

**Einzelfadenverklebung
in der Gemälderestaurierung:
Klebstoffe, Prüfsystematik und Ergebnisse**

Dissertation

zur Erlangung des Grades des
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

vorgelegt von

Hannah Flock, M.A.

Saarbrücken

2020

Tag des Kolloquiums: 07.05.2021

Dekan: Prof. Dr. Jörn Walter

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels

Prof. Dr. Elisabeth Jägers

Prof. Dr. Wulff Possart

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Johlitz

Vorsitz: Prof. Dr. Karen Lienkamp

Akadem. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Dominik Britz

Widmung

IN MEMORIAM

H. M.

1960 – 2017

Je schöner und voller die Erinnerung,
desto schwerer ist die Trennung.
Aber die Dankbarkeit verwandelt die Erinnerung
in eine stille Freude.

Dietrich Bonhoeffer

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Zuge meines kooperativen Promotionsvorhabens am Lehrstuhl für Technische Mechanik der Universität des Saarlandes sowie am Cologne Institute of Conservation Sciences der Technischen Hochschule Köln. Das Promotionsprojekt wurde von der Studienstiftung des Deutschen Volkes finanziell gefördert.

An dieser Stelle möchte ich mich für alle Unterstützung und Hilfestellung bedanken, die ich von zahlreichen Seiten im Rahmen des Projekts erfahren habe. Mehreren Personen gebührt dabei nachfolgend spezieller Dank.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels, der mir die Promotion am Lehrstuhl für Technische Mechanik unter seiner Leitung überhaupt erst ermöglichte. Für die Offenheit gegenüber der interdisziplinären Thematik und die vertrauensvolle Bereitschaft, mich als fachfremde Doktorandin anzunehmen, bin ich sehr dankbar. Auch bei Prof. Dr. Elisabeth Jägers möchte ich mich für viel mehr noch als die Vertretung der TH Köln und die Durchführung von FTIR-Analysen bedanken. Meinen beiden Betreuern danke ich neben vielem anderem vor allem für die langjährige Unterstützung und die gute Betreuung. Ich schätze mich sehr glücklich, bei Ihnen beiden studiert haben zu dürfen.

Auch bei Dipl.-Rest. Petra Demuth möchte ich mich für so vieles bedanken. Ob für das lehrreiche Studium, das immer offene Ohr, die anregenden Diskussionen, den fachlichen Input oder die Freude in der Zusammenarbeit. Vor allem aber dafür, meine Begeisterung für Klebstoffe und die Technik der Einzelfadenverklebung geweckt zu haben. Danke für deine Unterstützung, ich freue mich auf hoffentlich noch viele gemeinsame Projekte.

Zudem gilt mein Dank Prof. Dr. Wulff Possart vom Lehrstuhl für Adhäsion und Interphasen der UdS für den hilfreichen Austausch und die wertvollen Hinweise, interessante Vorlesungen sowie den Einsatz als Berichterstatter. Ebenso möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Johlitz vom Institut für Mechanik der Universität der Bundeswehr München für die Gutachtertätigkeit bedanken.

Prof. Dr. Karen Lienkamp danke ich für die Übernahme des Vorsitzes sowie Dr.-Ing. Dominik Britz für den akademischen Beisitz in der Kommission.

Des Weiteren möchte ich Prof. Dipl.-Rest. Hans Portsteffen für die Beratung und Unterstützung im Projekt herzlich danken.

Auch Prof. Dr. Ansgar Büschges danke ich als meinem Vertrauensdozent der Studienstiftung für die Begleitung und Anregung zur Fortbildung im Graduiertenprogramm.

Und natürlich bedanke ich mich bei „meinen Saarbrücker Ingenieuren“:

Bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Technische Mechanik, für die freundliche Aufnahme, den fachlichen Austausch und alle Hilfestellungen. Bei allen temporären Bürokollegen, die mir nicht nur einen Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt, sondern vor allem eine tolle Arbeitsatmosphäre geschaffen haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei Dr.-Ing. Henning Seibert als „Meister der Biax“ und auch bei Dr.-Ing. Tobias Scheffer bedanken. Dank euch kam der ganze Stein ins Rollen – danke für viele kluge Anregungen und die große Unterstützung, aber auch für eine Menge Spaß.

Ich danke auch Thomas Schwan als Werkstattleiter der Zentralwerkstatt Maschinenbau der TH Köln für die gute Zusammenarbeit und hervorragende Umsetzung der biaxialen Zugrahmen.

Ebenso sei Manfred Rosellen vom Bau- und Gebäudemanagement für den Einsatz bei der Schaffung geeigneter Infrastrukturen für die Versuche gedankt.

Bei den Firmen Celanese, Ecronova / Michelmann sowie Jäklechemie möchte ich mich für die freundliche Bereitstellung von Produktmustern und die schriftlichen Auskünfte bedanken.

Nicht zuletzt danke ich meinen Freunden und meiner Familie, vor allem für das Verständnis in arbeitsreichen Zeiten, aber auch für die liebevolle Umsorgung. Dabei danke ich meiner Schwester Teresa Flock M.Sc. zudem für die fachliche Beratung in Sachen Statistik und die Umsetzung der Varianzanalysen sowie Histogramme.

Besonderer Dank gilt meinem Vater Dipl.-Ing. Stephan Flock für die große Unterstützung in allen Lebensfragen sowie die Ermöglichung von Studium und Promotion. Danke Papa.

Meinem Partner Dipl.-Des. Eike Wohlgemuth danke ich vor allem für die bedingungslose Unterstützung während der Verschriftlichung. Danke für alles. Du bist großartig.

Und natürlich danke ich Müsli, für aufmunterndes Mauzen und beruhigendes Schnurren zur rechten Zeit.

Saarbrücken / Köln, Oktober 2020

Hannah Flock

Zusammenfassung

Die restauratorische Technik der Einzelfadenverklebung dient der Schließung von Rissen und Schnitten sowie dem Einsetzen von Gewebeintarsien in Fehlstellen textiler Bildträger von Gemälden. Zur praktischen Anwendung kommen unterschiedliche Klebstoffsysteme auf Basis natürlicher und synthetischer Bindemittel in verschiedenen Verklebungstechniken. Dabei mangelt es jedoch bislang an der systematischen Erforschung.

Ziel der Arbeit ist die Erarbeitung einer geeigneten Prüfsystematik. Zudem sollen auf Basis durchzuführender Versuche Empfehlungen für die restauratorische Praxis erfolgen.

Zur Evaluierung der mechanischen Eigenschaften von Verklebungen mit verschiedenen Klebstoffen und Techniken wurde eine erste Prüfsystematik umgesetzt. Die Versuche sind als konsekutiver Aufbau angelegt, in schrittweiser Erweiterung der Parameter zur Annäherung an den Anwendungsfall im Gemälde. Vorgestellt werden uni- und biaxiale Kurzzeit-Zugversuche an un- und beschichteten Geweben, mit und ohne eingefügten Verklebungen. Zudem wird ein neuer Versuchsaufbau für biaxiale Langzeitversuche präsentiert.

In der Auswertung erfolgt die Diskussion der Vor- und Nachteile der Versuchstypen sowie der gewählten Parameter. Auf dieser Grundlage wird eine zukünftige Prüfsystematik vorgeschlagen und ein Ausblick auf anknüpfende Betrachtungen gegeben.

Als Ergebnisse der Versuchsreihen werden geeignete Klebstoffsysteme für unterschiedliche Anwendungsfälle benannt sowie weiterführende Klebstoffoptionen aufgezeigt.

Abstract

The single thread bonding technique (thread-by-thread mending) in conservation is used to close tears and cuts in textile supports of paintings, as well as for the application of inserts into the fabric. In practice, different adhesive systems based on natural and synthetic binders in various bonding techniques are used. So far, however, there is a lack of systematic research.

The aim of this work is to develop a suitable testing system. In addition, recommendations for conservation practice are to be made on the basis of tests to be carried out.

A first test system was conducted to evaluate the mechanical properties of adhesive bonds and bonding techniques. The tests are designed as a consecutive set-up, with step-by-step expansion of the parameters to approximate the application in the painting. Presented are uni- and biaxial short-term tensile tests on uncoated and coated fabrics, with and without single thread bonds. In addition, a developed test set-up for biaxial long-term tests is presented.

In the evaluation, the advantages and disadvantages of the test types and the selected test parameters are discussed. Within this framework, a future test system is proposed and an outlook is given on subsequent studies. According to the results of the test series, suitable adhesive systems for different applications are named and further adhesive options are presented.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2. Forschungsstand	5
2.1 Evaluierung von Technik und Klebstoffen	5
2.2 Klebstoffe in der praktischen Anwendung	10
3. Grundlageneinführung	15
3.1 Gemälde auf textilem Bildträger	15
3.1.1 Gewebematerialien	16
3.1.2 Gewebebeschichtung	18
3.1.3 Gemäldespannung	19
3.2 Technik der Einzelfadenverklebung	22
3.2.1 Bruchbilder	22
3.2.2 Verklebung	23
3.3 Mechanische Grundlagen	29
3.3.1 Physikalische Messgrößen	29
3.3.2 Rheologische Grundelemente	35
3.3.3 Rheologische Materialmodelle	38
4. Anforderungsprofile	45
4.1 Klebstoffe zur Einzelfadenverklebung	45
4.2 Materialprüfung zur Evaluierung der Technik und Klebstoffe	50

5. Konzeption Prüfsystematik	57
5.1 Uniaxiale Kurzzeitversuche	60
5.1.1 Versuchsreproduktion und -validierung	61
5.1.2 Gewebe mit Beschichtung	62
5.1.3 Erweiterte Klebstoffauswahl	64
5.1.4 Sonderbetrachtungen	65
5.2 Biaxiale Kurzzeitversuche	67
5.2.1 Versuchsreproduktion und -validierung	70
5.2.2 Gewebe mit Beschichtung	70
5.2.3 Sonderbetrachtungen	71
5.3 Biaxiale Langzeitversuche	73
5.3.1 Dauerstandversuch	74
5.4 Prüfübersicht	79
 6. Konzeption Klebstoffauswahl	 85
6.1 Glutinleime und deren Modifikation	85
6.1.1 Zusatz Weizenstärkekleister nativ/modifiziert	87
6.1.2 Zusatz Cellulosefasern	88
6.1.3 Zusatz Methylcellulose	89
6.2 Celluloseether und deren Modifikation	90
6.2.1 Zusatz Cellulosefasern	91
6.2.2 Zusatz Mikrokristalline Cellulose	91
6.3 Synthetische Polymere und deren Modifikation	92
6.3.1 PVAc-Dispersionen	92
6.3.2 EVA-Dispersionen	93
6.3.3 Vernetzende Thermoplaste	95
6.3.4 Schmelzklebstoffe	96
6.3.5 Epoxidharze	97
6.4 Klebstoffübersicht	98
 7. Evaluierung der Prüfmethodik	 105
7.1 Streuung von Messwerten	105
7.2 Uniaxiale Kurzzeitversuche	111
7.2.1 Charakterisierung von Verklebungseigenschaften	111
7.2.2 Wahl der Prüfparameter	113
7.2.3 Möglichkeiten der Versuchserweiterung	115

7.3	Biaxiale Kurzzeitversuche	117
7.3.1	Charakterisierung von Verklebungseigenschaften	117
7.3.2	Wahl der Prüfparameter	120
7.3.3	Möglichkeiten der Versuchserweiterung	122
7.4	Biaxiale Langzeitversuche	124
7.4.1	Charakterisierung von Verklebungseigenschaften	124
7.4.2	Wahl der Prüfparameter	126
7.4.3	Möglichkeiten der Versuchserweiterung	129
8.	Klebstoffevaluierung	137
8.1	Festigkeit bei Kurzzeitbelastung	137
8.1.1	Uniaxiale Gewebestreifen / unbeschichtet	137
8.1.2	Biaxiale Gewebekreuzproben / unbeschichtet	155
8.1.3	Uniaxiale Gewebestreifen / beschichtet	166
8.2	Beständigkeit im Langzeitversuch	168
8.2.1	Biaxiale Gewebeflächen / beschichtet	168
9.	Bewertung und Ausblick	179
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	179
9.1.1	Prüfsystematik	181
9.1.2	Klebstoffauswahl	182
9.1.3	Bruchbilder und Verklebungstechniken	183
9.1.4	Praktischer Anwendungsfall	184
9.2	Anknüpfende Forschung	185
	Literaturverzeichnis	187
	Anhang	215

1

Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Die Technik der Einzelfadenverklebung stellt eine mittlerweile weit verbreitete Maßnahme in der Konservierung und Restaurierung von Gemälden auf textilem Bildträger dar.

Ihr Einsatz erfolgt zum Schließen von Durchtrennungen, wie Rissen und Schnitten in Geweben, kann sich jedoch sogar bis hin zum Einsetzen flächiger Gewebeintarsien in Fehlstellen erstrecken. Bei der Durchführung erfolgt das Verkleben der einzelnen Fadenden gemäß der ursprünglichen Gewebestruktur mittels Feininstrumenten unter dem Mikroskop. Aufgrund der stark lokal begrenzten Bearbeitung, bei geringstmöglichem Eingriff in die originale Gewebestruktur, wird auch von einer minimal invasiven Behandlung gesprochen.

Dabei stellt die Verklebung der einzelnen gerissenen Fäden eine große technische Herausforderung dar und ist je nach Objekt mit vergleichsweise hohem Aufwand verbunden. Oftmals sind aufwändige Verwebungsprozesse erforderlich, bei denen nach Möglichkeit auch die Rekonstruktion der individuellen Fadentorsion sowie des gewundenen Verlaufs der Fadensysteme im Gewebe umgesetzt wird.

Ziel ist es, auf diese spezielle Weise die mechanischen Eigenschaften und das optische Erscheinungsbild des ursprünglichen Gewebes wiederherstellen zu können, ohne eine Veränderung der inhärenten Eigenschaften des textilen Trägers herbeiführen zu müssen. Andere in diesem Kontext angewandte Behandlungsstrategien ermöglichen diese Prämisse in der Regel nicht. Darunter fallen beispielsweise das vollständige Auffüllen von Gewebeschäden mittels Klebstoff oder Kittmassen, die lokale Applikation von Flickern oder das vollflächige

Hinterkleben des originalen Gemäldes mit einem weiteren Gewebe, die sogenannte Doublierung. Speziell durch den Wunsch nach Vermeidung invasiver Doublierungsmaßnahmen hat sich die Technik der Einzelfadenverklebung daher zunehmend etabliert.

Aufgrund mangelnder Grundlagenforschung ist die Entscheidungsfindung hinsichtlich zu verwendender Klebstoffmaterialien und Techniken für die Einzelfadenverklebung jedoch bislang weitestgehend empiriegeleitet. Neben einer einerseits unzureichenden Datenlage bezüglich bereits angewandter Klebstoffe, wurden andererseits möglicherweise geeignete Klebstoffe bislang nicht erwogen. Im Falle erster Klebstoffevaluierungen für die Einzelfadenverklebung erlauben zumeist geringe Stichprobengrößen bei gleichzeitig vergleichsweise hohen Streuungen der Messergebnisse leider kaum verlässliche Aussagen.

Vielfach wird daher notgedrungen auch auf Klebstoffforschung zurückgegriffen, die nicht in direkter Verbindung zum konkreten Anwendungs- und Anforderungsfall steht.

Sich bereits mit dem Thema befasste Arbeiten weisen zumeist das Problem unzureichender Vergleichbarkeit untereinander sowie keine zufriedenstellenden Übertragbarkeiten auf die konkret zu behandelnden Gewebestrukturen innerhalb der Objekte auf.

Eine besondere Herausforderung bei Anwendung der Einzelfadenverklebungstechnik liegt etwa in der dauerhaften, biaxialen Aufspannung der behandelten Gemälde. Es bedarf somit der wohlbedachten Auswahl zuverlässiger Klebstoffsysteme, welche nicht nur zunächst zufriedenstellende Verklebungen ermöglichen, sondern sich speziell unter dauerhafter Aufspannung in ihren mechanischen Eigenschaften bewähren. Die grundsätzliche Frage nach einer geeigneten Prüfsystematik zur Charakterisierung und Bewertung der Verklebungen im Anwendungsfall konnte jedoch bislang noch nicht beantwortet werden.

Im Kontext der Evaluierung der mechanischen Klebstoffeigenschaften stellt sich dabei mitunter als zusätzliche Hürde dar, dass wesentliche Grundlagen der Materialwissenschaften bislang keinen festen Bestandteil des Hochschulstudiums der Konservierungs- und Restaurierungswissenschaften darstellen. Dies bedingt, dass mitunter auch ein fehlendes Verständnis der mechanischen Hintergründe wichtiger Grundlagenforschung im Wege steht.

Im Hinblick auf die dargestellte Motivation und auf Grundlage eigener vorausgegangener Versuchsreihen wurde daher das interdisziplinäre Forschungsvorhaben zur Bearbeitung der genannten Problemstellung initialisiert.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Als übergeordnete Ziele der vorliegenden Arbeit stellen sich prinzipiell dar:

- Die Entwicklung sowie Vorstellung einer geeigneten Prüfsystematik als mögliche Grundlage für zukünftige weiterführende Versuche.
- Aus den durchgeführten Versuchen zur Klebstoffcharakterisierung abzuleitende Empfehlungen für die Klebstoffwahl und Technik bei der Einzelfadenverklebung in der restauratorischen Praxis.

Zur Übersicht wird eingangs zunächst der aktuelle Forschungsstand bisheriger Materialprüfungen sowie bereits verwendeter Klebstoffe für die Einzelfadenverklebung umrissen. Zur Vorbereitung des experimentellen Hauptteils schließt sich eine Einführung in die wichtigsten Verständnisgrundlagen an. Neben Grundlagen zu Geweben als textile Bildträger und der Vorstellung der Einzelfadenverklebungstechnik soll dieser Teil insbesondere wesentliche Terminologie für die mechanische Materialprüfung bereitstellen und klären.

Es schließen sich die Zusammenfassung der allgemeinen Anforderungsprofile hinsichtlich der Klebstoffeigenschaften für die Einzelfadenverklebung sowie der Erfordernisse geeigneter experimenteller Prüfsystematiken zur Verklebungsscharakterisierung an.

Der experimentelle Hauptteil leitet sich durch die Vorstellung der konzipierten Versuchsreihen ein. Hier erfolgt eine prinzipielle Unterscheidung nach Kurz- und Langzeitversuchen sowie uni- und biaxialer Prüfung. Im nachfolgenden Kapitel zur Klebstoffauswahl werden die unterschiedlichen getesteten Klebstoffmaterialien vorgestellt und Hintergründe zu deren allgemeinen Materialeigenschaften präsentiert.

Die durchgeführten Experimente werden anschließend hinsichtlich der übergeordneten Eignung der Prüfmethodik sowie der Klebstoffe für die praktische Anwendung evaluiert. Die Versuche finden sich zudem in umfangreicher Protokollierung im Anhang der Arbeit wieder. Es wird daher mitunter darauf verzichtet, den einzelnen Versuchen umfangreiche Ausführungen beizufügen und stattdessen auf die zugehörigen Datensätze verwiesen.

Den Abschluss bilden Zusammenfassung sowie Ausblick auf anknüpfende Forschung.

Etwaige Anmerkungen zum Text finden sich zudem je am Ende der Kapitel.

Die Aufschlüsselung der zwecks verbesserter Nachvollziehbarkeit je Seite in den Fußnoten aufgeführten Quellenkürzel erfolgt in alphabetischer Reihenfolge im Literaturverzeichnis.

2

Forschungsstand

2.1 Evaluierung von Technik und Klebstoffen

Die Technik der Einzelfadenverklebung wurde seit den 1980er Jahren zunehmend zur Verklebung von Durchtrennungen in textilen Bildträgern erwogen. Erste Anwendungen sind mitunter als Fallbeispiele publiziert und im Zuge dessen als Technik diskutiert worden.¹ Teils erfolgte bereits ein erster Vergleich von Klebstoffmaterialien und Unterschieden in der Umsetzung der Verklebungstechnik, es fand jedoch noch keine systematische Überprüfung im Sinne einer mechanischen Charakterisierung in quantifizierbaren Größen o.ä. statt.² Mit zunehmender Popularität der Technik in den 1990er Jahren mehren sich die Beiträge, welche die Möglichkeiten und Grenzen für die praktische Konservierung und Restaurierung auszuloten versuchen.³

Empirische Versuche

Insbesondere HEIBER engagierte sich als Restaurator umfänglich, die Verklebungstechnik in ersten systematischen Kontext mit u.a. zusammenhängender Fügetechnologie oder Mechanik der Klebefugen zu stellen. Die ersten Durchführungen von Experimenten zur Quantifizierung von Verklebungsfestigkeiten fanden auf seine Initiative in Form von Zugprüfungen verklebter Einzelfäden statt. Im Rahmen dieser initialen Versuche wurden einzelne Fäden an einer Briefwaage befestigt und anschließend in möglichst konstanter Geschwindigkeit uniaxialer Zug bis zum Bruch der Verklebung ausgeübt. Entsprechend der vergleichs-

1 Siehe u.a. KUDRJAWZEW 1945; GABLER 1981; SACK 1989.

2 Vgl. CEDERHOLM 1985; OSMOND 1987.

3 Siehe u.a. SANDNER 1990; ESSERS 1995; GLANZER 1995.

weise ungenauen, analogen Waagenanzeige wurde aus dem angezeigten Gewicht auf die Verklebungsfestigkeit geschlossen. Aus dieser Durchführung folgte so noch keine Normierung des Prüfverfahrens, bspw. eine Standardisierung der Zuggeschwindigkeit oder Definition des Bruchversagens. Mitunter wurden auch verklebte Einzelfäden mit Gewichten versehen oder Gewebestreifen konstanter uniaxialer Zuglast ausgesetzt, um in ersten Kriechexperimenten deren Langzeitverhalten zu beobachten. Eine verlässliche Dokumentation oder Messung erfolgte bei diesen empirischen Behelfslösungen jedoch nicht.⁴

Uniaxiale Zugprüfungen an Einzelfäden und Gewebestreifen

Ab Ende der 1990er Jahre wurden diese ersten Experimente dann zunehmend in standardisiertere Prüfaufbauten an uniaxialen Zugprüfmaschinen überführt. Dabei lag der Fokus auf der uniaxialen Zugprüfung verklebter Einzelfäden in konstanten Zuggeschwindigkeiten. Die Verklebung und uniaxiale Prüfung von Gewebestreifen stellte zunächst eher die Ausnahme dar.

Während anfangs lediglich häufig vorzufindendes Leinen (Flachs) betrachtet wurde, erfolgte später mitunter die Erweiterung um andere Gewebematerialien als verklebte Substrate. Mangels Verfügbarkeit natürlich gealterten Materials fanden die Versuche in der Regel an neuwertigem, ungealtertem Probenmaterial sowie an Geweben ohne Beschichtung statt. Teils wurden erste Bezüge zu den Festigkeiten natürlich gealterten Referenzmaterials hergestellt, um sich der Frage nach einer Eignung der Verklebungsmittel für den Einsatz an degradierten Objekten zu nähern. Des Weiteren erfolgten auch erste Vergleiche von Unterschieden in der Art der Fügetechniken und im Zuge dessen zu berücksichtigender Kriterien der Klebstoffauswahl.⁵

Im Falle der uniaxialen Gewebestreifen fand die Probenherstellung und -prüfung oftmals in grober Anlehnung an zwei DIN-Normen statt, welche die Ermittlung der Zugeigenschaften von Geweben im einfachen Streifenzugversuch oder an im Mittelbereich verbreiteter Gewebestreifenproben zur Evaluierung von Nähten beschreiben.⁶

Dort genannte Einspannlängen und Probenbreiten erfuhren jedoch zur Begrenzung des logistischen Aufwands in der Regel Modifikation. Einheitliche Prüfkonzepte wurden nicht

4 Siehe u.a. HEIBER 1984; HEIBER 1996; HEIBER 2003; HEIBER et al. 2012.

5 Siehe u.a. BALTSCHKEIT 2011; BECKER 2002; DEMUTH et al. 2011; HOFFMANN 2003; HOFFMANN 2009; NÄGLER 2005; PLÖTZ 2003; REUBER 2010; VOGEL 2010.

6 Siehe DIN EN ISO 13934-1 und DIN EN ISO 13935-1.

verfolgt, sodass weder für Probekörpergeometrien oder Prüfparameter (wie Klima oder Prüfgeschwindigkeiten) eine echte Normierung oder Standardisierung verfolgt wurde.

Erweiterung erfuhren die genannten uniaxialen Kurzzeit-Versuche vornehmlich in exemplarischen Betrachtungen, wie der Prüfung von durch zyklischen Klimawechsel „beschleunigt gealterter“ Proben. Die Proben befanden sich im Zuge der Klimazyklen jedoch unter keiner konstanten Zugbelastung oder in keiner konstanten Fixierung (Aufspannung), sodass Kriech- oder Relaxationsprozessen, wie sie bei der Anwendung im Gemälde stattfinden, keine Rechnung getragen wurde (vgl. Kap. 3.1.3). Auch Prüfungen entsprechend vor-konditionierter Proben bei besonders trockenen bzw. feuchten Extremklimata fanden statt, um die Effekte auf die eingebrachte Verklebung zu beleuchten.

Im Rahmen weiterer Versuche wurde zudem dargelegt, dass die erzielten Verklebungsgüten mitunter stark von Erfahrung und Geschick der durchführenden Person abhängen.⁷

Trotz zunehmender Prüfungen stagnierte jedoch die Weiterentwicklung der Prüfverfahren sowie die Entwicklung geeigneter Prüfsystematiken regelrecht. Die Verklebungen unterschiedlicher Klebstoffe und Techniken wurden immer, entweder als verklebter Faden oder Gewebestreifen, uniaxial mit konstanten Verformungsgeschwindigkeiten Zuggeprüft. Zur Evaluierung wurden in der Regel die gemessenen Kräfte sowie technischen Gesamtdehnungen der Proben verglichen (vgl. Kap. 3.3.1).

Es wurde sich somit vornehmlich auf die maximalen Belastungsgrenzen der Verklebungen konzentriert, motiviert aus der Sorge um unzureichende Verklebungsfestigkeiten. Die Dehnungen der Klebefuge in Abgrenzung von den Gesamtproben oder das Langzeitverhalten im Gemälde fanden dabei kaum Berücksichtigung. Das Hauptaugenmerk lag vielmehr auf allgemeinen Klebstoffvergleichen, um daraus erste Handlungsempfehlungen für die praktische Konservierung und Restaurierung ableiten zu können.

So stellte es sich in ersten Versuchen auch als ungünstig für die Verklebungsevaluierung dar, im Falle der uniaxialen Gewebestreifen die Verklebungen in Umgebung intakter Fäden zu prüfen. Im gängigen Zugversuch ließen sich so die maximalen Belastungsgrenzen der Verklebungen sowie Dehnungen der Proben nicht eindeutig interpretieren und darstellen.⁸

⁷ Vgl. REUBER 2010, S. 70-85.

⁸ Vgl. REUBER 2010, S. 88-92.

Wohl aus diesem und vergleichbaren Gründen der Komplexität, sowie auch wesentlich bedingt durch den Anfertigungsaufwand von Verklebungen, wurde lange Zeit die Evaluierung der Einzelfadenverklebung inmitten von Gewebestrukturen nicht weiter erwogen und stattdessen insbesondere die Kurzzeit-Zugprüfung verklebter Einzelfäden bevorzugt.

Biaxiale Zugprüfungen und neue Prüfsystematiken

Die Übertragung der zu evaluierenden Technik in biaxial gespannte Gewebestrukturen fand zwar bereits 2003 erstmalig exemplarisch statt, wurde jedoch nicht weiter verfolgt.

Im Rahmen dieser ersten Versuche wurde ein biaxiales Zugprüfgerät verwendet, das von YOUNG und HIBBERD im Kontext konservatorisch-restauratorischer Fragestellungen entwickelt wurde. Die Messung wurde an Gewebekreuzproben durchgeführt, in deren Mitte Schnitte gesetzt und mittels Einzelfadenverklebung sowie Flickapplikation behandelt wurden. Im Einzelversuch erfolgte der Vergleich der Dehnungen bei zunehmender biaxialer Zugbelastung der Proben unterhalb der Versagensgrenze. Die Dehnungsmessung wurde dabei durch die parallele Oberflächenerfassung mittels elektronischer Specklemuster-Interferometrie (Electronic Speckle Pattern Interferometry / ESPI) vorgenommen. Die Nutzung der ESPI erlaubte dabei als optisches Verfahren erstmalig die berührungslose Messung von Wegänderungen an der Schadstelle durch Auswertung der veränderten Probenoberflächen, welche zum Vergleich der Dehnungsentwicklung und -verteilung herangezogen wurden.⁹

Erst 2013 fand die erneute Evaluierung von Einzelfadenverklebungen auch in biaxialen Versuchen durch die Verfasserin statt. Diese Versuchsreihen bilden eine wesentliche Basis für die vorliegende Arbeit. Im Rahmen dieser durchgeführten Kurzzeit-Zugversuche wurde erstmalig eine ineinander aufbauende Prüfsystematik zur Klebstoffevaluierung verfolgt.¹⁰

Die zu evaluierenden Klebstoffe wurden dabei zur Charakterisierung des Reinmaterials zunächst als freie Filme uniaxial zuggeprüft und dann in ihrer Verklebungsanwendung in Einzelfaden- und Gewebestrukturen aus Leinen bzw. Flachs übertragen.

Zwecks klarer Parameteridentifikation fanden alle genannten Versuche zunächst an unbeschichtetem Probenmaterial neuer Qualität statt. Verklebte Einzelfaden- und Gewebestreifenproben wurden entsprechend des üblichen Prüfaufbaus zur Evaluierung von Einzelfadenverklebungen uniaxial zuggeprüft, wobei im Zuge dieser Versuchsreihen eine konkrete Festlegung einheitlicher Prüfbedingungen und -parameter stattfand. Neben der erstmaligen

⁹ Vgl. YOUNG 1996 (a); YOUNG 1999; YOUNG, HIBBERD 1999; YOUNG 2003.

¹⁰ Vgl. FLOCK 2014; FLOCK 2015; FLOCK et al. 2020 (b).

Herstellung des Bezugs zwischen uniaxialen Einzelfaden- und Gewebeproben im Rahmen dieser Testreihen wurden zudem in direkter Anlehnung an die Geometrie der uniaxialen Gewebestreifen auch biaxiale Gewebekreuzproben mit Verklebungen angefertigt. Deren äquibiaxiale Prüfung fand analog unter gleichen Parametern statt, um den Effekt orthogonalen Zugs zur Verklebung prüfen zu können.

Bei allen beschriebenen Einzelversuchen fand jeweils die Prüfung ausschließlich intakter oder verklebter Fäden innerhalb der Proben statt. Im Unterschied zu allen anderen bis dahin durchgeführten uniaxialen Versuchen wurde die Dehnungsauswertung der biaxialen Versuche jedoch nicht über die technische Gleichmaßdehnung via Längenänderung vorgenommen (vgl. Kap. 3.3.1), sondern wie bereits 2003 auch hier ein optisches Verfahren genutzt, die digitale Bildkorrelation (Digital Image Correlation / DIC; vgl. Kap. 5.2).

Erweitert wurden die Versuchsreihen um eine finale Übertragung der Verklebung in flächige Gewebeproben. Die an diesen durchgeführten Berstdruckprüfungen dienten der weiterführenden Betrachtung von gleichzeitig verklebten, als auch intakten Fäden.

Anhand dieser ersten konsekutiven Versuchsreihen stellte sich dar, dass für eine geeignete langfristige Prüfsystematik zur Evaluierung der Einzelfadenverklebung ausschließlich die uni- und insbesondere biaxiale Prüfung von Gewebestrukturen erfolgen sollte.

Die zusätzliche Klebstofffilmprüfung erwies sich als nützlich zur Charakterisierung grundlegender Materialeigenschaften, erlaubte jedoch wenig konkrete Rückschlüsse für die Anwendung in der Einzelfadenverklebung, bei gleichzeitig hohem Vorbereitungsaufwand.

Die uniaxiale Einzelfadenprüfung sowie Berstdruckprüfung konnten als weniger geeignet für aufbauende Versuchsreihen benannt werden. Während sich in der Einzelfadenprüfung insbesondere hohe Streuungen und die Vernachlässigung der Gewebestruktur als nachteilig darstellten, ließ die Berstdruckprüfung keine zuverlässige Evaluierung der Verklebung zu und wies zudem einen zum aufgespannten Gemälde abweichenden Lasteintrag auf.

Auch diese vorgestellte Prüfsystematik auf Basis von Kurzzeitversuchen wurde so noch nicht dem konkreten Anwendungsfall der Einzelfadenverklebung in dauerhaft gespannten, beschichteten Gemäldestrukturen gerecht.

2.2 Klebstoffe in der praktischen Anwendung

Als Klebstoffe für die Einzelfadenverklebung kommen unterschiedliche natürliche und synthetische Bindemittel sowie vorformulierte Klebstoffe zum Einsatz. Ihre Verwendung sowie erste Prüfergebnisse sind bereits in mehreren Veröffentlichungen unter Nennung genauer Materialien, Produkte und Rezepte zusammengefasst worden.¹¹

Gleichsam lässt sich jedoch auch eine sehr individuelle Klebstoffverwendung festhalten, sodass in der empirischen Berufspraxis genutzte Varianten bislang nicht zwangsläufig Publikation erfahren haben. Da es sich um eine vergleichsweise kleine Berufsgruppe handelt, wird in der praktischen Konservierung und Restaurierung in der Regel auf bestehende Produkte oder einfache Rezepturen und Mischungen zurückgegriffen.

An dieser Stelle soll daher nur ein knapper Überblick zu den üblichen verwendeten Klebstoffsystemen als einführender Überblick erfolgen. Weitere Informationen zu einigen genannten Klebstoffmaterialien finden sich zudem in Kap. 6 zur Klebstoffauswahl.

Naturfasergewebe

Die ersten Einzelfadenverklebungen in Gemälden wurden häufig mit hochfesten Epoxiden umgesetzt, da große Bedenken hinsichtlich sonst nicht zu gewährleistender Verklebungsfestigkeiten bestanden.¹² Mit zunehmender Popularität der Technik wurden auch alternative synthetische Bindemittelsysteme in Erwägung gezogen, wobei diese Entwicklung eng in Zusammenhang mit der Etablierung der Heiznadel als Werkzeug in der Restaurierung stand (vgl. Kap. 3.2.2).¹³ In Folge dessen kamen zunehmend wässrige Dispersionen auf Basis thermoplastischer Polymere (u.a. Acrylate, Polyvinylacetate) sowie auch unterschiedliche Schmelzklebstoffe (u.a. Polyamide, Acrylate) zum Einsatz.¹⁴

Als Nachteile der genannten Klebstofftypen stellten sich jedoch zum einen Schwierigkeiten in der Wiederbearbeitbarkeit, als auch mangelnde Alterungsbeständigkeiten dar. Aus dieser Motivation entwickelte HEIBER die bis heute weit verbreitete „klassische“ Rezeptur für die Einzelfadenverklebung in cellulosischen Geweben: Die Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung.¹⁵

11 Vgl. REUBER 2010; DEMUTH et al. 2011; FLOCK 2014; GALE-SCHODTERER 2016; FLOCK et al. 2020 (b).

12 Siehe u.a. WEDDINGEN 1979; GABLER 1981.

13 Vgl. HEIBER 1984.

14 Siehe u.a. EIPPER 1997; ESSERS 1985; ROUX 1993.

15 Vgl. HEIBER 1996; HEIBER 2003.

Der wässrige Klebstoff auf Basis tierischen Glutinleims erfährt dabei die für die praktische Anwendung erforderliche Rheologie-Modifizierung durch den Zusatz hochviskosen Stärkekleisters. Während anfangs noch native Stärke dafür aufgekocht wurde, wird heute mit zunehmender Präferenz modifizierte, kaltlösliche Weizenstärke für die Herstellung des Kleisters verwendet.¹⁶ In Weiterentwicklung dieser Bindemittelauswahl hat sich für Verklebungen mit besonders hohen Belastungsansprüchen zudem die Mischung von Störleim mit Cellulosefasern etablieren können, in der die Fasern nicht nur der Verdickung, sondern insbesondere auch einer zusätzlichen Armierung dienen.¹⁷ [Anm. 1]

Mitunter findet auch die Mischung von Störleim und Methylcelluloseethern in der Berufspraxis Anwendung.¹⁸ Hier stellt sich jedoch u.a. die Temperaturempfindlichkeit der Celluloseether in der warm zu verarbeitenden Leimlösung (ca. 25-35 °C) durch damit verbundenen Viskositätsabfall als abträglich in der Verarbeitung dar. [Anm. 2]

Lange Zeit wurden reine Celluloseether nicht für die Technik der Einzelfadenverklebung in Erwägung gezogen. Übliche Methylcellulosen weisen in wässriger Lösung eine vergleichsweise hohe Viskosität bei geringem Feststoffgehalt auf; im Vergleich mit den anderen vorgestellten Klebstoffen erschien daher die Erzielung ausreichender Verklebungsfestigkeiten als unwahrscheinlich. Erst in jüngeren Untersuchungen konnte das Potential der Celluloseether als Klebstoff für die Einzelfadenverklebung dargestellt werden.¹⁹

Zudem finden Methylcellulosen vielfach Einsatz zur gezielten Modifizierung der Rheologie und verbesserten Wasserquellbarkeit genutzter Dispersionen auf Basis synthetischer Polymere (~ Kunstharzdispersionen).²⁰ Auch Dispersionen auf Basis copolymerer Ethylenvinylacetate (EVA) werden neben den bereits Erwähnten auf Basis von homopolymeren Polyvinylacetaten (PVAc) und Acrylpolymeren angewandt; letztere werden wohl auch motiviert durch den verbreiteten Einsatz in der Textilkonservierung noch immer in Erwägung gezogen [Anm. 3]. In der wiederholten Betrachtung unterschiedlicher Acrylharzdispersionen erwiesen sich diese jedoch hinsichtlich der Verklebungsfestigkeiten und -qualitäten als nicht zu bevorzugen. Dabei scheinen insbesondere die vergleichsweise niedrigen Glasübergangsbereiche für die Anwendung in der Einzelfadenverklebung abträglich (vgl. Kap. 4.1).²¹

16 Vgl. VOGEL 2010.

17 Vgl. FLOCK 2014; FLOCK et al. 2019.

18 Siehe u.a. REUBER 2010; GLANZER 1995.

19 Vgl. GAASCH 2019.

20 Vgl. BALTSCHKEIT 2011; FLOCK 2014.

21 Vgl. REUBER 2010; DEMUTH et al. 2011.

In der Regel wird die Verwendung von Klebstoffen auf Basis synthetischer Polymere in Form wässriger Dispersionen bevorzugt. Der meist hohe Feststoffgehalt (i.d.R. ca. 50 %) und die wässrige Komponente erweisen sich als vorteilhaft in der Verklebung. Die Verwendung von Polymeren (insbesondere Acrylaten) in organischen Lösungsmitteln stellt eher die Ausnahme dar. Speziell in Osteuropa ist jedoch mitunter die Lösung von Polyvinylbutyral zur Einzelfadenverklebung populär.²² [Anm. 4]

Allgemein werden natürliche Bindemittel und Füllstoffe für die Klebstoffrezepturen bevorzugt. So wird gemäß grundsätzlicher Leitlinien der Restaurierungsethik vermieden, fremdartige Materialien in das originale Objektgefüge einzubringen. Des Weiteren ist das Alterungs- und Langzeitverhalten dieser im Unterschied zu synthetischen Materialien bereits besser bekannt; insbesondere abruptere und mitunter drastische Eigenschaftsänderungen synthetischer Bindemittel im Zuge der Alterung stellen sich als kritisch dar.²³

Hydrophobierte Naturfaser- sowie Chemiefasergewebe

Im Falle von Hydrophobierungen an cellulosischen Bildträgern (u.a. durch Wachs-Harz-Tränkungen in Folge von Doublierungen) finden mitunter die selben Klebstoffe wie an Chemiefasergeweben auf Basis synthetischer Polymere Anwendung.

Jedoch stellt auch die Einzelfadenverklebung in modernen Geweben auf Basis synthetischer Fasern eine besondere Problemstellung dar, für die in der restauratorischen Praxis bislang weitaus weniger Klebstoffmaterialien in empirischer Erprobung oder erster Untersuchung gefunden werden konnten. Vornehmlich finden Epoxide oder Schmelzklebstoffe auf Polyamid-Basis Anwendung.²⁴ Auch das in der Konservierung und Restaurierung weit verbreitete Produkt Beva 371, ein Schmelzklebstoffgemisch auf Basis von Ethylvinylacetat [Anm. 5], wird mitunter verwendet. Hier erfolgt teils der Zusatz von Cellulosefasern zur Verfestigung des weichen Klebstoffs sowie verbesserter Armierung. Während Dispersionen auf Polyurethan-Basis für die Einzelfadenverklebung in Naturfasergeweben kaum eine Rolle spielen, werden sie an Chemiefasergeweben als zusätzliche Alternative zu den zuvor genannten Kunstharzdispersionen häufiger in Erwägung gezogen.²⁵

22 Vgl. SANDNER 1990; ACKROYD et al. 2002.

23 Vgl. HORIE 2010, S. 37-44.

24 Vgl. BODECHTEL 2000; PLÖTZ 2003; NÄGLER 2005.

25 Vgl. MASSA et al. 1991; PLÖTZ 2002; NÄGLER 2005.

Anmerkungen Kap. 2

[1] Einen von der Einzelfadenverklebung als solche abzugrenzenden Sonderfall stellt die Verwendung sogenannter „Faserbreie“ (~ Faser-Bindemittel-Gemische) für die Schließung von Defekten im textilen Bildträger im Sinne einer Kittung dar. Der Einsatz wird vornehmlich im Kontext kleiner, stark lokal begrenzter Schäden sowie im Falle einer nicht umsetzbaren Einzelfadenverklebung diskutiert (bspw. aufgrund sehr dichter Webstruktur oder stark brüchigen Gewebes). Siehe u.a. ROUBA, TYMINSKA 2004; BEINER-BÜTH, BECKMANN 2007; HARTWICH, PLÖTZ 2016; MERLE 2016; DUDEW et al. 2019.

[2] Zu erwähnen sei auch die mitunter in Einzelfällen durchgeführte Modifikation von Störleim durch Zusatz von JunFunori (hochgereinigtes, standardisiertes, wasserlösliches Polysaccharid auf Rotalgenbasis), welche besonders matt auftrocknende Verklebungen erlaubt (vgl. HOFMANN 2003, S. 47). Speziell im Hinblick auf die besondere Problemstellung beidseitig bemalter Gemälde (siehe u.a. CASTRO-GREUNE 1994; SCHWÄGERL 2015) oder im Kontext moderner und zeitgenössischer Kunst mit dem textilen Bildträger als Bestandteil des visuellen Erscheinungsbilds des Gemäldes kann u.a. diese Modifikation eine hilfreiche Option darstellen.

[3] Zu Klebstoffen in der Textilkonservierung und -restauration siehe u.a. HILLYER et al. 2010; KEYSERLINGK 1990; LANZ 1996; TÍMÁR-BALÁZSY, EASTOP 1998.

Das Anforderungsprofil an Klebstoffe in der Textilkonservierung gestaltet sich aufgrund oftmals ungespannter Objekte (fließende, fallende Stoffe o.ä.) in der Regel abweichend. Bevorzugt wird bei vergleichbaren Problemstellungen zudem eine nähtechnische Sicherung vorgenommen und eine Verklebung eher in Sonderfällen erwogen (siehe u.a. BECKER 2002; JEDRZEJEWSKA 1981; WORCH 2002).

Das Vernähen von Schadstellen im textilen Bildträger von Gemälden ist aufgrund der aufliegenden Beschichtung oftmals nicht möglich, wurde jedoch bereits als Technik diskutiert und mitunter (in Kombination mit der Technik der Einzelfadenverklebung) angewandt, siehe u.a. BELTINGER 1992; HEDINGER 1997; HEDINGER 1999; SCHWÄGERL 2015.

[4] Insbesondere bei Anwendung der genannten Klebstoffe in Baumwoll- statt Leinengewebe wird mitunter auch eine vorbereitende Imprägnierung der Fadenenden vor der Verklebung durchgeführt, um die sich als ungeordneter und krauser darstellenden Baumwollhaare zu bündeln (vgl. WALTERS 2006). Auch an Leinengewebe erfolgt teils eine vorbereitende Imprägnierung stark aufgefaserter Bereiche zur vorbereitenden Faserbündelung im Zuge der Verklebung; zum Einsatz kommen in der Regel stark verdünnte Störleim- oder Methylcelluloselösungen ($\leq 1\%$ in H_2O ; GT).

Zur Rissverklebung in Baumwollbildträgern, siehe auch FRAUENDORFER 2006.

[5] Bis 2010 war die Zusammensetzung von Beva 371 bekannt und wie folgt: 45 % Ethylen-Vinylacetat Copolymer mit 32 % Vinylacetat, 27 % Cyclohexanonharz, 15 % Ethylenvinylacetat-Copolymer mit 15 % Vinylacetat, 9 % ölfreies Paraffin (Schmelzpunkt 65 °C), 4 % Phtalsäureester mit Hydroabietinalkohol (vgl. BERGER 1976, S. 179; REUBER 2010, S. 42). 2010 wurde die Formulierung geändert und 2018 nochmals variiert. Die neue Zusammensetzung und das damit verbunden abweichende Eigenschaftsprofil sind Gegenstand aktueller Forschungen, siehe u.a. CIMINO et al. 2020; PLOEGER et al. 2015; MC GLINCHEY et al. 2011.

Einen weiteren Sonderfall in der Klebstoffwahl stellen Kunstharzdispersionen auf Basis von Beva 371 dar.

3

Grundlageneinführung

Das nachfolgende Kapitel dient der einführenden Darstellung des Aufbaus von Gemälden auf textilem Bildträger, der Technik der Einzelfadenverklebung sowie der mechanischen Grundlagen zum Materialverständnis. Es soll daher lediglich eine verknäppte Zusammenfassung der Themenkomplexe erfolgen, weshalb eingangs explizit auf die genannte weiterführende Literatur verwiesen wird.

3.1 Gemälde auf textilem Bildträger

Als textile Bildträger können allgemein sämtliche textile Flächengebilde bezeichnet werden, die sich an Kunstwerken als tragende Strukturen von Gemälden finden.

Die meisten Objekte mit textilem Bildträger verfügen dabei über einen mehrschichtigen Bildaufbau auf einem Gewebe. Diese Bildwerke werden mitunter auch synonym als „klassische Leinwandgemälde“ bezeichnet, ungeachtet des genauen technologischen Aufbaus und Materials.

Speziell in der modernen und zeitgenössischen Kunst findet sich zudem eine große Bandbreite unterschiedlichster Kunstwerke, bei denen der textile Bildträger teils auch gezielt als Teil des visuellen Erscheinungsbilds der Objekte eingesetzt wird oder eine Erweiterung des Gemäldebegriffs um neuartig entwickelte künstlerische Konzepte stattfindet. Exemplarisch genannt seien hier Künstler wie Lucio Fontana, Sigmar Polke oder Gotthard Graubner.

3.1.1 Gewebematerialien

Gewebe sind textile Flächengebilde, welche durch das rechtwinklige Verkreuzen unterschiedlicher Fadengruppen gebildet werden. Hierbei werden grundsätzlich die Fadensysteme gemäß ihrer Lage in Webstuhl bzw. Webmaschine unterschieden; das längs verlaufende System der vorgespannten Fäden wird als Kette bezeichnet, das quer (orthogonal) dazu im Webprozess eingeschobene Fadensystem als Schuss. Der während des Webvorgangs am äußeren Kettrand gewendete Schuss bildet dort die sogenannte Webkante.

Die Bindungsart beschreibt die Art und Weise der genauen Verkreuzung der Fadensysteme. Zumeist liegt an textilen Bildträgern eine einfache Überkreuzung in Leinwand- bzw. Leinenbindung vor. Mitunter finden sich jedoch auch komplexere Bindungsarten, wie Panama-, Köper- oder Atlasbindung, welche strukturbedingt abweichende mechanische Eigenschaften aufweisen. Bedingt durch den Webprozess bilden sich in der Regel fadensystemabhängig unterschiedliche, anisotrope Gewebeeigenschaften aus.

In klassischer Leinwandbindung stellt die Kette zumeist das tragende, der Schuss hingegen das füllende Element dar. Oftmals zeigt das Kettssystem daher auch eine etwas stärkere Färendrehung. Im Webprozess werden die beiden Fadensysteme regelrecht in- und umeinander gedrückt, sodass die Fäden einen wellenförmigen Verlauf einnehmen. Insbesondere die Kette wird dabei häufig so um den Schuss gelegt, dass diese im Vergleich der beiden Fadensysteme eine erhöhte Welligkeit aufweist. Auf gleicher Gewebestrecke besitzt das Kettssystem somit oftmals eine höhere Gesamtlänge als das Schussfadensystem.¹

Natürliche Fasern

Textile Bildträgergewebe können aus unterschiedlichen natürlichen und synthetischen Fasern hergestellt werden. Am häufigsten findet sich die Verwendung von Flachs als natürliche Bastfaser. Das daraus hergestellte Leinengewebe begründet den oftmals allgemein verwendeten Begriff des „Leinwandgemäldes“ für Gemälde auf textilem Bildträger.

Den Hauptbestandteil von Flachs stellt Cellulose als Polysaccharid dar. Die cellulosische Flachsfaser weist dabei eine vergleichsweise komplexe makromolekulare Struktur aus gebündelten Fibrillen auf, welche wiederum aus Mikrofibrillen aufgebaut sind. Die resultierende Struktur besitzt sowohl amorphe, als auch kristalline Faserbereiche. Dieser Aufbau begründet u.a. auch die hygroskopischen Eigenschaften der Flachsfaser. Sie besitzt die Fä-

¹ Siehe u.a. ZENKER 1998, S. 338, 342, 346; SCHEEL 1992, S. 73; BRAKEBUSCH 1996. Vgl. FLOCK 2014, S. 22f.

higkeit, über die zahlreichen Hohlräume im Inneren in den amorphen Faserbereichen Wasserdampfmoleküle aufzunehmen.

Erst nach aufwändiger, mehrschrittiger Gewinnung der Bastfaserbündel aus der Flachspflanze können die aufbereiteten Fasern zu textilen Liniengebilden, dem Faden oder Garn, versponnen werden. Im Spinnprozess werden die Fasern verstreckt und verdreht, sodass sie eine dauerhafte Torsion aufweisen und daher eine größere Gesamtfestigkeit erreichen (vgl. Abb. 3.01).²

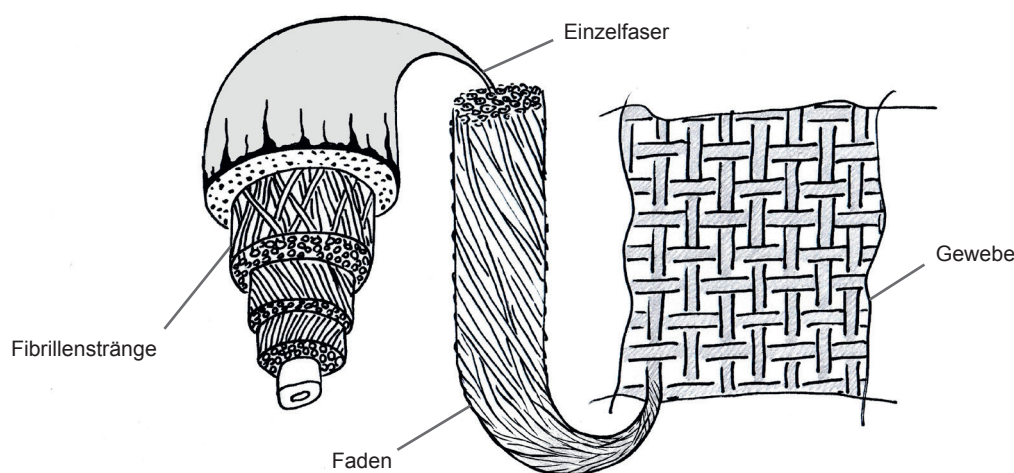


Abb. 3.01: Zusammenhang von Faseraufbau aus komplexen Fibrillensträngen sowie aus der Faser folgendem Faden- und Gewebeaufbau (angelehnt an VITI, HAUDEK 1981, S. 73).

Neben Flachs finden sich vor allem Baumwolle, Hanf oder Jute als weitere natürliche Gewebematerialien auf Cellulosebasis. Insbesondere Baumwolle stellt einen häufig in der modernen und zeitgenössischen Malerei genutzten Bildträger dar. Aufgrund der abweichenden Faservoraussetzungen besitzen diese Bildträgermaterialien sowohl dem Leinen ähnliche, als auch etwas abweichende Eigenschaften.³

Die Verwendung von Proteinfasern wie Seide als Bildträgergewebe ist hingegen eine seltene Besonderheit und weist ein stark abweichendes Eigenschaftsprofil auf.⁴

2 Siehe u.a. TÍMÁR-BALÁZSY 1999, S. 661 ff.; SCHLIEFER 1975, S. 247-252; VITI, HAUDEK 1981, S. 86 f.; HEERMANN 1931, S. 457 f.; BOBETH 1993; GRUBER et al. 1975; SCHLIEFER 1975. Vgl. FLOCK 2014, S. 22.

3 Siehe u.a. YOUNG 1996 (a); WESSEL 2000; GRABMANN 2004; KNECHT 2009; VITI, HAUDEK 1981; WEHLTE 2005; HACKNEY 2020.

4 Vgl. DANTER 2003.

Synthetische Fasern

Synthetische Gewebe werden mitunter in der modernen und zeitgenössischen Kunst verwendet. Als Bildträgermaterial finden sich vornehmlich Polyester- und Polyamidgewebe, seltener auch Polyacryl(nitril) oder Polypropylen. Aufgrund ihres chemischen Aufbaus sowie der Herstellungsweise besitzen diese synthetische Gewebematerialien deutlich von den cellulosischen Geweben abweichende Materialeigenschaften. Im Kontext der Einzelfadenverklebung stellen sich insbesondere das allgemein als eher hydrophob zu bezeichnende hygri-sche Verhalten sowie unpolare Oberflächenvoraussetzungen als Herausforderungen dar.⁵

3.1.2 Gewebebeschichtung

Der üblicherweise vorliegende mehrlagige Schichtaufbau auf dem textilen Bildträger wird auch zusammenfassend als Bild- oder Malschicht bezeichnet. Der genaue technologische Aufbau zeigt sich als je nach Objekt divers, wobei sich tradierte Techniken und Materialien als typisch für bestimmte Entstehungszeiträume, Regionen, Künstler oder Werkstätten darstellen.

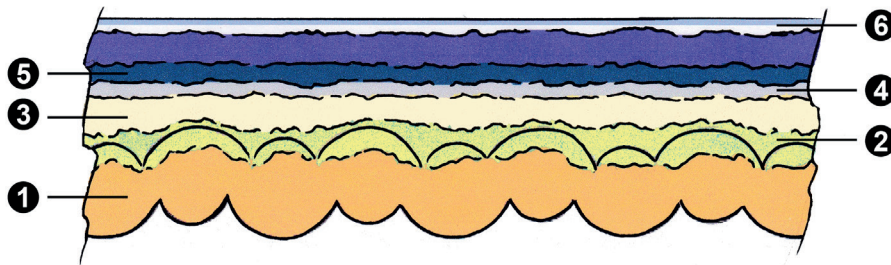


Abb. 3.02: Typische Schichtenabfolge eines Gemäldes auf textilem Träger im Querschnitt.

Wie in Abb. 3.02 schematisch dargestellt, findet sich auf dem Gewebe (**Schicht 1**) oftmals eine absperrende Isolierung bzw. Vorleimung (**Schicht 2**) sowie darauf die Grundierung (**Schicht 3**) zur Glättung der Gewebestruktur und Vorbereitung des Malgrunds. Erst auf dieser erfolgt, in der Regel nach erneuter Isolierung (**Schicht 4**), der gestalterische Farbauftrag im klassischen Leinwandgemäldeaufbau (**Schichten 5**). Oftmals bildet ein transparenter Schutzüberzug, der Firnis (**Schicht 6**), den Abschluss. Die genannten Schichten weisen teils sehr unterschiedliche Materialzusammensetzungen und Strukturen auf, woraus sich auch eine große Vielfalt an mechanischen Eigenschaften ableitet.

⁵ Siehe u.a. KARAMPATAKI 2002; PLÖTZ 2002; NÄGLER 2005; VITI, HAUDEK 1981; VON FALKAI 1981; BOBTH 1993.

Bis ins 19. Jh. finden sich vor allem natürliche Bindemittel und Füllstoffe, wie tierische Proteine, pflanzliche Öle und Harze, Kreide und Gips, oder Pigmente auf Basis von Erden und Mineralen. Seit Beginn der Industrialisierung erfuhr die Materialpalette eine umfangreiche Erweiterung um verschiedene synthetische Neuentwicklungen, sodass sich heutige Restauratoren [Anm. 1] mit einer enormen Bandbreite unterschiedlicher Materialkomposite konfrontiert sehen.⁶

3.1.3 Gemäldespannung

Gemälde auf textilem Bildträger befinden sich in der Regel in biaxialer Aufspannung auf (zumeist rechteckigen) Rahmensystemen. Es liegt somit eine andauernde Spannung zwischen konstanten Abständen (\sim Dehngrenzen) in beiden Bildachsen vor. Eine allgemeine, normierte Gemäldespannung lässt sich dabei jedoch kaum formulieren; in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien, ihrer individuellen Struktur und Eigenschaften, sowie der nicht standardisierten Aufspannung durch Künstler oder Restauratoren formen sich ganz unterschiedliche Spannungszustände aus. Restauratoren befassen sich in ihrer Berufspraxis daher mit sowohl vergleichsweise niedrigen als auch hohen Spannungswerten an unterschiedlichsten Objekten.

Quantifizierungsproblematik

Der Frage nach einer Quantifizierung der grundsätzlichen Gemäldespannung wurde bereits an verschiedenen Stellen nachgegangen; dabei stellt sich jedoch vor allem die Durchführung einer Spannungsmessung am realen Objekt als schwierig dar. Verschiedene uni- und biaxiale Untersuchungen präsentieren stark variierende Werte von zumeist 60-950 N/m für unterschiedliche un- und beschichtete Gewebe sowie „Testgemälde“. Hierbei handelt es sich lediglich um eine breitenbezogene Ersatzspannung (vgl. 3.3.1). Oftmals wird gefolgert, dass Werte von 100-600 N/m am häufigsten für Objekte anzunehmen sind. Im Zuge erneuter Spannmaßnahmen sowie insbesondere im Falle von klimatischem Wechsel (Temperatur, relative Feuchte) sind mitunter abweichende, fluktuierende und deutlich erhöhte Spannungswerte (bedingt durch das hygrische Verhalten) nachweisbar.⁷

6 Siehe u.a. EIBNER 1982; KOLLER 1988; SCHRAMM, HERING 1995; NICOLAUS 1998; WÜLFERT 1999; BRACHERT 2001; WEHLTE 2005.

7 Siehe u.a. BERGER 1981; BERGER, RUSSEL 1984; BERGER, RUSSEL 1988; HEDLEY 1988; HEDLEY 1993; BERGER, RUSSEL 2000 (b); YOUNG, HIBBERD 1999; MECKLENBURG, TUMOSA 1999 (a).

Spannungsverteilung

Hinzu kommt die Kenntnis über eine inhomogene Spannungsverteilung innerhalb der aufgespannten Bildebene. Bedingt durch die rechteckige Rahmengeometrie finden sich Bereiche erhöhter Spannung zumeist in den Ecken und Randregionen, während die Spannung zur Mitte hin abfällt. Eine zentrale Rolle spielen dabei auch das Format und das damit verbundene Eigengewicht des Gemäldes. So lassen sich insbesondere an Großformaten stark erhöhte Spannungen im oberen Bildbereich feststellen, da sich bedingt durch die eigene Masse eine konstante Gewichtskraft in Form von Zug auswirkt. Gemäß des Schnittprinzips nimmt die Masse und somit wirkende Zugkraft hier nach unten hin ab.⁸

Es sei zudem darauf hinzuweisen, dass (bedingt durch die bereits erwähnten anisotropen Eigenschaften) das Kettssystem mitunter eine höhere Dehnung bei Erzielung vergleichbar gespannter Ausrichtung der zwei Fadensysteme erfahren haben muss. Eine vergleichbare Spannung von Kett- und Schusssystem liegt jedoch häufig nicht vor (vgl. Kap. 3.2.1).

Im Falle einer Unterbrechung des textilen Bildträgers durch Risse, Schnitte oder Fehlstellen erfolgt im Schadstellenbereich selbst ein Spannungsabbau, während in den unmittelbar angrenzenden Randbereichen erhöhte Spannungen auftreten. Das nebenliegende, intakte Material stellt sich als überproportional belastet dar, da der Verlauf der Kraftvektoren lokal unterbrochen wurde (vgl. Kap. 3.3.1) und nun bildlich gesprochen um die Schadstelle herum geleitet wird (Abb. 3.03). Dies kann zu einem regelrechten Domino-Effekt im Sinne einer Rissfortpflanzung führen.⁹

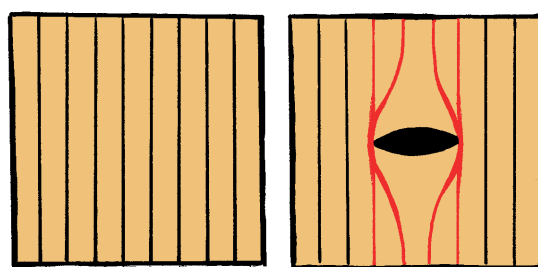


Abb. 3.03: Schematische Darstellung durchlaufender sowie abgelenkter vertikaler Kraftverläufe durch schadstellenbedingte Unterbrechung der Gewebeebene (angelehnt an HEIBER 2003, S. 37; vgl. BERGER, RUSSEL 1993). In den Grenzbereichen zum Riss kommt es zu erhöhter Belastung.

⁸ Vgl. LÄUCHLI 2004; HEIBER 1996, S. 135; TROSBACH 2002.

⁹ Siehe u.a. HEDLEY 1975; BERGER, RUSSEL 1993; YOUNG, HIBBERD 2000; YOUNG 2003, HEIBER 2003; SCHÄFER 2010.

Spannungsabbau

Die Spannung eines Gemäldes ist jedoch keinesfalls als allgemein konstant zu betrachten. Neben den bereits erwähnten Spannungswechseln im Zuge variierender Klimavoraussetzungen u.ä. unterliegt das Material einer Relaxation und ist dazu bestrebt, innere Spannungen abzubauen. Dies äußert sich in dem häufig zu beobachtenden, langfristigen Erschlaffen gespannter Gemälde. Daher wird häufig ein maximal haltbarer Spannungszustand im Sinne eines Gleichgewichtszustands angenommen. Demnach würde jedes Gemälde bei überhöhter Belastung zwangsläufig bis zu einem sogenannten MST-Wert (maximum sustainable tension) relaxieren; üblicherweise werden in Abhängigkeit von den individuellen Voraussetzungen MST-Werte von 60-250 N/m angenommen.¹⁰

Insbesondere an Großformaten können sich zudem konkrete Dehnungszunahmen u.a. in Ausbeulungen des unteren Bildbereiches darstellen; in diesen Fällen liegt (gleichzeitig) Retardation (~ Kriechen) vor. Relaxation und Kriechen sind an Gemälden mitunter nicht scharf voneinander abgrenzbar. [Anm. 2]

Zwar stellt sich speziell im Zuge der Schließung von Schadstellen im Gewebe die Frage nach der herrschenden Bildspannung zwecks Definition der Belastungsanforderungen an einzubringende Einzelfadenverklebungen, ein allgemeingültiger Richtwert ist aus den dargestellten Gründen jedoch nicht nennbar. Dies führt dazu, dass es zumeist einer erfahrungsbasierten und subjektiven Einschätzung am realen Objekt bedarf. Nicht unüblich, obwohl bisweilen als trivial und unzureichend erscheinend, ist daher eine empirische Spannungsabwägung durch vorsichtige Tastkontrolle, in der Regel mit der flachen Hand an der textilen Gemälderückseite. Zur Einschätzung der Anforderungen an die Einzelfadenverklebung dienen des Weiteren u.a. Form und Format des Schadbereiches, Lage dessen im gespannten Bildbereich oder äußere Bedingungen in der Präsentation (insbesondere T., r.F.).

¹⁰ Siehe u.a. BERGER, RUSSEL 1988 (S. 189); BERGER, RUSSEL 1990 (S. 108); LIPINSKI 2010 (S. 15, 64, 88).

3.2 Technik der Einzelfadenverklebung

Risse in textilen Bildträgern entstehen allgemein durch übermäßigen uni- oder biaxialen Zug in der Gewebeebene sowie in Folge triaxialer Durchstoßungen senkrecht zur Aufspannung (\sim Berstungen).¹¹ Eher selten tritt abruptes Materialversagen des aufgespannten Gemäldes ohne äußere Einflüsse aufgrund von alterungsbedingter Versprödungszunahme o.ä. auf. Häufiger stellen sich für das Material überhöhte Zugspannungen durch feuchtephysikalisch bedingte Quellung (\sim Wasserschäden, das sogenannte „Einspringen“) oder im Zuge der restauratorischen Bearbeitung ein (u.a. Wiederauf-/Nachspannung). Ein bedauerlicher Klassiker sind als Folge fehlerhaften Handlings oder Transports in das Gemälde hinein fallende oder stoßende Gegenstände, die das Gewebe und seine aufliegenden Schichten punktieren oder bersten. Ebenfalls bittere Realität stellen beabsichtigte Attentate dar, wobei Gemälde mitunter großflächig durchschlitzt werden und Schnitte als abzugrenzendes Schadensbild auftreten.¹² In Folge der unterschiedlichen Schadensmechanismen und Objektvoraussetzungen stellen sich somit unterschiedliche Bruchmuster des Gewebes und seiner aufliegenden Schichten ein.¹³

3.2.1 Bruchbilder

Durch in der Bildebene gerichteten Zug verursachte Risse weisen zumeist ein vergleichsweise planes Bruchbild auf und gehen oftmals mit Klaffungen der Rissränder einher. Für die erfolgreiche Verklebungsdurchführung ist hier zunächst das Zusammenführen der Rissränder erforderlich. Im Gegensatz dazu treten im Falle von Durchstoßungen vielfach stark deformierte (verwölbte) Schadstellen auf, welche eine plastische Überdehnung erfahren haben. Letztere bieten in der restauratorischen Bearbeitung oftmals den Vorzug, dass sich bereits aneinander stoßende oder überlappende Rissränder vorfinden.

Im Falle gerader Schnitte zeigen sich in Gemälden mit vergleichsweise starrer Beschichtung die Fadenenden mitunter in fast idealer Stoß-auf-Stoß-Position. Oftmals ist der Schnitt als solcher zunächst kaum sichtbar, jedoch sind auch hier Klaffungen möglich. Speziell an Schnitten zeigen sich häufig noch vollständig in die Bildschicht eingefasste Geweberänder, welche durch die Eigenspannung¹⁴ der Beschichtung verwölbt aufstehen.

¹¹ Vgl. HEIBER 1996, S. 121.

¹² Vgl. BRACHT et al. 2003; GLANZER et al. 2006.

¹³ Siehe u.a. HEIBER 2003, S. 36; BUCHER 2000; S. 38 f.; BECKER 2002, S. 12, 26.

¹⁴ Siehe u.a. ROOS et al. 2017, S. 94 ff.

Gewebevoraussetzungen

Das Bruchbild der Fadenenden hängt zudem unmittelbar mit den Gewebevoraussetzungen zusammen. So stellen sich Risse und Berstungen in degradierten, versprödeten Bildträgern häufig mit eher geraden Bruchkanten dar, an denen lediglich Stoß-auf-Stoß-Situationen erzielbar sind. Weniger stark gealterte Gewebe mit höherer Duktilität neigen eher zur Ausformung von verlängerten, ausgefaserten Fadenenden, sodass sich Überlappungen erzielen lassen.¹⁵ Des Weiteren zeigen leinengebundene Gewebe am häufigsten kettfadenparallele Risse im Schuss. Begründet ist dies in den erwähnten anisotropen Gewebeeigenschaften; das verwellter vorliegende Kettfadensystem ist dehnbarer, sodass sich das kürzere Schuss-system schneller spannt und seine maximale Belastungsgrenze erreicht.¹⁶

Gelegentlich gehen Schäden im textilen Bildträger zudem mit Gewebematerialverlusten einher. Insbesondere in Folge über längere Zeiträume unbehandelter Schadstellen neigen diese auch zur Vergrößerung, bspw. durch abbrechende Fadenenden. Hinzu kommen ohne Behandlung im aufgespannten Zustand zunehmende Klaffungen. Liegen Fehlstellen im Gewebe vor oder lassen sich die Rissränder nicht zurück in Verklebungsposition führen, wird das Einsetzen von Gewebeintarsien erforderlich.

3.2.2 Verklebung

Zur Verklebung müssen die Geweberänder vorbereitend in der flachen Bildebene entsprechend der späteren Verklebungstechnik ausgerichtet werden. Dabei ist sicherzustellen, dass sich präzise die jeweils zertrennten Fadenhälften treffen. Die Verklebung erfolgt im Idealfall im aufgespannten Zustand des Gemäldes. Das (lokale) Abspannen ist zu vermeiden und als Ausnahme zu betrachten, da Bildspannung sowie (originale) Aufspannung erhalten werden sollten und sich das Verkleben „unter Spannung“ als vorteilhaft darstellt.

Für das Zusammenführen klaffender Ränder in aufgespannten Gemälden existieren unterschiedliche Möglichkeiten und Zugsysteme, wie der sogenannte „Trecker“.¹⁷

Im Falle erwähnter Überdehnungen genügt in der Regel die vorbereitende Ausrichtung des Schadbereiches in der Bildebene zur Verklebung. Die größere Herausforderung besteht hier häufig in erforderlichen Verwebungen während des Verklebungsprozesses sowie in der Behandlung des umliegend überdehnten, deformierten Bereichs. [Anm. 3]

15 Vgl. YOUNG 2003, S. 55; HEIBER 1996, S. 121. Siehe auch ROOS et al. 2017, S. 119-128..

16 Vgl. ZENKER 1998, S. 348; FLOCK 2014, S. 23.

17 Vgl. DEMUTH 2020; DEMUTH, HEIBER 2000; BUCHER 2000; BUCHER, HAUPT 2000; WELLMER, WELLMER 2006; KAPUSCIAK 2007.

Verklebungstechniken

Ausgehend von den beschriebenen Bruchbildern ergeben sich zunächst grundsätzlich zwei zu unterscheidende Fügesituationen: Stoß-auf-Stoß oder Überlappung.¹⁸ Für die praktische Umsetzung der Einzelfadenverklebung ergeben sich daraus insgesamt vier allgemein angewandte Verklebungstechniken (Abb. 3.04):

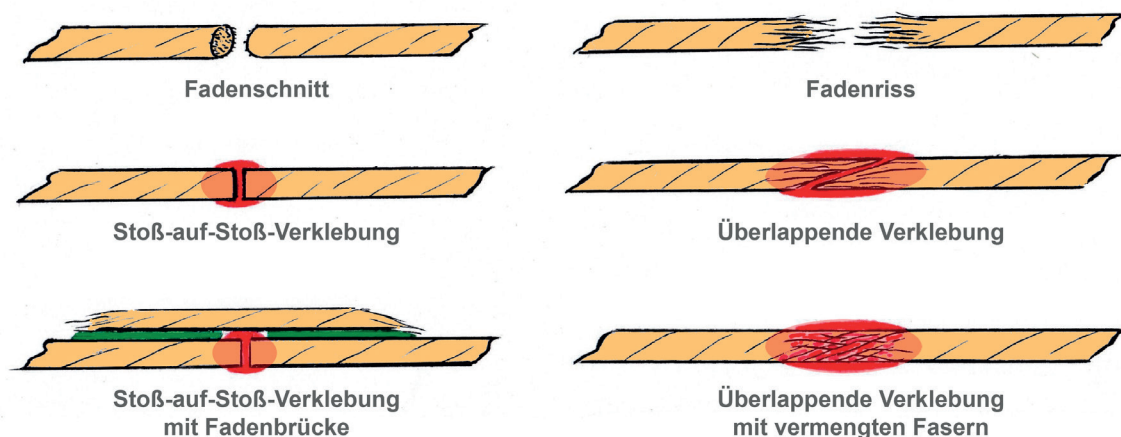


Abb. 3.04: Schematische Darstellung unterschiedlicher Bruchbilder und Fügetechniken (angelehnt an YOUNG 2003, S. 55).

- In der **Stoß-auf-Stoß-Verklebung** (SAS) erfolgt das direkte Aneinanderfügen der Fadenenden. Dabei sind Spalte unbedingt zu vermeiden, ein Auffüllen der Fuge mittels Klebstoff ist nicht technikgemäß. Als praktischer Richtwert sollten spätestens Fugen mit Spalten von $\geq 0,5$ mm nicht mehr als klassische Stoß-auf-Stoß-Verklebungen behandelt werden. In solchen Fällen sollte das Einsetzen zusätzlicher Faser- oder Fadenabschnitte erfolgen.
- Die **einfach überlappende Verklebung** (Ü) entspricht einem simplem Übereinanderfügen der Fadenenden. Als Richtwert können Überlappungen von $\geq 0,5$ mm betrachtet werden; kleinere Überlappungen sollten entsprechend u.a. der Klebstoffauswahl als Stoß-auf-Stoß-Verklebung behandelt werden. Die einfach überlappende Technik kann u.a. erforderlich sein, wenn zwar eine Überlappung der Fadenenden vorliegt, diese sich jedoch als zu empfindlich für eine zusätzliche Verzahnung bei Umsetzung darstellen oder sich nicht in einzelne Fasern auffächern lassen.
- Bei vorliegender Überlappung allgemein vorzuziehen ist jedoch die **überlappend-vermengte Verklebung** (Ü+V), bei welcher eine zusätzliche Verzahnung der faser-

¹⁸ Siehe u.a. HABENICHT 2008, S. 123, 140, 144; HABENICHT 2009.

rigen Fadenenden zur mechanischen Verankerung sowie Vergrößerung der Klebefläche erfolgt. Hier können mitunter auch geringere Überlappungen von $\geq 0,3$ mm in der praktischen Verklebung noch als solche behandelt werden. Auch die ebene Kraftübertragung wird so optimiert (vgl. Kap. 3.3.1).

- Eine Erweiterung der drei Grundtechniken stellt das zusätzlich zur Einzelfadenverklebung erfolgende, nachträgliche **Aufbringen von Fadenbrücken** dar. Dieses erfolgt in der Regel lediglich an Stoß-auf-Stoß-Verklebungen (SAS+B) zwecks zusätzlicher Sicherung, bspw. im Falle besonders hoher Zugbelastungen oder kritisch einzuschätzender Verklebungsqualitäten und -eigenschaften (Adhäsion und Kohäsion). Häufig werden Fäden von ca. 15-25 mm Gesamtlänge als Brücken genutzt. Die Applikation sollte dabei ohne ein Spannen des Brückenfadens sowie lediglich links und rechts der Klebestelle erfolgen; die Brücke hat somit keinen direkten Verklebungskontakt mit der eigentlichen Klebestelle.¹⁹

Je nach Verklebungstechnik müssen passende Klebstoffe ausgewählt werden. Entsprechend des Schadensbilds im Gewebe ist es daher ggf. auch erforderlich, die Verklebungstechniken und damit einhergehend genutzte Klebstoffsysteme gezielt zu wechseln bzw. kombinieren.

Verklebungsdurchführung

Die Durchführung der Einzelfadenverklebungen im Gewebe erfolgt mittels Feininstrumenten unter dem Mikroskop, je nach erforderlicher Technik. Exemplarisch wird eine idealisierte Stoß-auf-Stoß-Verklebung in Grundzügen schrittweise erläutert (vgl. Abb. 3.05):

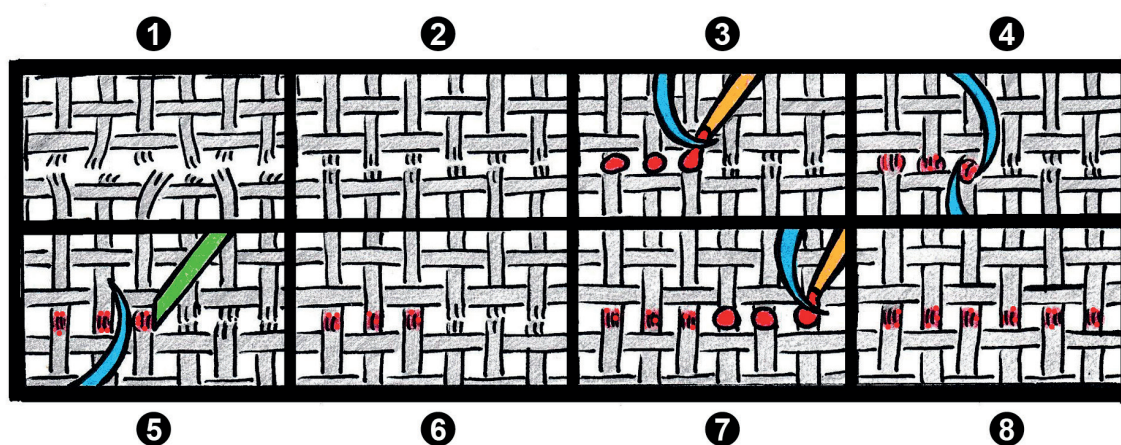


Abb. 3.05: Schematische Darstellung der Stoß-auf-Stoß-Verklebung eines Gewebes.

¹⁹ Siehe u.a. HEIBER 1996, S. 119; BECKER 2002, S. 22; HOFFMANN 2009, S. 4; REUBER 2010, S. 7, 16; HEIBER 2003. Vgl. FLOCK 2014, S. 23 f.

Voraussetzung für die Verklebung ist die geschaffene Lage der Geweberänder in der Bildebene (**Schritt 1**), auf welche die vorbereitende Feinsortierung und Ausrichtung der Fadenenden in Fügesituation folgt (**Schritt 2**). Die feindosierte Klebstoffangabe erfolgt je einzelner Faden; die zeitlich parallele Bearbeitung von maximal drei Fäden ist dabei zu empfehlen. Die Klebstoffmenge ist so gering wie möglich zu wählen, unter gleichzeitiger Gewährleistung der erforderlichen Benetzung. In der Regel sind dafür nur 0,3-1 µl Klebstoff je einzelner Fadenverklebung erforderlich, je nach Fadenvoraussetzung und Verklebungstechnik. Bei der Klebstoffangabe wird der Klebstofftropfen vom Dosiermedium (Dosiernadel, Pipettenspitze u.ä.) mittels der Feininstrumente kontrolliert abgetragen und zum einzelnen Faden geführt (**Schritt 3**). Nach Klebstoffangabe erfolgt die Einarbeitung des Klebstoffs in die Fadenenden und -zwischenräume durch mechanische Manipulation. Ziel sind eine gleichmäßige Klebstoffverteilung und Benetzung der Fügeiteiloberflächen unter Integration aller freien Faserenden. Dies erfordert, dass der Klebstoff nicht nur genau zwischen den Fadenenden sitzt, sondern diese zudem auf einer gewissen Länge penetriert und dünn ummantelt. Hier sollte als Richtwert max. 1 mm Fadenmaterial links und rechts der Klebestelle „gefüllt“ werden (**Schritt 4**). Nach Einarbeitung des Klebstoffs erfolgt die Modellierung und Glättung der Klebungsoberfläche, optional unter Einsatz einer Heiznadel zur leichten Antrocknung wässriger Klebstoffsysteme sowie der thermoplastischen Modellierung (**Schritt 5**). Erst nach vollständigem Abschluss der einzelnen Fadenverklebungen (**Schritt 6**) erfolgt die erneute Klebstoffzugabe und Fortsetzung der Verklebung von weiteren Fäden (**Schritt 7**). Die abgeschlossene Einzelfadenverklebung (**Schritt 8**) stellt sich idealerweise als mit bloßem Auge nahezu unsichtbar dar, d.h. ohne Verdickungen oder Tränkungen der Schadstellenbereichs u.a. (vgl. Abb. 3.06-07).

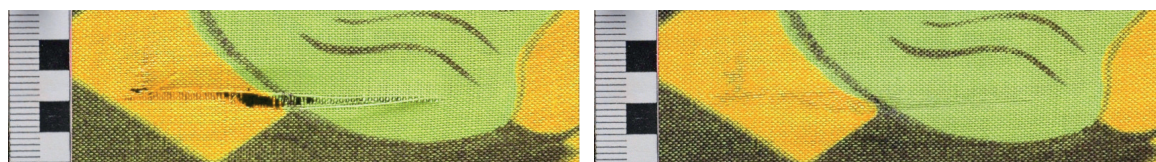


Abb. 3.06-07: Riss in einem bedruckten Gewebe vor und nach der Einzelfadenverklebung.

In der praktischen Durchführung am Objekt ist die Einzelfadenverklebung zudem mit der vorbereitenden und/oder parallelen Sicherung der auf dem Gewebe liegenden, gebrochenen Schichten sowie zumeist einem Neuverweben der Schadstelle verbunden. Nach Abschluss der Verklebung und Wiederherstellung der Gewebestruktur kann dann die lokale Rekonstruktion der Beschichtung durch Kittung und Retusche erfolgen (siehe Abb. 3.08-14).



Abb. 3.08-10: Durchstoßung einer Gemälderückseite im Vorzustand (links), nach Wiederherstellung der Gewebestruktur mittels Einzelfadenverklebung (Mitte) sowie nach Kittung der vorderseitigen Grundierung (rechts).

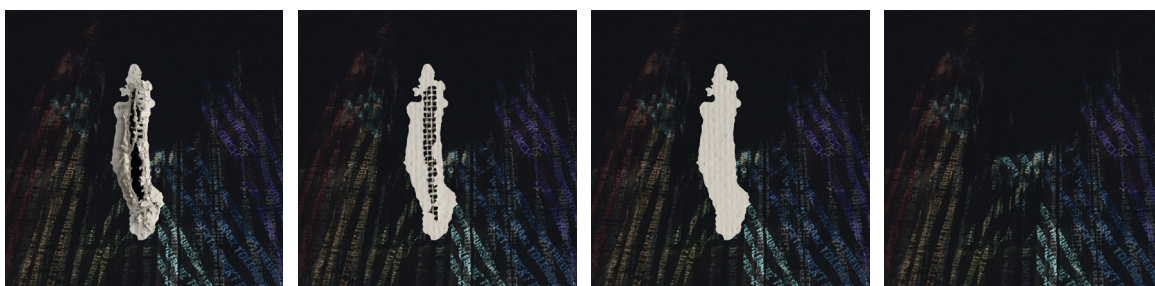


Abb. 3.11-14: Die rückseitige Durchstoßung betrachtet von der Gemädevorderseite im Vorzustand (links), nach Wiederherstellung der Gewebestruktur mittels Einzelfadenverklebung (2. von links) sowie nach Kittung der vorderseitigen Grundierung (2. von rechts) und abschließender Retusche (rechts).

Faden- und Gewebeintarsien

Das Einsetzen einzelner Fäden oder ganzer Gewebeintarsien erfolgt prinzipiell analog in den genannten Verklebungstechniken; das Material wird dazu entsprechend des originalen Gewebes ausgewählt (Faserart, Gewebestruktur, Fadensystem etc.) und durch schrittweisen Zuschnitt im Verklebungsprozess angepasst. In der Regel geschieht ein zunächst im Vergleich zur Fehlstelle größerer Gewebezuschnitt, welcher seitlich um orthogonal verlaufende Fäden bis auf das Fehlstellenformat ausgefranst wird. Die so rings um das finale Intarsienformat freiliegenden Einzelfäden können zur temporären Fixierung bei der Einpassung der Intarsie genutzt werden („Käfer-Technik“), indem sie alternierend auf Vorder- und Rückseite des Originals platziert werden. Die Intarsie erfährt so eine Selbstfixierung innerhalb der Gewebefehlstelle und -ebene. Bei Bedarf lassen sich zudem einzelne Seitenfäden interimsmäßig zur Fixierung ankleben. Erst bei der eigentlichen Verklebung der Seitenfäden mit dem originalen Gewebe erfolgt das Einkürzen dieser auf ihre finale Länge.

Häufig lassen sich lediglich Stoß-auf-Stoß- oder einfach überlappende Verklebungen umsetzen. Das überlappend-vermengte Verkleben bei gleichzeitiger Gewährleistung der korrekten Ausrichtung und ebenen Spannung der Intarsie stellt eine ausgesprochene Herausforderung dar. Ungleichmäßiger Zug oder Verwölbungen des eingesetzten Intarsiengewebes müssen vermieden werden. Die einfach überlappende Verklebung sollte jedoch nur dann Anwendung finden, wenn die aufgeklebten Fäden der Intarsie das originale Gewebe alternierend auf Vorder- und Rückseite einfassen können. Hier ergeben sich mitunter Limitationen durch die aufliegenden Gewebebeschichtungen. Das daher leider häufig in der restauratorischen Praxis vorzufindende, lediglich an der Gemälderückseite überlappende Ankleben der Intarsie sollte nicht durchgeführt werden (siehe Abb. 3.15). Der Grund liegt in der einseitigen Scherflächenaufgabe. Liegt das Intarsiengewebe zunächst noch vermeintlich in der originalen Gewebeebene, so stellen sich in der dauerhaften Aufspannung häufig aus der Bildebene heraus wölbende Intarsienbereiche dar. Da keine gerade gerichtete Kraftübertragung in der Gewebeebene stattfindet, resultiert (je nach Steifigkeit der Schichten) ein momentenbedingtes Verkippen. Im Gegensatz dazu gleichen sich im Falle vorder- und rückseitig aufgebrachtener Scherflächen die auftretenden Momente statisch aus (siehe auch Kap. 3.3.1). Zur Veranschaulichung erfolgt eine schematische Übersicht:

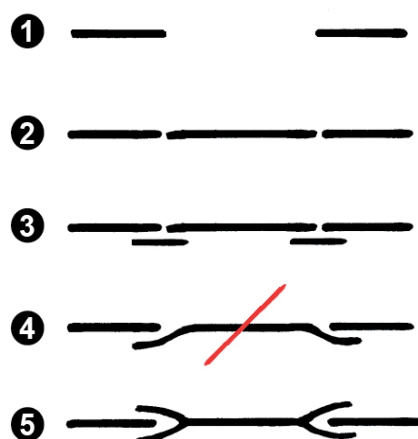


Abb. 3.15: Vergleich häufig verwendeter Intarsientechniken zur Fehlstellenergänzung:

1. In der Ebene liegendes, originales Gewebe mit Fehlstelle,
2. Stoß-auf-Stoß-Verklebung der Intarsie,
3. Stoß-auf-Stoß-Verklebung mit zusätzlichen Fadenbrücken,
4. lediglich einseitige überlappende Verklebung (zu vermeiden),
5. alternierend vorder- und rückseitig aufgeklebte Überlappungen.

3.3 Mechanische Grundlagen

Um das allgemeine Materialverhalten textiler Bildträger, gesamter Gemäldestrukturen und innerhalb dieser eingebrachter Klebungen zu verstehen, bedarf es der Kenntnisse der mechanischen Grundlagen.²⁰ Eine feste Etablierung der Grundlagen von Statik, Festigkeitslehre oder rheologischen Materialmodellen lässt sich in der Konservierungs- und Restaurierungswissenschaft bislang vermissen. Zwar ist immer wieder die Rede von Spannung und Dehnung, viskoelastischem Materialverhalten oder plastischer Deformation u.ä., mitunter lassen sich jedoch ungenaue Definitionen, unzutreffende Begriffsverwendungen und ein Mangel an Grundlagenverständnis festhalten. An dieser Stelle sollen daher verknüpft wesentliche Verständnisgrundlagen für die vorliegende Arbeit dargestellt werden.

3.3.1 Physikalische Messgrößen

Betrachtet man die Newtonschen Gesetze bieten sich bereits anschauliche Erklärungen für viele an Gemälden im Zuge auftretender Beanspruchungen zu beobachtender Phänomene. Die Axiome beschreiben wesentliche Grundsätze für die Wirkungsweise von Kräften:

- Gemäß des Trägheitsprinzips verbleibt ein Körper in Ruhe oder gradliniger, konstanter Bewegung, solange einwirkende Kräfte keine Zustandsänderung bewirken (lex prima).
- Das Aktionsprinzip besagt im Falle einwirkender Kraft eine dieser proportionale Bewegungsänderung entlang der Kraftwirkungslinie (lex secunda).
- Mit dem Reaktionsprinzip wird das paarweise Auftreten von Kräften beschrieben, sodass eine Krafteinwirkung am Körper eine gleich große, entgegengesetzte Kraftantwort bewirkt (lex tertia).

Kraft und Moment

Kräfte beschreiben also allgemein eine Einwirkung unter Beschleunigung (dynamisch) oder Verformung (statisch) von Körpern. Die Kraft F stellt dabei eine physikalische Größe dar, die durch gerichtete Vektoren dargestellt werden kann, und ist als Masse m mal Beschleunigung a definiert (3.1).

$$(3.1) \quad \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

²⁰ Siehe u.a. BALKE 2010; ROOS et al. 2017; FRIESKE 2019; ELIAS 2001.

Kräfte werden üblicherweise in der Einheit Newton [N] angegeben (3.2).

$$(3.2) \quad N = \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

Somit ergibt sich auch die Möglichkeit, bei bekannter Masse m auf die mit der Erdbeschleunigung (Ortsfaktor) $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ resultierende Gewichtskraft F_G zu schließen (3.3).

$$(3.3) \quad \vec{F}_G = m \cdot \vec{g}$$

Bei hängenden Objekten, wie auch Fahnen oder Tapisserien, lassen sich mitunter so wirkende Kräfte im Rückschlussverfahren nachvollziehen. Der häufig vorzufindende direkt synonyme Gebrauch des Massebegriffs als Kraft ist daher unpräzise.

Aus Kräften resultierende Momente M beschreiben die Wirkung einer punktuell angreifenden Kraft; es handelt sich um das Produkt von

- senkrechtem Abstand b zwischen dem Bezugspunkt B und der Wirkungslinie der Kraft (auch Hebelarm genannt)
- und dem Kraftbetrag (3.4).

Momente [Nmm] lassen sich anschaulich anhand aus ihnen resultierender Biegedeformationen in Bildträgerstrukturen nachvollziehen, bspw. wenn wie mitunter an Intarsien ein Ebenenversatz in der Kraftübertragung vorliegt (vgl. Abb. 3.15 / Kap. 3.2.2).

$$(3.4) \quad \vec{M}^{(B)} = b \cdot \vec{F}$$

In der Statik liegt prinzipiell ein Kräftegleichgewicht vor, welches für ruhende als auch in konstanter Geschwindigkeit bewegte (unbeschleunigte) Körper gilt. Daraus ergibt sich, dass die Summe aller Kräfte $\sum \vec{F}_i$ (3.5) und Momente $\sum \vec{M}_i$ (3.6) gleich Null ist.

$$(3.5) \quad \sum \vec{F}_i = \vec{0}$$

$$(3.6) \quad \sum \vec{M}_i = \vec{0}$$

Das aufgespannte Gemälde befindet sich somit in einem statischen Gleichgewicht und ist bestrebt, dieses Gleichgewicht in der energetisch günstigsten (niedrigsten) Form einzustellen.

Spannung

Spannungen stellen ein Maß für die innere Belastung von Körpern in Folge äußerer Krafteinwirkung dar. Die Spannung ergibt sich aus der auf eine Fläche wirkenden Kraft [N/mm²], wobei grundsätzlich Zug- und Scherspannungen unterschieden werden können (Abb. 3.16).

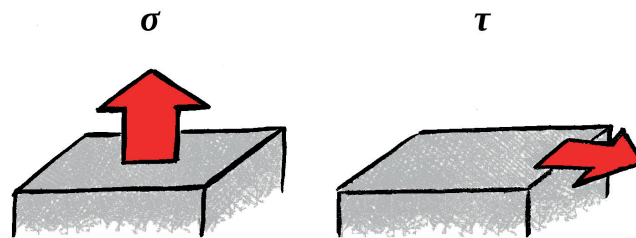


Abb. 3.16: Vereinfachte Darstellung der Ausrichtungen von Zug- und Scherspannung.

Zugspannung σ (Normalspannung) tritt im Falle einer senkrecht auf die Querschnittsfläche A [mm²] wirkenden Normalkraft F_N auf (3.7).

$$(3.7) \quad \sigma = \frac{F_N}{A}$$

Scherspannung τ (Schubspannung) bildet sich hingegen bei parallel zur Querschnittsfläche wirkenden Querkräften F_Q aus (3.8).

$$(3.8) \quad \tau = \frac{F_Q}{A}$$

Betrachtet man z.B. ein eben biaxial gespanntes Gemälde, steht dieses sowohl in horizontaler als auch vertikaler Achse unter Zugspannung. Liegt eine Stoß-auf-Stoß-Verklebung im Gewebe vor, ist diese ebenfalls einer Zugspannung ausgesetzt, während in überlappenden Verklebungen (auch) Scherspannungen auftreten. Im Fall aufgebrachter Fadenbrücken liegt im Transitbereich von Original und Fadenbrücken ebenso eine Scherspannung vor.

Der Begriff der Zugfestigkeit (häufig auch R_m) bezeichnet allgemein die gemessene Höchstzugkraft F_{max} (als Normalkraft F_N) bezogen auf den ursprünglichen Probenquerschnitt A_0 , d.h. eine maximale mechanische Zugspannung [N/mm²].²¹

²¹ Vgl. ROOS et al. 2017, S. 85 ff. Siehe auch HABENICHT 2008, S. 123.

Mitunter findet sich der Begriff in konservierungswissenschaftlichen Quellen bislang auch in unpräziser Verwendung synonym genutzt für die Höchstzugkraft F_{max} [N]; hier sollte zukünftig genauer differenziert werden, um Verständnisfehlern vorzubeugen.

Prinzipiell sind nominelle (technische) und wahre Spannung zu unterscheiden. Während sich die nominelle Spannung σ_N auf die ursprüngliche Querschnittsfläche A_0 bezieht, berücksichtigt die wahre Spannung σ_w die in Folge von Belastungen veränderte Querschnittsfläche A_1 (vgl. Abb. 3.17). So kommt es bspw. in uniaxialen Zugversuchen an Geweben durch fortschreitende Dehnung zur Querschnittsverringering, sodass die wahre Spannung im Vergleich zur technischen Spannung höher ausfällt. Dabei lässt sich auch eine Querkontraktion des Probenmaterials (Einschnürung) beobachten. Oftmals entfällt die Angabe einer wahren Spannung jedoch mangels Kenntnis über die genaue Querschnittsflächenänderung. Diesem Problem lässt sich mitunter durch die Nutzung geeigneter Bildgebungsverfahren im Rahmen experimenteller Versuche begegnen.

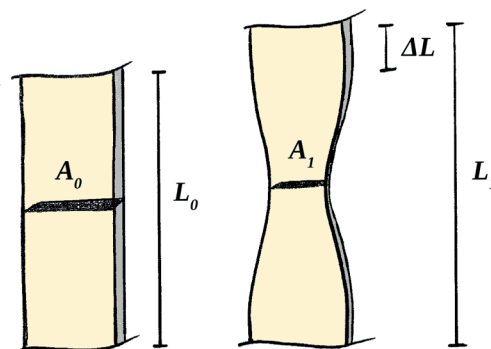


Abb. 3.17: Schematische Veranschaulichung der Probendeformation nach uniaxialen Zug. Durch die Längenzunahme sind eine Querschnittsverringering und Einschnürung aufgetreten.

Dehnung

Dehnungen ε beschreiben die relative Längenänderung eines Körpers durch äußere Belastung. Bei einer positiven Dehnung (Längenzunahme) wird auch von Streckung, bei negativer Dehnung (Längenabnahme) von Stauchung gesprochen. Wie bereits im Falle der Spannung lassen sich nominelle (technische) und wahre Dehnung unterscheiden.

Die technische Dehnung ε im uniaxialen Zugversuch (vgl. Abb. 3.17) ergibt sich aus der Längenänderung ΔL bezogen auf die ursprüngliche Ausgangslänge L_0 (3.9).

$$(3.9) \quad \varepsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Diese Definition nimmt eine ideale, homogen über die neue Gesamtlänge L verteilte Dehnung an. In der Realität finden sich jedoch zumeist inhomogene Dehnungsverteilungen, u.a. auch bedingt durch die Klemmung der Probenbereiche bei Einspannung in Zugversuchen. Die bereits beschriebene Querkontraktion von Proben bei uniaxialen Zug kann mit der Poissonzahl ν beschrieben werden, sofern die veränderten Probenmaße bekannt sind. Diese Querkontraktionszahl ergibt sich dann aus der ursprünglichen Länge L und Dicke d sowie deren jeweilige Änderungsabmaßen ΔL und Δd (3.10).

$$(3.10) \quad \nu = \frac{-(\Delta d / d)}{(\Delta L / L)}$$

Solange es sich um kleine Dehnungen handelt, entspricht die Gesamtdehnung näherungsweise der Summe der Teildehnungen und die technische Dehnung ε entspricht annähernd der wahren (logarithmischen) Dehnung ε_w (3.11).²²

$$(3.11) \quad \varepsilon_w = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) = \ln (1 + \varepsilon) \approx \varepsilon$$

Die Nutzung von bspw. digitaler Bildkorrelation (DIC) bietet im Gegensatz zur einfachen Berechnung der technischen Dehnung eine individuelle Dehnungsermittlung in allen (sich ggf. heterogen dehnenden) Probenbereichen und erlaubt des weiteren die präzisere Dehnungserfassung in mehrachsigen Spannungszuständen (siehe auch Kap. 5.2).

Dehnungen sind prinzipiell ohne Einheit und werden daher entweder als Zahl [-] oder durch Multiplikation mit 100 in Prozent [%] angegeben.

Der Zusammenhang von Spannung und Dehnung lässt sich visuell in Spannungs-Dehnungs-Diagrammen darstellen, indem die Spannung (Ordinate) über der Dehnung (Abszisse) aufgetragen wird.

Im Kontext beschriebener Materialprüfungen sei der Vollständigkeit halber zudem noch auf die Erfordernis einer geeigneten Statistik zur Beurteilung der Messwerte hingewiesen.²³

²² Siehe u.a. ROOS et al. 2017, S. 88.

²³ Siehe u.a. BANDERMANN 1980; BOURIER 2008; SACHS, HEDDERICH 2006.

Spannungsbegriff am Gemälde

Allgemein ist die Angabe von Spannungen für un- und beschichtete textile Bildträger mit Problemen behaftet. In konservierungswissenschaftlichen Quellen angegebene Spannungswerte lassen sich zumeist nicht vergleichen oder allgemein übertragen:

In der Regel sind die Querschnittsflächen bzw. Schichtdicken der aufgespannten Gemälde nicht bekannt. Daher wird im Kontext von Gemäldespannungen oftmals auch eine ersatzweise Linienspannung angegeben, bezogen auf die Gewebebreite [N/m]. Auch diese Alternative ist jedoch kritisch zu betrachten, da die Spannungsangabe ungeachtet der individuellen Struktur geschieht; der genaue Gewebeaufbau, Art und Homogenität der Beschichtung, Interaktion der Schichten u.ä. finden keine Berücksichtigung.

Bezogen auf das Gewebe bestehen zudem konkrete Unschärfen bei Verwendung des Spannungsbegriffs durch den quasi „offenporigen“ Aufbau. Die aus einzelnen Fibrillen aufgebauten Fasern bilden miteinander verdreht die Fäden, welche ebenso wiederum in Abhängigkeit von der Bindungsart punktuell interagieren (Reibung) oder Freiräume lassen. Die Approximation des Gewebes als kontinuierliche Schicht stellt somit einen hohen Abstraktionsgrad dar. Vielmehr liegt weder im einzelnen Faden, noch im Gewebe ein Kontinuum vor, sodass für diese streng genommen keine Spannung definiert werden kann.

Auch in der Textiltechnik und -prüfung ist die Berechnung von querschnittsbezogenen Höchstzugkräften [N/mm²] von Faden- und Flächengebilden daher unüblich. Gearbeitet wird stattdessen mit der Höchstzugkraft [N], der breitenbezogenen Höchstzugkraft [N/mm] oder der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft [cN/tex].²⁴ [Anm. 4]

Zusammenhang von Spannung und Dehnung im Gewebe

Üblicherweise lässt sich die Proportionalität von Spannung und Dehnung im linear-elastischen Bereich für Werkstoffe mit Moduln ausdrücken. Bei textilen Materialien besteht jedoch (anders als bspw. an Metallen) keine ausgeprägte Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung. Aus den beschriebenen Schwierigkeiten der Querschnittsbestimmung von Textilien folgt zudem, dass keine klassische Angabe von u.a. Elastizitätsmoduln [N/mm²] erfolgen kann (vgl. Kap. 3.3.2). In der Textiltechnik und -prüfung werden daher unterschiedliche Ersatzmoduln genutzt; für textile Flächengebilde erfolgt mitunter die Bestimmung der Steigung von (feinheitsbezogenen) Zugkraft-Dehnungs-Kurven in unterschiedlichen Kurvenbereichen via Sekante oder Tangente. Insbesondere Sekantenmoduln werden

²⁴ Vgl. REUMANN 2000, S. 62, 275, 382 f., 403 ff; DIN EN 2062; DIN EN ISO 13934-1.

dann auch in den Bereichen der Kurven bestimmt, die für das Verarbeitungs- oder Gebrauchsverhalten der Textilien relevant sind (Höchstzugkraft, Dehnbarkeit).²⁵

Auch hier stellen sich die in restauratorischer Fachliteratur angegebenen Moduln als schwierig interpretierbar dar. Neben der fehlenden genauen Charakterisierung des Gewebematerials ist oftmals nicht angegeben, wie präsentierte Moduln bestimmt wurden. Oftmals werden Moduln für Steigungsbereiche fortgeschrittenen Kraftaufbaus und deutlicher Dehnungszunahme angegeben²⁶, die nichts mehr mit einem Elastizitätsmodul im wörtlichen Sinne gemein haben (vgl. auch Kap. 3.3.2). Aufgrund der Gefahr von Verwechslungen und Missinterpretationen ist daher größte Vorsicht geboten und eine transparentere als bisher oftmals übliche Darstellung der Datenlagen erforderlich.

Aus diesen Gründen wird auf die Angabe von Spannungen [N/mm^2] bzw. Ersatzspannungen [N/m] für Gewebe im Zuge dieser Arbeit weitestgehend verzichtet und stattdessen lediglich die gemessene Kraft [N] angegeben. Auf diese Weise soll vorgebeugt werden, dass durch scheinbar normierte Spannungsangaben unzutreffende Vergleiche mit anderen Datensätzen gezogen werden. Stattdessen wird sich erhofft, die kritische Betrachtung der präsentierten Messwerte im Kontext einer (wie in dieser Arbeit) explizit dokumentierten Probengeometrie und konkreten Gewebestrukturanalyse auch für weiterführende experimentelle Untersuchungen besser zu etablieren.

3.3.2 Rheologische Grundelemente

Eigenschaften und Verhalten von Materialien lassen sich durch rheologische Modelle beschreiben. Grundsätzlich werden drei Grundelemente unterschieden, aus denen sich auch komplexere Modelle konstruieren lassen: Hooke-, Newton- und St.-Venant-Element (vgl. Abb. 3.18).²⁷

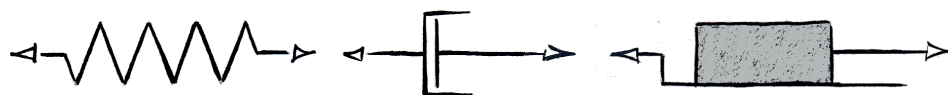


Abb. 3.18: Von links nach rechts zu sehen sind Hooke-, Newton- und St.-Venant-Element.

²⁵ REUMANN 2000, S. 61-68.

²⁶ Siehe u.a. YOUNG, JARDINE 2012.

²⁷ Siehe u.a. ALTENBACH 2012, S. 287 ff.; RUST 2009, S. 102 ff.; ROOS et al. 2017, S. 76-79; RÖSLER et al. 2012; SCHWARZL 1990; STROBL 2007, TOBOLSKY 1967.

Ideale Elastizität

Das Hooke-Element beschreibt als Feder einen auf einwirkende Kraft F und resultierende Spannung σ elastisch mit Deformation ε reagierenden idealen Festkörper, der sich nach Entlastung ebenso spontan und reversibel zurückformt. Spannung und Verformung verhalten sich proportional zueinander, mit dem Elastizitätsmodul E als Konstante ergibt sich das Hookesche Gesetz (3.12).

$$(3.12) \quad \sigma = E \cdot \varepsilon$$

Im Falle vorliegender Schubspannung τ stellt sich der Zusammenhang analog mit der Schubverzerrung γ (Gleitung) und dem G Schubmodul dar (3.13).

$$(3.13) \quad \tau = G \cdot \gamma$$

Der Elastizitätsmodul E [N/mm²] wird mitunter in unpräziser Verwendung synonym mit dem Begriff der Steifigkeit genutzt. Im Falle von bspw. Zugbelastungen wird die (Dehn-) Steifigkeit jedoch als das Multiplikationsprodukt von Elastizitätsmodul E [N/mm²] sowie der senkrecht zur Belastungsrichtung liegenden Querschnittsfläche A [mm²] verstanden und beschreibt den Widerstand gegen elastische Verformung [N].

Häufig findet sich in konservierungswissenschaftlichen Quellen leider auch eine unscharfe Nutzung des Elastizitätsbegriffs synonym mit „flexiblem“ oder allgemein verformbarem (duktilen) Werkstoffverhalten. Diese verallgemeinernde Interpretation ist inkorrekt und bedarf der präzisen Definition und Unterscheidung von Materialverhaltensklassen.

Rein elastisches Materialverhalten findet sich an Gemälden sowie ihren Einzelfadenverklebungen lediglich im Bereich sehr kleiner Deformationen. In der Regel lässt sich zudem anelastische Verformung in Versuchen beobachten, das Hookesche Gesetz der linearen Elastizität wird nicht erfüllt. Vielmehr stellt sich trotz spontaner, reversibler Rückformung eine Hysterese zwischen Be- und Entlastung ein. Begründet ist dies in Energieverlusten, die als Wärmeabgabe („innere Reibung“) erfolgen. Diese innere Reibung kann weitergehend zudem zu zeitabhängiger, viskoser Entropie-Elastizität führen, bei der die reversible Rückformung nicht mehr spontan erfolgt.²⁸

²⁸ Vgl. ROOS et al. 2017, S. 82.

Ideale Viskosität

Das Newton-Element repräsentiert als Dämpfer viskose Eigenschaften einer idealen Flüssigkeit; bei wirkender Spannung σ ergibt sich eine verzögerte, zeit- und somit auch geschwindigkeitsabhängige Materialantwort. Hier ist die Deformationsgeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}$ mit der Viskositätskonstante η proportional zur Spannung (3.14). Das Ausmaß der Deformation ist prinzipiell unbegrenzt solange die Spannung wirkt und bleibt nach Entlastung irreversibel bestehen.

$$(3.14) \quad \sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$$

Das viskose Materialverhalten ist verantwortlich für die zeitabhängige Reaktion von aufgespannten Gemäldestrukturen. Die in Kap. 3.1.3 beschriebenen Relaxations- und Retardationsverhalten sind in der polymeren Molekülstruktur begründet; bei andauernder Belastung gleiten die verknäuelten Molekülketten zunehmend in gerichtete Strukturen voneinander ab und es tritt zeitverzögerte Verformung ein. Dabei können sowohl nach Entlastung reversible (Entropie-Elastizität) als auch bleibende viskose Verformungen auftreten, da im Gemälde keine rein ideal viskosen Eigenschaften vorliegen. Dieses zeitabhängige Verhalten begründet, dass sich viskose Effekte in Gemälden erst bei langsamen (statischen) Prozessen darstellen, während bei abrupter, schneller Belastung der modellhafte Dämpfer nicht reagieren kann. Auch an Einzelfadenverklebungen lassen sich viskose Effekte beobachten; diese können sich unter andauernder Spannung kriechbedingt deformieren oder sogar vollständig öffnen.

Ideale Plastizität

Das St.-Venant-Element lässt sich ähnlich eines Reibklotzes interpretieren, dessen Haftreibung zunächst überwunden werden muss. Bei einwirkender Spannung σ unterhalb der Fließgrenze σ_F kommt es zu keiner Verformung, oberhalb jedoch zu irreversibler Deformation (3.15).

$$(3.15) \quad \varepsilon = \begin{cases} 0 & \text{für } \sigma < \sigma_F \\ \varepsilon(t) & \sigma \geq \sigma_F \end{cases}$$

Unterhalb der Fließgrenze entspricht das Materialverhalten somit einem starren Festkörper, darüber quasi einer Flüssigkeit mit sehr geringer Viskosität.

Plastisches Materialverhalten lässt sich an Gemälden beispielsweise im Zuge der plötzlich eintretenden, irreversiblen Überstreckung bei Belastung oberhalb der genannten Fließgrenze beobachten. Hier ist der Begriff der Duktilität zutreffend, der plastischen Verformung vor dem Bruch. Im Gegensatz dazu verhalten sich versprödete Bildträger, diese zeigen auch mit plastischen Eigenschaften keine ausgeprägte Dehnung vor dem Bruch.

Die häufige Verwendung des Begriffs „plastisch“ synonym mit „irreversibel“ ist jedoch unpräzise; wenn irreversible Deformationen durch viskose Materialeigenschaften in Gemäldestrukturen verursacht werden, sind diese prinzipiell von durch plastisches Materialverhalten begründete bleibende Verformungen abzugrenzen.²⁹

Plastische Eigenschaften von Einzelfadenverklebungen sind aufgrund der Größenordnung als solche zumeist nicht konkret beobachtbar; vielmehr geht das erkennbare Überschreiten möglicher Fließgrenzen oftmals unmittelbar mit dem Verklebungsbruch einher.

3.3.3 Rheologische Materialmodelle

Für Gemälde auf textilem Bildträger und ihre Einzelfadenverklebungen lassen sich Anteile elastischer, als auch viskoser und plastischer Materialeigenschaften belegen. Zur Beschreibung dieser kombinierten Eigenschaften können rheologische Modelle genutzt werden. Anhand dieser Modellvorstellungen lassen sich die generellen Zusammenhänge zwischen Spannung und Deformationsverhalten vereinfacht darstellen.

Parallel- und Reihenschaltung

Grundsätzlich stehen zur Kombination der Elemente die Parallel- und Reihenschaltung zur Verfügung. Das Prinzip wird an dieser Stelle vereinfacht anhand von parallel sowie in Reihe geschalteter Federn exemplarisch illustriert (Abb. 3.19):

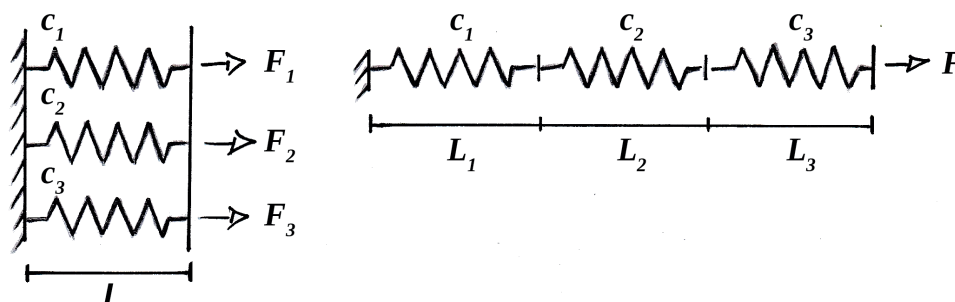


Abb. 3.19: Parallel- und Reihenschaltung mit unterschiedlichen Federsteifigkeiten c_1 - c_3 .

²⁹ Vgl. ROOS et al. 2017, S. 83f., 97 f.

Analog zum Hookeschen Gesetz lässt sich die Kraft F als Produkt der Federkonstante c und der Längenänderung ΔL ausdrücken (3.16).

$$(3.16) \quad F = c \cdot \Delta L$$

Im Falle der Parallelschaltung erfahren alle Federn bei Belastung die selbe Längenänderungen (3.17),

$$(3.17) \quad \Delta L_k = \Delta L \text{ für } k = 1, \dots, i$$

die Gesamtkraft entspricht der Summe der Einzelkräfte (3.18).

$$(3.18) \quad F = \sum_{k=1}^i F_k$$

Für die Gesamtschaltung lässt sich eine Ersatzfederkonstante angeben, welche größer als die der größten Einzelfeder ausfällt (3.19).

$$(3.19) \quad c = \sum_{k=1}^i c_k$$

Im Falle des aus dem textilen Bildträger und seinen Schichten bestehenden Gemäldes liegt stark vereinfacht betrachtet somit eine Parallelschaltung vor. Der mehrlagige Aufbau bewirkt eine Versteifung, vergleichbar einer erhöhten Gesamt-Ersatzfederkonstante. Die Art und Weise der Kraftübertragung hängt dabei jedoch nicht nur von den mechanischen Eigenschaften der Einzellagen, sondern auch ihrer Interaktion und Homogenität ab. So ergeben sich mehr oder weniger stark voneinander differenzier- oder zusammenfassbare Eigenschaften. Prinzipiell erfahren alle Lagen eine Kraft, wie hoch die Spannung (anteilig) ausfällt, hängt jedoch stark von den Einzelmoduln ab.

Liegen Brüche in der Beschichtung vor, wie auch ein sogenanntes Craquelé, ergeben sich daraus wie im Falle eines Risses im textilen Bildträger prinzipiell Unterbrechungen der Kraftübertragung innerhalb dieser Schicht.

Im Falle einer Reihenschaltung verhält es sich genau gegensätzlich; alle Federn erfahren dieselbe Kraft (3.20),

$$(3.20) \quad F_k = F \text{ für } k = 1, \dots, i$$

die Gesamtlängenänderung ergibt sich jedoch aus der Summe der Längenänderungen der Einzelelemente (3.21).

$$(3.21) \quad \Delta L = \sum_{k=1}^i \Delta L_k$$

Für die Gesamtschaltung lässt sich eine Ersatzfederkonstante angeben, welche kleiner als die der kleinsten Einzelfeder ausfällt (3.22).

$$(3.22) \quad c = \frac{1}{\sum_{k=1}^i \left(\frac{1}{c_k} \right)}$$

Betrachtet man eine Einzelfadenverklebung inmitten eines intakten aufgespannten Gewebes, ergibt sich für das Fadensystem mit eingebrachter Klebestelle dort lokal eine Reihenschaltung zwischen a) der einen Fadenhälfte, b) der Klebestelle und c) der anderen Fadenhälfte (vgl. Abb. 3.04 / Kap. 3.2.2). [Anm. 5]

Aus der ersatzweisen Gesamtschaltung des in Reihe verschalteten Systems ergibt sich hier, dass das schwächste Glied im Sinne der geringsten Federsteifigkeit das System wesentlich bestimmt. Dies erklärt bspw. anschaulich den mitunter drastischen Rückgang der Höchstzugkraft von einzelfadenweise verklebtem Gewebeprobenmaterial im Vergleich zu intaktem Gewebe bei Verwendung weicher, stark dehnbarer Klebstoffe in Zugprüfungen.

Ist zusätzlich zur Einzelfadenverklebung eine Fadenbrücke aufgebracht, liegt lokal ebenfalls zusätzlich eine Parallelschaltung von a) originalem Faden des Gewebes und Fadenbrücke sowie b) Klebestelle und Fadenbrücke vor. Hier wird deutlich, dass zusätzliche Fadenbrücken (bei gewährleisteter Adhäsion und Scherkraftübertragung) als ein parallel geschaltetes Element eine lokale Versteifung bewirken müssen.

Eigenschaften von Klebefugen

Weitergehend lässt sich auch die Klebung als solche noch differenzierter betrachten, da sich im Klebstoff als verbindendes Material schichtdickenabhängige, gradierte Eigenschaften darstellen.³⁰ Es ist bekannt, dass sich in direkter adhäsiver Wechselwirkung von Substrat und Klebstoff Interphasen an den Grenzflächen innerhalb der Klebstoffschicht ausbilden (Abb. 3.20):



Abb. 3.20: Schematische Visualisierung von Stoß-auf-Stoß-Klebefugen unterschiedlicher Schichtdicke unter Ausbildung von Interphasen zu den Substratflächen (angelehnt an BATAL 2011, S. 4).³¹

Je dicker die Klebstoffschicht zwischen den verbundenen Substraten, desto höher fällt der Gradient aus und umso stärker dominiert das kohäsive Verhalten des Klebstoffs die Eigenschaften der Klebestelle. In dicken Klebeschichten lässt sich daher für den durch die Interphasen eingeschlossenen Fugenbereich häufig ein mit dem Klebstoffbulk (~ Reinklebstoffmaterial) vergleichbares Verhalten feststellen. Dies ist mitunter kontraproduktiv und kann die Klebestelle schwächen. Ziel sind daher auch in der Einzelfadenverklebung möglichst dünne Klebeschichten, um die sich ausbildenden Interphasen nah zueinander zu führen, den Eigenschaftsgradienten der Klebefuge klein zu halten und den auf adhäsive Wechselwirkung hin konzipierten Klebstoff materialgerecht zu nutzen. Ebenso lassen sich bei mittels Klebstoffen aufgetragenen Fadenbrücken entsprechende Wechselwirkungen der Faden-substrate und Klebeschichten festhalten.

Auch die Klebefugen selbst lassen sich modellieren.³² Je nach verwendeten Klebstoffen können sich auch an diesen alle drei Grundmodelle rheologischen Verhaltens finden: Elastizität, Viskosität und Plastizität. Für den Einsatz der Klebstoffe im dauerhaft aufgespannten Gemälde sind insbesondere deren potentiell viskose Eigenschaften im Zuge der verlässlichen Funktionserfüllung im gespannten Gemälde von Interesse (siehe auch Kap. 4.1).

³⁰ Siehe u.a. BARTHEL 2007; DIEBELS et al. 2007; JOHLITZ 2008; BATAL 2011; JOHLITZ et al. 2012; GOLDSCHMIDT 2015.

³¹ Nach BATAL 2011, S. 4.

³² Siehe u.a. BIEKER, SCHLIMMER 2004; BORNEMANN, SCHLIMMER 2004 (a), (b); EHRENSTEIN 1978; ELIAS 2001; GIESEKUSS 1994; KLAPP 2002; PAHL et al. 1995; SCHLIMMER, BARTHEL 2011 (a), (b).

Rheologie der Gemäldegesamtstruktur

An Gemälden auf textilen Bildträgern lassen sich material- und strukturabhängig daher allgemein zusammengefasst häufig folgende grundlegende Eigenschaften beobachten:

- Auf geringe Belastungen und damit verbundene kleine Deformationen reagieren aufgespannte Objekte elastisch.
- Im Falle zyklischer Belastung (hygrische Wechsel u.ä.) oder andauernder höherer Belastung lässt sich ein mit Spannungsabfall verbundenes Relaxationsverhalten³³ beobachten.
- Insbesondere an Großformaten stellen sich zudem häufig retardationsbedingte Kriechdeformationen³⁴ ein.
- Entlastet man das Gemälde durch Abspannen, zeigen sich spontane, elastische sowie zeitverzögerte, viskos-elastische Rückformungen.
- Je nach vorausgehender Belastungshöhe und -dauer bleiben irreversible Deformationsanteile bestehen. Hierbei ist prinzipiell zu differenzieren zwischen
 - a) sich erst zeitabhängig ausbildenden, bleibenden viskosen Anteilen oder
 - b) durch Überlastung oberhalb der Fließgrenze auftretenden plastischen Anteilen.
- Selbige Beobachtungen lassen sich auch klebstoffabhängig für eingebrachte Einzel-fadenverklebungen festhalten. Von besonderem Interesse sind deren viskose Eigenschaften, da sie sich unter andauernder Spannung deformieren oder sogar vollständig öffnen können (~ Kriechen).

Je präziser ein Modell die Materialeigenschaften beschreiben soll, desto komplexere Kombinationen der Einzelelemente sind mitunter erforderlich. Umfangreich ausformulierte Modelle sind zudem in der Lage, neben dem unterschiedlichen mechanischen Verhalten der Einzelkomponenten auch deren Interaktion abzubilden. Der Kleinteiligkeit der Modelle sind dabei theoretisch kaum Grenzen gesetzt, sodass u.a. auch zwischen unterschiedlichen Molekülkettenlängen vorzufindender Polymere unterschieden werden kann, indem Moduln und Viskositäten variiert werden. Limitationen und Schwierigkeiten ergeben sich jedoch bei der Beschreibung des an polymeren Strukturen oftmals vorzufindenden nicht-linearen Materialverhaltens, welches nochmals komplexere Modellierungsansätze erfordert.³⁵

³³ Siehe u.a. ROOS et al. 2017, S. 103 f.

³⁴ Siehe u.a. ROOS et al. 2017, S. 100 ff.

³⁵ Siehe u.a. BETTEN 2001; BETTEN 2008; FERRY 1980; HAUPT 2002 ; JOHLITZ et al. 2007; JOHLITZ, DIEBELS 2011; LOSCH 1971; RUST 2009; SCHEFFER 2016; SEIBERT 2017.

Die Formulierung von Materialmodellen basiert daher nicht nur auf der experimentellen Charakterisierung von Materialeigenschaften, sondern auch der Übersetzung dieser in kontinuumsmechanische Materialtheorie und der numerischen Implementierung der Modelle. Erste Ansätze zur Beschreibung von Gemäldestrukturen wurden bereits u.a. von MECKLENBURG und TUMOSA vorgestellt.³⁶

Im Zuge der vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt rein auf der experimentellen Charakterisierung von un- und beschichteten Gewebeprobe, ohne und insbesondere mit Einzelfadenverklebungen.

³⁶ Vgl. MECKLENBURG, TUMOSA 1991 (a); MECKLENBURG, TUMOSA 1991 (b); COLVILLE et al. 1982.

Anmerkungen Kap. 3

[1] Die Verfasserin verwendet in ihrer Arbeit das generische Maskulinum und begreift darunter Menschen jeglichen Geschlechts, auch im Sinne feministisch geforderter Gleichstellung.

[2] Relaxation bezeichnet allgemein eine Zustandsänderung in Folge eines bestrebt Gleichgewichtszustands. Im Kontext textiler Bildträgerstrukturen wird mit Relaxation der Spannungsabfall bei konstanter Aufspannung (\sim Dehnung) bezeichnet. Mit Retardation ist hingegen die Dehnungszunahme bei konstanter Aufspannung (\sim Spannung) gemeint, auch als „Kriechen“ bezeichnet.

Nach RUST 2009 (S. 106 f.) fasst Kriechen jedoch allgemein das zeitabhängige Entstehen bleiben der Dehnungen zusammen, man unterscheide vielmehr nach „reinem Kriechen“ und Relaxation: Beim reinen Kriechen liege Verformung unter konstanter Spannung vor; die elastische Dehnung sei konstant, während die Kriechdehnung mit der Zeit steige. Bei der Relaxation bleibe die Gesamtdéhnung konstant, mit zunehmendem Anteil der Kriechdehnung nehme jedoch die elastische Dehnung und damit die Spannung ab.

[3] Die Deformationsbehandlungen sollten in der Regel erst nach der Risssschließung erfolgen, um den Verlust von Überlappung im Zuge feuchter Planierungen o.ä. zu vermeiden.

Weitere Hilfsmittel zur Verwebung präsentiert u.a. SARODNICK 1999.

[4] Der Titer bzw. Tex-Wert ist als sogenannte „Feinheit textiler Fasern“ ein Maß für die Dicke und Struktur linienförmiger textiler Gebilde wie Einzelfäden. Der Wert ergibt sich aus der Masse pro Länge: $1 \text{ tex} = 1 \text{ g}/1000 \text{ m}$ (REUMANN 2000, S. 251 ff.). Als ersatzweise Approximation von Querschnittsflächen findet für textile Liniengebilde mitunter auch eine Berechnung über den Quotienten von Ausgangsfeinheit [tex] und der Dichte [g/cm^3] des Fasermaterials statt (REUMANN 2000, S. 275 f.).

[5] Theoretisch ließen überlappende Klebungen ggf. wiederum Parallelschaltungen an den Klebestellen nachvollziehen; aufgrund der üblichen Größenordnung der Überlappung ($< 1 \text{ mm}$) und komplexen Mechanik der Klebefuge sei diese Hypothese jedoch zunächst ausgeklammert.

4

Anforderungsprofile

4.1 Klebstoffe zur Einzelfadenverklebung

Das Anforderungsprofil an Klebstoffe für die Einzelfadenverklebung stellt sich als sehr komplex dar und erscheint mitunter widersprüchlich. Die sich auch aus dem berufsethischen Verständnis ergebenden, speziellen Anforderungen der Konservierung und Restaurierung unterscheiden sich von anderen technischen Klebungen textiler Strukturen, wie sie u.a. in der Industrie Anwendung finden. Darüber hinaus ergeben sich je nach textilen Bildträgervoraussetzungen teils sehr individuelle Erfordernisse. Gewebe auf Basis von Cellulosefasern (u.a. Leinen, Baumwolle) sind grundsätzlich deutlich von Geweben aus synthetischen Fasern (u.a. Polyester, Polyamid) abzugrenzen. Auf Grund der polymeren Materialstruktur weisen unterschiedliche Fasertypen jeweils spezifische Adhäsionseigenschaften auf, insbesondere im Hinblick auf die Wechselwirkungen funktioneller Gruppen. Synthetische Gewebe zeichnen sich konträr zu üblichen cellulosischen Bildträgern durch vornehmlich unpolare Eigenschaften aus. Eine wesentliche Rolle spielt zudem die Vor- und Nachbehandlung der Gewebe, bspw. durch aufliegende Imprägnierungen, umfängliche Tränkungen oder Bindemittelreste vorhergehender (Verklebungs-)Maßnahmen. Eine zentrale Problemstellung findet sich insbesondere in hydrophobierten, wachs-harz-getränkten Bildträgern in Folge vorausgegangener Doublierungen.

In der fachspezifischen Literatur existieren bereits allgemein formulierte Anforderungskataloge, deren wesentliche Punkte nachfolgend zusammenfassend erläutert werden.¹

¹ Siehe. u.a. YOUNG 2003, S. 55-58; REUBER 2010, S. 17-20; FLOCK 2014, S. 25 f. Vgl. FLOCK et al. 2020 (b), S. 2.

Adhäsion

Insbesondere aus der Zielsetzung des Eintrags möglichst geringer Klebstoffmengen ergibt sich die Erfordernis einer hohen Klebkraft durch geeignete Adhäsionseigenschaften des Klebstoffs. Hierbei sind die individuellen adhäsiven Wechselwirkungen mit den Geweben der Objekte als maßgeblich heranzuziehen. Generell lassen sich mechanische Verankerung und spezifische Wechselwirkungen (funktionelle Gruppen, Dipolkräfte, Wasserstoffbrückenbindungen) als wesentliche Adhäsionsmechanismen bei der Einzelfadenverklebung unterscheiden.²

Im Falle des „worst case“, hydrophober, unpolarer Oberflächenvoraussetzungen, ergibt sich oftmals eine deutliche Limitation, sodass übliche (insbesondere wässrig basierte Klebstoffsysteme) keine ausreichenden adhäsiven Wechselwirkungen ausbilden können.

Speziell in diesen Kontexten ist über eine vorbereitende Oberflächenbehandlung der Fadenfügeteile zur Adhäsionsoptimierung nachzudenken, welche von den inhärenten Adhäsionseigenschaften des anschließend zu verwendenden Klebstoffs nochmals separat abzugrenzen ist. [Anm. 1]

Benetzung, Penetration und Viskosität

Aus zuvor Gesagtem ergibt sich folglich eine gute Benetzung der zu verklebenden Einzel-fäden durch den Klebstoff als Maßgabe. Weitergehend wird nicht nur die Oberflächenbenetzung angestrebt, sondern auch eine gewisse Penetration des Klebstoffs in die Fadenenden und ihre Faserzwischenräume. Dies ist nur möglich, wenn eine geeignete Viskosität des Klebstoffs gewählt wurde; weder darf der Klebstoff zu hochviskos zum Eindringen sein, noch sollte er zu stark in die Fadenlängen penetrieren. Neben der eigentlichen Klebstoffviskosität hängt dies zudem stark mit der Füge-teilstruktur und sich u.a. daraus ergebender Kapillarität zusammen.

Kohäsion

Oftmals wird die Faustregel genannt, der *Klebstoff* solle im Sinne der Schadensprävention bei erneuter Überlastung eine geringere Kohäsion als das originale Gewebe aufweisen, damit sich statt der Ausbildung neuer Defekte die Klebestelle öffnet. [Anm. 2]

Diese Forderung ist jedoch dahingehend zu präzisieren, dass die resultierende *Verklebung* eine geringere Kohäsion als das umliegende Material aufweisen muss. Dies ist insofern von großer Relevanz, da sich das Klebstoffverhalten in der Fuge mitunter stark vom Rein-

² Siehe auch HABENICHT 2009, S. 315-333; REUBER 2010, S. 14 f.

klebstoffmaterial unterscheidet (vgl. Kap. 3.3.3). So können sich bspw. sowohl erhöhte Verbesserungen, als auch erniedrigte Verschlechterungen zuvor (ausgehend vom Reinklebstoff) anzunehmender Festigkeiten darstellen.³ Adhäsives und kohäsives Verhalten sind somit auch unter wechselseitiger Beeinflussung zu verstehen und betrachten.

Bruchverhalten

Im Falle des Klebstoff- bzw. Klebungsversagens wird des Weiteren eine langsame Öffnung angestrebt, um das Risiko weiterer Schäden durch abrupte (~ beschleunigte) Vorgänge zu minimieren. Eine langsame, gleichmäßige (~ quasistatische) Verklebungsöffnung bietet zudem Zeit, sich entwickelnde Schäden zu sichern und somit eine Fortpflanzung der Schadstelle auf angrenzende intakte Bildträgerbereiche zu unterbinden (vgl. Kap. 3.1.3 und 3.3.1). [Anm. 3]

Elastizität oder „Flexibilität“

Insbesondere im Zusammenhang mit dem oftmals hygroskopischen Gewebeverhalten sollte die mittels Klebstoff erzielte Klebung eine gewisse Toleranz gegenüber durch klimatische Wechsel (T., r.F.) sowie Transporte o.ä. bedingte Spannungswechsel aufweisen. Der verklebte Bereich nimmt die Gewebebewegung idealerweise (ausgleichend) auf, statt lokale Spannungsunterschiede und somit Markierungen zu begünstigen. In der Regel werden daher auch hygroskopische Klebstoffeigenschaften bevorzugt.

In diesem Kontext wird oftmals der eher unscharfe Begriff einer geforderten „Flexibilität“ verwendet. Wünschenswert wäre sicherlich, dass sich die Klebefuge tatsächlich im Sinne spontaner, vollständig reversibler Gestaltänderung verhält (~ Elastizität). Mitunter ausreichend ist jedoch eine gewisse Flexibilität im Sinne adaptiven Verhaltens, das in gewissen Grenzen viskose oder sogar plastisch-duktiler Anteile aufweisen kann. Spröde Eigenschaften sind hingegen eher zu vermeiden.

Steifigkeit

Aus dem Wunsch nach möglichst elastischem bis „flexiblem“ Verhalten ergibt sich automatisch die einschränkende Randbedingung dabei gleichzeitig geeigneter Steifigkeit, also entsprechender Widerstandsfähigkeit gegenüber (elastischer) Deformation (vgl. Kap. 3.3.2). Die Klebefuge sollte nicht zu weich oder dehnbar sein sowie Spannungen möglichst deformationsfrei übertragen können. Gleichzeitig sind zu starre Verklebungen zu vermei-

³ Vgl. FLOCK 2014, S. 134 f.

den. Speziell hier wird die bisweilen als widersprüchlich wahrgenommene Vorstellung vom idealen Klebstoffmaterial deutlich. Es besteht jedoch weniger ein Widerspruch, als vielmehr ein sehr spezifisches, je nach Objekt individuelles und somit kaum in allen Punkten erzielbares, mechanisches Eigenschaftsprofil.

Viskose Eigenschaften und Glasübergang

Aus den beiden zuletzt genannten Punkten ergibt sich somit insbesondere die Notwendigkeit einer geeigneten Glasübergangsspanne (T_g ca. 40-65 °C), um ein (ausgeprägtes) viskoelastisches Kriechen bei Raumtemperatur zu vermeiden. Niedrige Glasübergangsbereiche begünstigen viskose Kriechvorgänge; zu hohe Glasübergangsbereiche können sich aufgrund damit verbundener Versprödung jedoch ebenfalls als abträglich darstellen.⁴

Wechselwirkungen

Das Klebstoffmaterial sollte sich als inert und bestenfalls pH-neutral darstellen, um keine unerwünschten Wechselwirkungen mit dem Objekt einzugehen oder dessen Abbau zu katalysieren. Insbesondere an stark degradierten Geweben sind daher pH-neutrale Klebstoffsysteme zu bevorzugen. [Anm. 4]

Wiederbearbeitbarkeit

Da aufgrund der notwendigen Penetration des Klebstoffs in die Fadenenden eine vollständige Entfernung in der Regel kaum mehr durchführbar ist, wird meist von der geforderten Wiederbearbeitbarkeit im Sinne einer gewissen Reversibilität des Klebstoffsystems gesprochen. Bevorzugt werden sollten daher möglichst wasserlösliche oder -quellbare sowie ggf. thermoplastisch reaktivierbare Klebstoffe.

Dabei sind gleichzeitig die Kompatibilität mit den anderen Gemäldebestandteilen (z.B. wasserlösliche/lösungsmittlempfindliche Malschichten), etwaige Nachbehandlungen (Planierung unter Feuchtigkeitseinsatz o.ä.) sowie die späteren Aufbewahrungsbedingungen (v.a. feuchtes/maritimes Klima) zu bedenken.

Optisches Erscheinungsbild

Angestrebt wird eine mit dem bloßen Auge nahezu unsichtbare Verklebung ohne Verdunklung, Glanzbildung oder andere optische Veränderungen. Speziell im modernen Kunsthandel sind Wertsteigerung und -verfall von Objekten eng mit dem Ideal einer möglichst unversehrten Originalsubstanz verknüpft.

⁴ Siehe auch YOUNG 2012, S. 25.

Langzeit- und Alterungsverhalten

Als obligatorisch sind ein gutes Langzeit- und Alterungsverhalten hinsichtlich sogenannter Klima- und Lichtalterung, anderen äußeren Umweltbedingungen (Luftschadstoffe o.ä.), als auch ausreichender Unempfindlichkeit gegenüber mikrobiellem Befall zu betrachten.

Hinzu kommt die Berücksichtigung möglichen zeitabhängigen Relaxations- und Kriechverhaltens.

Verarbeitungs- und Filmbildungseigenschaften

Alle aufgeführten Klebstoff- und Verklebungseigenschaften lassen sich jedoch nur dann erzielen, wenn auch für die Verarbeitung geeignete Eigenschaften vorliegen. Die Klebstoffverarbeitung muss dafür der angewandten Technik entsprechen. Zu lange oder zu kurze Offenzeiten (~ Topfzeiten), zu langsame oder zügige Trocknung und Abbindeprozesse nehmen eine nicht zu unterschätzende Rolle hinsichtlich der Erzielung mangelhafter Verklebungsqualitäten ein. Im Falle von Dispersionsklebstoffen spielt auch die Mindestfilmbildungstemperatur (MFT) eine zentrale Rolle, insbesondere im Falle von In-situ-Bearbeitungen an mitunter unklimateisierten Standorten.

Im Kontext von Schmelzklebstoffen sei auf einen geeigneten Schmelzbereich ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) verwiesen, um Hitzeschäden am Gewebe zu unterbinden.

Sonderprofil: Fadenbrücken

Grundlegend gilt, dass die verklebten Einzelfäden den geraden, unabgelenkten Verlauf der Kraftvektoren ermöglichen sollen. Auch im Falle aufgebrachter Fadenbrücken sollte die Hauptkraftübertragung daher im verklebten, originalen Fadenmaterial stattfinden.

Ist hingegen die Fadenbrücke das tragende Verbindungselement, kann sich ein Hebelarm durch Ebenenversatz im Kraftverlauf ausbilden; die tragende Brücke läuft Gefahr, sich in die Gewebeebene der Kraftübertragung zu ziehen (vgl. Kap. 3.1.3 und 3.2.2).

Die Fadenbrücken sollen somit nur als zusätzliche Übertragungslinie durch Scherkraftwechselwirkung dienen, nicht durch die Materialwahl explizit versteifend o.ä. gewählt sein. Idealerweise erfordert es dazu einen eher weichen, dehnbaren Klebstoff, der ausgleichend auf Bewegungen des textilen Bildträgers reagieren kann. Zudem wird die optional einfache Entfernung durch Abschälen angestrebt. [Anm. 5]

Aufgrund des komplexen Anforderungsprofils gilt es in der Praxis geeignete Kompromisse abzuwägen, um dieses zumindest in Teilen erfüllen zu können.

4.2 Materialprüfung zur Evaluierung der Technik und Klebstoffe

Um die Technik der Einzelfadenverklebung vor der empirischen Anwendung am Objekt wissenschaftlich und systematisch zu evaluieren, bieten sich Möglichkeiten der gezielten Material- und Werkstoffprüfung. So lassen sich die im textilen Bildträger angewandten Verklebungstechniken und Klebstoffe charakterisieren, um gestützte Behandlungsentscheidungen treffen zu können.

Es erfolgt daher zunächst die Übersicht eines idealen Anforderungskatalogs. Aufgrund bisher gänzlich fehlender Sammlungen dieser Art werden einige Punkte näher ausgeführt.

Praktischer Anwendungsfall

Die Materialprüfungen sollten eine hohe praktische Relevanz aufweisen, aus der sich Handlungs- und Materialempfehlungen ableiten lassen. Folglich sollte die Evaluierung von Materialien und Maßnahmen möglichst eng mit dem späteren Anwendungsfall verknüpft sein. Daraus ergibt sich die Anforderung, Einzelfadenverklebungen idealerweise auch im beschichteten Gewebeverbund unter entsprechend andauernder biaxialer Aufspannung im Langzeitversuch zu prüfen.

Wünschenswert sind dabei genauere Daten zu insbesondere unterschiedlichen Gewebesubstraten und -vorbehandlungen sowie möglichen Klebstoffen und Verklebungstechniken. Weitergehend stellt sich die Frage nach verschiedenen Verläufen, Formaten und Positionen von Schadstellen innerhalb der gespannten Gewebeflächen sowie deren Bruchbildern.

Zudem sollte die Berücksichtigung äußerer Faktoren (u.a. Klima, Transport) erfolgen.

Ziel ist eine möglichst universelle Evaluierung, welche ein hohes Maß an übertragbaren Rückschlüssen für individuelle Anwendungsfälle an Objekten bietet.

Übertragbarkeit von Materialeigenschaften

Aufgrund der bereits erwähnten Objektvielfalt müssen so zwangsläufig mehrschrittige Untersuchungen stattfinden, um der entsprechenden Bandbreite unterschiedlicher Material- und Problemstellungen gerecht werden zu können. Für eine Übertragbarkeit ergibt sich somit im Idealfall, Kombinationen separat zu charakterisieren (Gewebe, Beschichtung, verwendete Klebstoffe etc.) und Versuche schrittweise aufzubauen. Nur so kann eine Differenzierung der Einzelparameter gewährleistet werden.

Erste systematische Untersuchungen zeigten zudem bereits, dass sich die Eigenschaften textiler Strukturen aufgrund ihres komplexen Aufbaus ggf. nicht ohne Weiteres durch einfache Größenskalierung abschätzen lassen. Speziell hinsichtlich der Herstellung möglicher Zusammenhänge zwischen Faser-, Faden- und (uni- sowie biaxialer) Gewebestrukturen ist bislang Vorsicht geboten.⁵ [Anm. 6]

Auch Festigkeiten von Einzelfadenverklebungen lassen sich nicht problemlos skalieren, um bspw. die Verklebung längerer Rissformate abzuschätzen.⁶ Hier erfordert es somit auch der näheren Untersuchung von Möglichkeiten und Grenzen, maßstäbliche Zusammenhänge zum Rückschluss von Proben- auf Gemäldeverhalten zu nutzen. Letztlich können nur so mögliche Korrekturfaktoren ermittelt und benannt werden.

In diesem Kontext stellt sich zudem das konkrete Problem im Hinblick auf die Auswahl geeigneten Probenmaterials. Insbesondere bezüglich Möglichkeiten beschleunigter (~ künstlicher) Alterung zur Erzielung möglichst repräsentativer, mit natürlich gealtertem Material vergleichbarer Eigenschaften existieren bislang nur mäßig befriedigende Konzepte. [Anm. 7]

Auch ergibt sich die Anforderung von einerseits für die Verklebungsevaluierung standardisierten Fügeteilen sowie andererseits möglichst realitätsnahen Bruch- und Schadensbildern. Die Evaluierung standardisierter „echter“ Risse statt künstlicher Schnitte fand bei Verklebungen des Probenmaterials bislang noch keine Berücksichtigung.

Forschungsbezüge

Ein großes Problem stellt bislang insbesondere die heterogene Datenquellenlage dar. Die im Rahmen unterschiedlicher mechanischer Experimente an un- und verklebten Geweben generierten Datensätze können selten in gemeinsamen Kontext gesetzt oder verglichen werden (vgl. Kap. 3.3.1).

Übergeordnetes Ziel ist jedoch die langfristige Möglichkeit der Übertragbarkeit von Untersuchungsergebnissen unterschiedlicher Forschungsgruppen, speziell im Kontext der Einzelfadenverklebung. [Anm. 8]

Es bedarf daher grundsätzlich der Festlegung (Normierung) und Kommunikation systematischer Prüfansätze (Anleitungen) und insbesondere der optimierten Versuchsdokumentation (Protokollvorlagen).

5 Vgl. auch FLOCK 2014, S. 130-139; GARSIDE, WYETH 2005, S. 122; GARSIDE, WYETH 2006, S. 65-66.

6 Vgl. FLOCK et al. 2020 (a).

Standardisierung und Reproduzierbarkeit

Die konzipierten Versuche müssen so gestaltet sein, dass eine bestmögliche Standardisierung und Reproduzierbarkeit gewährleistet wird. Dies erfordert neben der sorgfältigen Umsetzung (Ausschluss systematischer Fehler u.ä.) die genaue Dokumentation von Versuchsvorbereitung und -durchführung sowie transparente Darlegung der Versuchsdaten. Darunter fällt insbesondere auch die genaue Charakterisierung des verwendeten Probenmaterials und nach Möglichkeit dessen Auswahl im Sinne einer breiten, gesicherten Verfügbarkeit für anschließende Versuche.

Im Sinne der Verfügbarkeit sind zudem möglichst einfache Prüfkonzeppte vorzuziehen, welche sich mit üblichen Versuchsaufbauten umsetzen oder einfach adaptieren lassen.

Charakterisierung der Klebungseigenschaften

Klebstoffeigenschaften wie Benetzung, Penetration und Viskosität, Wiederbearbeitbarkeit, optisches Erscheinungsbild und Verarbeitung lassen sich vergleichsweise unkompliziert im Rahmen praktischer Versuche individuell für den Anwendungsfall im Vorfeld beproben. Schwieriger ist die kurzfristige Beantwortung von Fragen bezüglich chemischer Stabilität und mechanischer Eigenschaften in der Klebungsanwendung. Hinsichtlich möglicher Wechselwirkungen und Alterungsverhalten der Klebstoffe müssen komplexere chemisch-archäometrische Untersuchungen herangezogen werden. Von besonderer Relevanz ist zudem die experimentelle Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Einzelfadenverklebungen in quantifizierbaren Größen, um vor Anwendung am Objekt eine Materialabschätzung treffen zu können. Darunter fallen die formulierten Anforderungen bezüglich Adhäsion, Kohäsion, Bruchverhalten, Elastizität oder „Flexibilität“ sowie Steifigkeit der erzielten Verklebungen im konkreten Verbund.

Während Kurzzeitversuche sich zwar zunächst zur ersten Darstellung von maximalen Belastungsgrenzen und Extremwerten anbieten, erfordern die erwähnten zeitabhängigen, viskosen Materialeigenschaften die Konzipierung von Langzeitversuchen unter andauernder Belastung zur Charakterisierung. Dabei muss in jedem Fall auch eine bewusste Festlegung von Detailkonzepten (u.a. Probenmaterialauswahl, Probekörpergeometrie, Parameter der Versuchsdurchführung oder -auswertung) erfolgen, da die Ergebnisse zur Charakterisierung der Klebungseigenschaften unmittelbar mit der Art der Prüfungsführung zusammenhängen.

Statistik, Logistik und Arbeitsaufwand

Allgemein sollten die Materialprüfungen seriell und zu verhältnismäßigen Kosten umsetzbar sein, sowohl in Bezug auf Probenmaterial, als auch u.a. der Prüfgeräte.

Aus dem Wunsch nach Prüfung realer Verklebungen ergibt sich des Weiteren die Problematik des Aufwands in der Probekörperherstellung. Die Einzelfadenverklebung stellt eine zeitintensive Technik dar, sodass für valide Ergebnisse statistisch belastbaren Stichprobenumfangs entsprechend große Anstrengungen unternommen werden müssen. Es ist daher erforderlich, geeignete Prüfsystematiken zu erarbeiten, die einen gangbaren Kompromiss zur Bewältigung des Arbeits- und Prüfaufwands unter gleichzeitig größtmöglicher Stichhaltigkeit abzuleitender Schlussfolgerungen ermöglichen. Konkret stellt sich die Frage nach u.a. in der Komplexität aufsteigenden Testreihen sowie Mindestanzahlen von Einzelproben im Kontext hoher Streuungen.

Trotz des zwangsläufig hohen Verklebungsaufwands sind der Lohn idealerweise belastbare experimentelle Daten, welche auch für weiterführende Materialmodellierungen genutzt werden könnten. Auf diese Weise ließe sich die Anzahl praktischer Experimente durch numerische Berechnungsansätze reduzieren (vgl. Kap. 3.3.3). Eine zukünftige kontinuumsmechanische Modellierung von Einzelfadenverklebungen könnte damit deutliche Vorteile und Zeitgewinn in der Beantwortung konservatorischer Fragestellungen bedeuten.

Optionale Versuchserweiterung

Auch wenn die Option möglicher kontinuumsmechanischer Modellierungen das Potential birgt, die Anzahl praktischer Versuche zu reduzieren, dienen auch hier zunächst Experimente als Grundlage oder zur Validierung der Modelle. Es bleibt daher die Anforderung, je nach speziellem Forschungsfrageschwerpunkt (maximale Belastbarkeit, Langzeitverhalten, Klimareaktion, Transport etc.) adäquate Experimente heranziehen zu können.

Die ausgewählten Versuchstypen sind daher im Idealfall einfach und flexibel um aufbauende Fragestellungen erweiterbar, sodass grundsätzliche Herangehensweisen erhalten bleiben. So ergibt sich eine geschlossene Prüfsystematik mit Möglichkeit zu Querbezügen.

Wie bereits hinsichtlich des Klebstoffanforderungsprofils für die Einzelfadenverklebung stellt ein Anforderungsprofil an Materialprüfungen zur vollumfänglichen Evaluierung der Klebstoffe und Technik einen umfassenden Ideal-Katalog dar.

Entsprechend bedarf es auch hier zunächst geeigneter Kompromisse und Priorisierung.

Anmerkungen Kap. 4

[1] In Erwägung gezogen werden zumeist die einfache Aufrauung der Fadensubstrate oder Auffächerung der Fasern (~ Veränderung der Oberflächentopografie) zur verbesserten mechanischen Verankerung. Ebenfalls diskutiert wird die Entfernung bzw. Reduzierung von unpolaren Tränkungen mittels Lösungsmittel-Extraktion. Daneben bergen jedoch insbesondere das Aufbringen vermittelnder Haftsichten oder die Modifizierung der Oberflächenchemie (durch bspw. Plasmabehandlung) großes Potential. Hierzu besteht nach wie vor Forschungsbedarf. Zur Klebstoffreduzierung und Lösungsmittel-Extraktion an Geweben, siehe u.a. AHMED, KOLISIS 2011; BIANCO et al. 2015; BLÜHER et al. 1999; DANIELS 1995; HEYDENREICH 1994; MACKEN, SMITH 2019. Zur Verklebung hydrophober Oberflächen seien u.a. zu nennen ANGELOVA 2019 und FISCHER, ESKA 2011 sowie im Kontext der Einzelfadenverklebung PLÖTZ 2003. Mit der vorbereitenden Polarisierung von Wachsflächen zur Verklebung hat sich u.a. SCHMITT 2011 restauratorisch beschäftigt. Zur chemischen Oberflächenbehandlung allgemein siehe auch HABENICHT 2009, S. 254 ff.

[2] An dieser Stelle sei auch auf Forschungen im Kontext der „Festigung“ (~ Kohäsionserhöhung) von cellulosischen Bildträgern hinzuweisen. Diese könnte sich auch gezielt zur Vorbereitung des textilen Bildträgers/in Kombination mit der Einzelfadenverklebung von Schadstellen in stark geschädigten Gewebestrukturen anbieten. Siehe u.a. BRIDAROLLI et al. 2020; BRIDAROLLI et al. 2018; ORIOLA et al. 2018; ORIOLA-FOLCH et al. 2020; TEIXEIRA 2016; WEILER 2009.

[3] In der Regel treten bei Klebungsöffnung an Einzelfäden gemischte Adhäsions-Kohäsions-Brüche auf. Bei reinen Adhäsionsbrüchen im praktischen Anwendungsfall sollte die Klebstoffwahl sowie Fügeeteilvorbereitung grundsätzlich neu überdacht werden; reine Kohäsionsbrüche können auch auf Verarbeitungsfehler des Klebstoffs oder zu dicke Klebefugen hindeuten. Siehe auch HABENICHT 2008, S. 126.

[4] Auch die cellulosischen Gewebe selbst unterliegen einer pH-Wert-Verschiebung in den zunehmend sauren Bereich im Zuge der Alterung. Zu teils diskutierten Möglichkeiten der Entsäuerung oder alkalischen Pufferung von textilen Bildträgern, siehe u.a. RIZZO, BURNSTOCK 2003; ZUMBÜHL, SCHERRER 2003; GIORGI et al. 2002; HACKNEY et al. 1996; HACKNEY, ERNST 1994.

[5] Häufig werden in der Praxis zur Applikation von Fadenbrücken leider dieselben Klebstoffe wie zur Einzelfadenverklebung eingesetzt. Dies wirkt sich kontraproduktiv aus und resultiert oftmals in sich ablösenden Brücken (vgl. Störleim-Weizenstärkekleister) oder deren Markierung durch zu starke Versteifung (vgl. Dispersionsklebstoffe zur Einzelfadenverklebung). Grundsätzlich sind andere Klebstoffanforderungen gegeben, die Berücksichtigung in der Fadenbrückenapplikation finden müssen (vgl. FLOCK et al. 2020 b).

Des Weiteren stellt sich die Frage eines geeigneten Fadenmaterials der Brücke. Neben Leinenfäden vergleichbarer Struktur des Originals kommen mitunter auch gezielt dünnere Fäden (Bsp. „Käseleinen“) oder verdrehte Einzelfasern (Bsp. Hanf) zum Einsatz. Bei der Präparation verdrehter Einzelfasern bietet sich die Beschichtung mit benzin-verdünnter Beva-Lösung aus dem Dosengebinde statt der Rasterung an (vgl. B.3). Mitunter werden auch Seidenfäden o.ä. für transparente, nahezu un-

sichtbare Fadenbrücken appliziert. Nicht empfehlenswert erscheint die gezielte Auswahl eines Fadenmaterials mit besonders steifen oder weniger hygroskopischen Eigenschaften als des originalen Gewebes, wie es mitunter durch Nutzung von Polyester erwogen wird (vgl. GÄBLER 2003).

Vor diesem Hintergrund sei auch explizit darauf hingewiesen, dass die Bezeichnung der „Verklammerung“ (vgl. GALE-SCHODTERER 2016, S. 51) für das Aufbringen von Fadenbrücken begrifflich nicht der hier dargelegten Intention entspricht und daher nicht genutzt werden sollte.

[6] In diesem Kontext sei explizit darauf hinzuweisen, dass auch die mitunter von Restauratoren zur Zustandsevaluierung textiler Bildträger erwägte, chemisch-physikalische Charakterisierung einzelner Gewebefasern und -fäden der Umschlagkanten von Gemälden (noch) keine zuverlässigen Aussagen über die tatsächliche Belastbarkeit und Tragfähigkeit der textilen Struktur erlaubt. Neben des oftmals abweichenden Zustands der stärker mechanischem und chemisch-oxidativem Abbau ausgesetzten Geweberänder findet so keine Berücksichtigung der komplexen Gewebestruktur statt. Die Torsion der Fasern im Garn, die Art der Bindung, die damit verbundenen verfestigenden Reibungseffekte sowie die zusätzlich versteifend wirkende Beschichtung und biaxiale Aufspannung des Gewebes u.v.m. werden hierbei außer Acht gelassen. Auch wenn Korrelationen nicht von der Hand zu weisen sind (vgl. u.a. GARSIDE, WYETH 2005 und 2006), kann ohne dezidierte Kenntnisse über die vorliegende individuelle Strukturmechanik bislang keine zuverlässige Einschätzung erfolgen. Es besteht die große Gefahr, aus diesem Ansatz heraus Gewebestrukturen maßgeblich zu unterschätzen und damit verbundene Fehlurteile in der Behandlung zu fällen. Speziell vor dem Hintergrund prinzipiell zu vermeidender Doublierungsmaßnahmen ist hier Vorsicht hinsichtlich unerwünschter Signalwirkungen geboten.

[7] Im Kontext sogenannter künstlicher Alterung sei auf u.a. folgende Quellen verwiesen: FELLER 1994; HACKNEY, HEDLEY 1993; HACKNEY, HEDLEY 1981.

[8] Obwohl der spezielle Anwendungsfall es nur begrenzt erlaubt, direkte Rückschlüsse zu ziehen, bieten sich dienliche Beschreibungen von allgemeinem Eigenschafts- und Alterungsverhalten unterschiedlicher Klebstoffmaterialien (siehe u.a. CAPPITELLI et al. 2004; CIMINO et al. 2020; DE WITTE et al. 1984; DOWN et al. 1996; DOWN 2009; DOWN 2015; ELIAS 2011; FELLER, WILT 1990; FINK 2017; HORIE 2010; MECKLENBURG et al. 2012; PRETZEL 1997; WILKS 1987). Dabei sei jedoch nochmals abgegrenzt, dass sich das mechanische Reinklebstoffverhalten nicht ohne Weiteres auf durchgeführte Verklebungen übertragen lässt (vgl. Kap. 3.3.3).

5

Konzeption Prüfsystematik

Ausgehend von den Anforderungen an Materialprüfungen zur Evaluierung von Einzelfadenverklebungen wurde eine Prüfsystematik für die weiteren im Rahmen dieser Arbeit präsentierten Versuchsreihen formuliert.

Die zu konzipierenden Versuche sollten zunächst in unmittelbarer Bezugnahme auf die vorausgegangenen Versuche der Verfasserin angelegt werden.¹ Auf diese Weise wurde einerseits die Herstellung von Bezügen im Sinne einer Vergleichbarkeit angestrebt, zum anderen sollten die bisherigen Ergebnistendenzen anhand höherer Stichprobengrößen validiert werden. Im Rahmen dieser Reproduktions- und Validierungsversuche wurde die Betrachtung von sich bis dahin als besonders vielversprechend dargestellten Klebstoffen als Auswahl vorgesehen.

Neben der sich daraus ergebenden Fortführung bisheriger uni- und biaxialer Kurzzeit-Zugversuche an unbeschichtetem Leinengewebe wurde die weitere Annäherung an den tatsächlichen Anwendungsfall im Gemälde angestrebt. Es sollten daher sowohl Beschichtung, als auch Langzeitversuch Berücksichtigung finden.

Für eine erste Betrachtung beschichteter Gewebe lag daher zunächst der logische Aufbau in Erweiterung der uni- und biaxialen Kurzzeit-Zugversuche nahe. Durch Fortführung des grundlegenden Versuchsaufbaus und Beibehaltung der wesentlichen Rahmenbedingungen sollte eine schrittweise Modifikation erfolgen, welche der gewünschten Bezugnahme unter Abgrenzung veränderter Parameter gerecht wird. Dies umfasste in der Planung zudem eine

¹ Vgl. FLOCK 2014; FLOCK 2015; FLOCK et al. 2020 (b).

sinnvolle Reduzierung der vorhergehenden Klebstoffauswahl, um dem Wunsch nach logistisch vertretbarem Prüfumfang nachzukommen. Gleichzeitig wurde die Festlegung einer sinnvollen Stichprobengröße je Einzelkonfiguration erforderlich.

Ausgehend von den Ergebnissen der Kurzzeitversuche an beschichteten Geweben sollte eine nochmals reduzierte Auswahl von Klebstoffen und Verklebungstechniken anschließend in eine biaxiale Langzeitevaluierung überführt werden. Der weitere Zwischenschritt einer uniaxialen Langzeitbetrachtung wurde zunächst nicht priorisiert.

Gleichsam wurde der Mehrwert von bis dahin grundlegend beibehaltenen Probekörpergeometrien als gering eingeschätzt; im bisherigen systematischen Aufbau der Prüfreihe wurde bislang die Prüfung ausschließlich intakter oder verklebter Einzelfäden als Ansatz verfolgt, um deren Extremwerte abbilden und klar von den intakten Gewebeeigenschaften differenzieren zu können. Stattdessen wurde für die Verklebungen im Langzeitaufbau eine unmittelbare Übertragung in flächige Gewebestrukturen vorgesehen, sodass eine gleichzeitige Prüfung intakter und verklebter Einzelfäden des Gewebes wie im späteren Anwendungsfall der Einzelfadenverklebungen am Gemälde stattfindet. [Anm. 1]

Neben der so geplanten umfänglichen Prüfung ausgewählter Klebstoffe, im Sinne einer größtmöglichen schrittweisen Übertragung auf die tatsächlichen Gegebenheiten am Gemälde, wurde zudem die ergänzende Betrachtung weiterer Klebstoffe vorgesehen. Hier sollten sowohl neue Klebstoffmaterialien und -rezepturen erstmalig geprüft, als auch bereits eingesetzte Klebstoffe erstmalig im Gewebeverbund statt nur in der Verklebung an Einzelfäden evaluiert werden (vgl. Kap. 2.1).

In logischer Folge aus der zuvor umrissenen Prüfsystematik ergab sich für diese somit zunächst die uniaxiale Kurzzeit-Zugprüfung in unbeschichtetem Gewebe, welche als initialer Versuch mit Ausblick auf wünschenswerte Erweiterung im Falle vielversprechender Klebstoffresultate betrachtet wurde.

In der Übersicht dargestellt ließen sich somit die zentralen Ziele und Maßgaben festhalten:

- Reproduktion vorausgegangener uni- und biaxialer Zugversuche an verklebten Geweben zur Validierung,
- Übertragung von Verklebungen in beschichtete Gewebestrukturen zur Annäherung an den üblichen Gemäldeaufbau,

- Erweiterung der Klebstoffauswahl der bisherigen Versuche zur Evaluierung weiterer potentiell geeigneter Klebstoffe,
- Entwicklung eines Langzeitversuchsaufbaus zur Charakterisierung des Verklebungsverhaltens unter dauerhafter Beanspruchung wie im Gemälde.

Als Rahmenbedingungen für die Prüfungen wurden des Weiteren u.a. definiert

- Leinen (ungealtert) als un- und beschichtetes Testgewebematerial,
- Betrachtung unter Normalklima (Vorbereitung, Lagerung, Durchführung),
- Prüfung vergleichbarer/aufeinander Bezug nehmender Probekörpergeometrien,
- Verklebung festgelegter Anzahl von Einzelfäden je Probekörper (Standard 12),
- Prüfung ausschließlich intakter/verklebter Fäden in den Kurzzeitversuchen,
- Verklebung im Schussfadensystem der Gewebe (gerader Verlauf parallel zur Kette),
- Anfertigung aller Proben durch eine Person,
- Produktion vergleichbarer Füge-teile durch standardisierten Schnitt,
- Standardisierung der Verklebungstechnik (Überlappungslänge 1 mm u.a.),
- Reproduktion definierter Klebstoffmengen pro Einzelfaden,
- Nutzung von Schussfäden des Testgewebes zur Anfertigung von Fadenbrücken,
- Einhaltung vergleichbarer Lagerdauer zwischen Verklebung und Prüfung,
- Festlegung einheitlicher Prüfparameter (Zuggeschwindigkeit etc.),
- und Betrachtung vergleichbarer Stichprobengrößen (Standard $n = 10$).

Im Zuge der Prüfsystematik ergaben sich im Hinblick auf weiterführende Versuche zudem als begleitend zu berücksichtigende Punkte angesichts des Anforderungsprofils:

- Überprüfung bisheriger und Formulierung geeigneter Prüfparameter,
- Umsetzung der transparenten Dokumentation der Versuche zwecks Nachvollziehbarkeit, Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit,
- und Berücksichtigung der Möglichkeit optionaler Versuchserweiterungen.

Die daraus folgenden durchgeführten Einzelversuche werden nachfolgend kurz erläutert.

Dabei erfolgt lediglich eine stark verknappte Darstellung der allgemeinen Versuchshintergründe sowie Erläuterung der Prüfintention. Für detaillierte Informationen zu den relevanten Parametern der Versuchsvorbereitung und -durchführung erfolgt der Verweis auf die umfassende Versuchsdokumentation im Anhang. [Anm. 2]

5.1 Uniaxiale Kurzzeitversuche

Die uniaxialen Kurzzeit-Zugversuche an verklebten Gewebestreifen wurden als quasistatische Versuche durchgeführt, sodass die Belastung der Proben stoßfrei und mit konstanter Zuggeschwindigkeit bis zum Versagen des Gewebes bzw. der eingebrachten Verklebungen erfolgte. Die Versuche dienten einem ersten Vergleich von Verklebungstechniken und Klebstoffen in quantifizierbaren Größen. Dabei erfolgte vornehmlich die Beurteilung des Adhäsions- und Bruchverhaltens. Innerhalb der uniaxialen Versuche wurde dabei eine möglichst hohe Vergleichbarkeit aller Parameter angestrebt.

Probenvorbereitung, Versuchsdurchführung und -auswertung erfolgten bei Normalklima [Anm. 3]. Die genaue Probenherstellung und -verklebung für die betrachteten Gewebestreifen (vgl. Abb. 5.01) ist im Anhang unter B.1 und B.2 dokumentiert. Details zu den verschiedenen Testgeweben finden sich unter C.1. Die Zugprüfungen erfolgten mittels Zwick Universalprüfmaschine (Abb. 5.02).

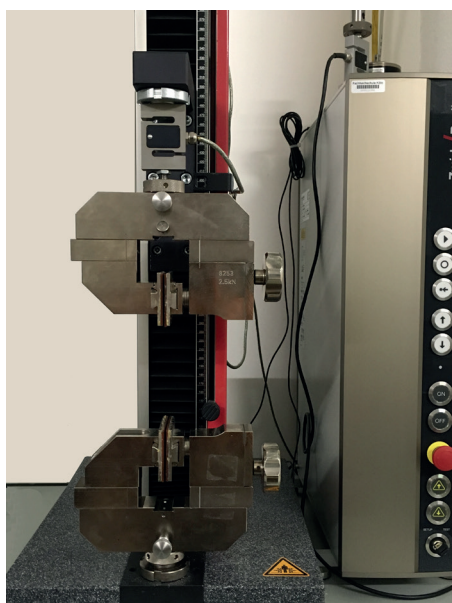
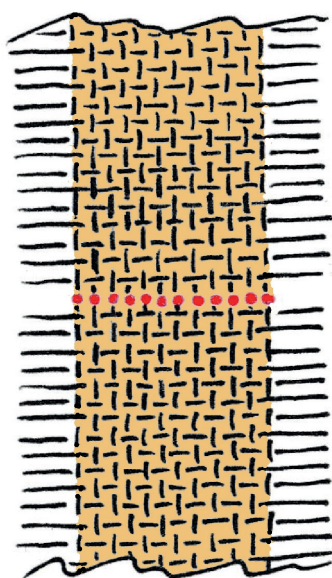


Abb. 5.01-02: Schematische Darstellung eines Streifenprobe mit Einzelfadenverklebung sowie genutzte Zugprüfmaschine in der Gesamtansicht.

Zur Auswertung wurden die gemessene Höchstzugkraft sowie technische Dehnung bei Höchstzugkraft entsprechend der Messkurven herangezogen. Je nach Testreihe erfolgte u.a. die Ermittlung zusätzlicher Sekantenmodule oder Dehnungs-Bezugswerte. Für alle Messwerte wurde zudem eine entsprechende Statistik festgehalten (vgl. Kap. 3.3).

5.1.1 Versuchsreproduktion und -validierung

Die Versuchsvorbereitung und -durchführung der ersten Validierungsversuche erfolgte in direkter Nachstellung der initialen Versuche (vgl. FLOCK 2014). Geprüft wurden unbeschichtete Gewebestreifen des Typs *I. Sironi* als intakte Referenzen und auf voller Breite verklebte Proben. Zur Verklebung wurden die sich in den vorangegangenen Versuchen als am vielversprechendsten erwiesenen Klebstoffe ausgewählt. Betrachtet wurden Verklebungen in den Verklebungstechniken Stoß-auf-Stoß (SAS), Stoß-auf-Stoß mit zusätzlicher Fadenbrücke (SAS+B), überlappend (Ü) sowie überlappend-vermenget (Ü+V), (vgl. B.1 und B.2). Es wurde eine erhöhte Gesamtprobenanzahl geprüft, mit mind. 10 Proben je Einzelkonfiguration und in teils mehrfacher Wiederholung der Prüfungen (vgl. A.1.1).

Im Zuge auftretender Schwierigkeiten in der Reproduktion von Messergebnissen schlossen sich spezielle Betrachtungen zur Fehleranalyse und Probengeometrie an.²

Mit Blick auf die praktische Anwendung der Klebstoffe durch Restauratoren unterschiedlichen Erfahrungshintergrunds erfolgte ergänzend die anonymisierte Einzelfadenverklebung von Gewebestreifen durch acht Testpersonen mit ausgewählten Klebemitteln. Auf diese Weise sollte exemplarisch beleuchtet werden, inwiefern die im Rahmen dieser Arbeit präsentierten Werte als repräsentativ angenommen werden können. [Anm. 4]

Die nachfolgenden Bilder zeigen exemplarisch das typische Probenverhalten während der uniaxialen Zugprüfung von Referenzproben und unterschiedlichen Verklebungstechniken im unbeschichteten Testgewebe *I. Sironi*. Die letzte Abbildung (von li. nach re.) zeigt je die Proben bei Versagen gemäß per genutzter Software definierter Brucherkennung als 50 % Kraftabfall (Abb. 5.03-14):

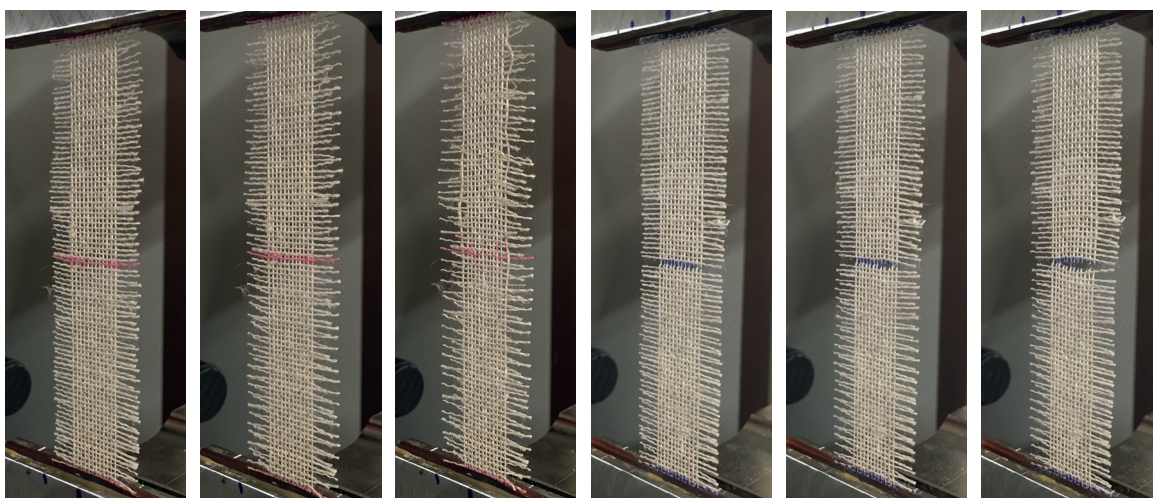


Abb. 5.03-05: Intakte **Referenz** Typ Sironi.

Abb. 5.06-08: Stoß-auf-Stoß-Verklebung (SAS).

² Vgl. FLOCK et al. 2020 (a).

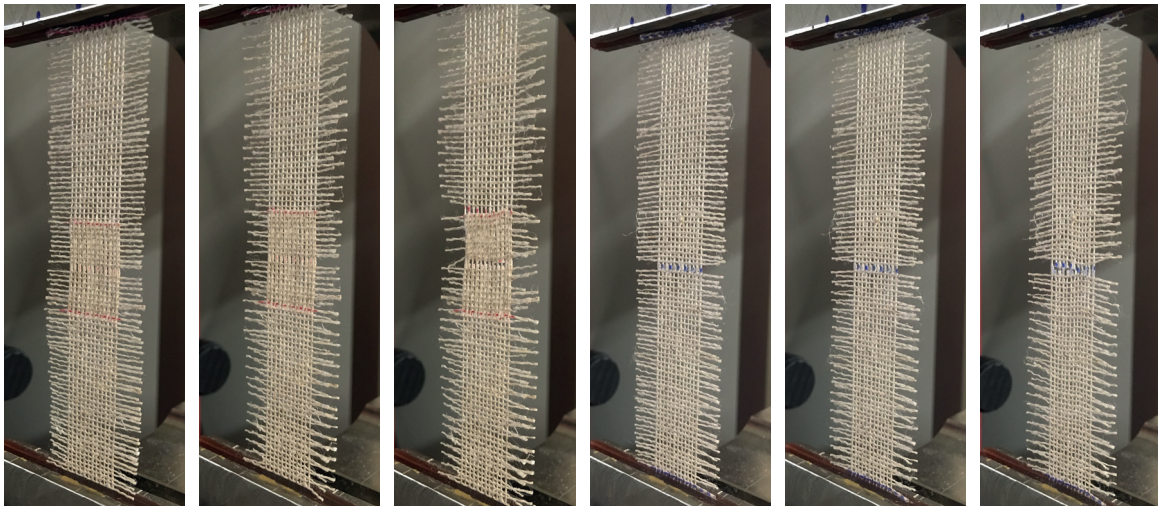


Abb. 5.09-11: Stoß-auf-Stoß-Verklebung mit Fadenbrücken (SAS+B).

Abb. 5.12-14: Überlappende Verklebung mit vermengten Fadenenden (Ü+V).

5.1.2 Gewebe mit Beschichtung

Die Übertragung der Verklebungstechnik in beschichtete Gewebe diente der ersten Annäherung an den tatsächlichen Gemäldeaufbau (vgl. Kap. 3.1.2). Es erfolgte zunächst die Fortführung des uniaxialen Kurzzetaufbaus zur Herstellung direkter Bezüge.

Bedingt durch die aufliegende Beschichtung kommt es zu einer erschwerten Benetzung der vollständigen Fadenquerschnitte im Zuge der Verklebung. Ziel war daher auch zu überprüfen, inwiefern ggf. mit einer Abnahme der bisher ermittelten Verklebungsfestigkeiten bei Verklebung im Gemälde zu rechnen ist. Gleichzeitig war ein homogenisierender Effekt auf das Gewebe und dessen Einzelfadenverklebungen durch eine aufliegende Schicht denkbar.

Unbeschichtete Gewebe stellen sich in der Prüfung als weitaus dehnbarer dar, als es nach der Beschichtung wie an einem Gemälde der Fall ist. Dies bewirkt, dass auch verklebte Proben in der Dehnungsermittlung stark von den (unbeschichteten) Gewebeeigenschaften dominiert werden. Es wurde daher erhofft, dass mit versteifender Beschichtung des Gewebes das Verhalten der Klebefuge im einfachen Zugversuch besser abgrenzbar ist.

Dazu wurde abweichend zu den vorhergehenden Versuchen (vgl. Kap. 5.1.1) eine leicht erhöhte Vorkraft eingeführt, da der zuvor gewählte Wert zu niedrig war, um die Proben hinreichend vergleichbar auszurichten. Während dies auf die Vergleichbarkeit der Höchstzugkräfte bislang keinen Einfluss nahm, wurde nun angestrebt, gezielt den Steigungsverlauf der ermittelten Kraft-Dehnungs-Diagramme sowie die Dehnungswerte besser untereinander vergleichen zu können. [Anm. 5]

Als abweichend zu den ersten Versuchen erfolgte mit diesem Versuchsaufbau somit die erwähnte Einführung der erhöhten Vorkraft, d.h. auch für zeitlich nachfolgende Betrachtungen. Auch die definierte Klebstoffmenge je Faden wurde modifiziert; weitere Proben- und Versuchsparameter wurden übernommen (vgl. A.1.3). [Anm. 6]

Ausgehend von Vorversuchen wurde ein weiteres Testgewebe ausgewählt, das eine dem bisherigen Testgewebe 1. *Sironi* möglichst ähnliche Struktur und Eigenschaften aufweisen, jedoch im Gegensatz zu diesem bereits industriell vorgründet erhältlich sein sollte. In den zugehörigen Vorversuchen hatte sich dargestellt, dass die eigene Beschichtung der Probekörper keine befriedigende Option für weiterführende Versuche darstellte. [Anm. 7]

Nach umfangreicher Recherche erwies sich das Testgewebe 2. *Claessens 070* als am geeignetsten; als weitere Testgewebe wurden daher dessen beschichtete Varianten 3. *Claessens 170* mit Acrylgrundierung sowie 4. *Claessens 70* mit Ölgrundierung ausgewählt (vgl. C.1). Als Referenzproben der vier Testgewebe wurden Streifen in Schuss- und Kettrichtung von üblicher, als auch Streifen doppelter Fadenanzahl der Schussrichtung geprüft. So erfolgte die beispielhafte Abbildung der anisotropen Eigenschaften sowie maßstäblichen Zusammenhänge in Ausblick auf weitere Versuche mit den vier Testgeweben. Die Verklebungen wurden mit einer nochmals reduzierten Klebstoffauswahl (vgl. Kap. 5.1.1) und aufgrund der Beschichtung zunächst nur in Stoß-auf-Stoß-Technik umgesetzt (vgl. B.1 und B.2).

Die nachfolgenden Abbildungen stellen exemplarisch das von den unbeschichteten Geweben abweichende, typische Probenverhalten beschichteter Gewebe im uniaxialen Zugversuch dar. Am Beispiel des Testgewebes 3. *Claessens 170* zeigen sich abrupter Riss und Klebungsöffnung für Referenz und Stoß-auf-Stoß-Verklebung (vgl. Abb. 5.15-20):



Abb. 5.15-17: Intakte **Referenz** Typ C 170.

Abb. 5.18-20: Stoß-auf-Stoß-Verklebung (SAS).

5.1.3 Erweiterte Klebstoffauswahl

Die Betrachtung der erweiterten Klebstoffauswahl strebte eine erste Evaluierung möglicherweise geeigneter Klebstoffalternativen an. Zu diesem Zweck erschien eine uniaxiale Betrachtung in unbeschichteten Gewebestrukturen zunächst als hinreichend, da wie zuvor ein erster Klebstoffvergleich erfolgen sollte. Potentiell unzureichende oder vielversprechende Adhäsion zwischen Substrat und Klebstoff ließen sich so bereits ablesen.

Die Versuchsreihe wurde in Bezugnahme auf die Validierungsversuche (vgl. Kap. 5.1.1 / A.1.1) noch um die Sonderbetrachtung von Fadenbrücken ergänzt, da im vorausgehenden Versuchsaufbau lediglich eine Standardlänge betrachtet und diese zudem nur in Kombination mit der Stoß-auf-Stoß-Verklebung getestet wurde. Zur verbesserten Differenzierung und Parameter-Identifikation wurden nun ergänzend auch Schnitte in Stoß-auf-Stoß-Position lediglich mit Fadenbrücken verbunden und evaluiert. Hintergrund war die gezielte Überprüfung der modellhaften Parallelschaltung (vgl. Kap. 3.3.3); so sollte sich im besten Fall die konkrete Festigkeitssteigerung für bekannte Verklebungsfestigkeiten mittels Fadenbrücke voraussagen lassen können. Gleichsam wurden Brücken unterschiedlicher Länge betrachtet, um erste Rückschlüsse auf eine erforderliche Mindestlänge hinsichtlich der gewünschten Festigkeitssteigerung ziehen zu können (vgl. A.1.4).

Des Weiteren erfolgte vergleichend zum bisherigen Klebemittel der Fadenbrücken auch hier die Betrachtung eines alternativen Klebstoffs zur Applikation (vgl. Kap. 6.3.2).

Die erweiterte Klebstoffauswahl wurde ebenfalls am bisherigen Standard-Testgewebe Typ 1. *Sironi* in Stoß-auf-Stoß-Verklebungstechnik umgesetzt, um eine Vergleichbarkeit zu den Validierungsversuchen (vgl. Kap. 5.1.1) zu ermöglichen. Hier stellt sich einschränkend dar, dass sich aufgrund der Vorkrafterhöhung lediglich die gemessenen Höchstzugkräfte sinnvoll vergleichen lassen, da sich bei zuvor gewählter geringerer Vorkraft erhöhte Dehnungen durch schlaffere Ausgangsvoraussetzungen der Proben darstellen.

Es wurde zudem die Intention verfolgt, eine Evaluierung der neuen Klebstofftypen im Sinne einer Art „Mindest-Adhäsion“ durchzuführen. So wurden zunächst nur Stoß-auf-Stoß-Verklebungen umgesetzt, um anhand dessen zu beurteilen, inwiefern die Klebstoffe für aufbauende Versuche in weiteren Verklebungstechniken erwogen werden.

Da sich die Anfertigung von Verklebungen in überlappend-vermengter Technik als ungleich aufwändiger darstellt, sollte so eine Reduzierung des Arbeitsaufwands in der Probe-

körperherstellung erzielt werden. Überdies stellte sich jedoch bereits in den zugrundeliegenden Versuchen dar, dass die Auswahl des Klebstoffs prinzipiell entsprechend der Füge-technik erfolgen sollte.³ Ausgehend von der Motivation der konkreten Klebstoffauswahl erfolgte daher mitunter auch bereits die Prüfung der Verklebungen in weiteren Testgeweben sowie in überlappend-vermengter Verklebungstechnik (vgl. A.1.5).

5.1.4 Sonderbetrachtungen

Anhand exemplarischer Sonderbetrachtungen wurden gezielt die bisherigen Prüfparameter hinterfragt und Überlegungen bezüglich zu modifizierender Prüfoptionen unternommen:

Einspannlänge

Mit der bisher gewählten Einspannlänge von 100 mm in den genannten Versuchen war eine Reduzierung der gemäß Textilprüfungsnorm genannten Prüflänge von 200 mm zur Drosselung des Materialaufwands und Probenzuschnitts erfolgt.⁴ Als Nachteil kann sich ergeben, dass erst bei Prüfung entsprechender Fadenlängen gewährleistet ist, die unterschiedlichen Längen der Einzelfasern des Garns abzubilden. Je kürzer die Einspannlänge, desto eher werden nur durchlaufende Fasern belastet, umso zugfester wird sich die Probe ggf. darstellen. Dies birgt die Gefahr, die eigentlichen Schwachstellen des Materials nicht mit abzubilden. Speziell vor dem Hintergrund des Anforderungsprofils an die Verklebung ist jedoch die Kohäsion des verklebten Gewebes maßgeblich für die Beurteilung der Verklebungsfestigkeit (vgl. Kap. 4.1). Andererseits birgt die Prüfung verkürzter Einspannlängen unter Umständen die Chance, eine dominante Gewebedehnung zu reduzieren und so besser die Verklebungen selbst beurteilen zu können.

Daher wurden die vier Testgewebe zudem in unterschiedlichen Einspannlängen betrachtet, teils exemplarisch mit zusätzlicher Stoß-auf-Stoß-Verklebung (vgl. A.1.6). [Anm. 8]

Ratenabhängigkeit

Für den Streifenzugversuch von Textilien wird des Weiteren eine Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min für Dehnungen < 8 % angegeben, weshalb zunächst diese Prüfgeschwindigkeit im Rahmen der zugrundeliegenden Versuchsreihen gewählt wurde.⁵ Vor dem Hintergrund der viskosen Eigenschaftsanteile der geprüften Materialien (vgl. Kap. 3.3.2) bei späterer

³ Vgl. FLOCK 2014, S. 133 f.

⁴ Vgl. DIN EN ISO 13934-1, S. 9.

⁵ Vgl. DIN EN ISO 13934-1, S. 9; FLOCK 2014, S. 603.

Klebstoffanwendung im gespannten Gemälde erscheint diese Zuggeschwindigkeit jedoch als vergleichsweise hoch gewählt. Aufgrund der geschwindigkeitsabhängigen Eigenschaften besteht die Gefahr, dass sich potentiell ungünstige Verklebungseigenschaften durch die gewählte Prüfungsführung nicht darstellen. Daher wurden exemplarische Versuche in unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten an den vier Testgeweben durchgeführt, auch hier teils mit exemplarischer Stoß-auf-Stoß-Verklebung (vgl. A.1.7).

Zyklische Belastung

Im Hinblick auf die angestrebte Umsetzung von Langzeitversuchen wurden zudem zyklische Versuche zwischen festgelegten Kraftgrenzen vorgenommen, um exemplarisch zu beleuchten, wie die Gewebe auf wiederholte Belastung unterschiedlichen Ausmaßes reagieren. Dabei liegt zudem der Gedanke nahe, auch eine etwaige Schwächung der Verklebung durch zyklische Be- und Entlastung zu berücksichtigen. Beispielhaft wurden daher die vier Testgewebe mit und ohne exemplarischer Stoß-auf-Stoß-Verklebung zyklisch vorbelastet und nach 24 Std. Ruhezeit im uniaxialen Zugversuch betrachtet (vgl. A.1.8).

Mischbetrachtung intakter und verklebter Fäden

Die gleichzeitige Prüfung intakter und verklebter Fäden stellt sich in der Kurzzeitprüfung mittels herkömmlicher Zugprüfmaschine als ungünstig dar, da je nach Probengeometrie und Anzahl verklebter Fäden keine (verlässliche) Klebungsöffnung durch entweder Kraftabfall oder Dehnungssprung (\sim konstante Kraft bei Wegzunahme) definiert werden kann. Hinzu kommt die Messung gemischter Parameter in der Aufzeichnung von Kraft und technischer Dehnung.⁶

Eine solche Mischsituation liegt jedoch in Gemälden in der Regel vor. Die gezielte Probenbeobachtung mittels bildgebender Verfahren während der Prüfung bietet die Möglichkeit, nicht nur die Klebestellen in entsprechender Auflösung zu beobachten, sondern die Dehnungen der Probe lokal auszuwerten. Es erfolgte daher eine erste parallele Prüfung intakter und verklebter Fäden im unbeschichteten Gewebestreifen Typ *1. Sironi* mittels alternativem Zugversuchsaufbau unter Nutzung der digitalen Bildkorrelation (DIC) zur Dehnungsauswertung (vgl. Kap. 5.2). Dabei wurden unterschiedliche verklebte Fadenanzahlen und Verteilungen über die Probenbreite betrachtet. Ziel war die exemplarische Überprüfung, inwiefern sich die Verklebungsfestigkeiten bei modellhaft paralleler Schaltung mit intakten Fäden möglicherweise verändert darstellen (vgl. Kap. 3.3.3).

⁶ Vgl. REUBER 2010, S. 85 ff.

5.2 Biaxiale Kurzzeitversuche

Die biaxialen Kurzzeit-Zugversuche an verklebten Gewebekreuzproben erfolgten in direkter Bezugnahme auf die initialen Versuche (vgl. FLOCK 2014) und uniaxialen Zugversuche an Gewebestreifen (Kap. 5.1). Neben dem auch hier angestrebten allgemeinen Vergleich von Verklebungstechniken und Klebstoffen stellte sich insbesondere die Fragen nach der Beeinflussung des Adhäsions-, Bruch- und Dehnungsverhaltens der Verklebungen im Schussystem durch den gleichzeitig orthogonal verlaufenden Zug in Kettrichtung, wie es auch am aufgespannten Gemälde der Fall ist.

Die Versuche erfolgten unter den gleichen Voraussetzungen wie unter Kap. 5.1 dargestellt. Wesentlicher Unterschied bestand in der veränderten Probengeometrie, wobei sich der Zugschnitt unmittelbar an der Geometrie der uniaxialen Gewebestreifen orientierte (Abb. 5.21). So wiesen die Proben zwar einen biaxialen Mittelbereich auf, die vier Kreuzarme entsprachen jedoch den uniaxialen Streifen. Die Dokumentation der Probenherstellung und -verklebung aus den Testgeweben (C.1) findet sich im Anhang unter B.1 und B.2.

Die äquibiaxialen Zugprüfungen erfolgten mit vergleichbaren Parametern entsprechend an einem biaxialen Zugversuchsstand⁷ (Abb. 5.22).

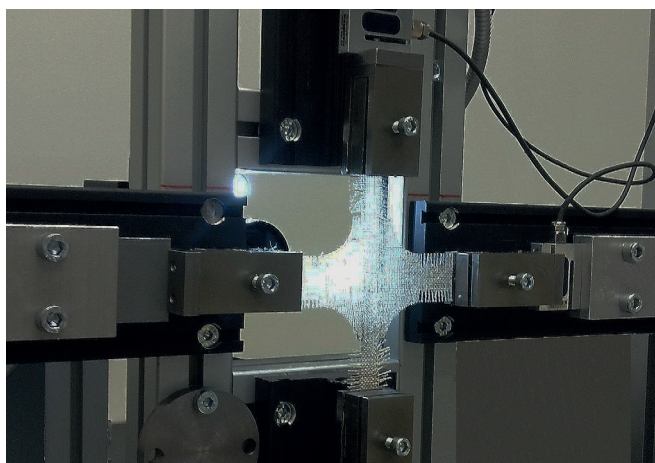
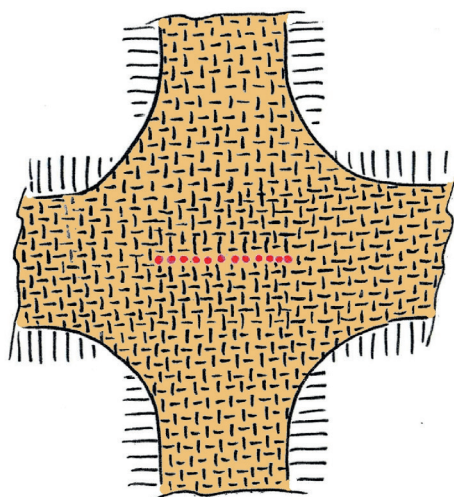


Abb. 5.21-22: Schematische Darstellung eines Gewebekreuzprobe mit Einzelfadenverklebung sowie Ausschnitt des genutzten Biax-Versuchsstands mit eingespannter Probe.

Zur Auswertung wurden jeweils die gemessene Höchstzugkraft sowie die ermittelte Dehnung bei Höchstzugkraft in beiden Probenachsen herangezogen (y: Schuss, x: Kette).

⁷ Siehe auch SEIBERT 2017, S. 71; SPEICHER 2009; SPEICHER 2010.

Abweichend zu den uniaxialen Versuchsreihen erfolgte die Dehnungsermittlung via digitaler Bildkorrelation (DIC). Es sollen daher kurz deren Hintergründe erläutert werden.

Digitale Bildkorrelation (DIC)

Die DIC ermöglicht die berührungslose, optische Deformationsmessung durch Nutzung bildgebender Verfahren während der Prüfungsdurchführung. Stark verkürzt gesagt, findet ein Vergleich während des Versuchs aufgezeichneter Foto-Bilddaten statt. Durch stochastische (\sim zufällige) Muster der Probenoberfläche lässt sich anhand der Musterbewegung auf das Verformungsverhalten der Probe schließen. Dazu findet der Abgleich von Ausschnitten der unterteilten Bildebene durch Algorithmen statt, sodass die Bewegungen entsprechend der widerfahrenen Verschiebungen und Verzerrungen nachvollzogen werden (Abb. 5.23).

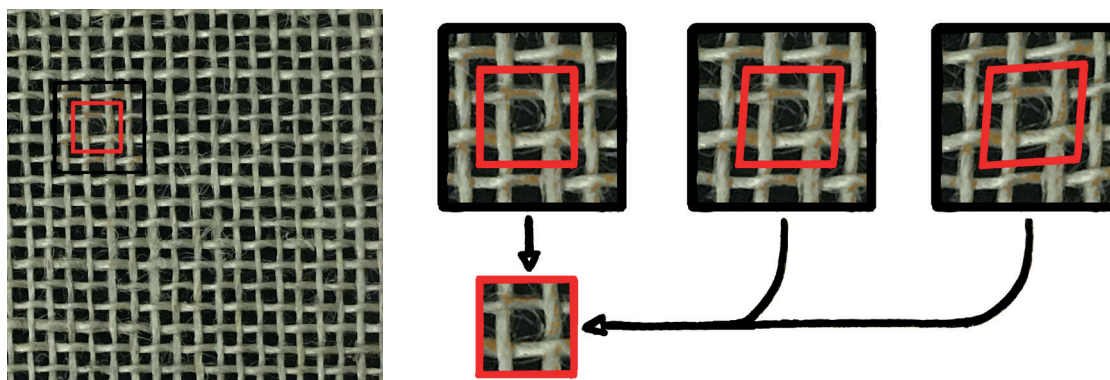


Abb. 5.23: Vereinfacht illustriertes Prinzip der zur Dehnungsermittlung genutzten digitalen Bildkorrelation am Gewebebeispiel (angelehnt an SCHEFFER 2016, S. 60).

So können aus den Pixelkoordinaten letztlich auch die Dehnungen berechnet werden. Dies kann entweder in Bezugnahme auf das erste Referenzbild, als auch auf das jeweils vorhergehende Bild als sogenannte incremental correlation (\sim schrittweise erhöhte Beziehung) erfolgen. Auf diese Weise lassen sich die wahren Dehnungen der betrachteten Probenbereiche im Unterschied zur technischen Dehnung individuell ermitteln, sodass auch mehrachsigen Spannungszuständen Rechnung getragen werden kann.⁸ [Anm. 9]

Im Gegensatz zur Dehnungsermittlung via Wegänderung (technische Dehnung) bleibt so bei optischer Auswertung des biaxialen Mittelbereichs die erhöhte Dehnung in den uniaxialen „Armen“ der Gewebekreuzproben unberücksichtigt.

In Abb. 5.24-29 ist exemplarisch eine Dehnungsentwicklung zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Prüfung zu sehen; für beide Achsen ausgewertet wurde immer nur der biaxial zugbelastete Bereich, d.h. das mittige Quadrat von 12 x 12 Fäden im Zentrum der Probe.

⁸ Siehe auch SUTTON et al. 2000; GIACHETTI 2000; SUTTON et al. 2009; YONEYAMA 2016.

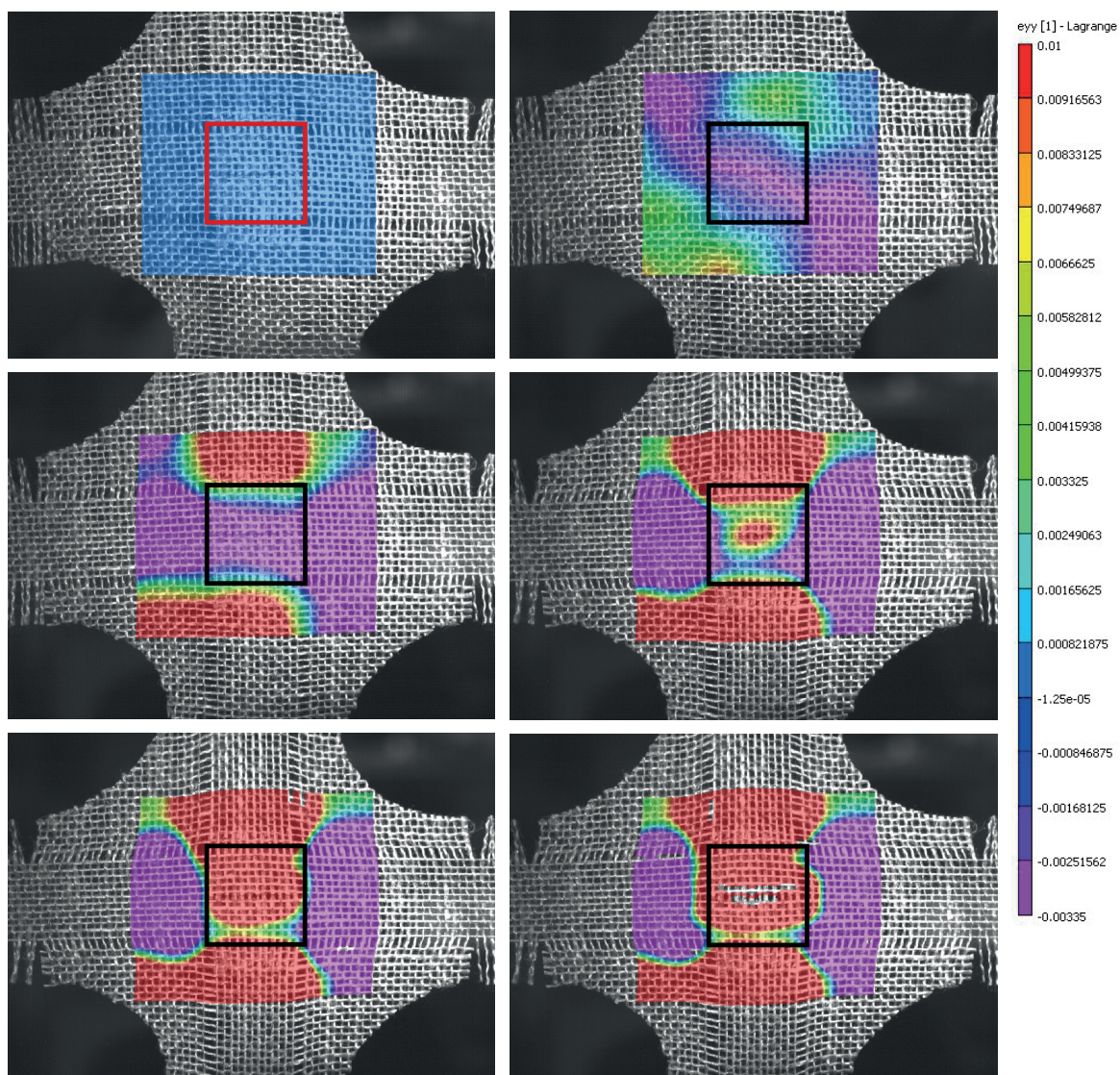


Abb. 5.24-29: Exemplarische Auswertung der Dehnung (Lagrange) in Schussrichtung (y-Achse) zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Prüfung.⁹

Der Mittelbereich der Proben dehnt sich im Vergleich zu den vertikal angrenzenden, uniaxial belasteten Probenarmen der Schussrichtung zunächst weniger stark in y-Richtung. Vielmehr ist dort (wie logischerweise in den horizontal angrenzenden, uniaxialen Probenarmen der Kettrichtung) bei Auswertung der vertikalen Dehnung mitunter zunächst eine leichte Stauchung durch den Querkzug zu erkennen; dies begründet die teilweise zunächst geringfügig negative Dehnung in den zugehörigen Messkurven (vgl. A.2.1). Teils zeigt sich bereits früh im Bereich der Verklebung lokal eine Dehnungserhöhung in Schussrichtung im Versuch. Nach Öffnung der Verklebung ist das Muster der Probe so nachhaltig gestört, dass keine Auswertung des Klebungsbereichs mehr erfolgen kann.

⁹ Vgl. FLOCK 2014, S. 613 ff.

5.2.1 Versuchsreproduktion und -validierung

Wie bereits im uniaxialen Fall erfolgten die biaxialen Prüfungen zur Validierung der initialen Versuche.¹⁰ Versuchsvorbereitung und -durchführung wurden unmittelbar reproduziert, sodass unbeschichtete Gewebekreuzproben des Typs *1. Sironi* in Form intakter Referenzen und verklebter Proben geprüft wurden.

Zur Verklebung wurde eine reduzierte Auswahl der Klebstoffe aus den uniaxialen Bezugsversuchen betrachtet (vgl. Kap. 5.1.1). Je nach Klebstoff fanden Verklebungen in den Verklebungstechniken Stoß-auf-Stoß (SAS), Stoß-auf-Stoß mit zusätzlicher Fadenbrücke (SAS+B), überlappend (Ü) sowie überlappend-vermengt (Ü+V) statt.

Teils wurde eine erhöhte Gesamtprobenanzahl betrachtet, wobei immer mindestens 10 Proben je Einzelkonfiguration geprüft wurden (vgl. A.2.1).

5.2.2 Gewebe mit Beschichtung

In Fortführung der Übertragung der Verklebungen in beschichtete Gewebe wurden auch die Möglichkeiten der biaxialen Kurzzeit-Zugprüfung in erneuter Bezugnahme auf die uniaxialen Zugversuche betrachtet (vgl. Kap. 5.1.2).

Im Zuge dessen erfolgte eine Reduzierung der Einspannlänge in den zwei Kreuzprobenachsen, da diese in Anlehnung an die uniaxialen Gewebestreifen zunächst bei den unbeschichteten Proben sehr hoch gewählt worden war. Im Hinblick auf die gewünschte biaxiale Evaluierung des Mittelbereichs der Proben bergen jedoch die abweichend hohen Dehnungen der uniaxialen Arme der Kreuzproben keine Vorzüge. In Vorversuchen zeigte sich, dass zwar im unbeschichteten Gewebe die gespannten Fäden von Referenzproben auf verschiedenen Höhen der Gesamtlänge rissen, an beschichteten Referenzproben trat das Probenversagen jedoch ausschließlich in den uniaxialen Armlängen auf (Abb. 5.30-31).

Vor diesem Hintergrund lag somit die Überlegung nahe, die biaxialen Proben so zu modifizieren, dass der zentrale Mittelbereich von 12 x 12 Fäden die Schwachstelle bildet. Daher wurde die gezielte Aufdoppelung der Probenarme (Abb. 5.32-33) als weitere Möglichkeit der Probekörpermodifikation betrachtet (vgl. B.1). Ziel war so auch eine verbesserte Auswertbarkeit einzufügender Einzelfadenverklebungen zu ermöglichen, da die flächig aufliegende Beschichtung dies erschwerte (vgl. Kap. 7.3.2).

¹⁰ Vgl. FLOCK 2014.

Letztlich erfolgte eine erste vergleichende Prüfung von Kreuzproben der zwei Testgewebe 2. *Claessens 070* (unbeschichtet) sowie 3. *Claessens 170* (acrylgrundiert), (vgl. Kap. 5.1.2 und C.1), jeweils sowohl als Referenzproben und mit exemplarischer Stoß-auf-Stoß-Verklebung. Hinzu kamen die normalen und aufgedoppelten Varianten (vgl. A.2.3). [Anm. 10]

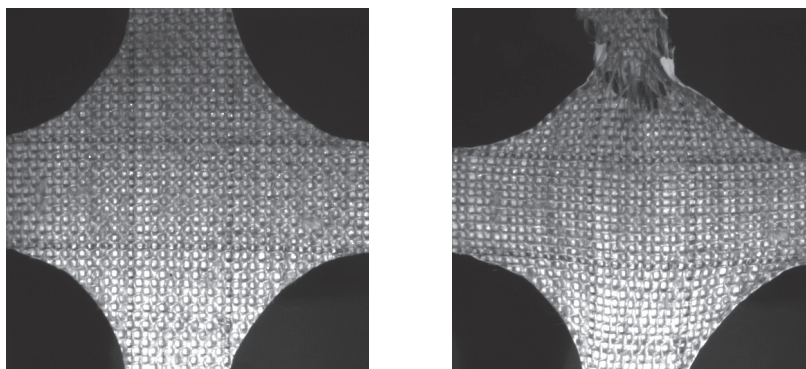


Abb. 5.30-31: Beschichtete Gewebekreuzprobe ohne Aufdoppelung im biaxialen Zugversuch; der Riss tritt an der am Übergang zum uniaxialen Probenarm ein.

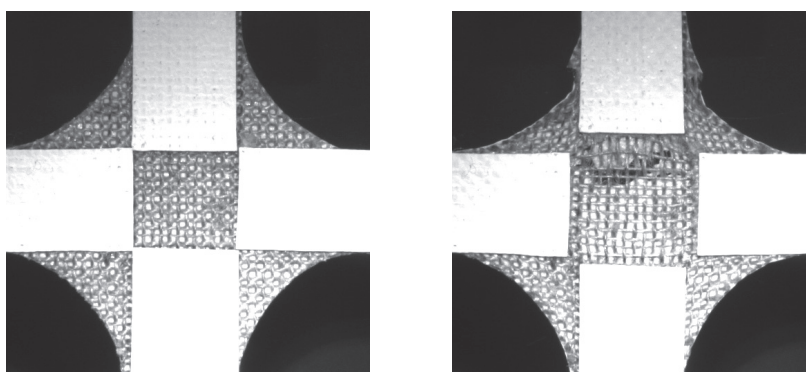


Abb. 5.32-33: Beschichtete Gewebekreuzprobe mit Aufdoppelung im biaxialen Zugversuch; der Riss tritt nun im biaxialen Zentrum auf.

5.2.3 Sonderbetrachtungen

Auch im Zuge der biaxialen Zugversuche wurden beispielhafte Sonderbetrachtungen angestellt, um die anschließenden Langzeitversuche vorzubereiten:

Mischbetrachtung intakter und verklebter Fäden

Im Zuge eines Langzeitaufbaus zur Annäherung an die Einzelfadenverklebung im Gemälde ist wie bereits erwähnt die Evaluierung der Verklebung in Umgebung intakten Gewebematerials erforderlich. Es erfolgte daher ebenfalls eine erste parallele Prüfung intakter und verklebter Fäden in unbeschichteten Gewebekreuzproben (vgl. Kap. 5.1.4), auch hier mit dem Ziel der Überprüfung ggf. veränderter Verklebungseigenschaften (vgl. B.2.2).

Dehnungsevaluierung

Im Zuge der biaxialen Versuche stellte sich zudem die Frage, inwiefern die DIC eine zuverlässige Dehnungsevaluierung anhand der Geweboberfläche ermöglicht. Das Verfahren ist nicht nur stark von der (gleichbleibenden) Bildqualität abhängig, sondern u.a. insbesondere auch von dem sich auf der Probe befindlichen, notwendiger Weise nicht zu regelmäßigen Muster (vgl. Abb. 5.23).¹¹

Im Falle der vorliegenden Gewebeproben diente auflösungsbedingt vermutlich weniger die feine Fleckung der Fäden, als vielmehr die Gewebestruktur selbst als Muster. Fraglich war, inwiefern die DIC es vermag, (ausschließlich) anhand der sichtbaren Gewebestruktur aus sich überlappenden Fäden und daraus folgenden Bindungspunkten eine valide Dehnung zu ermitteln, da sich das Muster der Bindungspunkte höchstwahrscheinlich nicht unmittelbar synchron zur Dehnung verändert. So könnten durch das Übereinandergleiten der Fadensysteme (bei zunächst ähnlichen Abständen der Bindungspunkte) geringere als tatsächliche Dehnungen bei Nutzung der DIC resultieren.

Um der Frage nachzugehen, ob sich das von den Fäden gebildete Gewebemuster zur Ermittlung der Verschiebungen eignet oder sich gezielt optimieren lässt, wurden intakte Gewebekreuzproben der Testgewebe 2. *Claessens 070* (unbeschichtet) und 3. *Claessens 170* (acrylgrundiert) jeweils auf halber Fläche des auszuwertenden Mittelfelds mit sichtbarem, opaken Zusatzmuster versehen, während die andere Hälfte zwecks Vergleichbarkeit transparent behandelt wurde (vgl. Abb. 5.34-35). [Anm. 11]

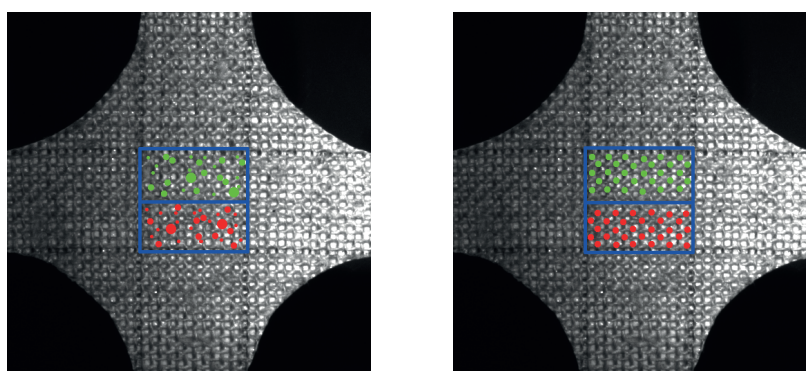


Abb. 5.34-35: Schema zusätzlich aufgebrachten Speckle- und Punktemusters auf der Probe.

Im Rahmen der anschließenden Dehnungsauswertung erfolgte zudem die Überprüfung der bisherigen Auswertungsparameter der genutzten Software (vgl. A.2.4). [Anm. 12]

¹¹ Vgl. SEIBERT 2017, S. 59 f; LECOMPTE et al. 2006. Siehe u.a. SEIBERT et al. 2014; WANG et al. 2007; YAOFENG, PANG 2007; PAN et al. 2008; PATTERSON et al. 2006; SCHREIER, SUTTON 2002.

5.3 Biaxiale Langzeitversuche

Einen wesentlichen Punkt stellte die Neukonzeption eines geeigneten Langzeitaufbaus im Hinblick auf den Anwendungsfall am realen Gemälde dar. Während bei den unter Kap. 5.1 und 5.2 aufgeführten Versuchsreihen im Grunde auf die bereits zuvor genutzten Möglichkeiten der uni- und biaxialen Kurzzeitprüfung zurückgegriffen wurde, existierte noch kein geeigneter Prüfaufbau zur Einzelfadenverklebungsevaluierung in der Langzeitprüfung.

Prinzipiell bieten sich zwei Grundkonzepte für den zeitabhängigen Versuchsaufbau an:

- Relaxationsversuch:
Spannungsabfall bei konstanter Fixierung (\sim Dehnung) des Gemäldes.
- Retardationsversuch (Kriechversuch):
Dehnungszunahme bei konstanter Belastung (\sim Spannung) des Gemäldes.

Ein Relaxationsversuch erscheint für die Evaluierung von Verklebungen im textilen Bildträger weniger zielführend. Zunächst mag dieser Aufbau näher am Anwendungsfall erscheinen, trotz potentiellen Spannungsabfalls bei konstanter Fixierung können sich jedoch andauernd hohe Spannungen am Gemälde besonders kritisch hinsichtlich eingebrachter Einzelfadenverklebungen auswirken. Dies ist beispielsweise der Fall an weniger stark relaxierenden Bildträgern, durch gewichtsbedingt konstanten Zug, durch klimatisch bedingte (wiederholte) Spannungssteigerung sowie auch durch (häufiges) Nachspannen im Falle bereits erfolgter Relaxation am aufgespannten Gemälde (vgl. Kap. 3.1.3).

Hinzu kommt die vergleichsweise einfachere Dehnungs-, als Spannungsmessung. Während Dehnungen sich durch entsprechende (optische) Verfahren unkomplizierter von außen messen lassen, würde die Spannungsmessung entsprechende Kraftaufnehmer in Reihenschaltung mit Gemälde und Fixierung erfordern. [Anm. 13]

Es wurde sich daher für die Umsetzung eines Kriechversuchs unter konstanter Last entschieden. Der neue Versuchsaufbau sollte gemäß Kap. 4.2 idealerweise eine Vielzahl an Maßgaben erfüllen, u.a. eine Imitation von gespannten Gemälden ermöglichen, seriell in ausreichender Anzahl umsetzbar sein sowie nicht zuletzt eine quantifizierbare Evaluierung des Verklebungsverhaltens ermöglichen.

Dazu wurde ein Zugrahmen mit separatem Innenrahmenaufbau entwickelt, der die konstante biaxiale Zugbelastung der Proben in der vertikalen Hängung erlaubt. Zur Dehnungsevaluierung wurde wie in den bisherigen biaxialen Kurzzeit-Versuchen die DIC genutzt.

5.3.1 Dauerstandversuch

Es existieren unterschiedliche Prüfkonzepte, anhand derer trotz prinzipiell uniaxialen Zugs durch gezielte Kraftumleitung biaxiale Spannungszustände geklemmter Proben erzielt werden. Oftmals geschieht dies aus der Motivation, durch entsprechende Einbauten biaxiale Zugversuche in uniaxialen Zugprüfmaschinen umzusetzen.¹²

Ein solcher Ansatz wurde für die entwickelten Zugrahmen aufgegriffen und angepasst: Die einzelnen Prüfraumen bestehen aus zwei rechtwinkligen Rahmenhälften. Durch das Einhängen einer Probe zwischen die Rahmenwinkel lässt sich selbige durch nach unten gerichteten Zug des unteren rechten Winkels äquibiaxial spannen. Dabei liegen die Achsen der quadratischen Probenfläche um 45° gedreht vor. Während die obere Zugrahmenhälfte der Hängung dient und fixiert wird, verbleibt die untere Rahmenhälfte frei beweglich und hat zu dieser keinen Kontakt, sodass die Probe die beiden Hälften verbindet (Abb. 5.36).

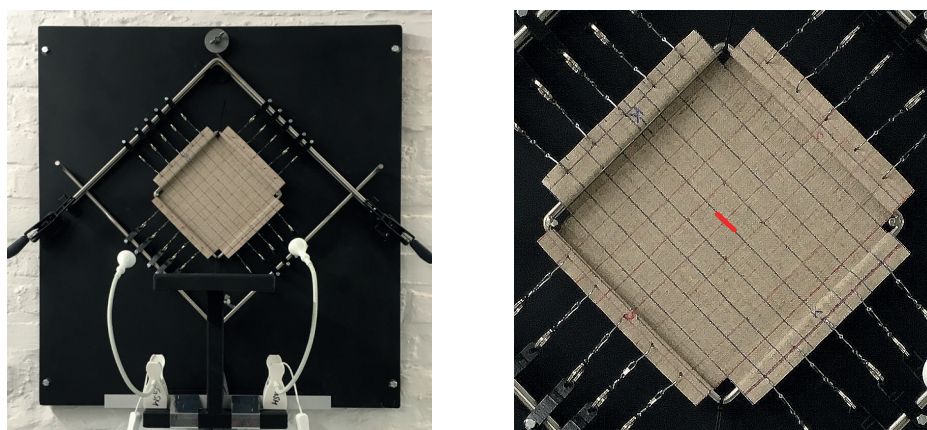


Abb. 5.36-37: Biaxialer Zugrahmen des Langzeitversuchs und Probe mit markierter Klebung.

Die beschichteten Gewebeproben des Testgewebetyps 2. *Claessens 170* wurden für den Versuch in zusätzlichen Innenrahmen positioniert. Dies diente lediglich der Kraftumleitung in der Aufspannung, es erfolgte keine feste Klemmung o.ä. der Proben. Wie im Regelfall am Gemälde sollte die Aufspannung nicht in der Bildebene liegen; durch die Linienbrechung ergibt sich eine gleichmäßigere Spannungsverteilung. Die Einspannung der „gerahmten“ Proben erfolgte mittels einzelner Haken im Gewebe. Die Haken wiederum befanden sich an beweglichen Loslagern, wodurch sich das Probengewebe frei ausrichten konnte und keine Fixierung der Gewebestruktur durch starre Klemmungen o.ä. erfuhr. [Anm. 14]

¹² Siehe u.a. BARROSO et al. 2013; SCHUBERT, HARRISON 2016; BARROSO et al. 2018.

Die Funktionsweise lässt sich im Wesentlichen anhand des Reaktionsprinzips nachvollziehen (vgl. Kap. 3.3.1). Durch Einhängen definierter Masse an den unteren Rahmenwinkel lässt sich die gewünschte Gewichtskraft einstellen. Über die Winkelbeziehungen lassen sich die wirkende Kraft [N] bzw. Linienspannung [N/m] in den um 45° gedrehten Hauptachsen (Schuss- und Kettrichtung) der Probe berechnen (Abb. 5.38).

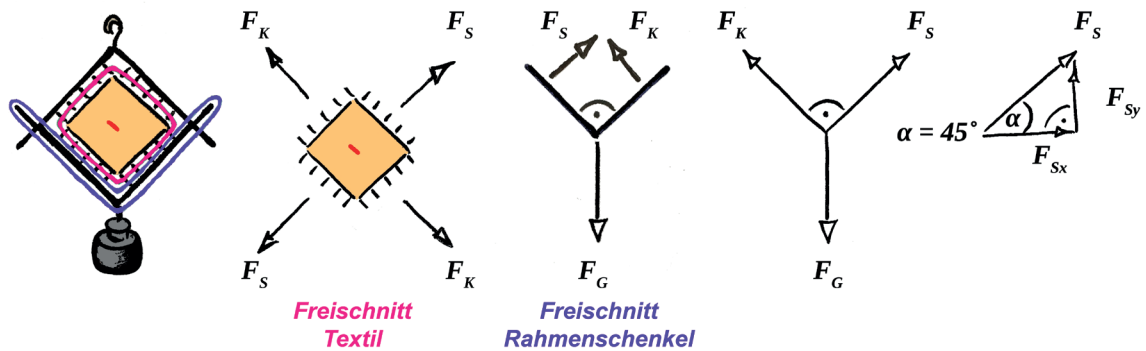


Abb. 5.38: Schematisches Funktionsprinzip des biaxialen Zugrahmens und Darstellung der zugehörigen Winkelbeziehungen.

Mit Hilfe des statischen Kräftegleichgewichts (Kap. 3, Formel 3.5) kann das System gelöst werden; dabei sind die resultierenden Kräfte F_i zuvor in ihre vertikalen F_{iy} und horizontalen F_{ix} Anteile im Sinne eines kartesischen Koordinatensystems zu zerlegen.

Aus dem Kräftegleichgewicht für das vertikale System folgt, dass die Summe aller Kräfte $\sum F_{iy}$ (5.1) gleich Null ist.

$$(5.1) \quad \sum F_{iy} = -F_G + F_{Ky} + F_{Sy} = 0$$

Aus der Symmetrie ergibt sich, dass die Kraft in Schussrichtung der Probe F_S gleich der Kraft in Kettrichtung F_K ist (5.2) und dies auch für ihre vertikalen Anteile gilt (5.3).

$$(5.2) \quad F_K = F_S = F$$

$$(5.3) \quad F_{Ky} = F_{Sy} = F_y$$

Anhand der trigonometrischen Beziehungen im Krafteck (vgl. Abb. 5.38) lässt sich der Zusammenhang zwischen den Resultierenden F_i und dem vertikalen Anteil der Kräfte in Schuss- und Kettrichtung F_{iy} darstellen (5.4).

$$(5.4) \quad F_y = F \cdot \sin(45) = F \cdot \cos(45) = F \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)$$

Durch Umformen von (5.1) unter Einsetzen von (5.3) lassen sich die vertikalen Anteile F_{iy} nach der wirkenden Gewichtskraft F_G auflösen (5.5).

$$(5.5) \quad -F_G = F_{Ky} + F_{Sy} = 2 \cdot F_y$$

Beim Einsetzen von (5.4) in (5.5) ergibt sich somit die wirkende resultierende Kraft F in Schuss- und Kettrichtung, in Abhängigkeit von der Gewichtskraft F_G (5.6).

$$(5.6) \quad -F_G = 2 \cdot F_y = 2 \cdot F \cdot \cos(45) = 2 \cdot F \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = F \cdot \sqrt{2}$$

Wenn nun eine bestimmte Hilfsspannung angestrebt wird, lässt sich das System einfach durch Einsetzen auflösen. Im Falle des vorliegenden Langzeitversuchs wurde zunächst eine Hilfsspannung von 130 N/m in Anlehnung an den MST-Wert gewählt (vgl. Kap. 3.1.3). Für die Maße der quadratischen Probenfläche im zusätzlichen Innenrahmen folgen daraus 26 N pro 20 cm (5.7).

$$(5.7) \quad F = 130 \text{ N/m} = 26 \text{ N/20 cm}$$

Ausgehend von der gewünschten resultierenden Kraft F kann anschließend die Bestimmung ihrer vertikalen Anteile F_{iy} (5.8) durch Einsetzen von (5.7) in (5.4) erfolgen.

$$(5.8) \quad F_y = F \cdot \sin(45) = 26 \text{ N} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \approx 18,39 \text{ N}$$

Mit den bekannten vertikalen Kraftanteilen der Schuss- und Kettrichtung F_{iy} (5.8) lässt sich die notwendige Gewichtskraft F_G ermitteln (5.9), indem einfach (5.8) in (5.6) eingesetzt wird.

$$(5.9) \quad -F_G = 2 \cdot F_y \approx 36,77 \text{ N}$$

Anhand der Erdbeschleunigung g (vgl. Kap. 3, Formel 3.2 und 3.3) kann so auf die erforderliche Masse m geschlossen werden (5.10).

$$(5.10) \quad m = 36,77 \text{ N} \div 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 3,75 \text{ kg}$$

Bei Festlegung des zusätzlichen Gewichts ist dabei die Gesamtsumme der nach unten wirkenden Masse zu bedenken, d.h. inklusive des unteren Rahmenwinkels und seiner Teile. Hinsichtlich der erzielten Hilfsspannung [N/m] kann zudem nur von einem näherungsweise Wert ausgegangen werden, da die Kraftumleitung durch Positionierung der Probe im inneren Rahmen nicht vollständig reibungsfrei ist; die erzielte Spannung der Probe wird also etwas geringer ausfallen als der berechnete Idealwert.

Um eine zuverlässige und fehlerfreie Dehnungsevaluierung via DIC durch Probenbeobachtung gewährleisten zu können, muss die Reproduzierbarkeit der Fotodokumentation sichergestellt werden. Neben identischen Lichtverhältnissen und Abständen der Proben zu den Kameras ist insbesondere die Wahrung identischer Winkel zwischen Kamera- und Probenebene wesentlich. Im Falle u.a. in dritter Raumdimension verkippter Probenpositionen ergeben sich leicht verfälschte Berechnungen, da so vermeintlich veränderte Abstände der 2-D-Punktkoordinaten in den Bildvergleich einfließen (vgl. Kap. 5.2).¹³ [Anm. 15]

Da sich aus logistischen Gründen kein idealer Versuchsaufbau mit konstanter Fixierung aller Prüfraumen (vgl. Abb. 5.39) unter separater Kamerabeobachtung umsetzen ließ, wurden daher sowohl ein Wechselgestell mit entsprechend standardisierter Fixierposition zur Versuchsbeobachtung der Proben des Reihenversuchs, als auch ein konstanter Idealaufbau (vgl. Abb. 5.40) zwecks Kontrollabgleich umgesetzt (vgl. B.5 / Abb. 13-15).

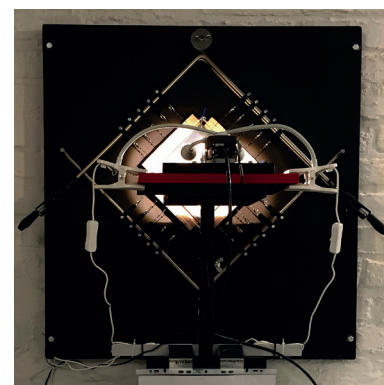
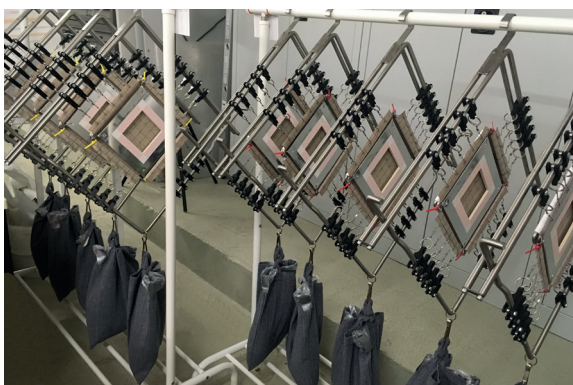


Abb. 5.39-40: Zugrahmen im Serienversuch sowie konstanter Idealaufbau mit Kamerasystem.

¹³ Vgl. SUTTON et al. 2008.

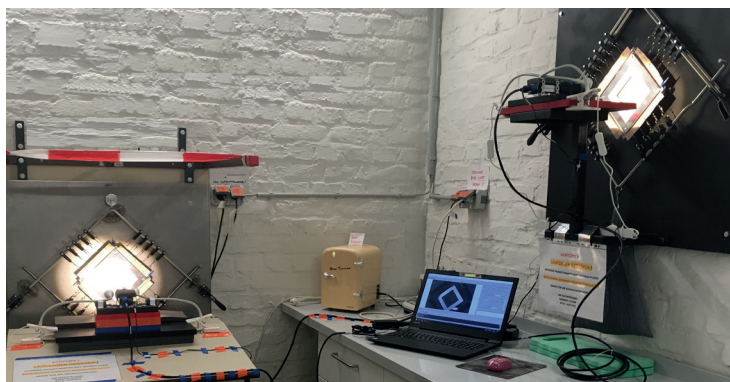


Abb. 5.41: Arbeitsfoto zur Probekörperdokumentation; links im Bild ist das Wechselgestell für den Serienversuch zu sehen, rechts der konstante Idealaufbau.

Im Versuchsaufbau wurden die Proben über einen Zeitraum von ca. drei Monaten beobachtet (vgl. Abb. 5.41). Die Probendokumentation erfolgte dabei anfangs noch mehrmals täglich, wurde dann zunächst auf Abstände von ca. 24 Std. und später bis zu 72 Std. erhöht. Dabei wurde die theoretisch wirkende Hilfsspannung durch zweimalige Erhöhung der Gewichtskraft (ca. 130 N/m; ca. 165 N/m; ca. 200 N/m) im Prüfungsverlauf gesteigert.

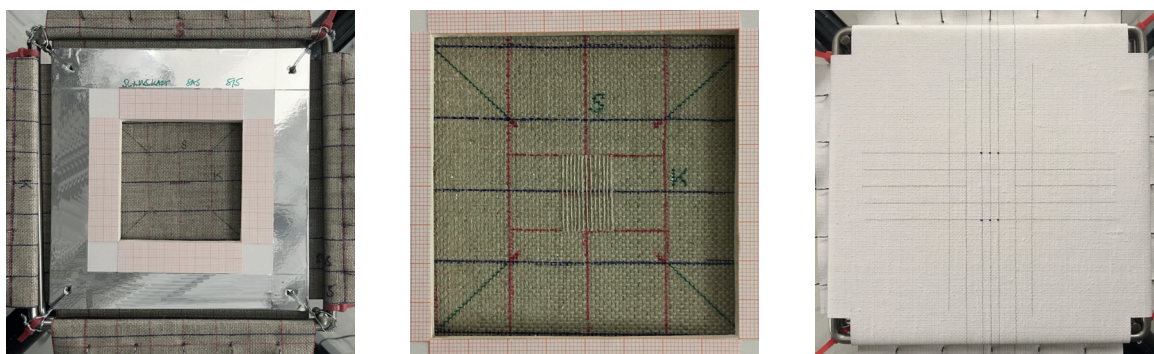


Abb. 5.42-44: Exemplarische Probenansichten; links eine Gesamtprobenansicht mit Kontroll-Inlay (vgl. B.5), mittig eine Stoß-auf-Stoß-Verklebung mit Fadenbrücken im für alle Proben je dokumentierten Bildausschnitt, rechts eine Rückseitenansicht.

In der Versuchsdurchführung erfolgte so eine erste Langzeit-Dehnungsevaluierung der Einzelfadenverklebungen von drei unterschiedlichen Klebstoffen innerhalb der beschichteten Gewebeproben (vgl. Abb. 5.42-44). Die Durchführung der Verklebungen erfolgte an Schnitten in Stoß-auf-Stoß-Technik (SAS); für einen Klebstoff erfolgte zudem die Betrachtung mit zusätzlichen Fadenbrücken (SAS+B). Je Konfiguration wurden fünf Proben angefertigt und geprüft; hinzu kam eine Referenz mit unverklebtem Schnitt. [Anm. 16]

Nähere Details zur Probekörpervorbereitung sowie dem Versuchsaufbau finden sich im Anhang unter B.1 und B.5.

5.4 Prüfübersicht

Nachfolgend sind die genannten Testreihen nochmals als verkürzte Übersicht gelistet.

Je Einzelversuch (vgl. Anhang A) werden aufgeführt:

Das geprüfte Gewebe,	1.	Sironi	unbeschichtet
	2.	C 070	unbeschichtet
	3.	C 170	acrylgrundiert
	4.	C 70	ölgrundiert
die Probenspezifikation			
	0.	Ref	intakt ohne Klebung
	I.	SAS	Stoß-auf-Stoß
	II.	SAS+B	Stoß-auf-Stoß mit Fadenbrücken
	III.	Ü	einfach überlappend
	IV.	Ü+V	überlappend-vermengt
und Art der Umsetzung.			
	A.	Vergleich	mehrere Klebstoffe
	B.	Exempel	ein Klebstoff
	<i>n</i>	Anzahl	der Probekörper je Einzelkonfiguration

Versuchstyp		Gewebe				Technik					Proben		
Uniaxial / Kurzzeit		1	2	3	4	0	I	II	III	IV	A	B	n
A.1.1	Reproduktion erster Zugversuche	x				x	x	x	x	x	x		20-60
A.1.2	Vorversuch Beschichtung	x				x							10
A.1.3	Beschichtete Proben	x	x	x	x	x	x				x		10
A.1.4	Fadenbrücken	x					x	x				x	10
A.1.5	Erweiterte Klebstoffauswahl	x	(x)	(x)			x			x	x		10
A.1.6	Exkurs Einspannlänge	x	x	x	x	x	x					x	10
A.1.7	Exkurs Ratenabhängigkeit	x	x	x	x	x	x					x	10
A.1.8	Exkurs zyklische Belastung	x	x	x	x	x	x					x	10
A.1.9	Exkurs Mischbetrachtung	x				x	x					x	5
Biaxial / Kurzzeit		1	2	3	4	0	I	II	III	IV	A	B	n
A.2.1	Reproduktion erster Zugversuche	x				x	x	x	x	x	x		10-30
A.2.2	Exkurs Mischbetrachtung	x				x	x					x	10
A.2.3	Beschichtete Proben		x	x		x	x					x	5
A.2.4	Exkurs Dehnungsevaluierung		x	x		x							5
Biaxial / Langzeit		1	2	3	4	0	I	II	III	IV	A	B	n
A.3	Dauerstandversuch			x		x	x	x			x		(1-) 5

Sowie hinsichtlich der einzelnen Proben- und Prüfparameter (vgl. Anhang A, B, C) die nachfolgende Übersicht zu den Hauptversuchen:

Anzahl verklebter Einzelfäden,	Schussfäden F	I.	12
		II.	13
Klebstoffdosierung je Einzelfaden,	Dosierung D	A.	0,6 µl
		B.	0,3-0,9 µl
Einspannlänge (je Achse),	Prüflänge LE	1.	100 mm
		2.	55 mm
		3.	200 mm
Probenmaß an Klemmstelle,	Breite B	12	Fäden
		24	Fäden
Vorausrichtung vor Prüfung,	Vorkraft Vk	0.1	0,1 N mit 5 mm/min
		1	1 N mit 5 mm/min
und Prüfgeschwindigkeit.	Rate R	a.	20 mm/min
		b.	k.A. (Dauerstand)

Versuchstyp		F		D		LE			B		Vk		R	
Uniaxial / Kurzzeit		I	II	A	B	1	2	3	12	24	0.1	1	a.	b.
A.1.1	Reproduktion erster Zugversuche	x		x		x			x		x		x	
A.1.3	Beschichtete Proben	x			x	x			x	(x)		x	x	
A.1.4	Fadenbrücken	x			x	x			x			x	x	
A.1.5	Erweiterte Klebstoffauswahl	x			x	x			x			x	x	
Biaxial / Kurzzeit		I	II	A	B	1	2	3	12	24	0.1	1	a.	b.
A.2.1	Reproduktion erster Zugversuche	x		x		x			x		x		x	
A.2.3	Beschichtete Proben	x			x		x		x			x	x	
Biaxial / Langzeit		I	II	A	B	1	2	3	12	24	0.1	1	a.	b.
A.3	Dauerstandversuch		x		x			x						x

Im Rahmen der hier nicht aufgeführten Sonderbetrachtungen ergaben sich mitunter abweichende Einspannlängen, Prüfgeschwindigkeiten oder Anzahlen verklebter Einzelfäden.

Die Parameter der Einzelversuche sind im Anhang eingangs zu den dokumentierten Versuchen jeweils zusammengefasst protokolliert.

Anmerkungen Kap. 5

[1] Grundsätzlich ließe sich auch der Zwischenschritt von Langzeitbetrachtungen in bisheriger Kurzzeit-Probekörpergeometrie als uni- und biaxialer Aufbau verfolgen. Die Erarbeitung eines Konzepts für die Annäherung an den flächig biaxial gespannten Zustand im Gemälde wurde jedoch als relevanter bewertet. Während es an einem solchen Grundkonzept bislang gänzlich mangelte, ergeben sich weiterführend die Betrachtungen unter konstanter Längenänderung (\sim Aufspannung) oder konstanter Last bei Nutzung der uniaxialen Gewebestreifen oder biaxialen Kreuzproben als vergleichsweise einfache Modifikationen (vgl. Kap. 7.4).

[2] Die im Anhang versammelten Protokollstrukturen umfassen umfangreiche Versuchsdaten zu den Einzelversuchen (A), beschreibende Probenprotokolle (B) sowie ein konkretes Materialverzeichnis (C). Es wurde sich für die Aufführung der wesentlichen Einzelversuche entschieden, um auch diese Ergebnisse der Konservierungs- und Restaurierungswissenschaft zugänglich zu machen. Ergänzende Detailbeschreibungen der allgemeinen uni- und biaxialen Kurzzeit-Versuchsdurchführungen finden sich zudem bei FLOCK 2014.

[3] Die Prüfungen erfolgten unter gängigem Klima von 17-23 °C und 50-60 % r.F.; es wurde somit keines der konkreten Normklimata für Textilprüfungen befolgt, sondern sich vielmehr an den üblichen kontrollierten Aufbewahrungsbedingungen von Gemälden orientiert (vgl. DIN EN ISO 139; KÜHN 2001, S. 316-318).

[4] Ein vergleichbarer Personenversuch findet sich bereits bei REUBER, jedoch wurden dort nur einzelne Fäden verklebt (vgl. REUBER 2010, S. 70-74). Im Zuge der Verklebung erfolgte sowohl bei REUBER als auch dieses Mal keine normierte Dosierung der Klebstoffmenge.

[5] Für textile Flächengebilde mit einer flächenbezogenen Masse $\leq 200 \text{ g/m}^2$ werden gemäß DIN EN ISO 13934-1 als anzuwendende Vorkraft 2 N genannt. Dieser Wert bezieht er sich auf eine abweichende Probenbreite von 50 mm, was bei der hier genutzten Probenbreite von 12,5 mm entsprechend 0,5 N bedeuten würde. Die Wahl von stattdessen unzureichenden 0,1 N Vorkraft an den Geweben war durch die Übernahme des Werts aus der Einzelfadenprüfung im Kontext der ersten vergleichenden Prüfsystematik begründet (vgl. FLOCK 2014, S. 600). Daher wurde der Wert in den hier genannten Prüfungen auf erforderliche 1 N erhöht; geringere Vorkräfte erlaubten keine zuverlässig vergleichbare Ausrichtung der unbeschichteten Gewebe.

[6] Da die zuvor definierte Klebstoffmenge von 0,6 μl je Faden sich im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit von Verklebungsqualitäten nicht als zielführend erwies (vgl. Kap. 7.1), wurde eine individuell je einzelner Fadenverklebung an Klebstoff, Verklebungstechnik und Einzelfadengeometrie angepasste Klebstoffdosierung von min. 0,3 μl bis max. 0,9 μl (in der Regel jedoch $> 0,5 \mu\text{l}$) umgesetzt, um sowohl ausreichende Benetzung zu gewährleisten, als auch Überdosierung zu vermeiden.

[7] Im Zuge der Versuchsvorbereitung erfolgte zunächst ein Vorversuch zur Behandlung und Beschichtung des bisherigen Testgewebes. Dazu wurde exemplarisch (in Bezugnahme auf den „klassischen Leinwandgemäldeaufbau“, vgl. Kap. 3.1.2) der Einfluss von Dekatur, aufgestrichener (flüssig, warm) und gespachtelter Glutinleim-Vorleimung (Gallerte, kalt) sowie Leim-Kreide-Grundierung auf das Testgewebe Typ 1. *Sironi* betrachtet (vgl. B.4 und A.1.2).

Die Dekatur stellt eine traditionelle Vorbehandlung von textilen Bildträgergeweben dar. Bei dieser Behandlung wird das Gewebe aufgespannt, befeuchtet, nach Trocknung abgespannt und dieser Vorgang mehrfach wiederholt. Auf diese Weise werden nicht nur Begleitstoffe aus dem Gewebe geschwemmt, sondern insbesondere die Gewebestruktur verändert. Durch die sich wiederholenden Quellungs- und Schrumpfungsprozesse der Fasern bzw. Fäden und den damit verbundenen Spannungswechseln werden idealerweise die produktionsbedingt anisotropen Gewebeeigenschaften reduziert (vgl. Kap. 3.1.1). Das zumeist stärker verwellt vorliegenden Kettfadensystems wird so dem orthogonal verlaufenden Schussfadensystem angeglichen. Man spricht auch von einer „Ermüdung“ des Materials, welches nach Behandlung weniger stark und homogener auf u.a. mechanische Belastungen und feuchtephysikalische Wechsel reagieren soll (siehe u.a. GUILLY et al. 1981).

Die Durchführung der Behandlung und Beschichtung findet sich inkl. Gewebedokumentation im Anhang unter B.4. In der Prüfung erfolgte sowohl die Betrachtung von Schuss- als auch einer reduzierten Auswahl an Kettfaden-Gewebeproben (vgl. A.1.2).

[8] Hingegen wurde eine rückführende Verbreiterung der Proben auf die gemäß Norm genannten 50 mm zunächst verworfen (vgl. DIN EN ISO 13934-1). Die deutliche Reduzierung auf 12,5 mm geprüfter Probenbreite (= 12 Fäden) wurde im Rahmen der zugrundeliegenden Versuche durchgeführt, um den Verklebungsaufwand zu drosseln (vgl. FLOCK 2014, S. 298). Die sich daraus ergebenden Nachteile im Kontext von Messwertstreuungen werden in Kap. 7 thematisiert.

[9] Auf die Darstellung der genauen Funktionsweise und theoretischen Grundlagen wird an dieser Stelle verzichtet. Zur weiteren Information finden sich leicht verständliche Zusammenfassungen u.a. bei MALOWANY et al., SCHEFFER und SEIBERT, während SUTTON et al. die komplexeren Zusammenhänge darstellen (vgl. MALOWANY et al. 2014; SCHEFFER, S. 58-64; SEIBERT 2007, S. 59-63; SUTTON et al. 2000, S. 323-372).

Genutzt wurde die Software VIC 2D (Correlated Solutions) mit den als Standard gewählten Einstellungen Subset 49, Step 10, Lagrange-Dehnung (eyy, exx). Subset- und Schrittgröße legen die Art und Weise der Unterteilung des Bildbereichs im Zuge des Bildabgleichs fest. Bei Schwierigkeiten in der Mustererkennung wurde mit der Einstellung „incremental correlation“ gearbeitet. Aufgrund der vergleichsweise geringen Dehnungen stellten sich keine wesentlichen Unterschiede bei vergleichender Betrachtung alternativer Verzerrungstensor-Optionen der Software dar.

[10] Im Zuge dieses Versuchsaufbaus wurden ebenfalls uniaxiale Proben der Testgewebe betrachtet, um so im Zuge der reduzierte Einspannlänge weiterhin Bezüge herstellen zu können. Des Weiteren wurde in diesem Kontext auch die optionale Aufdoppelung an uniaxialen Gewebestreifen betrachtet. Speziell vor dem Hintergrund der bisher unterschiedlichen Dehnungsermittlung fand zudem gezielt die Auswertung via technischer Dehnung und DIC an den uniaxialen Proben zum Vergleich statt.

[11] Jeweils die Hälfte der Schussfadenlänge im 12 x 12 Fäden großen Mittelbereich wurde mit herkömmlicher Sprühfarbe (Alkydharz, seidenmatt) unregelmäßig schwarz sowie transparent gespeckelt, um eine vergleichbare „Versteifung“ durch den Sprühauftrag auf beiden Seiten des Fadens zu gewährleisten. Ergänzend wurden zudem Proben jeweils halbseitig mit schwarzem und transparentem (regelmäßigeren) Punktmuster auf den Höhen der Bindungspunkte versehen, um so ggf. anhand der Fotodokumentation in der Prüfung unmittelbar sehen zu können, inwiefern der Faden sich streckt und dabei die Punkte Verschiebung erfahren.

[12] Bisherige Auswertungen in VIC 2D wurden allgemein mit der bereits 2014 als Standard gewählten Einstellung durchgeführt (Subset 49, Step 10), da auf diese Weise zunächst glaubwürdig erscheinende Dehnungen aus dem Gewebemuster generiert werden konnten (vgl. Anm. 9). Die vergleichsweise großen Subset- und Step-Werte führen jedoch zu einem größeren Raster in der Bilderkennung, sodass automatisch immer Kett- und Schussfäden gleichermaßen im Vergleichsfeld liegen. Dabei werden Bewegungen der Einzelfäden möglicherweise nicht ausreichend berücksichtigt. Daher wurde durch Verringerung der Subset- und Step-Größe versucht, die Auswertung näher auf Einzelfadenebene durchzuführen, um so die Dehnungen der Kett- und Schussrichtung ggf. weniger über- und gegeneinander zu mitteln.

[13] Es ließe sich nur dann unkompliziert von einer bekannten/ermittelten Dehnung auch auf die Spannung schließen, wenn zum einen linear elastisches Materialverhalten vorliegt und zum anderen der entsprechende Elastizitätsmodul bekannt ist (vgl. Hookesches Gesetz, Kap. 3.3.2). Weder weisen Gemälde rein elastische Materialeigenschaften auf (vgl. Kap. 3.3.3), noch ist von so geringer Belastung und Deformation auszugehen, dass dies noch unter elastische Materialantwort fallen würde. Zudem sind insbesondere die Moduln in der Regel nicht bekannt bzw. die Definition im Kontext Gewebe alles andere als trivial (vgl. Kap. 3.3.1); hinzu kommen die aufliegenden Schichten, deren Eigenschaften und Wechselwirkungen mit dem Gewebe. Insofern sollte an dieser Stelle ebenfalls Erwähnung finden, dass solche teils bereits in der konservierungswissenschaftlichen Literatur angewandten linearen Ideal-Modelle für Gemäldestrukturen sehr kritisch betrachtet werden müssen.

[14] Das Prinzip der beweglichen Fixierung gestaltet sich ähnlich des sogenannten „Gleitholzrahmens“ (vgl. HEIBER 2006). Zwischen Haken und Loslagern wurden zudem reibungsarme Drehwirbel eingesetzt, um eine momentenfreie Fixierung zu gewährleisten. Im Innenrahmen erfolgte die zur Probe berührungsfreie Fixierung eines Inlays mit Millimetermaß zur zusätzlichen Kontrolle der Rahmen- und Probenposition in der Fotodokumentation, vgl. B.5.

[15] An dieser Stelle soll nochmals auf den bereits erfolgreichen Einsatz der DIC in anderen Kontexten der Konservierung und Restaurierung verwiesen werden, siehe u.a. MALESA et al. 2011; KUJAWINSKA et al. 2011; MALOWANY et al. 2014; CONSTANTINI et al. 2020. Die Dehnungsevaluierung könnte prinzipiell auch mit abweichenden optischen Verfahren berührungsfrei durchgeführt werden; weitere Verweise finden sich in der zuvor aufgeführten Literatur.

Im Gegensatz dazu bieten sich zudem nicht berührungsfreie Möglichkeiten der Dehnungsmessung. In der Regel wird dazu ein Messsystem parallel zur evaluierenden Oberfläche geschaltet. Solche Optionen, wie bspw. die Nutzung von herkömmlichen Dehnungsmessstreifen oder Fibre-Bragg-Gittern, bergen jedoch den Nachteil der notwendigen (steifen) Fixierung auf der Probenoberfläche. Zudem stellen sich diese Messmethoden als empfindlich auf Querkrafteinwirkung quer zur Messrichtung dar, wie es im biaxialen Aufbau zwangsläufig der Fall ist. Zu Dehnungsmessstreifen, siehe u.a. KEIL 1995 und KEIL 2017. Eine umfangreiche Literatursammlung zu Fibre-Bragg-Gittern findet sich bei WERANECK 2018.

[16] Prinzipiell wäre eine erhöhte Stichprobengröße je Konfiguration wünschenswert gewesen, wurde jedoch zu Gunsten des Vergleichs mehrerer Klebstoffe bei zunächst noch logistisch limitierter Zugrahmenanzahl nicht verfolgt. Insbesondere vor dem Hintergrund nur einer Referenzprobe mit unverklebtem Schnitt bzw. keiner vollständig intakten Referenzprobe können diese initialen Versuche nur erste Tendenzen abbilden.

6

Konzeption Klebstoffauswahl

Im folgenden Kapitel werden die betrachteten Klebstoffe knapp unter Ausführung der motivierten Auswahl vorgestellt. Ergänzende Angaben zur Verklebung sind unter B.2 sowie Details zu Rezepturen und Klebstoffmaterialien unter B.3 und C.2 im Anhang aufgeführt. Weiterreichend sei explizit auf die genannte Literatur verwiesen (vgl. auch Kap. 2.2).

6.1 Glutinleime und deren Modifikation

Natürliche Glutinleime sind tierischen Ursprungs und stellen wässrige Lösungen des namensgebenden Proteingemischs Glutin (~ Kollagen) dar. Ihre Gewinnung erfolgt durch das Auskochen tierischer Bestandteile, wie Häuten oder Knochen. Je nach Art der Herstellung und verwendeter tierischer Basis zeigen sich sehr unterschiedliche Eigenschaften. Als Gemeinsamkeit ergibt sich die erforderliche Warmverarbeitung der sonst bei Raumtemperatur mehr oder weniger festen „Gallerte“ (Sol-Gel-Übergang).¹

Der Glasübergangsbereich von Glutinleimen fällt teils sehr unterschiedlich aus und ist insbesondere abhängig von der Materialfeuchte und folglich der relativen Luftfeuchtigkeit; im Regelfall kann jedoch von Tg-Werten $\geq 40\text{-}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgegangen werden.²

Störleim

Störleim ist ein in der Konservierung und Restaurierung traditionell breit eingesetztes Bindemittel. Die Gewinnung erfolgt aus den Schwimmblasen des Störs; der Leim weist im Vergleich zu anderen Glutinleimen einen der Verarbeitung oftmals zuträglichen, niedrige-

¹ Siehe u.a. FLOCK 2018; HAUPT et al. 1990; MELIÀ-ANGULO et al. 2017; SAUER 1958.

² Vgl. SOPPA 2018, S. 47.

ren Gelpunkt (ca. 15-17 °C) sowie zudem eine erhöhte Elastizität auf. Der pH-Wert der kolloidalen Lösung ist leicht sauer bis zumeist neutral. Nach Trocknung verbleiben die Filme wasserlöslich bis je nach äußeren Einflüssen wasserquellbar. Ein wesentlicher Nachteil besteht jedoch u.a. in der uneinheitlichen Zusammensetzung.³

Aufgrund der genannten Vorzüge wird Störleim mitunter auch für die Klebstoffanwendung in der Einzelfadenverklebung präferiert; dabei stellen sich insbesondere die Wasserlöslichkeit und der niedrige Gelpunkt in der Verarbeitung als maßgeblich dar. Zur Einzelfadenverklebung erfolgt eine Rheologiemodifizierung zwecks Verdickung (vgl. Kap. 2.2 und 6.1.1). In der praktischen Anwendung weisen sich die üblichen Feststoffkonzentrationen (< 30 %) sonst als zu niedrigviskos aus, sodass es u.a. zu starker Penetration in das Fasermaterial und unerwünschten Farbtonvertiefungen kommen kann.

Obwohl Störleim in Reinform für die Einzelfadenverklebung daher in der Regel nicht erwogen wird, wurden im Rahmen der Versuche auch Verklebungen mit den zwei zur Mischung verwendeten Konzentrationen (Störleim 20 % und 25 %) getestet, um deren Verklebungsfestigkeiten von der Mischung abgrenzen zu können.

Gelatine

Wenngleich aufgrund der höheren Reinheit und industriell erfolgten Standardisierung möglicherweise zu bevorzugen, wurden Gelatinen als Alternative zu Störleim bislang nicht in der Einzelfadenverklebung berücksichtigt. Es existieren verschiedene Typen mit teils sehr ungleichen Eigenschaftsprofilen auf dem Markt; so sind u.a. auch die pH-Werte von Gelatinen stark von der Art der Herstellung abhängig (saurer/alkalischer Aufschluss). Bislang konnte wegen der höheren Gelpunkte jedoch noch kein Produkt mit dem Störleim vergleichbaren Verarbeitungseigenschaften gefunden werden. Durch Entwicklung eines neuen Geräts zur erwärmten, feindosierten Klebstoffapplikation direkt am zu verklebenden Einzelfaden stellte sich jedoch nochmals gezielt die Frage nach einer nun ggf. verbesserten Anwendbarkeit.⁴

Daher wurde zunächst eine typischerweise in anderen Kontexten der restauratorischen Praxis verwendete Gelatine (Gelita Imagel 185 Bloom, inerte Fotogelatine, pH ca. 5) mit in die Klebstoffauswahl aufgenommen, um gezielt mit Störleim verglichen werden zu können. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Gelatinen kann diese jedoch nicht als allgemein repräsentativ verstanden werden. [Anm. 1]

³ Siehe u.a. FOSKETT 1994; HABEL-SCHABLITZKY 1992; HAUPT 2004; PRZYBYLO 2006.

⁴ Vgl. DEMUTH, FLOCK 2020.

6.1.1 Zusatz Weizenstärkekleister nativ/modifiziert

Entsprechend der gängigen Anwendungspraxis wurde auch das Störleim-Weizenstärkekleister-Gemisch nach HEIBER geprüft (Störleim 20 % + Weizenstärkekleister 13 %, GT 1:1), sowohl im Gemisch mit Kleister auf Basis nativer, als auch modifizierter Weizenstärke zur Einstellung der Viskosität (vgl. Kap. 2.2).⁵

Die modifizierte, kaltlösliche Weizenstärke stellt insofern eine interessante Alternative dar, da nicht nur die Klebstoffzubereitungsdauer verkürzt wird, sondern sich insbesondere standardisierte Produktqualitäten durch die industrielle Vorverkleisterung erhoffen lassen.⁶

Allgemein wäre es jedoch wünschenswert, ein alternatives Verdickungsmittel für Störleim zu nutzen, da sich abgesehen von der Rheologieoptimierung keine Vorzüge der Weizenstärke als Bestandteil der Klebstoffmischung darstellen [Anm. 2]. Trotz Verdickung tritt mit der Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung mitunter eine Verdunklung und/oder leichte Glanzbildung an den Verklebungen auf; auch in Bezug darauf liegt der Gedanke alternativer, zusätzlich mattierender o.ä. Füllstoffzuschläge nahe.

Ergänzend wurde statt Störleim zudem die ausgewählte Gelatine in Mischung mit Weizenstärkekleister betrachtet (Gelita Imigel 20 % + WSK modifiziert 13 %, GT 1:1).

Mitunter findet in der Praxis auch das Wiederanlösen getrockneter Filme der Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen zur Klebstoffherstellung statt, da sich so vorbereitete Kleinstmengen unkompliziert direkt ansetzen lassen und im Gegensatz zu den frisch angesetzten Komponenten lange lagerbar sind. Zwecks Vergleich wurden daher auch Verklebungen mit der wiederangelösten Mischung geprüft, um mögliche Unterschiede der erzielten Verklebungsqualitäten zu untersuchen.

⁵ Vgl. HEIBER 1996; HEIBER 2003.

⁶ Vgl. VOGEL 2010.

6.1.2 Zusatz Cellulosefasern

Eine Verklebung der natürlichen Cellulosefasern von textilen Bildträgern mit möglichst ähnlichen Klebstoffbestandteilen liegt nahe. Idealerweise lässt sich so eine Imitation der Materialeigenschaften mit der Verklebung erzielen.

Speziell im Hinblick auf ein alternatives Verdickungsmittel (statt Weizenstärkekleister) erscheinen Cellulosefasern als ein äußerst vielversprechendes, hygroskopisches Füllstoffmaterial mit zusätzlicher Armierungswirkung.⁷ Die durch Nutzung von Störleim-Cellulosefaser-Mischungen zur Einzelfadenverklebung vorteilhaft erhöhten Verklebungsfestigkeiten konnten bereits belegt werden. Dabei sollten industriell standardisierte Cellulosefaserprodukte zum Einsatz kommen, die sich als vollkommen rein, inert und insbesondere ligninfrei darstellen. An diesen liegt entsprechend eine gute Alterungsbeständigkeit vor.

Die bereits getesteten Arbocel-Cellulosefasern existieren in unterschiedlicher Faserlänge und davon abhängigem Wasserbindevermögen auf dem Markt. So zeigte sich bereits, dass sowohl besonders kurze Fasertypen ($\leq 40 \mu\text{m}$), als auch insbesondere lange Typen ($\geq 300 \mu\text{m}$) schwächere Verklebungsfestigkeiten in Stoß-auf-Stoß-Verklebungen generieren.⁸

Empfohlen werden konnte bislang eine Faserlänge von ca. $200 \mu\text{m}$ in Mischung mit Störleim als Standard-Rezeptur für Stoß-auf-Stoß-Verklebungen (Störleim 25 % + Arbocel BWW 40, GT 20:1). Dieser Klebstoff wurde ebenfalls wieder berücksichtigt.

Auch hier wurde zusätzlich die Verklebung mittels des wiederangelösten Film-Klebstoffs dieser Standard-Mischung betrachtet (vgl. Kap. 6.1.1). Hinzu kam die Erprobung des Standard-Gemischs mit Gelatine statt Störleim, wobei wegen der höheren Viskosität der betrachteten Gelatinelösung ein geringerer Feststoffgehalt gewählt wurde (Gelita Imigel 20 % + Arbocel BWW 40, GT 20:1).

Aufgrund der hohen Verklebungsfestigkeiten erscheint die bisherige Standard-Mischung jedoch als bisweilen zu stark für überlappende Verklebungstechniken, sodass zudem eine gezielte Klebstoffanpassung erprobt wurde. Ausgehend von der bisherigen Rezeptur wurde die Herabsetzung der Leimkonzentration sowie der Austausch der Faser gegen einen kürzeren Typ ($40 \mu\text{m}$) vorgenommen (Störleim 15 % + Arbocel BWW 40, GT 20:1 sowie Störleim 20 % + Arbocel BC 600-30 [$40 \mu\text{m}$], GT 20:1). [Anm. 3]

⁷ Siehe auch VEIGEL2008.

⁸ Vgl. FLOCK et al. 2019; FLOCK 2014.

6.1.3 Zusatz Methylcellulose

Mitunter setzen Restauratoren auch Methylcelluloseether (MC-“Gele“) zur Verdickung von Störleim für die Einzelfadenverklebung ein.⁹ [Anm. 4]

Im Temperaturbereich der Leimverarbeitung (ca. 25-35 °C) reagieren die MC-Lösungen jedoch temperaturempfindlich mit Viskositätsabfall.¹⁰ Die ursprünglich erwünschte Verdickung tritt so nicht mehr ein. Des Weiteren stellen sich die Mischungen während der warmen Verarbeitung oftmals durch eintretende Separation als inhomogen dar, was für die Klebstoffanwendung bei Ziel homogener Verklebungsqualitäten und -festigkeiten grundsätzlich abträglich ist.

Es ist somit nicht ganz klar, ob dies im praktischen Anwendungsfall häufig in Kauf genommen wird oder die Klebstoffmischung mitunter gar nicht warm, sondern bewusst alternativ unerwärmt bei Raumtemperatur (~ kalt) appliziert wird.

Probeweise wurde daher auch die Störleim-Modifikation mit Methylcellulose betrachtet. Die im warmen Störleim zu erfolgende Mischung mit der gelartigen MC wurde nach Abkühlung bei Raumtemperatur zur Verklebung verwendet (Störleim 20 % + Methocel A4C 10 %, GT 1:1). [Anm. 5]

⁹ Siehe u.a. REUBER 2010; GLANZER 1995; LAASER 2010.

¹⁰ Vgl. SOPPA 2018, S. 64.

6.2 Celluloseether und deren Modifikation

Das unlösliche Polysaccharid Cellulose lässt sich durch Veretherung in quellbare bis lösliche Derivate überführen, je nach Art hydrophiler bzw. hydrophober Substituenten sowie Grad der Substitution.¹¹

Die erzielten Eigenschaften können somit entsprechend vielfältig ausfallen. In dieser Arbeit wird lediglich Methylcellulose (MC) betrachtet, welche sich als am wenigsten hydrophil unter den wasserlöslichen Celluloseethern darstellt und als besonders alterungsstabil gilt. In der Regel liegen neutrale pH-Werte in wässriger Lösung vor, teils leicht in den sauren oder alkalischen Bereich verschoben. Die Glasübergangstemperaturen (T_g) von MC liegen weit $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, viskose Kriechneigungen der Klebungen erscheinen daher fast ausgeschlossen.¹²

Lange Zeit wurden unzureichende Verklebungsfestigkeiten bei Verwendung von Celluloseethern als Klebstoffe in der Einzelfadenverklebung befürchtet (vgl. Kap. 2.2); mittlerweile konnten bereits ausgewählte Typen für überlappend-vermengte Verklebungen als geeignete Klebstoffoptionen für die Einzelfadenverklebung ausgewiesen werden.¹³

Da ein Methylcelluloseether-“Gel“ ebenfalls zur Rheologiemodifizierung und Optimierung der Wasserquellbarkeit von betrachteten Dispersionen auf Basis synthetischer Polymere im Rahmen der hier präsentierten Klebstoffauswahl eingesetzt wurde (vgl. Kap. 6.3), sollte im Zuge der Versuche auch das Reinverhalten des verwendeten Produkts Methocel A4C zur Verklebung untersucht werden. Dazu wurde ein im Vergleich zum Dispersionszusatz leicht erhöhter Feststoffgehalt gewählt (vgl. Kap. 6.3), da sonst keine praktikable Verklebung möglich war (Methocel A4C 10%). [Anm. 6]

11 Vgl. FLOCK 2014, S. 31.

12 Siehe u.a. BALSER, ISERINGHAUSEN 1975; FELLER, WILT 1990; KENNEDY et al. 1985; SINDLINGER-MAUSHARDT, PETERSEN 2007; SOPPA 2018.

13 Vgl. GAASCH 2019.

6.2.1 Zusatz Cellulosefasern

Aufgrund des vorteilhaften Eigenschaftsprofils der Methylcellulosen und ihrer prinzipiellen Ähnlichkeit mit dem zu verklebenden cellulosischen Bildträger wurde der Versuch unternommen, die Verarbeitungs- und Klebungseigenschaften der ausgewählten MC (Methocel A4C) durch Cellulosefaserzusatz zu modifizieren und optimieren (vgl. Kap. 6.1.2).

Bedingt durch die bereits vergleichsweise hohe Viskosität (~ Molekülkettenlängen) dieser MC wurde dazu eine kürzere Cellulosefaserlänge (40 µm) mit geringerem Wasserbindevermögen ausgewählt. Zudem wurden zwei unterschiedliche Konzentrationen der MC betrachtet (Methocel A4C 5 % + Arbocel BC 600-30, GT 20:1 und Methocel A4C 10 % + Arbocel BC 600-30, GT 20:1). [Anm. 7]

6.2.2 Zusatz Mikrokristalline Cellulose

Im Hinblick auf eine gewünschte Armierung und „Füllung“ des vergleichsweise gering konzentrierten Methylcellulose-Bindemittels, bei gleichzeitig möglichst keiner weiteren Viskositätszunahme, lag die Zugabe von mikrokristalliner Cellulose (MCC) als Füllstoff nahe. Im Gegensatz zu den betrachteten Cellulosefasern (vgl. 6.1.2 und 6.2.1) bindet die MCC aufgrund ihrer kristallinen Struktur kein Wasser, erfährt keine Quellung, und dickt die hochviskose Methylcellulose somit nicht zusätzlich an.¹⁴ [Anm. 8]

Es wurde daher eine weitere Modifikation der ausgewählten MC durchgeführt und in der Verklebung erprobt (Methocel A4C 10 % + MCC 50 µm, GT 20:1). [Anm. 9]

An dieser Stelle sei der Vollständigkeit halber zudem auf das mögliche Potential weiterer Nanocellulosen sowie ggf. insbesondere der mikrofibrillierten Cellulose (MFC) zur gezielten Modifikation von Methylcellulosen (und anderen Klebstoffen) für die Technik der Einzelfadenverklebung hingewiesen. [Anm. 10]

¹⁴ Siehe auch ZUGENMAIER 2008.

6.3 Synthetische Polymere und deren Modifikation

Als Klebstoffe auf Basis synthetischer Polymere werden bislang bevorzugt wässrige Dispersionen (~ Kunstharzdispersionen), Schmelzen und Epoxidklebstoffe (~ Epoxidharze) angewendet (vgl. Kap. 2.2).

6.3.1 PVAc-Dispersionen

Homopolymere Polyvinylacetate (PVAc) sind thermoplastische Polymere, welche durch radikalische Polymerisation der monomeren Vinylacetate gewonnen werden.

PVAc werden in der Anwendung für Einzelfadenverklebungen zumeist als wässrige Dispersion genutzt. Dabei weisen sie mitunter eine sehr gute Verarbeitung und optische Eigenschaften auf, als nachteilig stellen sich jedoch die sauren pH-Werte sowie weitere Säureabspaltung in der Alterung von PVAc dar.¹⁵

Auf dem Markt bietet sich eine Fülle an Produkten mit abweichenden Eigenschaften; es wurden bereits verschiedenste Dispersionen für die Einzelfadenverklebung getestet, mit sehr unterschiedlichen Resultaten. Anhand bisheriger Vorversuche davon zu präferieren ist die wässrige PVAc-Dispersion Mowilith DHS S1.¹⁶ Mit ca. 38 °C (Tg) befindet sich die Dispersion knapp unterhalb des gewünschten Glasübergangsbereichs (> 40 °C); auch hier ist der genaue Glasübergang jedoch von der Gleichgewichtsfeuchte der Klebefuge im Raumklima abhängig.

Mowilith DHS S1 wurde sowohl in Lieferform, als auch modifiziert mit Methylcellulose-“Gel“ zur möglichen wässrigen Wiederanlösbarkeit getestet (Mowilith DHS S1 + Methocel A4C 5 %, GT 9:1). [Anm. 11]

15 Vgl. FLOCK 2014, S. 27. Siehe u.a. DOWN 2009; DOWN 2015; HORIE 2010; DE WITTE et al. 1984; WILKS 1987.

16 Vgl. FLOCK 2014.

6.3.2 EVA-Dispersionen

Zur Herstellung copolymerer Ethylenvinylacetate (EVA) werden Ethylen und Vinylacetat als Monomere genutzt. Die resultierenden Eigenschaften der Thermoplaste hängen dabei stark von den Mischungsverhältnissen ab. Je mehr Ethylen enthalten ist, desto dehnbarer und weniger zugfest stellt sich das Copolymer dar. Man spricht auch von „innerer Weichmachung“. Mitunter weisen EVA-basierte Dispersionen gegenüber den PVAc- und anderen Kunstharzdispersionen verbesserte Alterungseigenschaften und neutralere pH-Werte auf.¹⁷ Speziell vor dem Hintergrund von Geweben mit eher unpolaren bzw. hydrophobierten Oberflächen könnte die Copolymerisation mit Ethylen einen Vorteil für die Ausbildung adhäsiver Wechselwirkungen bei dieser Verklebungsproblematik bieten.

Im Kontext der Einzelfadenverklebung wurden bisher die zwei wässrigen EVA-Dispersionen Evacon-R und Lineco näher betrachtet; die Eigenschaften der beiden Klebstoffe unterscheiden sich stark. Da Evacon-R einen höheren Ethylen-Gehalt aufweist, stellen sich die Klebstofffilme als vergleichsweise weich und sehr dehnbar dar. Lineco hingegen enthält vornehmlich PVAc und verhält sich als Film und in der Verklebung deutlich steifer. Als Gemeinsamkeit haben beide Produkte einen neutralen pH-Wert (alkalische Pufferung). Die beiden Klebstoffe bleiben zudem nach Trocknung wasserlöslich, wohl begründet durch einen geringen Anteil Polyvinylalkohol (PVAI).¹⁸ [Anm. 12]

Die Tg-Werte sind nicht näher bekannt, liegen anhand von Filmeigenschaften vergleichend geschätzt jedoch $< 35\text{ °C}$, was einen grundsätzlichen Nachteil bedeutet.

Lineco

Der Klebstoff Lineco weist sich durch sehr homogene Filmeigenschaften, eine sehr gute Verarbeitung und gute Optik der Einzelfadenverklebungen aus. Bei allen bereits genannten Vorzügen stellt sich jedoch der vermutlich nicht allzu hohe Tg-Bereich als problematisch hinsichtlich etwaiger Kriechneigungen unter andauernder Belastung dar. [Anm. 13]

Daher scheint eine verfestigende Klebstoffmodifikation zuträglich; an freien Filmen des Klebstoffs zeigte sich bereits, dass zugesetztes Methylcellulose-„Gel“ sich potentiell verfestigend auswirken kann (vgl. Abb. 6.01). Hinzu kommt eine verbesserte Reversibilität.¹⁹

¹⁷ Siehe u.a. DOWN et al. 1996; HORIE 2010; WILKS 1987. Vgl. FLOCK 2014, S. 28.

¹⁸ Vgl. FLOCK 2014.

¹⁹ Vgl. FLOCK 2014.

Es wurden daher zwei zusätzliche Klebstoffmodifikationen mit Methylcellulose betrachtet (Lineco + Methocel A4C 5 %, GT 9:1 und Lineco + Methocel A4C 10 %, GT 1:1).

Zwecks optionaler Verfestigung wurde zudem noch die Armierung des Klebstoffs mit Cellulosefasern (zusätzlich verdickend) und MCC (kaum verdickend) geprüft ([Lineco + Methocel A4C 5 %, GT 9:1] + Arbocel BWW 40, GT 20:1 bzw. MCC 50 μm , GT 20:1).

Evacon-R

Der Klebstoff Evacon-R ist aufgrund seiner ausgeprägt weichen, leicht deformierbaren Filmeigenschaften prinzipiell ungeeignet für die Einzelfadenverklebung, könnte sich gerade daher jedoch zur Applikation von Fadenbrücken anbieten (vgl. Kap. 4.1).

So lässt sich in Abb. 6.01 erkennen, dass Evacon-R im Vergleich zu anderen Klebstoffen der Auswahl weniger steif (und im Verlauf zudem deutlich dehnbarer) im uniaxialen Zugversuch als Klebstofffilm reagiert. [Anm. 14]

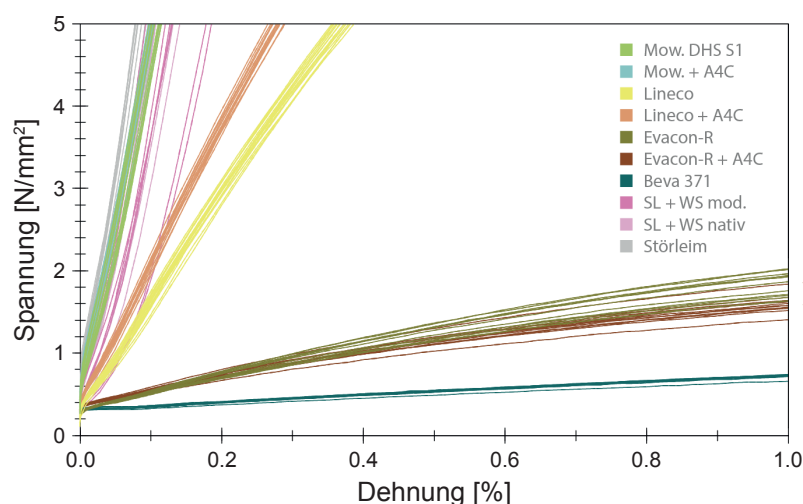


Abb. 6.01: Ausschnitt eines vergleichenden Spannungs-Dehnungs-Diagramms zur uniaxialen Zugprüfung von freien Filmen der Klebstoffauswahl (Darstellung basierend auf Daten aus FLOCK 2014; Prüfung von Schulterproben nach DIN EN ISO 527-3, Filmdicke ca. 65 μm).

Neben dem bisherigen Standard-Klebstoff für Fadenbrücken, Beva 371 (vgl. Kap. 6.3.4), wurde daher Evacon-R als weitere Klebstoffalternative für die Fadenbrücken-Applikation ausgewählt.

Dazu erfolgte die Modifikation mit Methylcellulose, im Sinne der bereits so mitunter von Restauratoren durchgeführten Praxis (Evacon-R + Methocel A4C 5 %, GT 9:1); ggf. wäre jedoch die reine Dispersion aufgrund erhöhter Dehnbarkeit zu bevorzugen. [Anm. 15]

6.3.3 Vernetzende Thermoplaste

Bedingt durch den Wunsch nach Ausnutzung der thermoplastischen Klebstoffeigenschaften in der Verklebungsdurchführung (Modellierung), bei gleichzeitig gewünschter Beständigkeit der Einzelfadenverklebungen unter dauerhafter Belastung, bietet sich theoretisch das Prinzip vernetzender Thermoplaste an. [Anm. 16]

Thermoplaste weisen in ihrer molekularen Struktur sowohl amorphe, als auch teilkristalline Bereiche auf. Die ungeordneten amorphen Bereiche begründen die reversibel schmelzbaren, jedoch auch zu viskosem Kriechen fähigen Eigenschaften. Durch nachträgliche Quervernetzung lassen sich die Molekülketten der ungeordneten Bereiche jedoch daran hindern, bei bspw. Erwärmung oder unter Zugbelastung aneinander vorbeizugleiten.²⁰

Zwar widerspricht das Prinzip gezielt eingebrachter Irreversibilität in der Regel der restauratorischen Intention, für spezielle Anwendungsfälle könnte die Ausnutzung vernetzender Thermoplaste jedoch einen gangbaren Kompromiss darstellen. Grundsätzlich scheint sich für den Anwendungsfall folgende Systemauswahl anzubieten:

- Polyaddition durch Zugabe von Isocyanaten als Vernetzer in funktionellen Bindemitteln mit Hydroxygruppen (2K-Reaktion),
- Isocyanat-Nebenreaktion mit Feuchtigkeit, Ausbildung interpenetrierenden Netzwerks in nichtfunktionellen Bindemitteln (Pseudo-2K-Reaktion),
- anionische Polymerisation von Cyanacrylaten (durch r.F.).²¹

Betrachtet wurden die drei zusätzlich bzw. nachträglich vernetzten Kunstharzdispersionen Ecrothan 4075, Ecronova RA 646 H und Ecrovin LV 340 eco auf Polyurethan-, Acrylat- und PVAc-Basis; zur Vernetzung diente das Polyisocyanat Bayhydur ultra 305 (vgl. Anhang C.2). [Anm. 17]

Über die weitere Mischung mit Methylcellulose-“Gel“ wurde zusätzlich der Versuch einer optimierten Verarbeitungsviskosität sowie Erzielung einer Wasserquellbarkeit der betrachteten Dispersionen trotz Vernetzung unternommen [Anm. 18]. Zudem wurde ein UHU easy Sekundenkleber als Cyanacrylat (Cyanacrylsäureester) ausgewählt und ebenso testweise mit Methylcellulose-Pulver sowie durch Zugabe von Cellulosefasern aufgrund der sehr niedrigen Viskosität und schlechter Verarbeitungseigenschaften modifiziert. [Anm. 19]

Die Übersicht der genauen Einzelrezepturen der Klebstoffe ist unter Kap. 6.4 aufgeführt.

²⁰ Siehe u.a. ELIAS 2001; SCHWARZL1990; STROBL 2007.

²¹ Siehe u.a. HABENICHT 2009; PACKHAM 2005; HORIE 2010; DOWN 2015.

6.3.4 Schmelzklebstoffe

Des Weiteren wurden bereits in der Technik der Einzelfadenverklebung angewandte Schmelzklebstoffe mit in die Auswahl aufgenommen. Diese Auswahl diene vornehmlich der Bereitstellung bislang fehlender Referenzwerte hinsichtlich widersprüchlicher Angaben zu den Verklebungsfestigkeiten.

Zwar sind insbesondere Polyamide (PA) mitunter populär und bieten teils einzig gangbare Lösungen bei Einzelfadenverklebungen in durch Tränkung hydrophobierten oder synthetischen Geweben, hier ergibt sich aber konkret das Problem der endgültigen Limitation der zukünftigen Klebstoffauswahl durch das Einbringen der Schmelze. Im Gegensatz zu den bereits genannten PVAc oder EVA weisen PA auch eine hohe Beständigkeit gegenüber organischen Lösungsmitteln auf; in der Praxis bleibt prinzipiell nur die thermoplastische Wiederbearbeitung. Glasübergang und Schmelzpunkt sind zum einen vom genauen Polyamid abhängig, zum anderen von den Zuschlagstoffen der handelsüblichen Produkte (sog. „Textilschweißpulver“). Für die Einzelfadenverklebung bevorzugt werden Schmelzbereiche $< 100\text{ °C}$.²²

In der Berufspraxis wird daher mitunter auch alternativ die Modifikation des vornehmlich EVA-basierten Schmelzklebstoffs Beva 371 durch Cellulosefaserzusatz durchgeführt (vgl. Kap. 2.2), welcher im Gegensatz zu PA das Wiederanlösen mit organischen Lösungsmitteln erlaubt, jedoch auch einen niedrigeren Schmelzbereich ($\sim 65\text{ °C}$) und geringere Kohäsion bei hoher Dehnbarkeit aufweist (vgl. Abb. 6.01).²³

Es erfolgte daher die Betrachtung der Produkte Lascaux 5065, Lascaux 5350 und Kremer Textilschweißpulver als PA. Beva 371 wurde sowohl als reine Schmelze, als auch in der Modifikation mit Cellulosefasern entsprechend bereits empirisch erprobter Rezeptur angewandt (Beva 371 + [Arbocel BW 40 ($200\text{ }\mu\text{m}$) + B 800 ($130\text{ }\mu\text{m}$), GT 1:1], GT 4:1).

Beva 371 in Form des industriell vorgefertigten Films ($25\text{ }\mu\text{m}$) stellt zudem den bisherigen Standard in der Applikation von Fadenbrücken dar (siehe auch Anhang B.3). An dieser Stelle sei nochmals auf das abweichende Anforderungsprofil verwiesen (vgl. Kap. 4.1).²⁴ Sofern nicht gezielt anders ausgewiesen, wurden alle Fadenbrücken der Versuche in dieser Arbeit daher mit Beva 371 in thermoplastischer Reaktivierung appliziert.

²² Siehe u.a. REUBER 2010; PLÖTZ 2003; BODECHTEL 2000.

²³ Vgl. BIANCO et al. 2015. Siehe auch FLOCK 2014.

²⁴ Siehe u.a. FLOCK et al. 2020 (b); FLOCK 2014.

6.3.5 Epoxidharze

Die für die Einzelfadenverklebung betrachteten Epoxidharze stellen auf Polyaddition basierende 2K-Systeme dar, die zu Bildung der Duroplaste führen. Während in den Anfängen der Einzelfadenverklebungstechnik zunächst noch vornehmlich Epoxidharze verwendet wurden, bildet deren Anwendung mittlerweile eher die Ausnahme.

Erwogen werden Epoxide mitunter im Falle unzureichender Adhäsion der sonst mittlerweile zur Einzelfadenverklebung präferierten Klebstoffe auf den zu verklebenden Substraten oder aus Sorge um Verklebungsversagen an schwierigen Stoß-auf-Stoß-Situationen (Schnitten) in stark zugbelasteten Geweben (vgl. Kap. 2.2).

Die Verklebung mit Epoxidharzen gilt dabei nach wie vor als besonders (bisweilen sogar zu) zugfest und wird in erster Linie wegen der vernetzungsbedingt starren bis spröden Klebefuge, vergleichsweise hydrophober Klimareaktion, eher schlechten Alterungseigenschaften sowie irreversibler „Blockierung“ des Systems abgelehnt.²⁵

Im Zuge der bisherigen Klebstoffneuentwicklungen sollte daher der gezielte Vergleich mit einem häufig verwendeten 2K-Epoxid-Klebstoff erfolgen. Dem lag auch die Hypothese zu Grunde, dass zwar der Epoxidklebstoff selbst eine hohe Kohäsion aufweist und prinzipiell gute Adhäsionseigenschaften auf vielen Oberflächen besitzt, die vergleichsweise schlechten Verarbeitungseigenschaften bei der Einzelfadenverklebung jedoch die Ausbildung hochfester Verklebungen behindern [Anm. 20]. Es sollte daher der Beweis erbracht werden, dass insbesondere die neu entwickelten Störleim-Cellulosefaser-Gemische (in der Anwendung zur Stoß-auf-Stoß-Verklebung von Leinengeweben) den Verklebungsfestigkeiten der Epoxide in nichts nachstehen (vgl. 6.1.2).

Dazu wurde beispielhaft das am häufigsten in der Praxis verwendete UHU plus schnellfest mit in die Klebstoffauswahl aufgenommen.²⁶

25 Siehe u.a. DOWN 1984; DOWN 1986; HORIE 2010; VON DERSCHAU, UNGER 1998.

26 Vgl. REUBER 2010, S. 44 f.

6.4 Klebstoffübersicht

Nachfolgend sind sämtliche betrachtete Klebstoffe zur Einzelfadenverklebung nochmals als Übersicht gelistet, ergänzt um den Verweis auf die Haupt-Testreihen.

Aufgeführt werden je Klebstoff auch die geprüften Verklebungstechniken (vgl. Kap. 3.2.2):

- I. **SAS** Stoß-auf-Stoß
- II. **SAS+B** Stoß-auf-Stoß mit Fadenbrücken
- III. **Ü** einfach überlappend
- IV. **Ü+V** überlappend-vermengt

Uniaxiale Kurzzeitversuche / unbeschichtet

Zwecks verbesserter Übersicht erfolgt hier die tabellarische Zusammenfassung der Klebstoffauswahl aus den Validierungsversuchen (A.1.1) sowie der zeitlich nachgelagerten erweiterten Klebstoffauswahl (A.1.5). Alle hier aufgeführten Klebstoffe wurden mindestens in Stoß-auf-Stoß-Technik am unbeschichteten Gewebe Typ *I. Sironi* getestet:

Klebstoff	Technik				Anhang
	I	II	III	IV	
Glutinleime					
Störleim 20 % in H ₂ O	x				A.1.5
Störleim 25 % in H ₂ O	x				A.1.5
Störleim 20 % + Weizenstärkekleister nativ 13 % (1:1)	x	x	x	x	A.1.1
Störleim 20% + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1)	x	x	x	x	A.1.1
Störleim 20 % + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	x				A.1.5
Störleim 25 % + Arbocel BWB 40 (20:1)	x	x	x	x	A.1.1
Störleim 15 % + Arbocel BWB 40 (20:1)	x			x	A.1.5
Störleim 20 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)	x			x	A.1.5
Gelatine Gelita Imigel 20% in H ₂ O	x				A.1.5
Gelatine Gelita Imigel 20 % + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1)	x				A.1.5
Gelatine Gelita Imigel 20 % + Arbocel BWB 40 (20:1)	x				A.1.5
Kunstharzdispersionen	I	II	III	IV	
Mowilith DHS S1	x	x	x	x	A.1.1
Mowilith DHS S1 + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)	x	x	x	x	A.1.1
Lineco	x	x	x	x	A.1.1
Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)	x	x	x	x	A.1.1
Lineco + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	x			x	A.1.5
[Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)] + Arbocel BWB 40 (20:1)	x				A.1.5
[Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)] + MCC 50 µm (20:1)	x				A.1.5

Klebstoff	Technik				Anhang
Celluloseether	I	II	III	IV	
Methocel A4C 10 % in H ₂ O	x			x	A.1.5
Methocel A4C 5 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)	x			x	A.1.5
Methocel A4C 10 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)	x			x	A.1.5
Methocel A4C 10% + MCC 50 µm (20:1)	x			x	A.1.5
Schmelzklebstoffe	I	II	III	IV	
Beva 371	x				A.1.5
Beva 371 + [Arbocel B 800 + BWW 40 (1:1)] (4:1)	x				A.1.5
Kremer Polyamidschweißpulver	x				A.1.5
Lascaux 5065	x				A.1.5
Lascaux 5350	x				A.1.5
Vernetzende Thermoplaste	I	II	III	IV	
Ecrovin LV 340 eco + Bayhydur ultra 305 (19:1)	x				A.1.5
[Ecrovin LV 340 eco + Bh. ultra 305 (19:1)] + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	x				A.1.5
Ecronova RA 646 H + Bayhydur ultra 305 (19:1)	x				A.1.5
[Ecronova RA 646 H + Bh. ultra 305 (19:1)] + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	x				A.1.5
Ecrothan 4075 + Bayhydur ultra 305 (19:1)	x				A.1.5
[Ecrothan 4075 + Bh. ultra 305 (19:1)] + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	x				A.1.5
UHU easy (Cyanacrylat)	x				A.1.5
UHU easy + Methocel A4C 100 % in Pulverform (9:1)	x				A.1.5
UHU easy + Arbocel BWW 40 (10:1)	x				A.1.5
Epoxidharze	I	II	III	IV	A.1.5
UHU plus schnellfest (2K-Epoxid)	x				A.1.5

Biaxiale Kurzzeitversuche / unbeschichtet

Im Rahmen der biaxialen Kurzzeitversuche erfolgte die Betrachtung einer zur uniaxialen Testreihe (A.1.1) reduzierten Auswahl im unbeschichteten Gewebe Typ *I. Sironi*:

Klebstoff	Technik				Anhang
Glutinleime	I	II	III	IV	
Störleim 20 % + Weizenstärkekleister nativ 13 % (1:1)	x	x	x	x	A.2.1
Störleim 25 % + Arbocel BWW 40 (20:1)	x				A.2.1
Kunstharzdispersionen	I	II	III	IV	
Mowilith DHS S1	x				A.2.1
Lineco	x	x	x	x	A.2.1

Die reduzierte Auswahl erfolgte auch in Bezugnahme auf die Erstversuche (FLOCK 2014).

Uniaxiale Kurzzeitversuche / beschichtet

Im Rahmen der uniaxialen Kurzzeitversuche mit den beschichteten Geweben Typ 3. *Claessens 170* und 4. *Claessens 70* wurde eine reduzierte Auswahl (vgl. A.1.1) von für die Praxis am relevantesten erscheinenden Klebstoffen in Stoß-auf-Stoß-Verklebung betrachtet:

Klebstoff	Technik				Anhang
Glutinleime	I	II	III	IV	
Störleim 20% + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1)	x				A.1.3
Störleim 25 % + Arbocel BWB 40 (20:1)	x				A.1.3
Kunstharzdispersionen	I	II	III	IV	
Mowilith DHS S1 + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)	x				A.1.3
Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)	x				A.1.3

Biaxiale Kurzzeitversuche / beschichtet

Im Rahmen des Vorversuchs zu den biaxialen Kurzzeitversuchen mit dem beschichteten Gewebe Typ 3. *Claessens 170* wurde nur ein Klebstoff exemplarisch in Stoß-auf-Stoß-Verklebung betrachtet (der Versuchsaufbau wurde nicht weiter verfolgt, vgl. Kap. 7.3.2):

Klebstoff	Technik				Anhang
Kunstharzdispersionen	I	II	III	IV	
Lineco	x				A.2.3

Biaxiale Langzeitversuche / beschichtet

Die biaxiale Langzeitbetrachtung erfolgte im beschichteten Gewebe Typ 3. *Claessens 170* mit Stoß-auf-Stoß-Verklebungen. Dabei wurde die Klebstoffauswahl der uniaxialen Kurzzeitversuche an beschichteten Geweben aufgegriffen; statt der Betrachtung der PVAc-Dispersion wurde jedoch die ergänzende Betrachtung der EVA-Dispersion mit Fadenbrücken gewählt. Diese schien als besonders relevant vor dem Hintergrund der so bereits häufig in der Praxis üblichen, kombinierten Anwendung:

Klebstoff	Technik				Anhang
Glutinleime	I	II	III	IV	
Störleim 20% + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1)	x				A.3
Störleim 25 % + Arbocel BWB 40 (20:1)	x				A.3
Kunstharzdispersionen	I	II	III	IV	
Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)	x	x			A.3

Anmerkungen Kap. 6

[1] Das gewählte Produkt stellte sich insbesondere in Reinform (Gelita Imagel 20%) in der Verarbeitung als dem Störleim deutlich unterlegen dar, da am Faden eine rasche Abkühlung eintrat, welche der Benetzung und Penetration nicht zuträglich war. So bedurfte es einer stärkeren mechanischen Nachbearbeitung der Klebestelle mittels Feinwerkzeugen. Auch in den Modifikationen mit Weizenstärkekleister sowie Cellulosefasern gestaltete sich das zügige Gelieren als störend. Es wäre daher weitergehend zu prüfen, welche Typen sich ggf. besser eignen könnten. SOPPA erwähnt speziell für Kaltwasserfisch-Gelatinen deutlich niedrigere Gelpunkte (SOPPA 2018, S. 46).

[2] Im Gegenteil, nicht nur zeigen sich auch hier große Qualitätsunterschiede durch die Art der Zubereitung, die Stärke neigt zudem erwiesenermaßen zur Versprödung, mitunter sind auch ungünstige Wechselwirkungen mit dem Glutinleim und eine deutliche Abnahme der Wiederanlösbarkeit im Zuge der Alterung belegt. Siehe u.a. BLÜHER et al. 1999; MILLER, ROOT 1991; RIPPLINGER 2007; SPRINGOB 2001; TEGGE 2004; ULMANN 1970; ZIJDERFELD 1973.

DEMUTH et al. 2011 stellten zudem Einzelfadenverklebungen mit u.a. reinem Weizenstärkekleister der Verklebung mit dem Störleim-Weizenstärkekleister-Gemisch gegenüber (uniaxiale Einzelfadenprüfung). Die Verklebungsfestigkeiten reiner Weizenstärke fielen im Vergleich gering aus.

[3] Die Cellulosefaser-Mischung mit Störleim in 15 % Feststoffkonzentration ließ sich ausgesprochen schlecht verarbeiten; der Klebstoff driftete trotz wasserbindendem Faserzusatz stark in die Fadenlängen hinein und es kam zu einer unerwünschten Tränkung. Hier scheint hinsichtlich der Konzentration von 20 % Feststoffgehalt eine gewisse Minimalgrenze zur Verarbeitung zu bestehen.

[4] Streng genommen handelt es sich bei der Methylcellulose mit Raumtemperatur um eine hochviskose Lösung, erst bei erhöhten Temperaturen tritt Gelbildung ein. Umgekehrt zu den Glutinleimen liegt eine „thermisch induzierte Gelbildung“ vor (vgl. SOPPA 2018, S. 63). Um die gelartige Konsistenz der angesetzten Lösung zu beschreiben, wird trotz dessen im Zuge dieser Arbeit mitunter von Methylcellulose-„Gel“ gesprochen. Im Wesentlichen soll so verdeutlicht werden, in welcher Form die Methylcellulose ggf. den Klebstoffen zugesetzt wurde, und damit vermieden werden, dass fälschlicherweise die ungelöste Pulverform zur Mischung verwendet wird.

Analog dazu sollte auf die klare Angabe von Weizenstärkekleister geachtet werden, um missverstandenen Zusatz des unverkleisterten Pulvers zur Störleimlösung vorzubeugen.

[5] Die gelartige Konsistenz der kalt bei Raumtemperatur (RT ca. 20 °C) verarbeiteten Störleim-Methylcellulose-Mischung ließ sich vergleichsweise gut verarbeiten, zur vollständigen Benetzung der Füge-teile war jedoch eine deutliche Manipulation mittels Feinwerkzeugen erforderlich.

In vorbereitenden Versuchen war zudem bereits anhand reinen Störleims betrachtet worden, dass sich vergleichbare Verklebungsfestigkeiten bei kalter und warmer Störleimapplikation ergaben, sofern eine vergleichbare Penetration und Benetzung durch mechanische Nachbearbeitung erfolgte.

[6] Im Zuge der Verklebungen zeigte sich die Verarbeitung des Celluloseether-„Gels“ zur Stoß-auf-Stoß-Verklebung als sehr unbefriedigend. Der Klebstoff wies in der Einarbeitung unzureichend „Körper“ auf und ließ nicht den Schluss einer zuverlässigen Verklebung zu, da die Fadenenden kaum in eine Klebstoffmatrix eingebundenen schienen. Die überlappend-vermengte Verklebung gestaltete sich als vielversprechender, erforderte jedoch vergleichsweise viel Modellierung und Kom-

pression der Klebestelle in der Verarbeitung, um die erforderliche Benetzung und Adhäsion an der gesamten Klebestelle zu erzielen. Das optische Erscheinungsbild der Verklebung erscheint im Vergleich mit anderen Klebstoffen besonders vorteilhaft als matt und ohne Farbtonvertiefung.

[7] Prinzipiell ließe sich selbstverständlich über Methylcellulosen niedermolekulareren Typs nachdenken, um höhere Feststoffgehalte bei gleichzeitig geringeren Viskositäten zu ermöglichen. Im Zuge dieser ersten Klebstoffmodifikationen ging es jedoch zunächst darum, das Potential des betrachteten Produkts Methocel A4C (äquivalent: Benecel A4C) auszuloten, das als Material bereits weite Verbreitung und Nutzung in der Konservierung und Restaurierung erfährt. Mit abweichenden Celluloseethern für die Technik der Einzelfadenverklebung hat sich zudem GAASCH (2019) beschäftigt.

Stärkeether hingegen scheinen gegenüber Celluloseethern hinsichtlich der Einzelfadenverklebungstechnik keine Vorzüge zu bieten und wurden bislang nicht erwogen. Zu Stärkeethern siehe u.a. WALTRIN 2003 und GÜTTLER 2005.

[8] Während sich diese Eigenschaft hier als Vorteil darstellt, ist dies gleichermaßen der Grund dafür, weshalb sich die MCC nicht als Zusatz zu Störleim als rheologiemodifizierender Füllstoff im Klebstoff zur Einzelfadenverklebung eignet (vgl. FLOCK 2014, S. 221 f.).

[9] Die Verarbeitungseigenschaften der Methylcellulose durch Zusatz der MCC ließen sich insbesondere für die Stoß-auf-Stoß-Verklebung deutlich optimieren (vgl. Anm. 6).

[10] Durch spezielle Aufbereitungsverfahren der Cellulose ergeben sich vollständig neuartige Eigenschaftsprofile. So lassen sich mitunter hochviskose „kleisterartige Pasten“ aus MFC in Wasser herstellen, welche unlösliche Filme ausbilden. Je nach Mischung mit anderen Bindemitteln müssen jedoch nicht zwangsläufig vollständig unlösliche Filme resultieren. Der gezielte Einsatz von Nanocellulosen zur Modifizierung von Methylcellulosen (Klebkraftsteigerung, Viskositätsminderung o.ä.) wird bereits in Forschungsansätzen behandelt, siehe auch KOHLER et al. 2018; KOHLER, SOPPA 2018; SOPPA et al. 2018; SOPPA et al. 2019; DUFRESNE 2012; DREYFUSS-DESEIGNE 2017; GOETZ 2012. Erste eigene Vorversuche mit einer (in Struktur und Viskosität dem verwendeten Weizenstärkekleister ähnelnden) MFC lieferten bei geringerem Feststoffgehalt der klassischen Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung vergleichbare Höchstzugkräfte in Stoß-auf-Stoß-Verklebung (Störleim 20 % + MFC 3 %, GT 1:1 *versus* Störleim 20 % + Weizenstärkekleister 13 %, GT 1:1).

[11] Als übliche Zusammensetzung einer Kunstharzdispersion lassen sich in der Regel festhalten: Wasser 50-70 %, Kunstharz 30-50 %, Netzmittel 1-3 %, Katalysator 1-3 %, Schutzkolloide 0-3 %, Weichmacher 0-5 %, Puffer 0-2 %, Verdicker 0-1 % sowie ggf. weitere Additive. Siehe u.a. DOWN 2009; DOWN 2015; HORIE 2010; DE WITTE et al. 1984; WILKS 1987.

[12] Im Sinne einer einheitlichen Nomenklatur wird weiterhin der Name „Lineco“ synonym für den Neutral pH Adhesive der Fa. Lineco genutzt (vgl. FLOCK 2014). Das Produkt ist gemäß letzter FTIR-Analysen identisch mit den Produkten Pel White neutral pH Adhesive sowie Arcare J55 neutral pH Adhesive der Fa. Arcare, siehe auch im Anhang C.2. Dies wird zukünftig zu überprüfen bleiben. Auf den Gebinden ist der Klebstoff jeweils fälschlicherweise als PVAc deklariert, wohl aufgrund des vergleichsweise geringen Ethylen-Anteils. Nicht zu verwechseln ist Lineco daher mit dem EVA neutral pH Adhesive der Fa. University Products (vgl. Anm. 14).

Von der Verfasserin bereits 2010 hergestellte Filme der beiden Klebstoffe Lineco und Evacon-R lassen sich noch immer wässrig anlösen. Die Extrakte der Filme sind stabil pH-neutral. Tendenziell hat die Löslichkeit bei Lineco minimal abgenommen; im Gegensatz zu Evacon-R zeigen die Lineco-Filme zudem auch unter Lagerung bei Lichtausschluss vergleichsweise zügig leichte Gelbungen. Dies deutet auf oxidative Alterungsprozesse hin und sollte daher kritisch beobachtet und nach Möglichkeit untersucht werden. Es kann vermutet werden, dass der PVAI-Anteil hierbei eine Rolle spielt (vgl. u.a. HORIE 2010, S. 39-42).

[13] In vorausgehenden Versuchen zeigte der Klebstoff Lineco besonders homogene Eigenschaften als freier Klebstofffilm (vgl. FLOCK 2014, S. 130) und wurde in den letzten Jahren zunehmend populärer für die Technik der Einzelfadenverklebung. Aufgrund dessen und wegen der vergleichsweise weichen Klebstoffeigenschaften mit anzunehmenden viskosen Eigenschaftsanteilen wurde Lineco (mit/ohne MC-Zusatz) als Standard-Klebstoff für erweiterte Betrachtungen mit exemplarischen Verklebungen ausgewählt. Auf diese Weise wurden besser von den Gewbeeigenschaften differenzierbare Verklebungseigenschaften in den Versuchen angestrebt (vgl. Kap. 5.1.4 und 5.2.3).

[14] In ersten ersten vergleichenden Zugprüfungen an verklebten Einzelfäden stellte sich das stark abweichende Eigenschaftsprofil von Evacon-R im Vergleich zu Lineco weniger deutlich dar (vgl. DEMUTH et al. 2011; FLOCK 2014). Im Rahmen aufbauender Zugversuche an verklebten Gewebestreifen durch die Verfasserin zeigte sich jedoch deutlich das ungeeignete Eigenschaftsprofil von Evacon-R als Klebstoff für die Einzelfadenverklebung; daher wurde Evacon-R in dieser Anwendung verworfen.

Ebenfalls im Rahmen von Vorversuchen an uniaxialen Gewebestreifen betrachtet und aufgrund unbefriedigender Klebstoff- bzw. Verklebungseigenschaften für die Einzelfadenverklebung verworfen wurden zudem die Klebstoffe: Planatol BB Buchbinderleim (PVAc-Dispersion), Vinamul 8852 (PVAc-Dispersion) und University Products' EVA neutral pH Adhesive (EVA-Dispersion).

[15] Im Gegensatz zu Lineco stellte sich an Evacon-R keine Verfestigungstendenz hinsichtlich der erzielten Höchstzugkraft durch Methylcellulosezusatz an freien Filmen in der Zugprüfung dar, jedoch eine Abnahme der Höchstzugkraftdehnung (vgl. FLOCK 2014). Daher ist fraglich, inwiefern der MC-Zusatz im Hinblick auf das Anforderungsprofil der Fadenbrücken von Vorteil ist (vgl. Kap. 4.1). In Bezugnahme auf das Löslichkeitsverhalten des reinen Films ist der Zusatz hinsichtlich der Reversibilität ggf. verzichtbar.

[16] Mitunter werden auch Glutinkleime gezielt vernetzt (~ gegerbt) und damit u.a. wasserunlöslich gemacht. Im Kontext der Einzelfadenverklebung findet sich das Beispiel der Vernetzung von Störleim mit Dialdehyd (vgl. WUNTSCHEK 1997).

[17] Anhand der mitgeteilten Problemstellung sowie der allgemeinen Kriterien zur Klebstoffauswahl erfolgte die Auswahl und freundliche Bereitstellung von Produktmustern durch die Firmen Ecronova/Michelman sowie Jäklechemie (es erfolgte somit keine weitere proaktive Recherche nach gezielten Produkteigenschaften durch die Verfasserin, sondern lediglich eine erste Betrachtung der gelieferten Materialvorschläge vernetzender/nach-vernetzter Thermoplaste; im Falle des Anwendungswunsches eines vernetzten thermoplastischen Dispersionsklebstoffsystems wäre die genaue Produktauswahl daher nochmals gezielt zu hinterfragen):

- a) Ecronova RA 646 H, Reinacrylat-Dispersion mit Selbstvernetzung (OH-Gehalt 1,8 %),
- b) Ecrothan 4075, wässrige Polyurethan-Dispersion (auf Basis von Polyesterpolyolen) und

c) Ecrovin LV 340 eco, wässrige Polyvinylacetat-Dispersion (auf Basis Vinylacetat/ Vinylversat/ Maleinsäureester).

Die beiden letzteren Dispersionen b) und c) weisen keine Selbstvernetzung auf, können laut Firma jedoch auch durch Zugabe von Isocyanat vernetzt werden; empfohlen wurde dazu das Produkt Bayhydur ultra 305 (hydrophiles, aliphatisches Polyisocyanat auf Basis von Hexamethylendiisocyanat).

Gemäß Firmenauskunft sind zwei Mechanismen zu unterscheiden, je nachdem, ob man ein Bindemittel mit OH- bzw. NH-Funktionalität oder ein nicht-funktionelles Bindemittel vorliegen habe: Während bei funktionellen Bindemitteln die Isocyanatmenge über die Äquivalentgewichte zur Vernetzung ermittelt werde, nutze man bei nicht-funktionellen Bindemitteln die Isocyanat-Nebenreaktion mit Feuchtigkeit. Dies könne als Pseudo-2K-Reaktion bezeichnet werden, da das Isocyanat kein Netzwerk mit dem Bindemittel eingehe, sondern ein interpenetrierendes Harnstoffnetzwerk ausbilde. Dabei sei zu berücksichtigen, dass die Harnstoffsegmente in Polyurethanstrukturen die Hartsegmente darstellen, man also nur geringe Mengen Isocyanat zufügen könne, hohe Mengen führten zur Versprödung (freundliche schriftliche Mitteilung Harald Gebbeken, Fa. CSC Jäcklechemie GmbH & Co. KG, 25.02.2019).

[18] Der Erfolg hinsichtlich einer gewünschten Wasserquellbarkeit war trotz vergleichsweise hohen Anteils der MC eher mäßig. Verkürzt dargestellt zeigten sich die getrockneten Filme der Mischungen als:

Ecrovin + Bayhydur: nicht wasserquellbar; Ecrovin + Bayhydur + MC: leicht bis schlecht wasserquellbar; Ecronova + Bayhydur + MC: nicht erkennbar wasserquellbar, aber bei Beprobung splitterig (vermutlich zu hoher Anteil Isocyanatvernetzer); Ecrothan + Bayhydur + MC: leicht wasserquellbar.

Aufgrund der hohen Reaktivität der Isocyanate können diese mitunter auch als Haftvermittler eingesetzt werden; in diesem Kontext ergibt sich ggf. der Ausblick auf neue Ansätze zur Problemstellung der Einzelfadenverklebung in wachs-harz-getränkten oder synthetischen Geweben.

[19] Hier ließen sich durch Zugabe der MC zwar die Verarbeitungseigenschaften verbessern (Viskositätssteigerung), jedoch keine Wasserquellbarkeit des Films erzielen. Vermutlich behindert das starre Polymer die Quellbarkeit der MC. Zudem handelte es sich hier um den einzigen Fall einer als Pulver zugesetzten MC. Während u.a. in Dispersionen die Zugabe des MC-“Gels“ erfolgen muss, um homogene Mischungen ohne Verklumpungen o.ä. erzielen zu können, stellt es sich am Cyanacrylat genau umgekehrt dar. Durch die mit Feuchtigkeit einsetzende Polymerisation verklumpt eine Mischung von Cyanacrylat und MC-“Gel“ sofort.

[20] Dieser Tendenz zeigte sich bereits in Untersuchungen von REUBER (2010) und DEMUTH et al. (2011) in der Zugprüfung von mittels Epoxid verklebten Einzelfäden im Klebstoffvergleich.

7

Evaluierung der Prüfmethodik

Nachfolgend werden die vorgestellten Prüfungen hinsichtlich ihrer Eignung für die Charakterisierung von Klebstoffen und Techniken zur Einzelfadenverklebung in ihren entscheidenden Vor- und Nachteilen erläutert. Dabei werden ausgewählte Punkte diskutiert und mögliche Optimierungen sowie Modifizierungen aufgezeigt.

7.1 Streuung von Messwerten

Als wesentliche Problematik im Kontext zu erwägender Prüfungen für die Evaluierung von Einzelfadenverklebungen stellen sich die mitunter breiten Streuungen der Messergebnisse dar. Als grundsätzlich für alle Prüfungen zu berücksichtigender Punkt wird daher eingangs der Umgang mit allgemein auftretenden Messwertstreuungen anhand der ersten uniaxialen Validierungsversuche dargestellt.

Trotz gleicher Parameter hinsichtlich u.a. Probenmaterial, Probekörperzuschnitt, Anzahl verklebter Fäden, Klebstoffmenge oder Zuggeschwindigkeit zeigten die Versuchsreihen je nach Klebstoff und Verklebungstechnik Abweichungen in Form von mehr oder weniger stark verringerten und/oder erhöhten Höchstzugkräften (F_{max}) sowie der zugehörigen Variationskoeffizienten (VK) als Streuungsmaß. Im Gegensatz dazu lieferten alle intakten Referenzproben besser vergleichbare Ergebnisse.

Im Rahmen einer Fehleranalyse konnten u.a. die klimatischen Bedingungen während Produktion, Lagerung und Prüfung, abweichende Klebstoffdosierungen, veränderte Zusammensetzungen/Materialfehler der Klebstoffe, variierende Lagerdauer vor Prüfung oder Un-

genauigkeiten der Prüfgeräte (Kalibrierung) als Gründe für die mitunter hohen Abweichungen ausgeschlossen werden. Des Weiteren wurden alle Verklebungen von derselben Person ausgeführt, sodass anhand der genannten Punkte eine größtmögliche Standardisierung zu erwarten ist.

Grundvoraussetzungen des Materials

Bei der Betrachtung der Höchstzugkraft im Zugversuch handelt es sich nicht nur um die von den Einzelfadenverklebungen ertragene Last, sondern gleichsam auch des verklebten Gewebes. Die einzelnen Fäden und ihre Fasern werden verschieden stark gedehnt und erfahren unterschiedlich starke Reibungseffekte untereinander, sodass sich lokale Steifigkeitsunterschiede ausformen (vgl. Abb. 7.01).

Jeder einzelne Faden eines Gewebes wird dabei durch systemimmanente Variationen bestimmt: Dazu zählen Anzahl, Länge und Struktur der gezwirnten Einzelfasern, Grad der Torsion, Fadendurchmesser und -gleichmäßigkeit. Aus diesen ergeben sich eine unterschiedliche Benetzung und Penetration des Klebstoffs in die Fadenenden von variierender Struktur und Porosität. Folglich resultieren variierende Adhäsion, Kohäsion und Ausformungen der Klebestellen (vgl. Abb. 7.02).

Daher wurden umfangreiche Zusatzversuche zur möglichen Identifizierung und Quantifizierung beeinflussender Faktoren der Faden- und Gewebegeometrie durchgeführt.¹

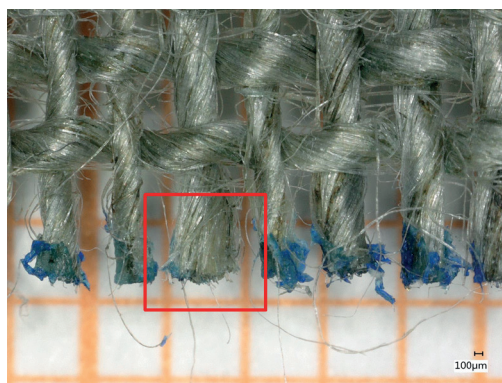
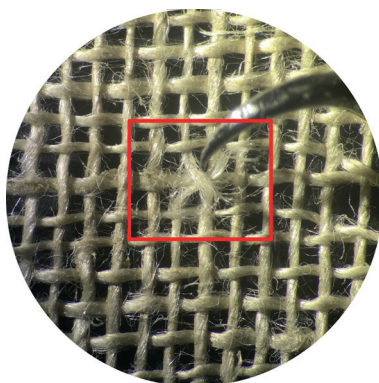


Abb. 7.01: Links die Detailaufnahme einer Referenzprobe ohne Verklebung nach Zugprüfung bis zur Höchstzugkraft; die einzelnen Fäden reißen ungleichmäßig über die gesamte Prüflänge verteilt entsprechend ihrer lokalen Schwachstellen.

Abb. 7.02: Rechts eine nachträglich angefärbte Verklebung nach Öffnung im Zugversuch; erkennbar ist die uneinheitliche Benetzung und Penetration des Klebstoffs je einzeltem Faden.

¹ FLOCK et al. 2020 (a).

Umgang mit Streuungen

Die aufbauenden Untersuchungen zeigten, dass sich die Streuungen der Verklebungsqualitäten immanent aus der Einzelfadenverklebungstechnik und dem Gewebesubstrat ergeben. Auch durch Berücksichtigung individueller Fadenquerschnittsflächen lassen sich die Variationen nicht oder nur geringfügig reduzieren. Unter Voraussetzung des Ausschlusses vermeidbarer Fehlerquellen (~ systematische Fehler) sind daher Messwertstreuungen als zufällige Fehler zu akzeptieren. Eine zu hohe Standardisierung von Technik oder Probenmaterial würde hingegen eine stark von der restauratorischen Bearbeitungspraxis entfernte Abstraktion bedingen. Ziel sollte es daher sein, möglichst repräsentative Streubereiche durch hohe Stichprobengrößen (~ Probenanzahlen) darzustellen, um die für praktische Anwendungen limitierenden Minima und Maxima aufzuzeigen (vgl. nachfolgend Abb. 7.08). So muss die Mindestfestigkeit im Kurzzeitversuch bzw. Mindestbeständigkeit im Langzeitversuch durch Anwendung von Klebstoff und Verklebungstechnik erfüllt werden können, während die maximalen Obergrenzen hinsichtlich der Schadensprävention am Gemälde zu berücksichtigen sind (vgl. Kap. 4.1).

Verteilung der Messwerte

Der Umgang mit systemimmanenten Streuungen setzt voraus, dass sich diese durch die angewandte Statistik sinnvoll beschreiben lassen. Dabei ist insbesondere in Erwägung zu ziehen, dass bei Vergleich unterschiedlicher Versuchsreihen eine Entwicklung der Messwerte vorliegen könnte, bspw. im Sinne einer sich durch Erfahrungszuwachs steigernden Verklebungsqualität. Ein derartiger Trend konnte in den vorliegenden Messdaten jedoch mittels einer Varianzanalyse zum Vergleich der Prüftermine ausgeschlossen werden.

Des Weiteren ist für nachfolgende Betrachtungen zu berücksichtigen, dass die Höchstzugkraft unter Umständen nicht symmetrisch verteilt ist, da besonders niedrige oder hohe Verklebungsfestigkeiten nicht gleich wahrscheinlich sind. Neben der Normalverteilung wurden daher zudem beispielhaft zwei asymmetrische Verteilungen berücksichtigt.²

Im Falle des unbeschichteten Testgewebes *I. Sironi* lassen sich für intakte Referenzproben die Höchstzugkräfte im uniaxialen Zugversuch recht gut anhand einer (symmetrischen) Normalverteilung beschreiben (vgl. Abb. 7.03).

² Siehe u.a. BOURIER 2008; SACHS, HEDDERICH 2006.

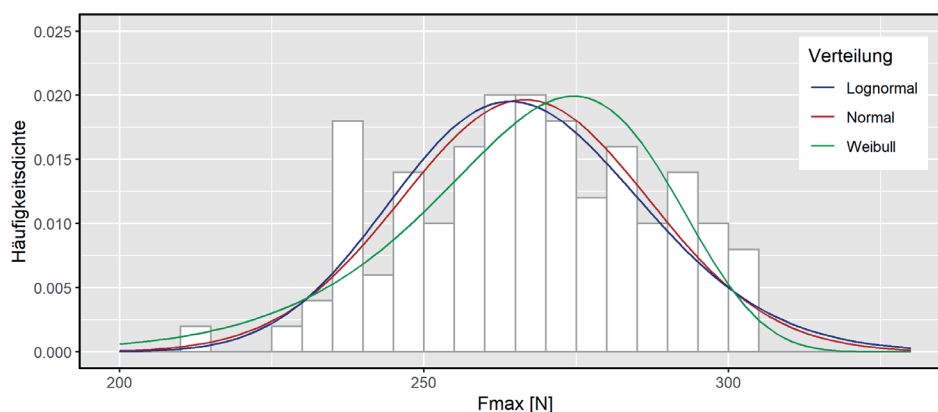


Abb. 7.03: Häufigkeitsdichte der Höchstzugkraft (F_{max}) der intakten Referenzproben des Testgewebes Typ *I. Sironi* mit exemplarischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen.

Für die einzelnen Klebstoffe und ihre Verklebungstechniken hingegen lassen sich aufgrund kleineren Stichprobenumfangs der durchgeführten Versuche weniger deutliche und nur recht grob unterteilte Häufigkeitsdichten auftragen. Daher wurde zur exemplarischen Veranschaulichung die Häufigkeitsdichte der verschiedenen Verklebungstechniken für alle Klebstoffe der Validierungsversuche zusammengefasst betrachtet (vgl. Abb. 7.04-07).

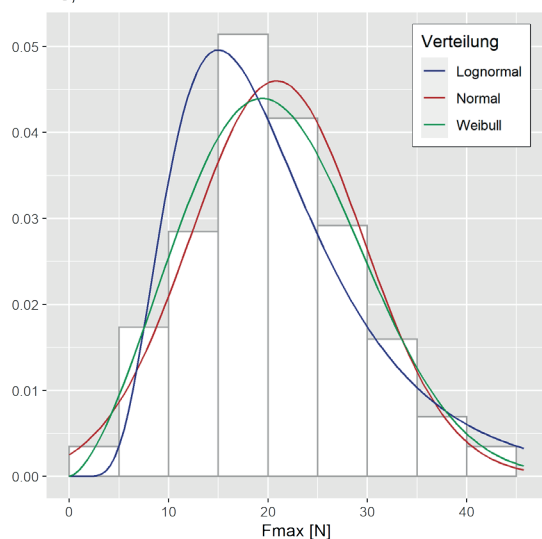


Abb. 7.04: Links Häufigkeitsdichte der Höchstzugkraft (F_{max}) aller Klebstoffe in Stoß-auf-Stoß-Technik (SAS) sowie

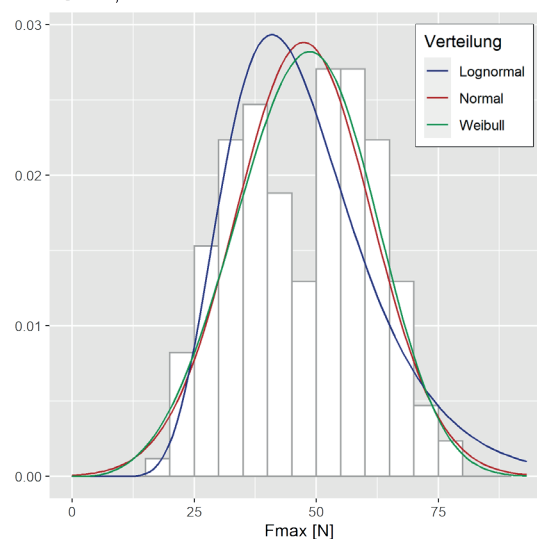


Abb. 7.05: rechts Häufigkeitsdichte der Höchstzugkraft (F_{max}) aller Klebstoffe in Stoß-auf-Stoß-Technik mit Fadenbrücken (SAS+B), jeweils im Testgewebes Typ *I. Sironi* mit exemplarischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen (uniaxialer Zugversuch).

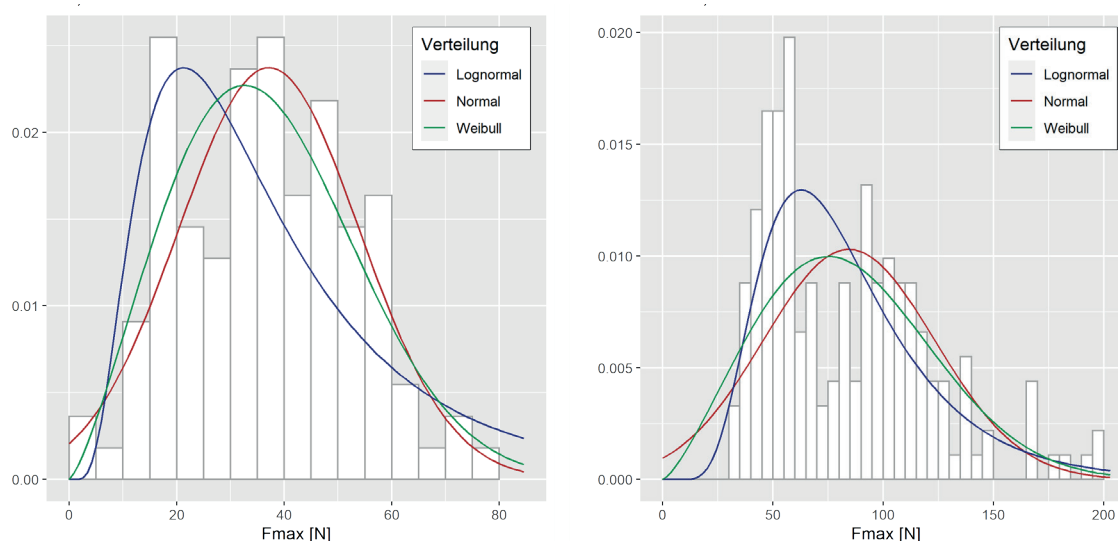


Abb. 7.06: Links Häufigkeitsdichte der Höchstzugkraft (F_{\max}) aller Klebstoffe in einfach überlappender Technik (Ü) sowie

Abb. 7.07: rechts Häufigkeitsdichte der Höchstzugkraft (F_{\max}) aller Klebstoffe in überlappend-vermengter Technik (Ü+V), jeweils im Testgewebes Typ 1. *Sironi* mit exemplarischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen (uniaxialer Zugversuch).

Allgemein stellen sich die Höchstzugkräfte je nach Klebstoff als recht unterschiedlich dar, sodass sich hier keine unimodalen Verteilungen ergeben; prinzipiell sollten die Klebstoffe separat betrachtet werden. Es lässt sich jedoch an diesen Mischbetrachtungen bereits besser darstellen, dass sich im Falle der Verklebungen eher eine rechtsschiefe Verteilung für zukünftige Beschreibungen anbietet. Dies könnte bei geeigneter Wahl der Parameter bspw. eine Lognormal- oder Weibullverteilung sein. [Anm. 1]

Des Weiteren ist es daher nicht sinnvoll, wie mitunter zur Evaluierung von Einzelfadenverklebungen in der Literatur zu finden, auf einer Normalverteilungsannahme basierende Konfidenzintervalle zu betrachten (bspw. 95%-Vertrauensbereich; induktive Statistik). Eher bietet sich die Auswertung von arithmetischem Mittel, dessen Standardabweichung bzw. zum Vergleich der Messreihen der Variationskoeffizienten als Streuungsmaß an (deskriptive Statistik). Dies ist bereits häufig übliche Praxis in entsprechenden Untersuchungen.

Sinnvoll ist zudem die Betrachtung von den gemessenen Minima und Maxima als Extremwerten, da diese aus der Standardabweichung nicht ablesbar sind, jedoch wie bereits dargelegt die praktische Entscheidungsfindung maßgeblich bestimmen. [Anm. 2]

Gesamtstatistik

Da systematische Fehler ausgeschlossen werden konnten, ein hohes Maß an Standardisierung umgesetzt wurde und auch die statistische Datenanalyse keine allgemeine zeitliche Entwicklung belegen konnte, wurden alle wiederholten Validierungsversuche an uniaxialen Gewebestreifen nicht nur einzeln, sondern auch als Gesamtstatistik evaluiert (alle Details zu den Einzelversuchen und Messwerten lassen sich unter A.1.1 nachvollziehen).

Die Abb. 7.08 zeigt eine solche Messwert-Gesamtstatistik der Wiederholungen, bei der auch die Minima und Maxima der einzelnen Konfigurationen Berücksichtigung finden.

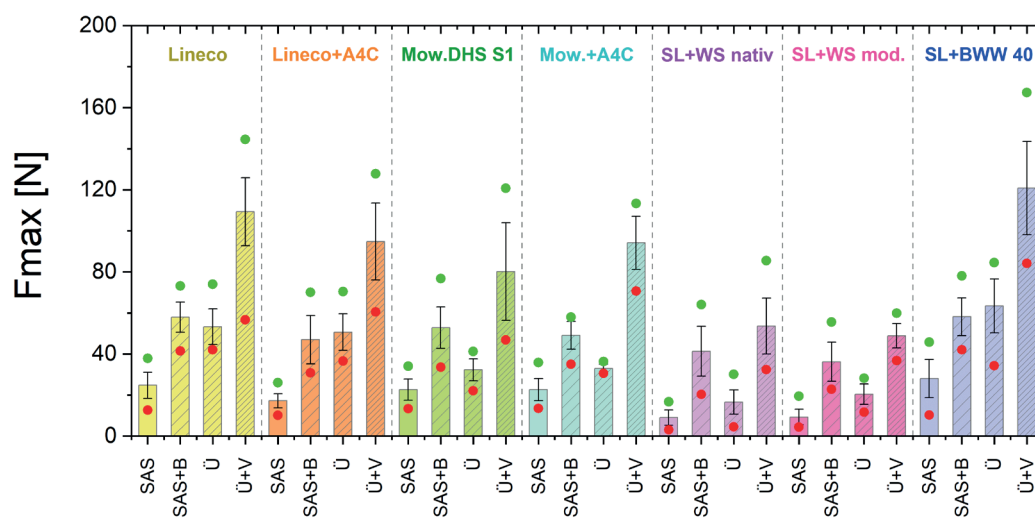


Abb. 7.08: Darstellung der arithmetischen Mittelwerte der Höchstzugkraft an uniaxial geprüften unbeschichteten Gewebestreifen (Typ I, Sironi) mit Verklebung in unterschiedlichen Techniken und Klebstoffen (vgl. A.1.1).

Neben den Standardabweichungen in Form der Fehlerbalken wurden zudem die Minima (rot) und Maxima (grün) der erzielten Höchstzugkräfte visualisiert.

Die uni- und biaxialen Kurzzeitversuche ließen sich somit nicht wie ursprünglich geplant zur direkten Rekonstruktion vorangegangener Messdaten nutzen. Es konnte jedoch dahingehend eine Validierung der Messergebnisse umgesetzt werden, dass die Streuungsbereiche der unterschiedlichen Techniken und Klebstoffe eine verbesserte Abbildung erfahren haben. Dabei ist festzuhalten, dass sich durch Prüfung erhöhter Stichprobenanzahlen und/oder die Auswertung als zusammenfassende Gesamtstatistik nicht zwangsläufig auch die Variationskoeffizienten reduzierten. Teils fiel der Trend auch gegenläufig erhöht aus [Anm. 3]. Grundsätzlich ist das Konzept der Versuchswiederholung somit unabkömmlich, insbesondere im Falle initialer Versuche mit logistisch bedingt zunächst vergleichsweise geringen Stichprobengrößen je Konfiguration. Auch eher geringe Streuungen erster Stichproben

bedeuten nicht unmittelbar eine gesicherte Reproduzierbarkeit der Messwerte oder valide Abbildung des potentiellen Streumaßes. [Anm. 4]

Vor diesem Hintergrund sind alle weiteren Ausführungen zu betrachten.

7.2 Uniaxiale Kurzzeitversuche

Die Durchführung uniaxialer Zugversuche an Gewebestreifen stellt eine relativ unkomplizierte Möglichkeit zur ersten vergleichenden Verklebungsevaluierung unterschiedlicher Klebstoffe und Techniken dar. Die Verfolgung dieses Prüfaufbaus bietet sich auch für zukünftige Betrachtungen an; dabei sollten jedoch wesentliche Limitationen bedacht und möglicherweise gezielte Modifikationen des bisherigen Standard-Setups vorgenommen werden.

7.2.1 Charakterisierung von Verklebungseigenschaften

Zwecks Differenzierbarkeit der Messergebnisse sollten weiterhin vollständig intakte oder auf voller Breite verklebte Proben geprüft werden. [Anm. 5]

Festigkeit

Anhand der Durchführung quasistatischer Zugprüfungen in konstanter Verformungsgeschwindigkeit, bis zum Versagen des intakten Gewebematerials bzw. der eingebrachten Verklebungen, bietet sich ein direkter Vergleich der Höchstzugkräfte verschiedener Verklebungstechniken und Klebstoffe. Im Gegensatz zu bspw. der freien Klebstofffilmprüfung werden so auch konkrete Aussagen zur zwischen Substrat und Klebstoff stattfindenden Adhäsion möglich. Aufgrund erhöhter Praxisrelevanz sollte die Prüfung verklebter Gewebe statt Einzelfäden erfolgen. Neben der abweichenden (erschweren) Bearbeitungssituation in der Verklebung und Berücksichtigung der Fadenstruktur im Gewebe (Erhalt von Torsion und gewundenem Verlauf) bilden sich zudem weniger hohe Streuungen durch gleichzeitige Prüfung mehrerer verklebter Fäden ab.³ Es liegt jedoch auf der Hand, dass eine ausschließlich anhand von Höchstzugkräften des Kurzzeitversuchs durchgeführte Klebstoffevaluierung nicht voraussagen vermag, inwiefern sich eine aufwändige Verklebung in der Praxis als dauerhaft belastbar und geeignet erweist (vgl. Kap. 4.1).

3 Vgl. FLOCK et al. 2020 (a).

Dehnung

Im Falle der ausschließlichen Ermittlung einer technischen Dehnung findet keine Berücksichtigung inhomogener Probendehnungen statt; das Deformationsverhalten von Klebestelle und Gewebe lässt sich kaum voneinander abgrenzen und nicht getrennt quantifizieren. Es ist so keine explizite Charakterisierung der Verklebungseigenschaften möglich. Die sich aus der Längenänderung ergebenden Dehnungswerte korrelieren in der Regel ähnlich unmittelbar mit der aufgezeichneten Kraft, da sich die Gewebedehnung als dominant darstellt. Ein Vergleich der technischen Dehnung zur Beurteilung der Verklebungen bot daher mit den gewählten Prüfparametern kaum Mehrwert (vgl. Kap. 7.2.2 und 8.1.2).

Die technische Dehnung ist zudem fehleranfällig gegenüber möglichem Rutschen der Proben oder Verformungen der Maschinenteile unter Belastung.

Anfertigungsaufwand und Statistik

Bei einfachen Gewebestreifen vergleichsweise schmaler Probenbreite (hier: 12 Fäden) hielt sich der Aufwand von Zuschnitt und Verklebung in vertretbaren Grenzen. Insbesondere das Konzept einer initialen Prüfung von Stoß-auf-Stoß-Verklebungen in unbeschichteten Testgeweben, mit einer Stichprobengröße $n \geq 10$ zur ersten Verklebungsevaluierung, erschien einen probaten Kompromiss zu bieten. So kann ein vergleichsweise unkomplizierter Vergleich von Verklebungsfestigkeiten anhand der gemessenen Höchstzugkräfte erfolgen, d.h. im Sinne der allgemeinen Adhäsion sowie des Bruchverhaltens mit dem reinen Gewebesubstrat. In SAS-Technik liegt keine zusätzliche mechanische Verankerung wie bei der Ü+V-Verklebung vor, sodass sich das adhäsiv-kohäsive Verhalten des Klebstoffs selbst besser abgrenzen lässt. Eine Abbildung des Streubereichs oder repräsentativen Mittelwerts kann jedoch ggf. nicht gewährleistet werden (vgl. Kap. 7.1).

Anwendungsfall

Mittels uniaxialer Zugprüfung können zudem immer nur Schuss- oder Kettsystem betrachtet werden. Unberücksichtigt bleibt, wie die beiden Fadensysteme miteinander interagieren, d.h. inwiefern sich bei zusätzlich orthogonalem Zug Reibungswechselwirkungen und Querversteifung auf Gewebe und deren eingebrachte Verklebungen auswirken.

Hinzu kommt, dass durch die konstant zunehmende Dehnung der Probe in der Versuchsführung auch die Belastung im Verlauf steigt. Daher ist die Prüfungsführung grundsätzlich nicht mit dem vergleichbar, was ein textiler Bildträger bzw. ein Gemälde und dessen Einzelfadenverklebungen unter dauerhafter Aufspannung erfahren (vgl. Kap. 3.1.3).

7.2.2 Wahl der Prüfparameter

Alle Messwerte der Zugprüfung sind grundsätzlich direkt mit den gewählten Parametern verknüpft. Messwerte können daher nicht als allgemeingültig verstanden werden. Für anzustrebende Vergleiche unterschiedlicher Testreihen erfordert es grundsätzlich identische Parameter in allen Bereichen der Prüfungsführung (Probekörperstruktur und -geometrie, Einspannlänge, Zuggeschwindigkeit etc.).

Dabei ist insbesondere zu bedenken, dass die viskosen Eigenschaftsanteile von Geweben und Klebstoffen sich grundsätzlich geschwindigkeitsabhängig verhalten, somit also die Messergebnisse (mehr oder weniger stark) von der Zuggeschwindigkeit abhängig sind. So können sich darstellende Verklebungseigenschaften ggf. sehr unterschiedlich zum Anwendungsfall im Gemälde ausfallen.

Beschichtung

Beschichtungen der geprüften Gewebe wirkten sich allgemein verfestigend und in gewissem Maße anisotropie-ausgleichend auf die Gewebeeigenschaften aus [Anm. 6].

So ließ sich im Rahmen der uniaxialen Prüfung von Verklebungen in beschichteten Gewebestreifen auch die grundlegende Einflussnahme der Beschichtungen auf die Verklebungen betrachten, während unbeschichtet zunächst nur die reine Gewebeadhäsion. [Anm. 7]

Allgemein scheint es sich für die Betrachtung von Verklebungen als vorteilhaft darzustellen, wenn auch beschichtete Gewebe geprüft werden und so die zuvor stark dominanten Gewebeeigenschaften weniger präsent die Messung bestimmen (vgl. Kap. 8.1.3). Bei Prüfung in den bislang üblicherweise gewählten Einspannlängen (>> geprüfter Probenbreite) war jedoch wie an unbeschichteten Geweben keine explizite Charakterisierung des Verformungsverhaltens der Klebefuge anhand der technischen Dehnungen möglich, da die Gewebestruktur und Länge des verklebten Substrats die Gesamtdehnung und -steifigkeit zu maßgeblich beeinflussten. [Anm. 8]

Probenbreite

Im uniaxialen Zugversuch zeigten sich für die intakten un- und beschichteten Testgewebe bei verdoppelter Breite annähernd proportional etwas mehr als verdoppelte Höchstzugkräfte und leicht erhöhte Höchstzugkraftdehnungen (vgl. A.1.3 / Abb. 37-38). So reagierten die Gewebestrukturen bei erhöhter Anzahl gleichzeitig geprüfter intakter Fäden insgesamt etwas toleranter gegenüber Zugbelastung. [Anm. 9]

Bei Prüfung von auf voller Breite verklebten Gewebestreifen konnte hingegen der gegen-
teilige Trend beobachtet werden; mit erhöhten Probenbreiten, d.h. steigender Anzahl ver-
klebter Fäden, fallen tatsächliche Werte geringer aus als die auf Proportionalität basieren-
den Prognosen. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die Messwertstreuungen.⁴

So ist es nicht sinnvoll, wie häufig im Kontext der Rissverklebung in fachspezifischen Pu-
blikationen vorzufinden, vom arithmetischen Mittelwert schmaler verklebter Streifen auf
vermeintlich erwartbare Höchstzugkraft pro meterlanger Verklebung zu schließen.

Sinnvoller erscheint es hingegen, umgekehrt eine Mindest-Adhäsion für jeden einzelnen
schmalen Probekörper auf Grundlage einer erforderlichen breitenbezogenen Kraft [N/m]
als Orientierung festzulegen. [Anm. 10]

Prinzipiell ist die Prüfung einer möglichst hohen Anzahl verklebter Fäden erstrebenswert.

Einspannlänge

Bei Prüfung der intakten un- und beschichteten Testgewebe in unterschiedlichen Einspann-
längen zeigte sich prinzipiell ein Anstieg der Höchstzugkräfte mit Verkürzung der Ein-
spannlänge (vgl. A.1.6 / Abb. 05 und 07). Gleichsam reagierten die Gewebe steifer auf
Zugbelastung (vgl. A.1.6 / Abb. 10). Dies war zu erwarten und ist auf die bereits erwähnte
zusammengesetzte Struktur der Fäden aus Einzelfasern zurückzuführen, welche kürzer ein-
gespannt eher auf ihrer Gesamtlänge eingefasst werden und daher weniger voneinander ab-
gleiten (vgl. Kap. 5.1.4). [Anm. 11]

Eine Begrenzung des umgekehrten Effekts für höhere Einspannlängen ergibt sich somit bei
Prüfung einer dem Zusammenspiel der Einzelfasern und ihrer Einzelgesamtlänge repräsen-
tativen Einspannlänge (vgl. Kap. 5.1.4). Daraus folgt die Prüfung möglichst hoher Ein-
spannlängen bei Wunsch nach repräsentativer Charakterisierung minimaler Festigkeiten
von Gewebestrukturen, wie sie auch als Referenzwerte für die Evaluierung von Einzelfa-
denverklebungen dienen sollten (vgl. Kap. 4.1).

Anders als bei längerer Einspannlänge ($LE \gg$ geprüfter Probenbreite) ließen sich Verkle-
bungseigenschaften innerhalb beschichteter Gewebestreifen bei exemplarischer Prüfung
kürzerer Einspannlängen ($LE =$ Probenbreite) besser als solche abbilden. Auf diese Weise
ließ sich auch eine dehbare Verklebung mit verminderter Steigung im Anfangsbereich der
Messkurven (\sim Steifigkeit) im Vergleich zur intakten Gewebereferenz abgrenzen (vgl.
A.1.6 / Abb. 13-15). So könnten zum einen Messkurven der Proben hinsichtlich der Stei-

4 Vgl. FLOCK 2014; FLOCK et al. 2020 (a).

gung besser untereinander verglichen, zum anderen zumindest näherungsweise eine Steifigkeit der Klebung abgeleitet werden. Sowohl bei un-, als auch beschichteten Geweben erlaubte die Prüfung verkürzter Einspannlängen zudem eine präzisere Darstellung des Klebungsversagens durch „höhere Auflösung“ der Messkurven (vgl. A.1.6 / Abb. 11-12). [Anm. 12]

Im Zuge der Prüfung verkürzter Einspannlängen mit Verklebungen ist jedoch ggf. mit herabgesetzten Probenfestigkeiten und/oder erhöhten Streuungen im Vergleich zu erhöhten Einspannlängen zu rechnen, da die einzelnen Verklebungen unmittelbarer, d.h. ohne ausgleichend vorgeschaltete Gewebestruktur, Beanspruchung erfahren (vgl. A.1.6 / Abb. 13). Speziell bei Wunsch nach genauerer Charakterisierung der Klebefugeneigenschaften via technischer Dehnung könnte sich jedoch eine verkürzte Einspannlänge für zukünftige Betrachtungen anbieten. [Anm. 13]

Zuggeschwindigkeit

An den intakten un- und beschichteten Testgeweben der Auswahl zeichneten sich prinzipiell zu erwartend leicht reduzierte Höchstzugkräfte und erhöhte Dehnungen durch Prüfung in niedrigeren Prüfgeschwindigkeiten ab (vgl. A.1.7 / Abb. 01-04, 07-08). Der Einfluss bei Prüfung verklebter Proben ließ sich noch deutlicher im Vergleich der Messkurven abgrenzen; auch hier ergaben sich mitunter verminderte Höchstzugkräfte der Verklebungen bei langsameren Prüfraten (vgl. A.1.7 / Abb. 09-12). Die einhergehende technische Dehnung stellte sich ebenfalls als reduziert dar; dies ist insofern nicht fehlzuinterpretieren, dass je nach Klebstoff vielmehr auch von einer erhöhten Aufdehnung der eigentlichen Klebestellen bei langsamerem Zug auszugehen ist (vgl. A.1.7 / Abb. 13 sowie Kap. 3.3.1 und 3.3.2). Letztlich wird die Prüfung in geringeren Prüfgeschwindigkeiten so eher der Materialevaluierung bei späterer Anwendung der Einzelfadenverklebung im Gemälde gerecht, da viskose Eigenschaftsanteile der Klebstoffe sich eher abzubilden vermögen.

Es sollte daher erwogen werden, die bislang vergleichsweise hoch gewählten Prüfgeschwindigkeiten in zukünftigen Versuchen zu reduzieren.

7.2.3 Möglichkeiten der Versuchserweiterung

Ein wesentlicher Vorzug des einfachen uniaxialen Zugversuchs besteht in der großen Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher initial zu bearbeitender Fragestellungen, z.B. unter-

schiedlicher Gewebematerialien, Einflussnahme derer Vorbehandlungen oder Prüfung unter Extremklimata, bei gleichzeitig vergleichsweise einfacher Durchführung.

Zyklische Belastung

In der uniaxialen Zugprüfung zuvor zyklisch vorbelasteter intakter un- und beschichteter Proben ließ sich eine potentielle Versteifung des Probenmaterials bei tendenziell leicht erhöhten Höchstzugkräften nachvollziehen (vgl. A.1.8 / Abb. 18-20). In Abgrenzung dazu zeigte eine kurzzeitig einmalig aufgebrachte Last unterhalb der Versagensgrenze mitunter keine bis deutlich geringere Effekte bei späterer uniaxialer Zugprüfung. [Anm. 14]

An Proben mit eingebrachter Verklebung scheinen sich potentiell leicht reduzierte Verklebungsfestigkeiten durch zyklische Vorbelastung auszubilden, wobei der Effekt insbesondere an steif beschichteten Geweben durch die Reduzierung der ausgleichenden Gewebeweglichkeit zu erwarten ist. Es ließ sich zudem eine deutlichere Versteifung und Abnahme der Höchstzugkraftdehnung für die Proben mit exemplarischen Verklebungen im Vergleich zu den Referenzproben nachvollziehen (vgl. A.1.8 / Abb. 21-23).

Die zyklische Zugbelastung an Gewebestreifen bietet somit interessante Möglichkeiten der Versuchserweiterung. Durch gezielte Vorbehandlung von Probenmaterial ließe sich eine dem Realfall des natürlich gealterten Gemäldes besser vergleichbare Struktur durch Modifizierung des intakten Probenmaterials (~ Ermüdung) erzielen. Hinzu kommt die optional zyklische Versuchsführung zwischen Kraft- oder Weggrenzen, zwecks Nachstellung zu erwartender Spannungswechsel und deren Effekte auf verklebte Proben (~ Alterung).

Bruchbilder

Bislang wurden ausschließlich künstlich gesetzte Schnitte zur standardisierten Nachstellung von Rissen im Gewebe an den Probekörpern umgesetzt. Bei der Umsetzung überlappender Verklebungssituationen liegt so jedoch an der Klebestelle selbst zwangsläufig eine Verdickung vor, die nicht dem gängigen Praxisfall entspricht; in der Regel gehen mit der Überlappung ausgefaserte Fadenenden einher (vgl. Kap. 3.2.1), sodass die Füge Teile im weitesten Sinne als eine „abgeschrägte Schäftung“⁵ vorliegen (vgl. Kap. 3.2.2 / Abb. 3.04). Daraus folgt in der Praxis auch eine kleinere Verklebungsfläche, sodass geringere Verklebungsfestigkeiten zu erwarten sind. Hinzu kommt, dass an beschichteten Gewebeproben mit der bisherigen Vorgehensweise (vgl. B.2) keine Überlappungen erzielt werden können.

⁵ Vgl. HABENICHT 2008, S. 144.

Zur Erzielung praxisnaher Bruchbilder und Prüfung weiterer Verklebungstechniken in beschichteten Geweben würde es sich daher anbieten, zu verklebende reale Schadensbilder in Gewebestreifenproben durch Zugprüfung bei Klemmung auf möglichst kurzer Einspannlänge zu produzieren.

7.3 Biaxiale Kurzzeitversuche

Die Durchführung biaxialer Zugversuche an Gewebekreuzproben stellte im gewählten Aufbau einen sinnvollen nächsten Schritt zur Betrachtung des grundsätzlichen Einflusses des orthogonal verlaufenden Fadensystems auf die Verklebung dar (vgl. Kap. 8.1.2). Hinzu kam insbesondere eine verbesserte Dehnungsauswertung durch Nutzung der DIC, welche auch in zukünftigen uni- und biaxialen Versuchen präferiert werden sollte. Insgesamt gestaltete sich die Probekörpervorbereitung jedoch als weitaus aufwändiger als für die uniaxiale Zugprüfung von Gewebestreifen. Zudem ist für die sinnvolle Prüfung beschichteter Gewebe eine modifizierte Probekörpergeometrie erforderlich (vgl. Kap. 7.3.2).

7.3.1 Charakterisierung von Verklebungseigenschaften

Auch hier sollten zur bestmöglichen Differenzierung der Messergebnisse möglichst ausschließlich intakte oder verklebte Einzelfäden geprüft und ausgewertet werden. Bei Nutzung der DIC zur Dehnungsauswertung lässt sich zwar die lokale Dehnung im Bereich der Verklebung auswerten, insgesamt ist jedoch das Klebungsversagen im Falle paralleler intakter Fäden schlechter nachvollziehbar (vgl. A.2.2). Zudem lassen die gemessenen Höchstzugkräfte als Mischwerte intakter und verklebter Fäden schlechter interpretieren.

Festigkeit

Die Durchführung der biaxialen Kurzzeitversuche als quasistatische Zugprüfungen bot ebenso wie der uniaxiale Zugversuch zunächst einen direkten Vergleich der Höchstzugkräfte verschiedener Verklebungstechniken und genutzter Klebstoffe (vgl. 7.2.1).

Als insgesamt weniger zuträglich stellte sich bei der äquibiaxialen Prüfung unbeschichteter Gewebekreuzproben das strukturbedingt mitunter deutlich „zeitverzögerte“ Verhalten des Kettfadensystems dar (vgl. A.2.1 / Abb. 21-23). Daher war der gewünschte orthogonale Zug zum Schusssystem zunächst nicht besonders ausgeprägt; anders als am aufgespannten

Gemälde, wo in der Regel durch entsprechend abweichendes Spannen der zwei Bildachsen bzw. auch bedingt durch die anisotropie-ausgleichende Beschichtung (vgl. Kap. 7.2.2) die betrachteten Gewebe zwar in der Regel noch immer unterschiedliche, aber vergleichbarere Zugkräfte in beiden Achsen erfahren. Hier sollte in zukünftigen Versuche auf eine gezielt leicht erhöhte Vorkraft in Kettrichtung geachtet oder sogar eine abweichend höhere Zuggeschwindigkeit für das Kettsystem gewählt werden. [Anm. 15]

Dehnung

Anders als im uniaxialen Aufbau mit Betrachtung der technischen Dehnung lassen sich durch Nutzung der DIC lokale Dehnungsauswertungen vornehmen, welche auch bei möglichem Rutschen der Probe o.ä. keiner Verfälschung unterliegen. Die homogene und präzise Ausrichtung der Probe vorausgesetzt, erlaubt die DIC so eine überlegene Darstellung des Klebungsverhaltens in der Prüfung, sodass auch die Dehnungen der Klebefuge selbst als solche quantifiziert werden können. Von besonderem Vorteil stellte sich dabei auch die Abbildung langsamen Klebungsversagens durch lokale Dehnungszunahmen dar, welche sich im genutzten uniaxialen Versuchsaufbau kaum darzustellen vermochten, sodass das bereits eintretende Klebungsversagen vor Erreichen der Höchstzugkraft keine Berücksichtigung fand (vgl. bspw. A.2.1 / Abb. 46 und Kap. 8.1.2).

Prinzipiell ergaben sich gleiche bis nur geringfügig verringerte oder erhöhte Dehnungen, wenn statt der Auswertung des gesamten biaxialen Mittelbereichs (12 x 12 Fäden) nur die Klebefuge in der Bildauswahl bei Auswertung auf voller Breite verklebter Proben berücksichtigt wurde. Im Falle der gewählten Probekörpergeometrie bestimmte die oftmals dehnbarere Klebefuge maßgeblich die via DIC ermittelte Gesamtdehnung. Daher scheint es empfehlenswert, zur verbesserten Vergleichbarkeit und geringerer Störanfälligkeit der Bildauswertung den gesamten biaxialen Mittelbereich für erste Vergleiche auszuwerten. Anders stellt es sich ggf. dar, wenn größere biaxiale Flächen betrachtet werden oder im Auswertungsbereich intakte, als auch verklebte Fäden liegen (vgl. A.2.2. / Abb. 02).

Ein zusätzliches Speckle- oder Punktemuster auf dem Gewebe scheint die Dehnungsauswertung mittels DIC nicht zu optimieren, es stellten sich jedoch keine klaren Tendenzen dar (vgl. A.2.4 / Abb. 02-05). Auf verschiedenen Einstellungsparametern fußende Dehnungsermittlungen liefern des Weiteren zumeist recht ähnliche, teils leicht abweichende Dehnungen. Es lässt sich kein einheitlicher Trend festhalten, lediglich eine höhere Ähn-

lichkeit der Ergebnisse für eher geringe Dehnungen ($< 3\%$), wie im Falle von Verklebungen. [Anm. 16]

Es erscheint daher sinnvoll, an den bisherigen Einstellungen zur Dehnungsauswertung via DIC festzuhalten. Auf diese Weise ergeben sich durch Einbezug beider Fadensysteme zwar ggf. leicht reduzierte, jedoch in Bezug auf alle Testreihen besser vergleichbare Dehnungswerte. So zählt für eine vergleichende Versuchsauswertung zunächst insbesondere die Abbildung von Verhältnismäßigkeiten. [Anm. 17]

Anfertigungsaufwand und Statistik

Der Anfertigungsaufwand der Gewebekreuzproben stellte sich als ungleich höher im Vergleich zu den uniaxialen Gewebestreifen dar, insbesondere in Bezug auf den Zuschnitt der bisherigen Kreuzprobengeometrie (vgl. B.2). Auch hier bietet sich zunächst die initiale Betrachtung von Stoß-auf-Stoß-Verklebungen zur Reduzierung des Aufwands an (vgl. Kap. 7.2.1). Bei Prüfungen mit vergleichsweise geringen Stichprobengrößen $n \geq 10$ ist jedoch ebenfalls nicht gewährleistet, einen repräsentativen Mittelwert und Streubereich abzubilden (vgl. Kap. 7.1).

Anwendungsfall

Wesentlicher Vorteil war die parallele Prüfung von Schuss- und Kettssystem der Gewebe im biaxialen Aufbau, sodass sich eine wesentliche Annäherung an den Zustand des gespannten Leinwandgemäldes ergab. Auf diese Weise lässt sich im Kurzzeitversuch bereits ein erster Eindruck davon gewinnen, inwiefern eine Interaktion der Fadensysteme die eingebrachten Einzelfadenverklebungen beeinflusst. Nachteil des Kurzzeitversuchs ist jedoch auch hier die zunehmende Belastung der Proben im Prüfungsverlauf (vgl. Kap. 7.2.1).

Allgemein erschienen die maximalen Höchstzugkräfte der betrachteten Klebstoffe und Verklebungstechniken im biaxialen Zugversuch verglichen mit den uniaxialen Versuchen leicht herabgesetzt. Dies spricht dafür, dass zum einen durch die probekörpergeometriebedingt erschwerte Einzelfadenverklebung mit dem Realfall am Gemälde besser vergleichbare Verklebungsfestigkeiten erzielt werden, zum anderen ist es wahrscheinlich, dass sich hier der orthogonale Zug im Kettssystem als wesentlicher Einflussfaktor äußert (vgl. Kap. 8.1.2). Beide Hypothesen stellen einen Vorzug im Hinblick auf die gewünschte größtmögliche Annäherung der Messwerte an den Praxisfall dar.

Dabei sei zudem erwähnt, dass bei Probekörperverklebung mit der bisherigen Vorgehens-

weise (vgl. B.2) die Anfertigung überlappender Verklebungen im Schussfadensystem immer auch eine Ablenkung der orthogonalen Kettfadensystems bedingte (vgl. A.2.1 / Abb. 13-20). Dies ist grundsätzlich stark unterschiedlich zum Anwendungsfall und sollte möglichst durch abweichende Vorbereitungsschritte bzw. aufwändigere Probekörperpräparation zukünftig vermieden werden (vgl. Kap. 7.3.3).

7.3.2 Wahl der Prüfparameter

Wie bei der uniaxialen Zugprüfung sind auch hier die Messwerte grundsätzlich mit den gewählten Parametern verknüpft und müssen daher im jeweiligen Kontext betrachtet werden; wesentliche Ausführungen finden sich bereits unter Kap. 7.2.2.

Beschichtung

Die Prüfung von Verklebungen in beschichteten Geweben stellte sich im Unterschied zum gewählten uniaxialen Versuchsssetup mit dem bisherigen biaxialen Kurzzeit-Setup als nicht befriedigend umsetzbar dar. Als problematisch erwies sich die Beschichtung bei Nutzung der bisherigen Geometrie der Gewebekreuzproben.

Aufgrund der flächigen Beschichtung der Proben kam es zu einer erweiterten Kraftübertragung innerhalb der Mittelfläche der Kreuzformats, d.h. auch innerhalb der beschichteten Gewebebereiche seitlich des zu evaluierenden, verklebten Probenmittelsbereichs (vgl. Abb. 7.10). Es wurden somit nicht mehr nur ausschließlich die verklebten Fäden zugbelastet, anders als bei den unbeschichteten Kreuzproben, an welchen jeweils nur die durchlaufenden 12 Fäden Breite der Kreuzprobenarme auch im biaxialen Mittelbereich tragend waren (vgl. Abb. 7.09). Auf diese Weise ergab sich eine vermeintliche Steigerung der maximalen Festigkeit des mittleren Probenbereichs. Zudem konnten durch den mit der Beschichtung einhergehenden Formerhalt weder Klebungsöffnung, noch vollständiges Klebungsversagen präzise festgestellt werden (vgl. A.2.3 / Abb. 40 und 56). Das Versagen der Klebung war so mit keinem Kraftabfall und erst im Zuge des weiteren Prüfungsverlaufs mit einer verstärkten Zunahme der via DIC ermittelten Dehnungen verbunden. [Anm. 18]

Durch Aufdoppelung der Kreuzarmlängen ließ sich zwar gezielt die Schwachstelle der Probe ins Zentrum verlegen (vgl. Kap. 5.2.2), eine verbesserte Evaluierung der Verklebung wurde dadurch jedoch ebenfalls nicht möglich.

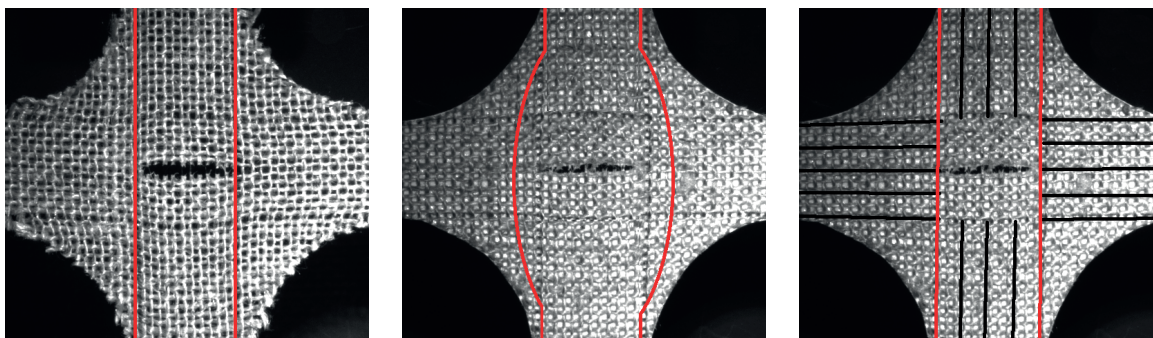


Abb. 7.09: Unbeschichtete Gewebekreuzprobe mit strikt vertikal verlaufender Kraftübertragung im Bereich der geklemmten Einzelfäden des verklebten Schusssystems;

Abb. 7.10: im Vergleich eine beschichtete Gewebekreuzprobe mit aufgrund der Beschichtung auch im Seitenbereich der Einzelfadenverklebung abgelenkter Kraftübertragung;

Abb. 7.11: Problembehandlung durch Einschlitzten der „Arme“ der beschichteten Kreuzproben zur Gewährleistung der fadengeraden Kraftübertragung im Bereich der geklemmten Einzelfäden.

Der Effekt ließe sich zwar durch Nutzung gerader Kreuzproben ohne größere abgerundete Übergangsbereiche etwas reduzieren, in Vorversuchen erwies sich jedoch auch diese Probekörpergeometrie als nicht zielführend. [Anm. 19]

Aufgrund der durch die Beschichtung auftretenden Schwierigkeiten wurde daher dieser Versuchsaufbau zunächst verworfen und vorerst keine weitere Modifikation der Probekörpergeometrie vorgenommen. Zur Unterbrechung der Kraftübertragung in den beschichteten Seitenbereichen könnte für weiterführende Versuche bspw. ein Einschlitzten der „Arme“ bis zum relevanten Mittelbereich erfolgen, wie es auch für andere biaxiale Prüfungen vorgeschlagen wird (vgl. Abb. 7.11).⁶

Probekörpergeometrie

Allgemein ließe sich, wie zuvor bereits für die Prüfung beschichteter Gewebeproben erwähnt, über eine Änderung der Probekörpergeometrie für die biaxialen Zugversuche an Einzelfadenverklebungen nachdenken:

Wie auch an den uniaxialen Gewebestreifen sind die Ergebnisse der biaxialen Kurzzeit-Prüfung unmittelbar von der Anzahl geprüfter intakter oder verklebter Fäden im Sinne der tragenden Probenbreite in beiden Achsen abhängig. Im Rahmen der ersten Versuche fanden zunächst keine Betrachtungen erhöhter Anzahlen verklebter Einzelfäden statt, prinzipiell

⁶ Vgl. (JIS) MSAJ / M-02 1995, S. 11.

wären diese jedoch wie an den uniaxialen Gewebestreifen zu bevorzugen (vgl. Kap. 7.2.2). Hinsichtlich der Einspannlänge ergeben sich keine Vorteile aus erhöhten uniaxialen „Armlängen“ der Gewebekreuzproben für die Evaluierung eines im Verhältnis deutlich kleineren biaxialen Mittelbereichs. Vielmehr ist zu bedenken, dass sich die uniaxialen Längen als Schwachstellen der Proben darstellen. Sofern ausschließlich der biaxiale Mittelbereich geprüft werden und sich dort im Zentrum die Schwachstelle der Proben befinden soll, bietet sich die Aufdoppelung der Probekörper an (vgl. Kap. 5.2.2 und A.2.3). Dabei ist die Aufdoppelung hinreichend steif zu wählen, wenn eine Dehnung der uniaxialen Längen möglichst vollständig unterbunden werden soll. [Anm. 20]

Auch hier ist jedoch zu bedenken, dass sich bei Aufdoppelung indirekt eine verkürzte Einspannlänge ergibt, sodass bedingt durch den Gewebeaufbau eine Verfestigung eintritt (vgl. Kap. 7.2.2). Insgesamt wäre daher auch zu erwägen, größere biaxiale Probenmittelbereiche zu betrachten (vgl. Kap. 7.3.3).

Zuggeschwindigkeit

Wie für die uniaxialen ist auch für die biaxialen Kurzzeit-Zugversuche grundsätzlich die Abhängigkeit der Messwerte von der Zuggeschwindigkeit zu berücksichtigen (vgl. Kap. 7.2.2). Auch hier würde sich zur verbesserten Klebstoffevaluierung daher für nachfolgende Betrachtungen anbieten, die Zuggeschwindigkeiten herabzusetzen.

7.3.3 Möglichkeiten der Versuchserweiterung

Für die biaxialen Kurzzeit-Zugversuche bietet sich ebenfalls die Versuchserweiterung um konkrete Schwerpunkte an (verschiedene Materialvoraussetzungen, Prüfung bei Extremklimata u.ä.). Neben der bereits erwähnten optionalen Modifizierung der bisherigen Gewebekreuzprobengeometrie wäre zudem insbesondere die Vergrößerung des biaxialen Bereichs in der Kurzzeitprüfung interessant. Zwangsläufig gehen damit jedoch deutlich vergrößerte Probengeometrien einher. [Anm. 21]

Zyklische Belastung

Auch für die biaxiale Zugprüfung wäre prinzipiell eine zyklische Versuchsführung zwischen Kraft- oder Weggrenzen, für entweder die Probenvorbehandlung oder aber Prüfung von Verklebungen, denkbar (vgl. Kap. 7.2.3).

Bruchbilder

Wie bereits für die uniaxialen Kurzzeitversuche ausgeführt (vgl. Kap. 7.2.3) stellt die bisherige Durchführung von Schnitten zur Durchtrennung der Fadensysteme eine deutliche Abstraktion der realen Bruchbilder dar. Auch hier wäre über die möglichst standardisierte Erzielung realer Brüche im Material nachzudenken. Neben der erwähnten Prüfung in kurzen Einspannlängen zwecks lokaler Zertrennung könnte sich (insbesondere an vergrößerten Probengeometrien) vielmehr noch die normierte Vorschädigung entsprechend üblicher Schadensprozesse anbieten (vgl. Kap. 3.2). So ließe sich das Probenmaterial bereits vor Zuschnitt mit definierter Spannung temporär auf Rahmen fixieren (vgl. B.4) und lokal durchstoßen. Je nach Wahl der Stempelgeometrie ließen sich dabei mehr oder weniger stark ausgefaserte Fadenenden bzw. Überdehnungen in beiden Fadensystemen erzielen (vgl. Abb. 7.12-14). Dieser Aufbau zur Probenvorbereitung scheint sich vornehmlich für beschichtete Gewebe anzubieten. [Anm. 22]

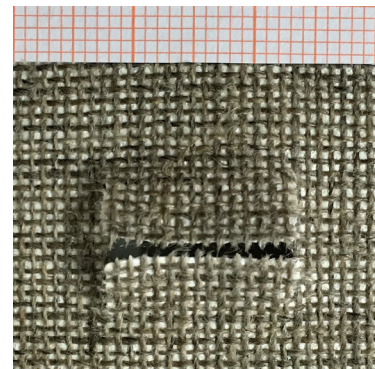
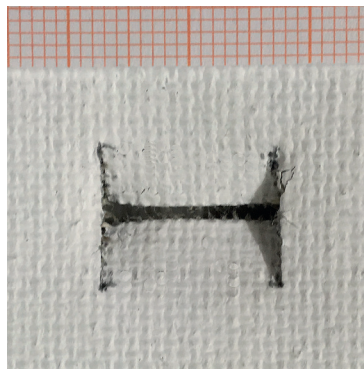
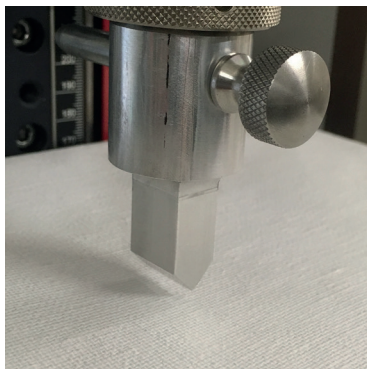


Abb. 7.12: Beispiel für einen Prüfstempel mit konisch zulaufender Klinge, im Prüfaufbau über einem aufgespannten Gewebe mit Beschichtung.

Abb. 7.13: Wie das Bruchbild nach Durchstoßung zeigt, lassen sich mit der gewählten Stempelgeometrie fadengerade Brüche in beiden Fadensystemen erzielen. Von Vorteil ist hier, dass keine starken Verwölbungen der Randbereiche vorliegen;

Abb. 7.14: dabei weisen die durchtrennten Fäden jeweils ausgefaserte Enden auf, welche überlappend verklebt werden können.

Erweiterte Dehnungsauswertung

Speziell im Hinblick auf die Prüfung beschichteter Proben wäre ein erweiterter Kameraaufbau während der Prüfung wünschenswert, um sowohl die Gewebeseite, als auch die (mit einem Zusatzmuster zu versehende) Beschichtungsseite der Proben gleichermaßen erfassen und via DIC auswerten zu können.

7.4 Biaxiale Langzeitversuche

Die Durchführung biaxialer Langzeitversuche stellt die größtmögliche Annäherung an den realen Belastungsfall von Einzelfadenverklebungen im Gemälde dar. Im Zuge dieser Arbeit wurde zunächst der Aufbau als Kriechversuch unter konstanter Last durchgeführt und eine Dehnungsauswertung via DIC vorgenommen (vgl. Kap. 5.3). Dabei erwies sich der gewählte Aufbau als grundsätzlich geeignet, sodass erste glaubwürdige Tendenzen abgebildet werden konnten. Die Auswertung gestaltete sich jedoch als vergleichsweise fehleranfällig, sodass weitere Optimierungen des neu entwickelten Versuchsaufbaus erforderlich sind.⁷

7.4.1 Charakterisierung von Verklebungseigenschaften

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten uni- und biaxialen Kurzzeitversuchen wurde im verfolgten biaxialen Langzeitaufbau eine Betrachtung von gleichermaßen intakten und verklebten Einzelfäden in vergrößerten Probenflächen vorgenommen. [Anm. 23]

Dabei kann damit gerechnet werden, dass die Verklebungen durch günstigere Kraftumverteilung als bei Prüfung ausschließlich verklebter Einzelfäden eine Entlastung erfahren (vgl. A.2.2). [Anm. 24]

Beständigkeit

Während in den uni- und biaxialen Kurzzeit-Zugversuchen die Höchstzugkräfte zum Vergleich der Klebstoffe und Verklebungstechniken als Extremwerte herangezogen wurden, wurde im Langzeitaufbau eine vergleichsweise geringe, dafür jedoch konstante Last umgesetzt [Anm. 25]. Es wird somit weniger die Festigkeit als vielmehr die Beständigkeit unterschiedlicher Verklebungen wie bei Anwendung im Gemälde verglichen.

Voraussetzung für die näherungsweise Quantifizierung der andauernden Spannung in der betrachteten Probe ist eine störungsfreie Übertragung der mittels angehängtem Gewicht angestrebten wirkenden Kraft in beiden Achsen (vgl. Kap. 5.3.1). Im ersten Versuchsdurchlauf kam es jedoch vermutlich zu stärkeren Reibungsverlusten durch die Umlenkung des beschichteten Gewebes; zwar war das Material nicht geklemmt, die direkte Auflage der Acrylgrundierung im metallischen Innenrahmen wirkte sich jedoch nachteilig „bremsend“ aus. Hier wäre zukünftig bspw. über eine gleitende Zwischenlage nachzudenken, um diesen Effekt so gering wie möglich zu halten. [Anm. 26]

⁷ Siehe u.a. BADALONI et al. 2015;

Sofern eine möglichst verlustarme Kraftübertragung und gleichmäßige Verteilung auf die betrachtete Probefläche durch den Innenrahmen gewährleistet ist, kann anhand des Schnittprinzips unmittelbar auf die von den Proben ertragenen Werte geschlossen werden (vgl. Kap. 3.3.3 und 5.3.1). Um zumindest näherungsweise auf die Spannungen schließen zu können, ist weitergehend eine genaue Kenntnis über die Proben- und Verklebungsgeometrie erforderlich (vgl. Kap. 3.3.1).

Dehnung

Anhand der zusätzlich aufgebrachten Markierungen auf Gewebe- und Beschichtungsseite der Proben (vgl. B.1) ließen sich zwar grundsätzlich stattgefundenene Dehnungen ab einem gewissen Ausmaß nachvollziehen, die Auswertung stellte sich jedoch nicht als ausreichend genau dar, um Dehnungen präzise zu quantifizieren oder vergleichen. [Anm. 27]

Die DIC hingegen ermöglichte eine präzisere Dehnungsauswertung der Proben, wenngleich auch hier für zukünftige Versuche einige Optimierungen erfolgen sollten, um valide Werte für die beschichtete Gewebestruktur sowie Verklebung selbst abbilden zu können. Als Schwierigkeit stellte sich insbesondere die exakte Reproduktion der Zugrahmenposition für die Fotodokumentation des Serienversuchs im Wechselgestell dar. Während der obere Rahmenteil immer eine feste Einspannung erfuhr, wurde der untere frei bewegliche Rahmenwinkel lediglich durch Magnetbügel in gleichem Abstand zur metallischen Rückseitenplatte fixiert (vgl. B.5). Hier sollte das Fixiergestell um weitere feste Einspannmöglichkeiten für den unteren Rahmenwinkel erweitert werden, um so eine besser reproduzierbare temporäre Ausrichtung für die Fotodokumentation gewährleisten zu können.

Des Weiteren erwies sich die Probenfixierung im Zugrahmen mittels Haken als nachteilig; zwar sollte so eine vollständige Beweglichkeit der Gewebestruktur erhalten werden (sowie eine Annäherung an die punktuelle Aufspannung von Leinwandgemälden mittels Nägeln erfolgen), es kam jedoch zu einem lokalen Einreißen der Hakenpunkte. Aufgrund dessen wurden teils nicht nur steigende, sondern auch abnehmende Dehnungen ausgewertet, da sich das Material durch das Einreißen kurzfristig entspannte. [Anm. 28]

Naheliegender wäre eine lokale Versteifung der Fixierpunkte durch bspw. Tränkung in Epoxid. Eine flächige Tränkung oder Klemmung auf kompletter Probenbreite sollte vermieden werden, auch einzelne Klemmbacken mit breiter Auflagefläche könnten die Gewebebeweglichkeit einschränken. Alternativ könnte eine punktuelle Fixierung mit zusätzlicher Klemmung erfolgen, um ein lokales Einreißen zu minimieren. [Anm. 29]

Durch Optimierung der genannten Aspekte ließe sich eine zuverlässige Dehnungsentwicklung der Einzelproben insgesamt sowie auch ihrer lokalen Verklebungen festhalten.

Anfertigungsaufwand und Statistik

Während der Gewebezuschnitt selbst aufgrund ausschließlich fadengerader Schnittführung unkompliziert ist, stellt sich die vorbereitende Markierung der Proben zur Sicherstellung von u.a. gleichen Fadenanzahlen und Abständen als durchaus aufwändig dar. Der Verklebungsaufwand in Stoß-auf-Stoß-Technik ist ähnlich der anderen uni- und biaxialen Kurzzeitproben; mit höherem Aufwand wäre hingegen die Umsetzung weiterer Verklebungstechniken oder komplexerer Rissgeometrien verbunden (vgl. Kap. 7.4.2).

Anders als in den präsentierten Pilotversuchen sollte idealerweise auch hier eine Mindestanzahl von $n \geq 10$ Proben je Konfiguration im Reihenversuch geprüft werden (vgl. Kap. 7.1). Dies erscheint insbesondere vor dem Hintergrund erforderlich, dass sich die Dehnungsauswertung als vergleichsweise leicht fehleranfällig darstellt und sich die ermittelten Werte einer Konfiguration je nach Probe mitunter deutlich unterscheiden (vgl. A.3).

Anwendungsfall

Der gewählte Langzeitaufbau erlaubte eine wesentliche Annäherung an den Belastungsfall der Einzelfadenverklebungen im Gemälde. Insbesondere im Hinblick auf mögliche Versuchserweiterungen lässt sich somit ein hoher Praxisbezug für die Evaluierung von Klebstoffen und Techniken erzielen (vgl. Kap. 7.4.2). Der Aufbau bietet sich daher nicht nur für den qualitativen und quantitativen Vergleich von Klebstoffen und Verklebungstechniken zur Ableitung praktischer Handlungsempfehlungen an, sondern ebenfalls für die Beschreibung der Materialeigenschaften in weiterführenden Modellen (vgl. Kap. 3.3.2 und 3.3.3).

7.4.2 Wahl der Prüfparameter

Allgemein ist auch für diesen Versuchsaufbau darauf hinzuweisen, dass das Probenverhalten, die resultierenden Spannungen sowie die ermittelten Dehnungen eng mit der Wahl der einzelnen Versuchsparameter verknüpft sind. Neben der Probekörperstruktur und -geometrie sind die Gewährleistung der Kraftübertragung sowie eine möglichst fehlerfreie Dehnungsermittlung maßgeblich für die korrekte Interpretation und u.a. optional anknüpfende Materialmodelle.

Beschichtung

Auch im Hinblick auf den späteren Anwendungsfall erscheint vornehmlich die Betrachtung beschichteter Gewebe für den entwickelten Versuchsaufbau geeignet. Mit unbeschichteten Geweben stellt sich zum einen die erwähnte Problematik des lokalen Einreißens noch prägnanter dar, zum anderen bietet sich die Betrachtung der ohne ausgleichende Beschichtung deutlich stärker ausgeprägten anisotropen Gewebeeigenschaften unter dem äquibiaxialen Zug der Rahmenkonstruktion weniger an.

Für abweichende Beschichtungen, wie Öl- statt Acrylgrundierungen oder sogar einen mehrschichtigen Aufbau in stärkerer Anlehnung an übliche Gemäldestrukturen (vgl. Kap. 3.1.2), ist ein deutlich abweichendes Materialverhalten zu erwarten (siehe auch A.1.2 und A.1.3).

Versuchsaufbau

Neben den bereits erwähnten Punkten stellte sich zudem die Umsetzung des seriellen Reihenversuchs als wesentlicher Einflussfaktor für das Proben- und Verklebungsverhalten dar. Zwar wurden die Proben in ihren Zugrahmen komplett unbewegt auf Rollständern hängend gelagert (vgl. Abb. 7.15), trotz möglichst ruhigem und stoßfreiem Handling im Zuge der regelmäßigen Positionierung im Wechselgestell zur Fotodokumentation hat die dabei unvermeidliche Pendelbewegung des angehängten Gewichts jedoch maßgeblichen Einfluss auf die Dehnungsentwicklung genommen.

So konnten sich die Proben des Serienversuchs trotz Reibung der Grundierungsschicht am Innenrahmen (vgl. Kap. 7.4.1) besser unter der wirkenden Kraft ausrichten und aufgrund der zusätzlichen dynamischen Beanspruchung entsprechend deutlich zunehmende Dehnungen verzeichnen (vgl. Abb. 7.16). Im Gegensatz dazu zeigt die als Referenz konstant unbewegt positionierte Probe (vgl. Abb. 7.17) eine deutlich abweichende Dehnungsentwicklung; zwar zeigen sich auch hier Dehnungssprünge im Zuge der zweimaligen Krafterhöhung (vgl. Kap. 5.3.1), in den Zeiten konstanter Last stellt sich jedoch ein deutlich ruhigerer Dehnungsverlauf dar (vgl. Abb. 7.18). Die statische Referenzprobe weist dabei zudem kaum eine Dehnungszunahme auf, vielmehr stellen sich auch abnehmende Dehnungen durch das erwähnte Einreißen der Fixierpunkte dar (vgl. Kap. 7.4.1). Die ermittelten Dehnungen fallen so insgesamt geringer aus als an den Proben des bewegten Serienversuchs.

Vermutlich würde das Probenverhalten ähnlicher ausfallen, wenn die erwähnte Reibung der Probe im Innenrahmen möglichst ausgeschlossen wird. Trotz dessen muss der offen-

sichtlich starke Einfluss des Handlings für weitere Versuche bedacht werden. Als nicht nachteilig stellt sich dar, dass alle Proben des Serienversuchs zumindest vergleichbare dynamische Belastung erfahren haben. Möchte man diese jedoch in vollständiger Annäherung an das statisch gespannte Gemälde komplett unterbinden, bliebe nur die Einzelbeobachtung aller Zugrahmen. Dadurch ergibt sich der Nachteil erhöhten Versuchsaufwands.

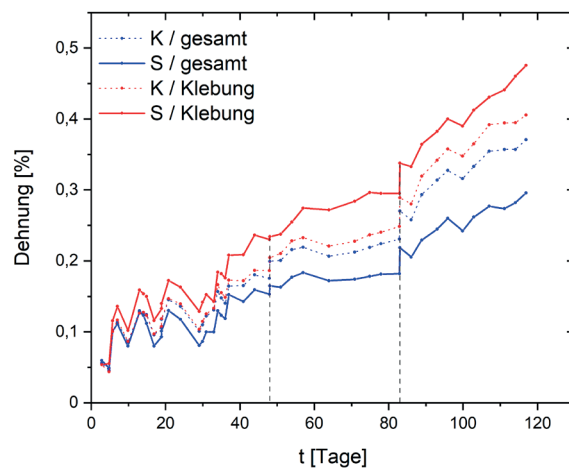
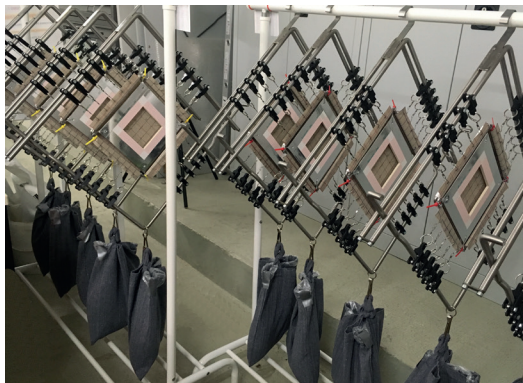


Abb. 7.15: Zugrahmen des Serienversuchs in der statischen Hängung.

Abb. 7.16: Exemplarische Dehnungsauswertung einer Probe (Verklebung Lineco + Methocel A4C, SAS) des Serienversuchs mit stark unruhigem Verlauf der zeitlichen Dehnungsentwicklung. Dargestellt sind sowohl Schussfadensystem (S), als auch Kettsystem (K), jeweils in Gesamtauswertung des sichtbaren Gewebebereichs sowie lokal beschränkt auf die Verklebung (vgl. A.3 / Abb. 02 und 03).

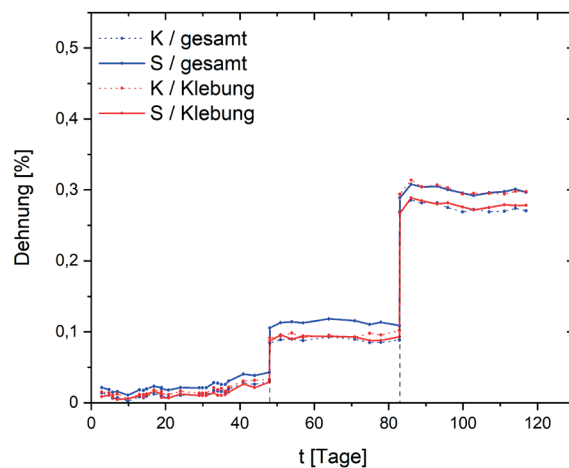
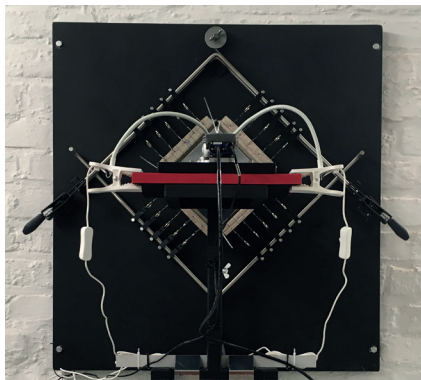


Abb. 7.17: Referenz-Zugrahmen unter konstant statischer Einzelbeobachtung.

Abb. 7.18: Dehnungsauswertung der Referenzprobe (Verklebung Lineco + Methocel A4C, SAS) mit deutlich ruhigerem Verlauf der zeitlichen Dehnungsentwicklung. Dargestellt sind sowohl Schussfadensystem (S), als auch Kettsystem (K), jeweils in Gesamtauswertung des sichtbaren Gewebebereichs sowie lokal beschränkt auf die Verklebung (vgl. A.3 / Abb. 02 und 03).

Der erhöhte logistische Aufwand durch dauerhaft statische Fixierung und Einzelbeobachtung der Proben erscheint jedoch insbesondere dann erforderlich, wenn über den grundlegenden Vergleich von Klebstoffen und Verklebungstechniken hinaus auch praxisnahe Dehnungswerte für weiterführende Betrachtungen ermittelt werden sollen. Zudem wäre nur so eine fortlaufende Videodokumentation o.ä. möglich. [Anm. 30]

7.4.3 Möglichkeiten der Versuchserweiterung

Der Versuchsaufbau bietet prinzipiell eine große Flexibilität für weiterführende Versuche. Neben der Betrachtung unterschiedlicher Gewebe, deren Vorbehandlungen und Beschichtungen, lassen sich insbesondere auch verschiedene Verläufe, Formate und Positionen von einzelfadenverklebten Schadstellen inmitten der Gewebefläche betrachten. [Anm. 31]

Neben der zusätzlichen Betrachtung des Klimaeinflusses (T., r.F.) kann auch gezielt der Einfluss von Transporten durch kontrolliert aufgebrachte Schwingungen (~ Oszillationen) o.ä. nachgestellt werden.

Wie bereits unter Kap. 7.3.3 ausgeführt, wäre zur Betrachtung von überlappenden Verklebungstechniken und/oder die Verklebung von natürlichen Bruchbildern die gezielte Vorschädigung des Probenmaterials in Erwägung zu ziehen (vgl. Abb. 7.12-14).

Zudem sollte langfristig ebenfalls u.a. die anschließende Kittung und Retusche von Schadstellen in der Mal- bzw. Bildschicht im Anschluss an die Einzelfadenverklebung des textilen Bildträgers Berücksichtigung finden (siehe auch Kap. 8.2).

Prinzipiell ließe sich der Versuchsaufbau auch im Sinne eines Relaxationsversuchs umkonzipieren; hierzu bedürfte es einer Feststelloption der beiden Rahmenwinkel entsprechend der gewünschten Aufspannung (nach vorheriger Ausrichtung mittels angehängten Gewichts). Zur Messung des Spannungsabfalls könnten in beiden Achsen Kraftaufnehmer in Reihe mit Probe sowie Fixierung im Zugrahmen geschaltet werden. [Anm. 32]

Bei Wunsch nach keiner äquibiaxialen, sondern achsweise unterschiedlichen Zugbelastung müsste das Funktionsprinzip des vorgestellten Zugrahmens hingegen gänzlich überarbeitet werden. [Anm. 33]

Anmerkungen Kap. 7

[1] Die Lognormalverteilung beschreibt eine Normalverteilung der logarithmierten Messdaten, was den Vorteil bietet, dass anders als bei der üblichen Normalverteilung nur positive Messwerte angenommen werden. Genau dieser Fall liegt hier vor, da ausschließlich positive Höchstzugkräfte verzeichnet werden.

Die Weibullverteilung wird häufig für sogenannte Lebensdaueruntersuchungen (~ Modellierung der Wahrscheinlichkeit des Ausfalls einer Komponente über die Zeit) genutzt und könnte in diesem Kontext die Wahrscheinlichkeit für Verklebungsversagen bei einer erreichten Kraft darstellen (vgl. WILKER 2004; BOURIER 2008).

[2] Als vergleichsweise besonders symmetrisch verteilt erwiesen sich allgemein Stoß-auf-Stoß-Verklebungen aller Klebstoffe. Es erfordert jedoch in jedem Fall auch die Prüfung überlappend-vermengter Verklebungen, um Klebstoffe für diese Technik zu evaluieren. Es liegt zudem auf der Hand, dass sich eine überlappend-vermengte Verklebung einzelner Fasern der Fadenenden praktisch schlechter exakt reproduzieren lässt, als das vergleichsweise standardisierte Fügen der Fadenenden; theoretisch könnten somit geringere Streuungen für Stoß-auf-Stoß-Verklebungen angenommen werden. In der praktischen Prüfung zeigten sich die Variationskoeffizienten der Stoß-auf-Stoß-Verklebungen jedoch mitunter als am höchsten (vgl. Kap. 8.1.1 / Abb. 8.06).

[3] Da im Zuge dieser ersten uni- und biaxialen Reihen eine festgelegte Klebstoffmenge eingesetzt wurde, sich diese jedoch nicht als maßgeblich oder hilfreich für die Erzielung standardisierter Verklebungsqualitäten darstellte, wurde zudem in aufbauenden Versuchen ein leicht variiertes, variabel anpassbares Klebstoffvolumen festgelegt, um der individuellen Klebestelle je Faden mit leicht verringerten oder erhöhten Volumina besser Rechnung zu tragen und so ggf. eine verbesserte Benetzung zu ermöglichen. Auf diese Weise sollte auch der Praxisbezug erhöht werden (vgl. B.2).

[4] Speziell vor dem Hintergrund des beeinflussenden Gewebes sollte daher zur Abbildung repräsentativer Streubereiche auf eine ausreichende Randomisierung der Probenzuschnitte aus dem flächigen Gewebematerial insbesondere bei geringen Stichprobengrößen geachtet werden. Gewisse „Clusterungen“ der Messkurvenverläufe einzelner Wiederholungen lassen sich möglicherweise durch die nahe Ausgangslage der Proben im Gewebe (~ Prüfung unterschiedlicher Längenabschnitte gleichen Fadenmaterials) begründen, während höhere Streuungen ggf. auch mit unterschiedlichen Gewebevoraussetzungen zusammenhängen.

[5] Eine verlässliche Brucherkennung der Klebung im Sinne eines deutlichen Kraftplateaus oder -abfalls in der Zugprüfung scheint erst ab einer parallelen Prüfung intakter und verklebter Fäden gleicher Anzahl vergleichsweise sinnvoll umsetzbar. Dabei ist zu bedenken, dass bei paralleler Prüfung lediglich gemischte Gesamtkräfte sowie technische Gesamtdehnungen intakter und verklebter Fäden aufgezeichnet werden.

[6] Während sich am betrachteten acrylgründierten Testgewebe 3. C 170 zudem ein starker Ausgleich der anisotropen Eigenschaften des ungründierten Typs 2. C 070 zeigte, fiel dieser Effekt beim ölgründierten Typ 4. C 070 schwächer aus (vgl. A.1.3 / Abb. 34-36). Welche abweichende Behandlung das Gewebe im Zuge der Beschichtung ggf. erfahren hat, ist unklar. Auch im Falle anderer Gewebe- und Beschichtungstypen sind große Unterschiede zu erwarten (vgl. A.1.2 / Abb. 01).

[7] Es erscheint ratsam, vor der Verklebung von beschichteten Geweben zunächst unbeschichtete Gewebe zu betrachten, um zunächst ausschließlich die adhäsiven Wechselwirkungen von Klebstoff und Gewebesubstrat evaluieren zu können (vgl. Kap. 8.1.1).

Mit den in diesem Fall ausgewählten Klebstoffen ließen sich keine einheitlichen Tendenzen bezüglich leicht verminderter oder erhöhter Verklebungsfestigkeiten sowie deren Streuungen bei Verklebung von beschichteten Gewebestreifen beobachten (vgl. Kap. 8.1.3).

[8] Bei Prüfung von Verklebungen stellte sich immer eine erhöhte Steigung im Anfangsbereich der Messkurven im Vergleich zur intakten Referenz dar. Anders als zu vermuten, liegt die Ursache dafür jedoch nicht (in erster Linie) in einer Versteifung durch die Verklebung als solche, sondern vielmehr in Faser- und Fadengeometrie begründet. Durch Unterbrechung der Faserlängen im Schnittbereich der Klebung sind die Einzelfäden schlicht weniger dehnbar. Auf Grund der dominanten Gewebestruktureffekte ließen sich so auch keine zufriedenstellenden Rückschlüsse auf die (elastischen) Steifigkeiten oder Dehnungen der Verklebungen im Messverlauf ziehen.

Am unbeschichteten Gewebe *I. Sironi* bspw. richtet sich zunächst die verwellte Fadenstruktur bis ca. 2-3 % Dehnung im Zugversuch aus. Inwiefern und wie hoch zu diesem Zeitpunkt auch die Klebefugen bereits eine (wesentliche) Dehnung erfahren, ist nicht ersichtlich. Eine Auswertung der Anfangssteigungen der Messkurven ermöglicht somit keine differenzierten Aussagen zur Verklebungsfestigkeit o.ä. Der Verlauf der Messkurven bildete zudem im seltensten Fall ein Aufdehnen der Klebefugen kurz vor Versagen ab. Sich darstellende minimale Unterschiede ließen sich nicht sinnvoll beurteilen bzw. die anteilige Dehnung der Klebefuge nicht bestimmen

[9] Dies ähnelt der Beobachtung scheinbar erhöhter Verklebungsfestigkeiten bei gleichzeitiger Prüfung intakter Fäden (vgl. A.1.9 / Abb. 01 und 04); es stellen sich jedoch weniger tatsächlich erhöhte Verklebungsfestigkeiten als vielmehr günstigere Kraftverteilungen auf alle Fäden und somit Entlastungen der verklebten Einzelfäden dar. Von je mehr intakten Fäden die verklebten Bereiche umgeben sind, desto besser. Hinzu kommt, je stärker verklebte Bereiche von intakten Fäden unterbrochen sind, desto günstiger (vgl. A.1.9 / Abb. 07). Folglich sind a) im Verhältnis zur Gesamtfläche des Gemäldes kurze Risse oder b) mehrere einzelne, verteilte Risse somit nicht so hohen Ansprüche an die einzelnen Klebungen ausgesetzt, wie bspw. ein durchlaufender Riss gleicher Gesamtlänge, da sich günstigere Umverteilungen ergeben.

[10] Im Falle einer Ersatzspannung von 200 N/m könnte das beispielsweise für jede Gewebestreifenprobe einen Richtwert von mindestens 2,5 N pro 12,5 mm breitem Gewebestreifen bedeuten.

Solchen Rechnungen ist jedoch allgemein mit gewisser Vorsicht zu begegnen (siehe auch Kap. 3.3.1 und 4.2), da hier unter Annahme der homogenen Verteilung der Linienkraft vernachlässigt wird, dass ggf. insbesondere die Verklebungen anteilig höheren Kräften ausgesetzt sind, da die verklebten Fäden stärker gestreckt wurden, woraus eine lokal höhere Belastung folgen kann.

[11] Prinzipiell fällt auch der Poisson-Effekt bei kürzerer Einspannlänge geringer aus. Dieser scheint sich jedoch auch an höheren Einspannlängen von auf kompletter Breite verklebten Gewebestreifenproben nicht nachteilig auf die Verklebungsfestigkeiten auszuwirken. Vielmehr öffnen sich die Klebungen nicht in Abhängigkeit von ihrer Lage auf der Probenbreite (mittig/außen), sondern entsprechend der einzelnen Fadenvoraussetzungen (vgl. Kap. 7.1). Ein stärkerer Geometrie-Einfluss liegt jedoch vor, wenn sowohl intakte als auch verklebte Fäden gleichzeitig geprüft werden. Hier stellen sich leicht abweichende Tendenzen dar, je nachdem, ob die verklebten Fäden mittig oder außen auf der Probenbreite liegen (vgl. A.1.9 / Abb. 01 und 04).

[12] Die Aufdoppelung (vgl. Kap. 5.2.2 und 7.2.2) verfolgte prinzipiell die selbe Intention und wurde an uni- und biaxialen Proben auch exemplarisch betrachtet, da sich im Falle der biaxialen Proben auf Grund der Dimensionierung der Klemmbacken keine Einspannfläche von 12 x 12 Fäden hätte einstellen lassen (vgl. A.2.3).

[13] Im Zuge einer exemplarischen Auswertung der Gewebestreifenproben (in verkürzter Einspannlänge von 55 mm) im uniaxialen Zugversuch wurden die technische Dehnung mit einer zusätzlich via DIC ermittelten Dehnungsauswertung verglichen. Die Dehnungsauswertung via DIC wurde dabei im Mittelbereich der Gewebestreifen (12 x 12 Fäden) vorgenommen und mit der technischen Dehnung via Längenänderung verglichen:

An intakten Proben ergaben sich grundsätzlich etwas höhere Dehnungswerte bei Berechnung der technischen Dehnung (plus ca. 1-2 %), was vermutlich auch mit der ungleichmäßigen Dehnung über die Gesamtlänge zusammenhängt; an den Gewebestreifenproben tritt eine erhöhte Dehnung im unteren Einspannbereich der Proben auf. Zudem ist die Berechnung via Längenänderung fehleranfällig gegenüber Rutschen (siehe A.2.3 und A.1.3).

An verklebten un- und beschichteten Proben ergab sich hingegen eine vergleichbare bis etwas niedrigere Höchstzugkraftdehnung bei Berechnung aus der Wegänderung, ggf. auch da die im Vorfeld der Klebungsöffnung erhöhte Deformation des Klebungsbereichs keine direkte Berücksichtigung wie bei der DIC findet (vgl. A.2.3 / Abb. 72 und 74).

Während an unbeschichteten Geweben die Aufdoppelung (vgl. Kap. 5.2.2 und B.1) der uniaxialen Proben keine Verbesserung für die Annäherung der technischen Dehnung an die DIC bewirkte, erlaubte die verkürzte Prüflänge durch Aufdoppelung an den beschichteten Proben eine bessere Vergleichbarkeit (vgl. A.2.3 / Abb. 73 und 75).

[14] In zyklischen Zugversuchen an den un- und beschichteten Testgeweben stellten sich bereits im Bereich eher geringer Belastung ($< 130 \text{ N/m}$) Hystereseschleifen zwischen Be- und Entlastungskurven dar, welche neben einer Umstrukturierung der Gewebe die innere Reibung und damit verbundenen Energieverluste belegen. Dies zeigte sich somit auch im Falle einer eher dem Bereich vermuteter MST-Werte entsprechenden Belastung (vgl. A.1.8 / Abb. 01-13 und Kap. 3.1.3).

[15] Eine solche Anpassung wurde bereits im Zuge der Versuche A.2.3 vorgenommen; hier wurde ebenso wie im Rahmen der uniaxialen Versuche die Vorkraft insgesamt hoch gesetzt, um vergleichbarere Ausgangsvoraussetzungen in der Prüfung zu schaffen (vgl. Kap. 5.1.2).

[16] Kleinere Subset- und Step-Größen bei Nutzung der Software VIC 2D verbesserten die Ergebnisse nicht, vielmehr resultierten weniger genaue Tendenzen (vermutlich auch auf Grund der limitierten Bildauflösung). Im Falle der Mittelung der Einzelpunktdehnungen zur erhofften Annäherung an das einzelne Fadensystem zeigten sich teils leicht erhöhte Dehnungstendenzen (vgl. A.2.4); dies spricht für reduziert-gemittelte Gesamtdehnungen durch Einbezug des orthogonal verlaufenden Fadensystems bei bisheriger Auswertung. Auch anhand der Einzelpunktauswertungen ist jedoch keine höhere Genauigkeit gewährleistet, vielmehr ergaben sich aus der Mittelung der Einzelpunktwerte anderweitige Ungenauigkeiten und Streuungen (vgl. A.2.4 / Abb. 01). So zeigten sich im Falle einer Einzelpunktauswertung der Dehnung in Schussrichtung mit steigender Kraft erwartbar zunehmende Dehnungen durch Streckung des Schussfadens unter Zugbelastung. Bei Auswertung der orthogonalen Kettrichtung im selben Punkt ließen sich jedoch sowohl sinkende als auch zunehmende Dehnungen verzeichnen. Dies lässt sich vermutlich damit begründen, dass bei Streckung der Fäden diese mittig nicht nur einschnüren können (Poisson-Effekt), sondern diese ggf.

auch flach in die Breite gedrückt werden, bedingt durch die Verwebung der Fäden über- und untereinander. Somit stellten sich in einzelnen Punkten mitunter widersprüchliche Dehnungen dar. Bei Erstellung eines Dehnungsverlaufs über die gesamte Fadenlinie ließen sich hingegen die alternierend wechselnden Bereiche der zwei sich kreuzenden Fadensysteme glaubwürdig nachvollziehen.

[17] Tendenziell sind vor allem die höheren Dehnungen an intakten Referenzproben von einer Ungenauigkeit bei gröber aufgelöster Auswertung von Bildausschnitten mit beiden Fadensystemen betroffen; an den schwächeren Klebungen sollten sich treffendere Dehnungswerte darstellen.

[18] Aufgrund der vergleichsweise offenen Webstruktur genügten im Falle ohne Beschichtung die Reibungswechselwirkungen mit dem orthogonalen Kettssystem im Kreuzbereich der Gewebeproben nicht aus, um auch eine (relevante) Kraftübertragung nebenliegend der unmittelbar zugbelasteten 12 Fäden zu bewirken. Dies könnte sich jedoch ebenfalls anders darstellen, wenn bspw. dichtere Gewebe geprüft werden.

An dieser Stelle sei daher auch explizit auf den potentiellen Nachteil bei Nutzung von mittig verbreiterten Klebungsbereichen in Anlehnung an die Streifengeometrie nach DIN EN ISO 13935-1 im Falle uniaxialer Zugversuche verwiesen (vgl. Kap. 2.1). Der verbreiterte Mittelbereich stellt sich einzig für die ursprünglich zgedachte Prüfung von Nähten als Vorteil dar, damit Anfang und Ende der Naht nicht im unmittelbar durch die eingespannten Fadenbereiche zugbelasteten Bereich liegen. Für die Evaluierung von Verklebungen stellt es jedoch keinen Vorteil dar, den Mittelbereich so im Vergleich zum schmaleren Rest der Probe zu verstärken. Im Gegenteil, es kommt im Falle dichter oder beschichteter Gewebe somit auch zur Kraftübertragung in den verbreiterten Seitenbereichen, d.h. der nicht unmittelbar gemäß Einspannung durchlaufenden Fäden, sodass sich ggf. das Klebungsversagen schlechter beurteilen lässt und zudem gemischte Kraftübertragungen aufgezeichnet werden. Dies ergibt ähnliche Nachteile für die Auswertung der Messergebnisse wie die bereits erwähnte parallele Prüfung intakter und verklebter Fäden.

[19] Die bisherige Probekörpergeometrie mit abgerundeten Eckwinkeln des Probenmittelbereichs wurde gewählt, da so im Rahmen anderer biaxialer Zugprüfungen eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung erzielt werden konnte (vgl. SEIBERT et al. 2014). Auch bei Verkleinerung der abgerundeten Bereiche neben der Probenmittelfläche sollte in jedem Fall eine leichte Abrundung der Ecken statt geraden Zuschnitts durchgeführt werden, um u.a. keine ungünstigen Sollbruchstellen zu riskieren (vgl. (JIS) MSAJ / M-02 1995).

[20] Die testweise Aufdoppelung beschichteter Gewebekreuzproben mittels beschichteter Gewebestreifen und Beva 371 als verbindendem Klebstofffilm erzielte zwar bereits eine deutliche Versteifung, es findet jedoch trotz dessen eine nicht unerhebliche Dehnung der uniaxialen Kreuzprobenlängen statt (vgl. Kap 5.2.2, B.1 und A.2.3). Hier wäre zur (vollständigen) Unterbindung insbesondere ein abweichendes Klebstoffsystem zu wählen, das weniger dehnbare Eigenschaften aufweist. Auch eine alternative Tränkung der Armlängen in Epoxid o.ä. könnte dazu in Betracht gezogen werden.

[21] Vor einer grundsätzlichen Vergrößerung des biaxialen Bereichs (durch Prüfung einer höheren Anzahl verklebter Fäden oder gleichzeitiger Prüfung intakter und verklebter Fäden) wäre es ggf. zunächst naheliegend, bei bisheriger Probenbreite des Schusssystems die biaxiale Zugbelastung auf die gesamte Einspannlänge statt nur des Mittelbereichs (12 x 12 Fäden) zu erweitern. Dafür bedürfte es jedoch einer sehr breiten Klemmung von 100 mm im Kettfadensystem.

[22] An den unbeschichteten biaxialen Gewebekreuzproben stellte sich zudem in der bisherigen Probekörperverklebung (vgl. B.2) die Ablenkung des orthogonalen Kettensystems zur Erzielung einer Überlappung im Schussfadensystem als nachteilig dar (vgl. A.2.1 / Abb. 13-20). Stattdessen sollte eine vollständige Zertrennung der Proben in zwei Hälften erfolgen, um nach Verklebung des zu prüfenden Mittelbereichs einen geraden Verlauf des orthogonalen Fadensystems gewährleisten zu können.

[23] Prinzipiell ließe sich mit dem präsentierten Zugrahmenaufbau auch die bisherige biaxiale Gewebekreuzprobegeometrie mit jeweils ausschließlich verklebten Fäden des Schussystems unter Belastung betrachten (vgl. Kap. 5.3.1). Uniaxiale Proben sollten hingegen durch einfach angehängtes Gewicht äquivalent im Kriechversuch Zuggeprüft werden.

[24] Wie im uniaxialen Aufbau (vgl. A.1.9) trat auch im biaxialen Kurzzeit-Zugversuch in Abhängigkeit des Verhältnisses intakter und verklebter Fäden zueinander eine vermeintliche Verklebungsverfestigung durch optimierte Kraftumverteilung auf nebenliegende Bereiche ein (vgl. A.2.2 / Abb. 01); siehe auch Anm. 9.

[25] Zum Vergleich ergeben sich aus den gewählten Ersatzspannungen von ca. 130 N/m, 165 N/m und 200 N/m für die bisher geprüften Probenbreiten von 12 Fäden (~ 12,5 mm) des Schussystems lediglich theoretische Dauerbelastungen von ca. 1,6-2,5 N.

[26] Am einfachsten umsetzbar wäre eine dünne Zwischenlage mit niedrigem Reibungskoeffizienten zum metallischen Innenrahmen, bspw. mittels Polyethylenterephthalatfolie (Hostaphan). Weitergehend wäre auch eine vollständige Ummantelung der Rahmen denkbar, z.B. durch Rohre aus Polytetrafluorethylen (Teflon), welche quasi als zusätzliches Loslager fungieren.

[27] Anhand der Markierungen ließen sich an allen verklebten Proben über die gesamte Probenfläche in Richtung des verklebten Schussfadensystems lediglich Wegzunahmen von 0,3-1,0 mm nachvollziehen; im Kettfadensystem ließen sich keine Wegänderungen einmessen. An der unverklebten Referenz mit Schnitt zeigte sich eine erhöhte Wegzunahme in Schussrichtung von ca. 2,0-2,25 mm. Eine genauere Interpretation und Quantifizierung wurde erst durch Nutzung der DIC möglich, vgl. Kap. 8.2.1.

[28] Wenngleich dieser Umstand durchaus mit dem Realfall vergleichbar ist, da sich eingerissene Stellen im Bereich der lokalen Aufspannung an Gemälden häufig finden lassen, stellt es für den gewünschten Versuchsaufbau lediglich Nachteile in der Auswertung dar.

[29] Denkbar wäre bspw. ein Fixierpunkt bestehend aus zwei Unterlegscheiben sowie Gewindeschraube und Flügelmutter im Sinne einer „Mini-Klemmbacke“. Hier ergibt sich jedoch weitergehend das Problem der Befestigung im Rahmen, sodass dann z.B. zusätzliche starre Lochbleche o.ä. mit geklemmt werden müssten, welche wie bisher über Wirbel, Ösen und Loslager Fixierung im Zugrahmen erfahren (vgl. B.5). Verzichtet werden sollte auf die im Rahmen von Klemmbacken-Anwendungen in der Konservierung und Restaurierung häufig gebräuchlichen Gewebebänder zur Aufspannung, da diese sich ebenfalls als dehnbar darstellen.

[30] Es scheint insbesondere das Verklebungsverhalten maßgeblich durch die wiederholte Bewegung der Zugrahmen beeinflusst, sodass mitunter deutlich erhöhte Dehnungen des Verklebungsbe-

reichs im Vergleich zum umgebenden Gewebe verzeichnet wurden, während sich dies an der gänzlich unbewegten Referenz nicht nachvollziehen ließ (vgl. A.3 / Abb. 14-23).

[31] Es liegt zudem auf der Hand, dass sich der Einsatzbereich des Zugrahmenaufbaus nicht auf die Evaluierung von Einzelfadenverklebungen beschränkt. Neben Flickern oder Faserbreien (vgl. Kap. 2.2 / Anm. 1) als weitere strukturelle Maßnahmen am textilen Bildträger ließen sich prinzipiell sämtliche Untersuchungen verfolgen, für die eine möglichst realitätsnahe, kontrollierte und konstante Aufspannung von „Testgemälden“ von Vorteil ist.

[32] Die gezielte Reihenschaltung von Kraftaufnehmern innerhalb der Proben würde sich prinzipiell ebenfalls dazu anbieten, um die wirkende Kraft der im Innenrahmen gespannten Probe auf Reibungsverluste hinsichtlich der eingestellten Gewichtskraft zu überprüfen.

[33] Denkbar wäre z.B. ein fester Rahmenwinkel, der ohne die hier genutzte 45°-Verkipfung (vgl. Kap. 5.3.1) an einer Seite eine Aufhängung erfährt. Während sich bei eingehängter Probe die vertikale Achse durch einfach angehängtes Gewicht spannen ließe, müsste die horizontale Achse der Probe zur Aufspannung mittels individuellen Gewichts eine Kraftumleitung erfahren, bspw. über eine möglichst reibungsfrei gelagerte Seilrolle o.ä. Dazu wären des Weiteren für beide Achsen jeweils einzelne Rahmenleisten statt eines weiteren Rahmenwinkels erforderlich, um die punktweise Fixierung der Probe vornehmen sowie das anzuhängende Gewicht je Achse aufnehmen zu können. Als Schwierigkeit im beschriebenen Aufbau würde sich die Erfordernis absolut symmetrischen Krafteintrags darstellen, da es sonst leicht zu Verkipfungen der Rahmenleisten käme. Für einen solchen oder vergleichbaren Aufbau müsste entsprechend eine weitere Detailkonzeption erfolgen.

8

Klebstoffevaluierung

Im diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der Hauptversuchsreihen hinsichtlich der unterschiedlichen Klebstoffe und Verklebungstechniken sowie abzuleitender Empfehlungen für den praktischen Anwendungsfall. Aufgrund der Fülle an Daten findet die verknappte Zusammenfassung einer wesentlichen Ergebnisauswahl statt. Für vertiefende Informationen wird je auf die detaillierte Dokumentation der Daten im Anhang verwiesen.

8.1 Festigkeit bei Kurzzeitbelastung

Zunächst werden die Ergebnisse der uni- und biaxialen Kurzzeit-Zugversuche an un- und beschichteten Geweben mit Verklebungen behandelt. Zur Auswertung werden die Höchstzugkräfte sowie mitunter ebenfalls die Höchstzugkraftdehnungen diskutiert. [Anm. 1]

Betrachtet werden dabei jeweils die arithmetischen Mittel und zugehörigen Variationskoeffizienten als Streuungsmaße. In den präsentierten Balkendiagrammen sind zudem die Standardabweichungen als Fehlerbalken angetragen. [Anm. 2]

8.1.1 Uniaxiale Gewebestreifen / unbeschichtet

An unbeschichteten Gewebestreifen des Typs *1. Sironi* fanden die Validierungsversuche mit einer ersten Klebstoffauswahl (A.1.1) sowie Betrachtungen zu Fadenbrücken (A.1.4) und einer erweiterten Klebstoffauswahl (A.1.5) als uniaxiale Zugprüfungen statt.

Die limitierte Aussagekraft von Reihen geringer Stichprobengrößen wurde unter Kap. 7.2 bereits dargelegt; die präsentierten Ergebnisse sind vor diesem Hintergrund zu betrachten.

Validierungsversuche

Alle Verklebungen erhöhten Stichprobenumfangs mit sämtlichen betrachteten Klebstoffen (vgl. Kap. 6.4) öffneten sich während der Zugversuche, sodass keine neuen Fadenbrüche in anderen Gewebebereichen auftraten und die mittlere Höchstzugkraft (F_{\max}) des intakten Referenzgewebes von ca. 268 N nie annähernd erreicht wurde (vgl. Abb. 8.01).

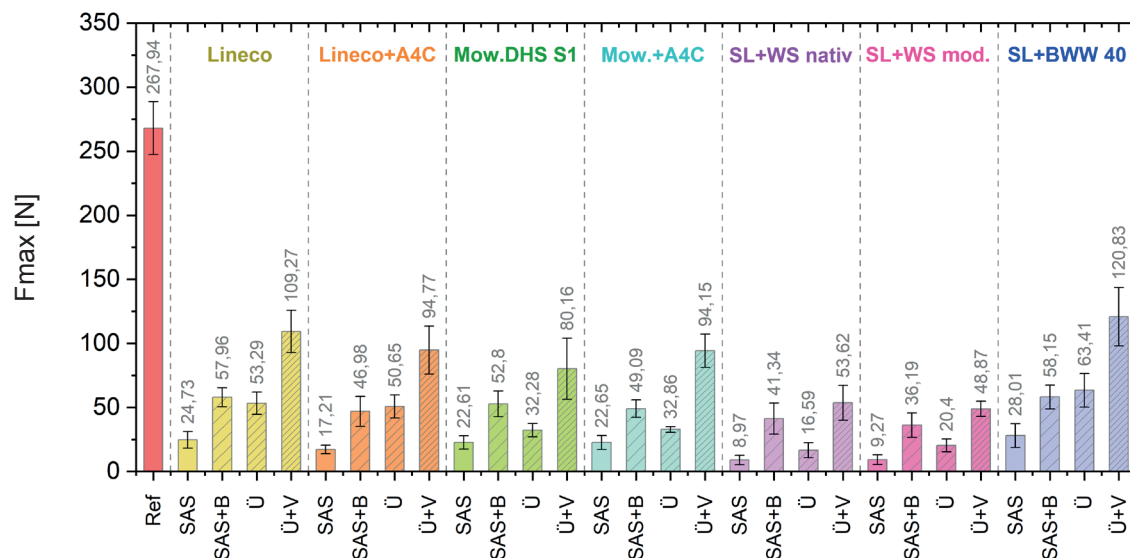


Abb. 8.01: Mittlere Höchstzugkraft (F_{\max}) verschiedener Klebstoffe und Verklebungstechniken im Vergleich zur Referenz. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs *I. Sironi* (mit je 12 Fäden zugbelasteter Streifenbreite) als zusammenfassende Gesamtstatistik der Einzelversuche (vgl. Kap. 7.1).

Dabei stellten sich mit mittleren F_{\max} der Verklebungen zwischen ca. 9-121 N zu erwartende deutliche Unterschiede unter den Klebstoffen sowie innerhalb der einzelnen Klebstoffe je nach Verklebungstechnik dar. Auch zeigten sich stark abweichende Bruchbilder im Gesamtvergleich der Klebstoffe und Verklebungstechniken. Während sich alle Stoß-auf-Stoß-Verklebungen (SAS) sowie auch die einfach überlappenden Verklebungen (Ü) eher unmittelbar und als (vorwiegende) Kohäsionsbrüche der Klebefuge öffneten (vgl. Abb. 8.02), wiesen die überlappend-vermengten (Ü+V) Einzelfadenverklebungen komplexere Bruchvorgänge auf. Je nach Klebstoff kam es sowohl zur fast vollständigen Trennung der Fadenfügeteile, als auch der partiellen Trennung durch zunehmendes „Auseinandergleiten“ (vgl. Ab. 8.03). Zwischen den vermengten Fasern der Fadenenden lagen auch hier vornehmlich Kohäsionsbrüche innerhalb der verbindenden Klebstoffmatrix vor, zusätzlich ließen sich teils lokale Adhäsionsbrüche in geringerem Umfang nachvollziehen. Lediglich mit dem betrachteten Störleim-Cellulosefaser-Klebstoff zeigten sich an den überlappend-

vermengten Verklebungen ebenso lokale Faserbrüche nach Verklebungsöffnung an der Klebestelle (vgl. Abb. 8.04). Hier kam es somit zur unerwünschten Schädigung des Gewebesubstrats, wenngleich stark lokal auf den Verklebungsbereich begrenzt.

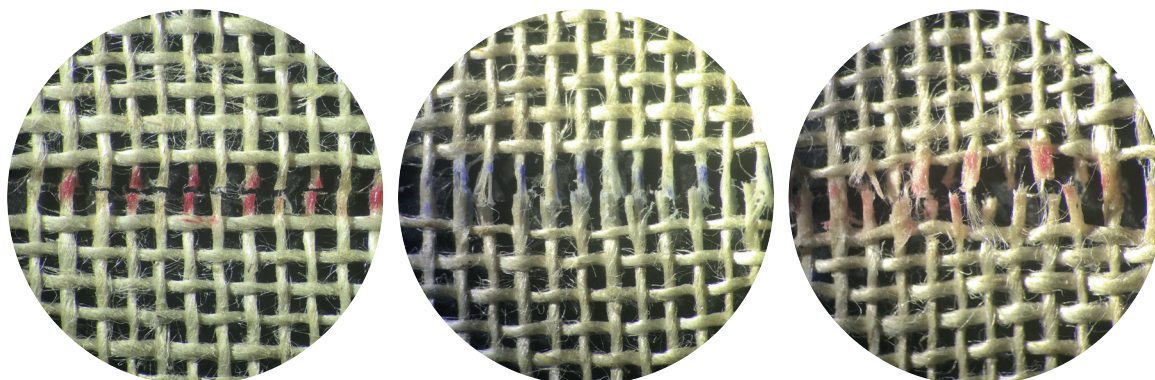


Abb. 8.02: SAS-Verklebung mit Störleim + Weizenstärkekleister (modifiziert),

Abb. 8.03: Ü+V-Verklebung mit Lineco + Methocel A4C,

Abb. 8.04: Ü+V-Verklebung mit Störleim + Arbocel BWW 40 in Gewebestreifen des Typs 1. Sironi nach uniaxialer Zugprüfung bis zur Brucherkenkung (vgl. A.1.1).

Die betrachtete EVA- und PVAc-Dispersion sowie deren Modifikationen mit MC-“Gel“-Zusatz lieferten recht vergleichbare Ergebnisse im Kurzzeitversuch, während die Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen deutlich schwächer im Vergleich der F_{max} ausfielen. Die höchsten Verklebungsfestigkeiten in allen Verklebungstechniken zeigten sich mit dem Störleim-Cellulosefaser-Klebstoff (vgl. Abb. 8.05).

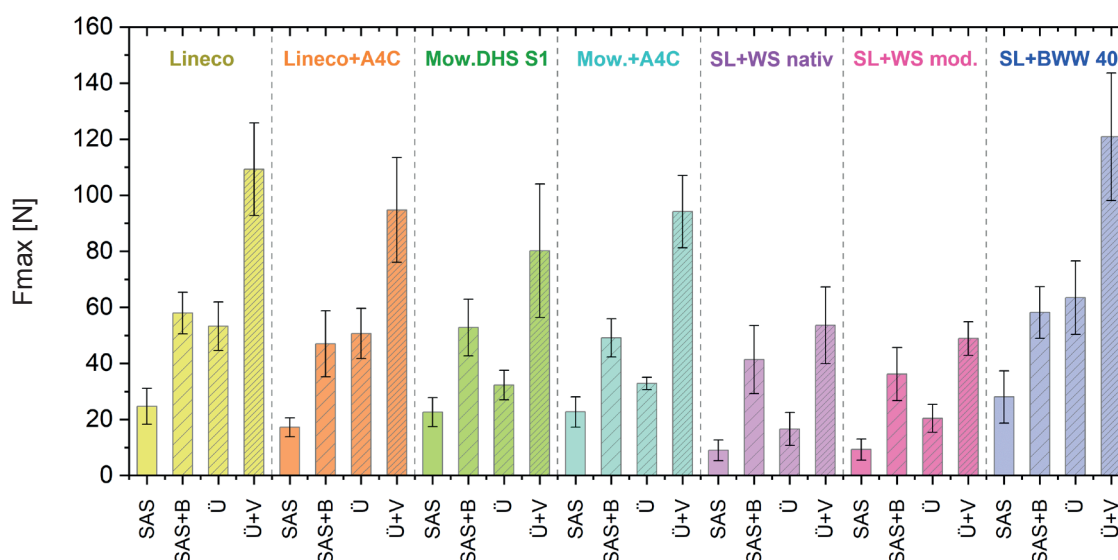


Abb. 8.05: Mittlere Höchstzugkraft (F_{max}) der betrachteten Klebstoffe und Verklebungstechniken im Vergleich (vgl. A.1.1).

Dabei stellten sich die Variationskoeffizienten (VK) der F_{\max} (nahezu) aller Klebstoffe mit ca. 12-41 % im Vergleich zur intakten Referenz mit ca. 8 % als erhöht dar (vgl. Abb. 8.06). Besonders hohe VK der F_{\max} wiesen die Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen auf; diese Klebstoffe generieren somit die inhomogensten Verklebungsqualitäten der Auswahl. Die hohen Stichprobengrößen bilden vergleichsweise repräsentative Streuungen ab. Allgemein hohe VK der F_{\max} zeigten jeweils die Verklebungen in SAS-Technik, während sich durch zusätzliche Fadenbrücken oder im Zuge überlappender Verklebungen in der Regel reduzierte Streubereiche ergaben. [Anm. 3]

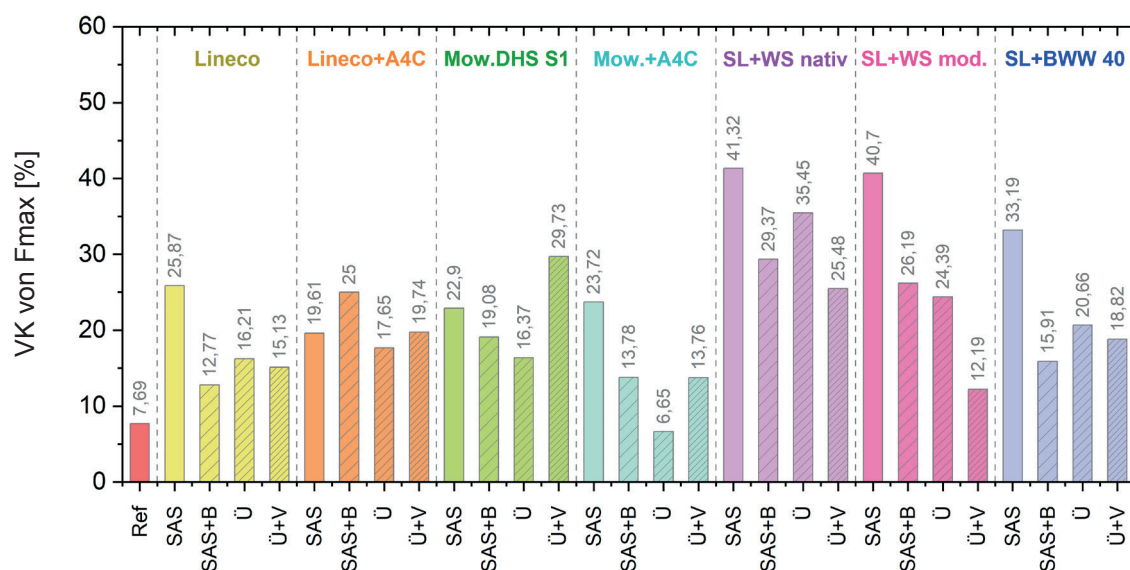


Abb. 8.06: Variationskoeffizienten (VK) der Höchstzugkräfte (F_{\max}) verschiedener Klebstoffe und Verklebungstechniken im Vergleich zur Referenz (vgl. A.1.1).

Die EVA-Dispersion Lineco erzielte in der Modifikation mit Methocel A4C etwas reduzierte F_{\max} -Werte der Einzelfadenverklebungen im Vergleich zur Reindispersion. Insbesondere vor dem Hintergrund zu vermutender Minimierung der Kriechneigung durch den MC-Zusatz erscheint die Mischung trotz dessen für den praktischen Anwendungsfall zu bevorzugen (vgl. Kap. 6.2 und 6.3.2).

Im Falle der PVAc-Dispersion Mowilith DHS S1 stellten sich bei Modifikation mit Methocel A4C ähnliche F_{\max} bei reduzierten VK dar; lediglich im Falle der Ü+V-Technik war eine deutliche Steigerung der F_{\max} zu verzeichnen. Vermutlich wird durch die einhergehende Verdünnung die Penetration und Benetzung optimiert. Für Mowilith DHS S1 kann daher ebenfalls die Modifikation mit MC-Zusatz bevorzugt werden, auch im Hinblick auf eine verbesserte Wiederanlösbarkeit (vgl. Kap. 4.1).

Hinsichtlich der Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen ergab sich kein klarer Trend bei Betrachtung der F_{max} ; die Werte fielen je nach Verklebungstechnik mal mit nativer oder modifizierter Weizenstärke leicht erhöht bzw. geringer aus. Bei Betrachtung der zugehörigen Variationskoeffizienten stellten sich jedoch etwas homogenere Verklebungsfestigkeiten mit der modifizierten Weizenstärkekleister-Mischung dar, sodass sich diese (auch aufgrund deutlich vereinfachter Klebstoffzubereitung) präferieren lässt (vgl. Kap. 6.1.1).

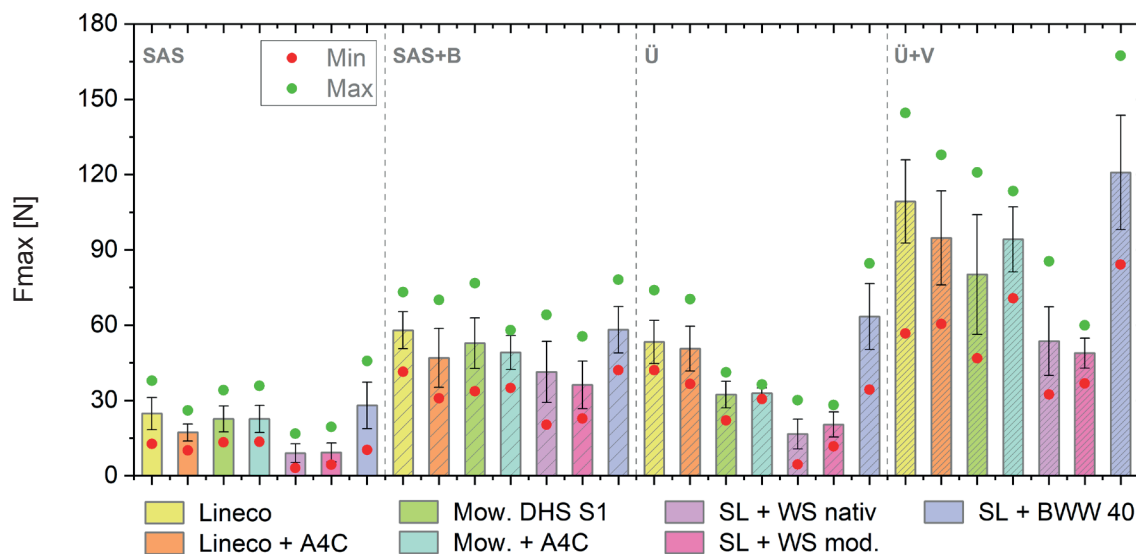


Abb. 8.07: Mittlere Höchstzugkraft (F_{max}) der betrachteten Klebstoffe, sortiert nach Verklebungstechniken und unter zusätzlicher Darstellung der Minima und Maxima der Gesamtstatistik (vgl. Kap. 7.1 und A.1.1).

In der praktischen Anwendung sollte die Klebstoffauswahl zudem auf Basis der Bruchbilder (vgl. Kap. 3.2.1), als auch der Gewebevoraussetzungen erfolgen. In stark abgebauten Geweben müssen zu hohe Verklebungsfestigkeiten vermieden werden, um die Verklebung selbst als Sollbruchstelle gewährleisten zu können (vgl. Kap. 4.1). So sollten neben den Mittelwerten auch die Maxima der F_{max} Berücksichtigung finden (vgl. Abb. 8.07); gleichsam weisen die Minima die untere Festigkeitsgrenze aus (vgl. Kap. 7.1).

Verklebungstechniken

Anhand dieser Kurzzeitversuche lassen sich als vorläufige Empfehlungen ableiten:

Für **SAS-Verklebungen** mit hohem Festigkeitsanspruch sowie wenig Toleranz gegenüber potentiell Kriechen der Klebstoffuge unter Langzeitbelastung empfiehlt sich insbesondere die Klebstoffmischung aus Störleim und der Cellulosefaser Arbocel BWW 40. Während hingegen bei weniger hohen Verklebungsbelastungen oder für geschwächte Gewebe

die zwei betrachteten Dispersionen mit MC-Zusatz geeigneter erscheinen. Dabei ist die im Vergleich erhöhte Dehnbarkeit der EVA-Dispersion Lineco zu bedenken, welche ggf. weniger formstabile Verklebungen, jedoch besonders schonende Klebungsöffnungen bedingt. Die Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen sind ungeeignet für die SAS-Technik, da sich neben stark inhomogenen Verklebungsqualitäten teils sehr geringe Festigkeiten darstellen. Zudem erfolgt die Verklebungsöffnung häufig nachteilig abrupt und vollständig.

Auch im Falle zusätzlich applizierter Fadenbrücken an **SAS+B-Verklebungen** stellt es sich grundlegend vergleichbar dar, da trotz Brücke die eigentlichen Verklebungseigenschaften und -festigkeiten maßgeblich sind (vgl. Kap. 4.1 und 8.1.2 / Abb. 8.28 und 8.36).

Für **Ü-Verklebungen** verhält es sich dahingehend ähnlich, dass die Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen wenig zuverlässige Verklebungen und keine vorteilhaft verlangsamen Klebungsöffnungen erlauben. Sehr formstabile Klebungen lassen sich vom Störleim-Cellulosefaser-Klebstoff erwarten. Weniger starre Verklebungen und eine langsamere Klebungsöffnung im Versagensfall ermöglichen die zwei Dispersionen mit MC-Zusatz, wobei hier ebenfalls die viskosen Eigenschaftsanteile der Thermoplasten zu bedenken sind.

Im Falle von **Ü+V-Verklebungen** muss ausdrücklich vor der Anwendung des Störleim-Cellulosefaser-Klebstoffs auch in stabilen Gewebevoraussetzungen gewarnt werden; die Verklebungen mit der Klebstoffmischung erlauben keine vollständig schadfreie Klebungsöffnung (vgl. Abb. 8.04). Auch für höhere Festigkeitsansprüche scheinen sich daher eher die MC-modifizierten Dispersionen Lineco und Mowilith DHS S1 anzubieten. Auch hier sind speziell im Falle der EVA-Dispersion Lineco ggf. weniger formstabile Verklebungen durch Kriechneigung unter dauerhaft hoher Beanspruchung zu bedenken. Speziell in geschwächten Geweben stellt die Mischung aus Störleim und modifiziertem Weizenstärkekleister eine probate Alternative dar; zudem sind mit dieser Klebstoffmischung weniger viskose Kriechtendenzen als mit den thermoplastischen Dispersionsklebstoffen zu erwarten.

Die im Rahmen dieses Klebstoffvergleichs präsentierten F_{max} -Werte beschränken sich jedoch auf das Kurzzeitverhalten bei Prüfung in vergleichsweise hohen Zuggeschwindigkeiten (vgl. Kap. 7.2.2). Speziell im Falle der EVA-Dispersion Lineco muss damit gerechnet werden, dass sich unter andauernder Belastung verringerte Beständigkeiten durch viskose Kriechdehnung darstellen. Die im Gesamtvergleich hohen F_{max} -Werte sind daher kritisch zu hinterfragen und mit Vorsicht zu interpretieren (vgl. Kap. 8.2.1).

Dies ist auch für die weiteren nachfolgenden Ausführungen zu bedenken.

Personenvergleich

Einschränkend sei des Weiteren darauf hinzuweisen, dass die hier präsentierten Verklebungsfestigkeiten zwar als Richtwerte zum Klebstoffvergleich genutzt werden können, die absoluten Werte jedoch mitunter deutlich verschieden ausfallen, je nach ausführender Person und deren Erfahrungsstand mit der Einzelfadenverklebungstechnik (vgl. Abb. 8.08).

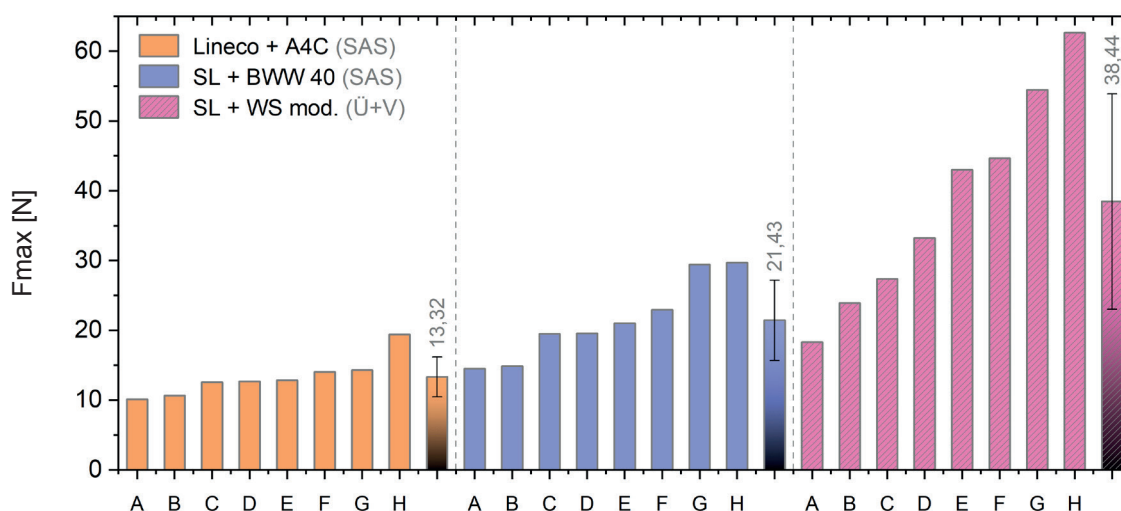


Abb. 8.08: Höchstzugkräfte (F_{max}) ausgewählter Klebstoffe und Verklebungstechniken, Ergebnisse uniaxialer Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs *I. Sironi* (je 12 Fäden). Ausführung der Verklebung durch 8 Restauratoren nach Einweisung; der Probenrücklauf erfolgte vollständig anonymisiert.

So zeigten sich insbesondere mit der MC-modifizierten EVA-Dispersion Lineco im Personenversuch recht homogene Verklebungsfestigkeiten, während die Verklebungsqualitäten mit dem Gemisch von Störleim und modifizierter Weizenstärke stark divers ausfielen. Insgesamt wurden im Mittel zudem geringere F_{max} erzielt als in den zuvor präsentierten Versuchsreihen (vgl. Abb. 8.01 und 8.08).

Fadenbrücken

In den zuvor vorgestellten Versuchen erfolgte die Applikation von Fadenbrücken mit der Standardlänge von 20 mm sowie Beva 371 als Klebstoff (vgl. B.2 und B.3). Ergänzend wurden unterschiedliche Brückenlängen sowie die EVA-Dispersion Evacon-R mit MC-Zusatz als alternativer Fadenbrückenklebstoff betrachtet (vgl. Kap. 5.1.3 und A.1.4).

In der uniaxialen Zugprüfung öffneten sich im Falle der SAS+B-Verklebungen immer zuerst die Einzelfadenverklebungen (vgl. Abb. 8.09), bevor auch die Fadenbrücken sich zunehmend ablösten (vgl. Abb. 8.11). [Anm. 4]

Die Verklebungen öffneten sich mit zusätzlich applizierten Fadenbrücken somit deutlich schonender und es erfolgte nie die vollständige Trennung der Gewebestreifenhälften (vgl. Abb. 8.10) bis zum Prüfungsabbruch (Brucherkenkung bei 50 % Kraftabfall).

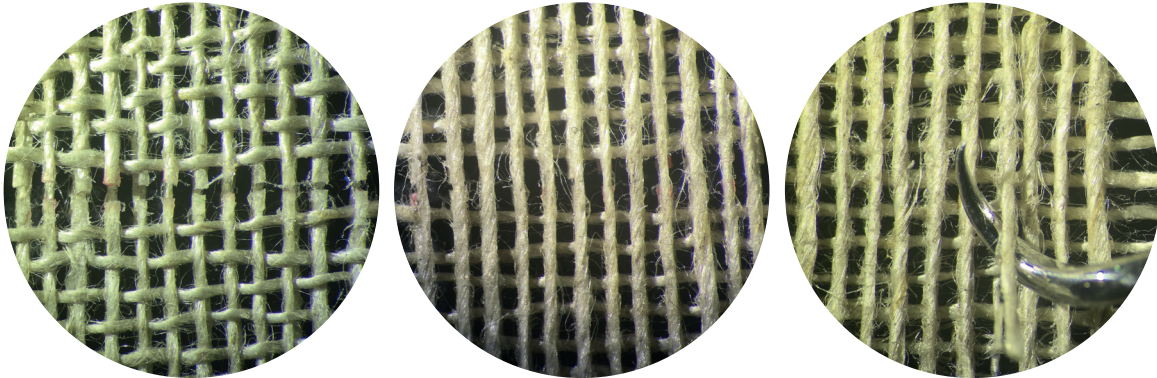


Abb. 8.09-10: Vorder- und Rückseite einer SAS+B-Verklebung mit Lineco + Methocel A4C (SAS) und Beva 371 (B) in Gewebestreifen des Typs 1. *Sironi* nach uniaxialer Zugprüfung bis zur Brucherkenkung (vgl. A.1.4);

Abb. 8.11: die Fadenbrücken haben sich teils vom Gewebesubstrat abgelöst.

Prinzipiell stellten sich die F_{max} erwartbar als von der Brückenlänge abhängig dar; der Verfestigungseffekt in Kombination mit der SAS-Verklebung war jedoch bereits ab einer Brückenlänge von 10 mm deutlich (je 5 mm links und rechts der Verklebung). Eine erhöhte Brückenlänge von üblichen 20 oder sogar 30 mm erscheint im Falle der erfolgten Einzelfadenverklebung somit nicht notwendig (vgl. Abb. 8.12). [Anm. 5]

Die EVA-Dispersion Evacon-R mit MC-Zusatz erweist sich hierbei als deutlich steifer und verfestigender als Beva 371 zur Fadenbrückenapplikation. Das ist prinzipiell nicht unbedingt wünschenswert, da sich so die Gefahr lokaler Markierungen der Brücken erhöht (vgl. Kap. 4.1). Der bisherige Standard-Klebstoff Beva 371 erscheint daher allgemein besser das spezielle Anforderungsprofil für die Fadenbrückenapplikation zu erfüllen (vgl. A.1.4 / Abb. 16-17). Auch der VK der F_{max} ist mit ca. 8 % an den SAS+B-Verklebungen mit Beva 371 als Brückenklebstoff etwas niedriger im Vergleich zu ca. 12 % bei Evacon-R mit MC-Zusatz (Brückenlänge 20 mm).

Allgemein wirkten sich die zusätzlichen Brücken scheinbar homogenisierend auf die SAS-Verklebung aus (VK der F_{max} ohne Brücke ca. 14 %). Gleichzeitig stellten sich erhöhte VK der F_{max} (ca. 11-23 %) für Brücken ohne zusätzliche SAS-Verklebung dar (vgl. A.1.4 / Abb. 20). [Anm. 6]

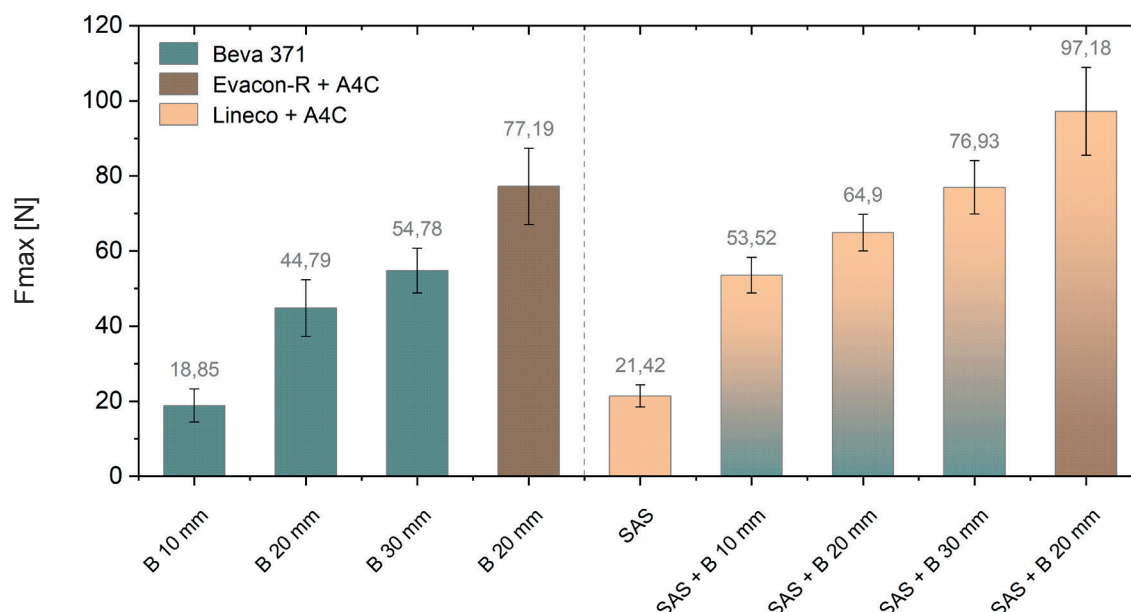


Abb. 8.12: Mittlere Höchstzugkraft (F_{max}) von Fadenbrücken (B) unterschiedlicher Länge und Klebstoffauswahl (Beva 371 / Evacon-R + A4C) zur Schließung der Durchtrennung ohne Verklebung. Rechts daneben zum Vergleich Stoß-auf-Stoß-Verklebungen (SAS) mit Lineco + Methocel A4C und zusätzlich aufgebrachten Fadenbrücken (SAS+B) der verschiedenen Modifikationen. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs *I. Sironi* (je 12 Fäden Breite).

Im Rahmen der vorgestellten Betrachtungen ergibt sich die F_{max} für Einzelfadenverklebungen mit Fadenbrücken (SAS+B) annähernd aus den addierten F_{max} der Verklebung (SAS) und der reinen Fadenbrücken (B) im Sinne einer Parallelschaltung (vgl. Kap. 3.3.3). Es erscheinen somit ungefähre Voraussagen der resultierenden Gesamtfestigkeiten möglich, sodass hilfreiche Abschätzungen im Zuge der Konzepterstellung durchzuführender Einzelfadenverklebungen in der Praxis erfolgen können.

Erweiterte Klebstoffauswahl

Im Zuge der Betrachtungen zur erweiterten Klebstoffauswahl wurden zudem unterschiedliche Klebstoffmaterialien und ihre Einzelfadenverklebungen erstmalig verglichen, deren wesentlichen Ergebnisse nachfolgend zusammengefasst werden (vgl. A.1.5). [Anm. 7]

Glutinleime

Reiner Störleim mit 20 % Feststoffgehalt erwies sich mit ca. 23,5 N F_{max} als deutlich zugfester in SAS-Verklebung als der betrachtete Gelatinetyp in gleicher Feststoffkonzentration mit ca. 12 N; beide Glutinleime zeigten jedoch eine recht vergleichbare Streuung der Verklebungsfestigkeiten mit ca. 26 % und ca. 23 % VK der F_{max} (vgl. Abb. 8.13). [Anm. 8]

Im Vergleich mit der klassischen Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung nach HEIBER¹ wurde deutlich, dass sich zwar die Klebstoffverarbeitung und das optische Erscheinungsbild der Verklebung durch die Verdickung deutlich verbesserten, der Störleim jedoch prinzipiell eine Schwächung durch den Kleisterzusatz erfährt (F_{\max} ca. 18,8 N); der VK der F_{\max} fiel mit ca. 18 % leicht reduziert aus. Bei der betrachteten Gelatine zeigte sich in Mischung mit Weizenstärkekleister hingegen eine vergleichbare mittlere F_{\max} (ca. 12 N) an SAS-Verklebungen, bei ebenfalls leicht reduziertem VK von ca. 19 %. [Anm. 9]

Das Wiederanlösen von getrockneten Filmen der Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung zur Klebstoffherstellung wirkte sich im Vergleich mit der frischen Klebstoffmischung in leicht reduzierter F_{\max} sowie etwas erhöhtem VK der F_{\max} aus (ca. 17,3 N und ca. 23 %). Inwiefern sich eine gewisse Minderung der Klebstoffqualität einstellt, lässt sich anhand der vergleichsweise geringen Stichprobengröße ($n = 10$) nicht sicher sagen. Das Wiederanlösen der Klebstoffmischungs-Filme zur rationalisierten Klebstoffzubereitung erscheint jedoch bisweilen als eine vertretbare Praxis. [Anm. 10]

Wenig überzeugende Verklebungen lieferte die Störleim-MC-Mischung mit ca. 6,8 N F_{\max} und stark erhöhtem zugehörigen VK von ca. 42 %. Von der Klebstoffmischung aus Störleim und Celluloseethern zur Einzelfadenverklebung ist daher abzuraten (vgl. Kap. 6.1.3).

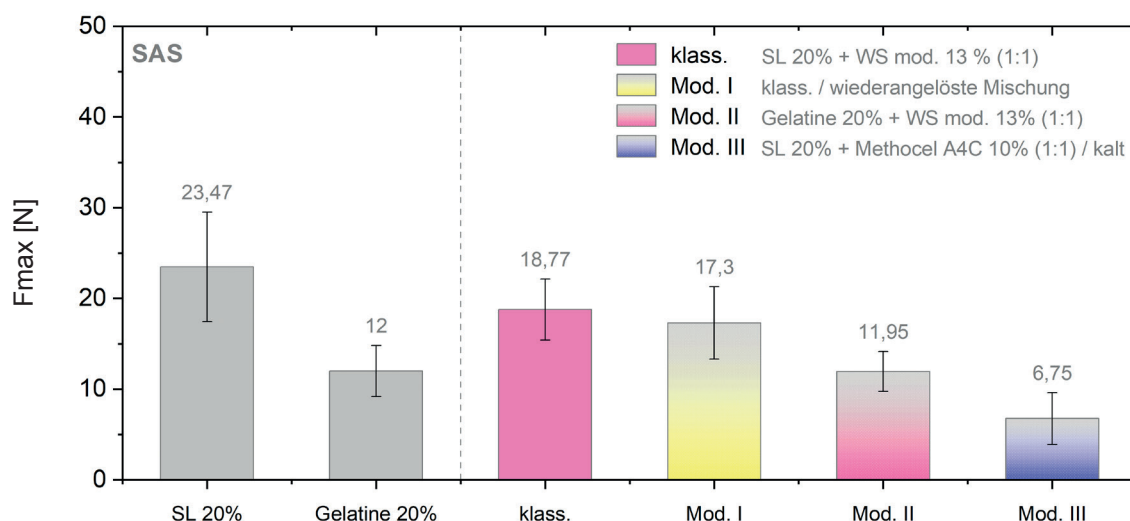


Abb. 8.13: Mittlere Höchstzugkraft (F_{\max}) verschiedener Klebstoffe auf Glutinleimbasis in SAS-Verklebungstechnik. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs 1. Sironi (mit je 12 Fäden zugbelasteter Streifenbreite).

¹ Vgl. HEIBER 1996; HEIBER 2003.

Im Falle der Störleim-Modifikation mit Cellulosefasern zeigte sich im Gegensatz zum Weizenstärkekleister ein deutlicher Festigkeitszuwachs von SAS-Verklebungen (F_{\max} ca. 33,9 N) im Vergleich mit reinem Störleim (ca. 21,6 N), bei ähnlichem VK der F_{\max} (ca. 23 und 25 %). Bei Verwendung der wiederangelösten Klebstoffmischung ergaben sich auch hier leicht reduzierte F_{\max} (ca. 30,1 N), jedoch gleichzeitig etwas reduzierte VK (ca. 17 %). Vermutlich liegt der abweichende VK der F_{\max} in den allgemeinen Messwertstreuungen begründet (vgl. Kap. 7.1), weniger in einer vermeintlichen Homogenisierung der Klebstoffeigenschaften durch Wiederanlösen der Klebstoffmischung (vgl. Abb. 8.14).

Auch der gewählte Gelatinetyp wies in Mischung mit Cellulosefasern zur SAS-Verklebung im Vergleich zur Reinform eine erhöhte F_{\max} (ca. 16,5 N), allerdings gleichzeitig einen leicht erhöhten zugehörigen VK auf (ca. 28 %). Für die Nutzung als Alternative zu Störleim müsste zunächst noch ein geeigneter Gelatinetyp gefunden werden (vgl. Kap. 6.1).

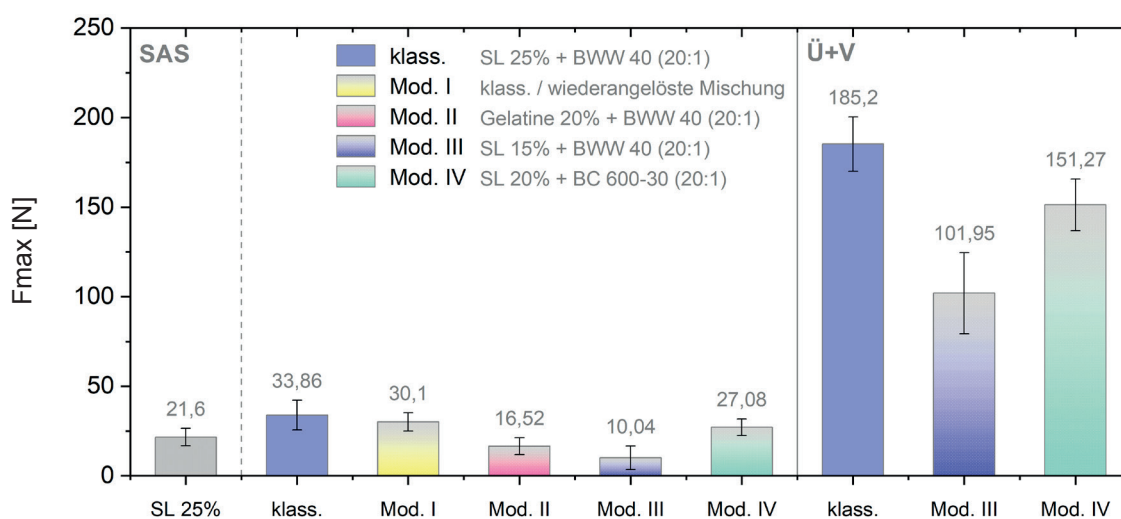


Abb. 8.14: Mittlere Höchstzugkraft (F_{\max}) verschiedener Klebstoffe auf Glutinleimbasis in SAS- und Ü+V-Verklebungstechnik. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs 1. *Sironi* (je 12 Fäden Streifenbreite).

Durch Herabsetzen des Störleim-Feststoffgehalts oder Wahl kürzerer Cellulosefasern stellten sich zwar leicht reduzierte F_{\max} in Ü+V-Verklebungstechnik und ein verbessertes Bruchbild mit reduzierten Faserbrüchen des Gewebes dar (vgl. Abb. 8.04), die Verklebungen öffneten sich jedoch trotzdem nicht vollständig schadfrei. Gleichzeitig zeigten die klassische Mischung sowie die Mischung mit kürzeren Fasern im Vergleich zur SAS-Verklebung deutlich reduzierte VK der F_{\max} von ca. 8 % und 10 % in Ü+V-Technik. Im Gegensatz dazu äußerte sich die schlechte Verarbeitung bei reduzierter Leimkonzentration auch in einem erhöhten VK der F_{\max} mit ca. 22 % in Ü+V-Technik (vgl. Abb. 8. 14). [Anm. 11]

Es ist fraglich, ob sich Störleim ohne einen schwächenden Zusatz daher überhaupt für Ü+V-Verklebungen anbietet [Anm. 12]. In jedem Fall erscheint keine zufriedenstellende Modifikation mit Cellulosefasern für die Ü+V-Verklebungstechnik möglich.

Störleim-Cellulosefaser-Klebstoff

Störleim-Cellulosefaser-Mischungen sollten als Klebstoffe daher ausschließlich für SAS-Verklebungen Anwendung finden. Dabei hat sich der Zusatz einer Faserlänge von ca. 200 µm des Typs Arbocel BWW 40 als klassische Standardrezeptur bewährt. Auch etwas kürzere Fasertypen ermöglichen pur oder in Mischung zufriedenstellende Verklebungsfestigkeiten; so lassen sich ggf. gezielt die Verarbeitungseigenschaften individuell modifizieren. Verzichtet werden sollte jedoch auf erhöhte Faserlängen als Klebstoffzusatz, da diese keine verbesserte Armierung bewirken (vgl. Abb. 8.15).² [Anm. 13]

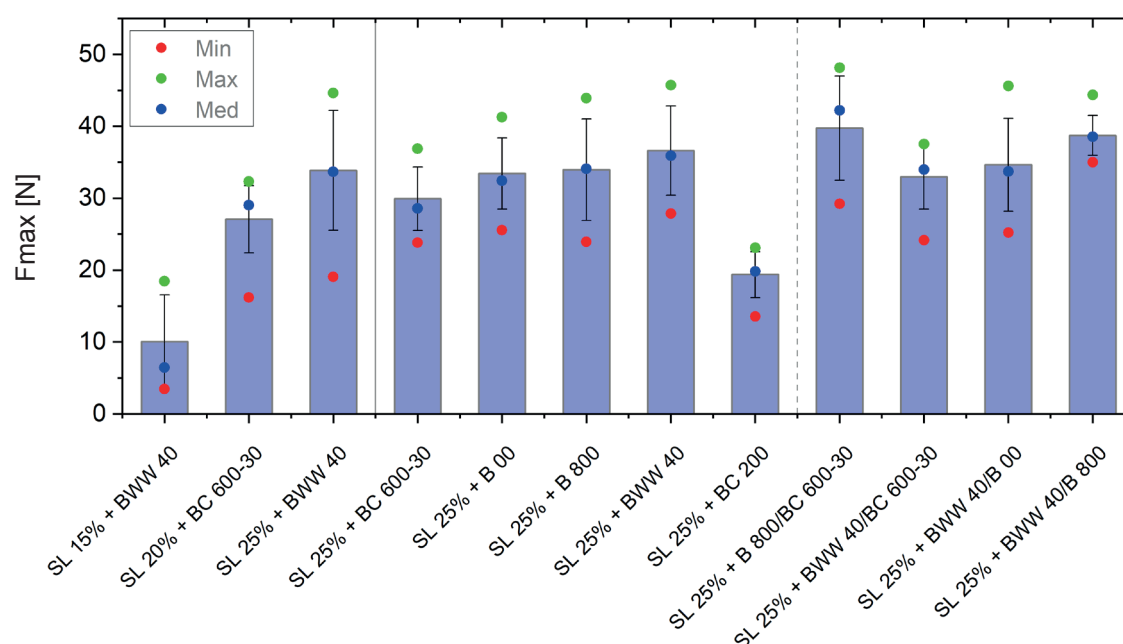


Abb. 8.15: Mittlere Höchstzugkraft (F_{max}) verschiedener Störleim-Cellulosefaser-Mischungen in SAS-Verklebungstechnik. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs *I. Sironi* (je 12 Fäden Breite).

Ganz links die drei weiteren Betrachtungen dieser Arbeit, daneben rechts im Vergleich die Ergebnisse erster Untersuchungen (FLOCK et al. 2019).

Die ganz rechts dargestellten vier Fasermischungen erfolgten je 1:1 GT.

Die mittleren Faserlängen der dargestellten Arbocel-Cellulosefasertypen sind:

- | | | | |
|-------------|--------|----------|--------|
| • BC 600-30 | 40 µm | • BWW 40 | 200 µm |
| • B 00 | 120 µm | • BC 200 | 300 µm |
| • B 800 | 130 µm | | |

² Vgl. FLOCK et al. 2019.

Celluloseether

Der betrachtete Methylcelluloseether (MC) Methocel A4C ermöglichte in allen Modifikationen wenig zufriedenstellende SAS-Verklebungen mit F_{max} von ca. 7,7-13,5 N (vgl. Abb. 8.16). Die Klebungsöffnung erfolgte ähnlich der Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen nachteilig abrupt und vollständig im uniaxialen Zugversuch.

Die schlechten Verarbeitungseigenschaften in SAS-Technik (vgl. Kap. 6.2 / Anm. 6) ließen sich zwar durch zusätzlichen Füllstoffzusatz von Cellulosefasern oder mikrokristalliner Cellulose (MCC) zur maximal verarbeitbaren MC-Feststoffkonzentration von 10 % verbessern, es stellte sich jedoch keine bis nur eine geringfügige Armierungswirkung in Form erhöhter F_{max} dar; auch das Bruchverhalten blieb unverändert. Die VK der F_{max} der SAS-Verklebungen lagen vergleichbar bei ca. 16-17 %.

Für die SAS-Verklebungstechnik erscheinen die betrachtete MC und ihre Modifikationen daher weniger geeignet.

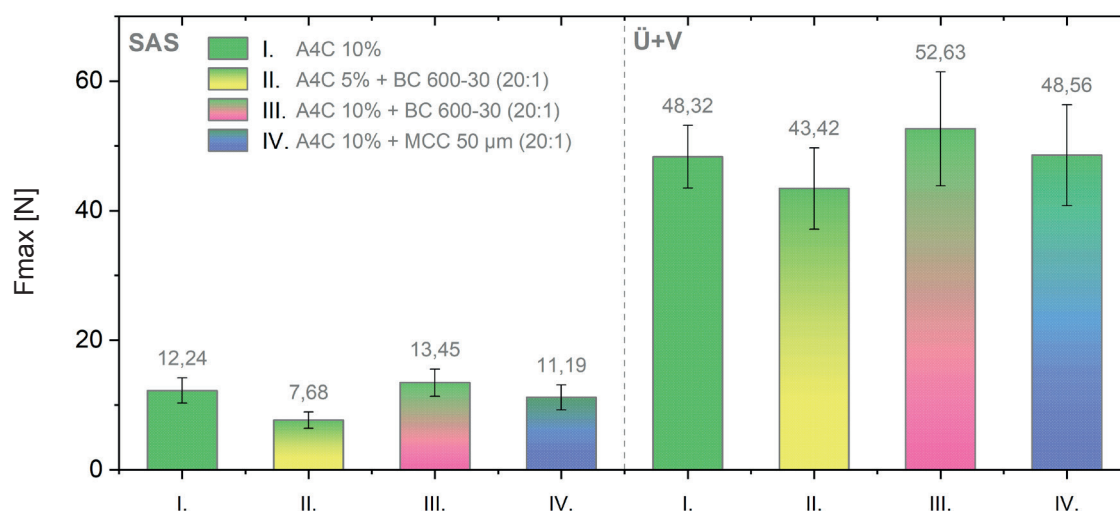


Abb. 8.16: Mittlere Höchstzugkraft (F_{max}) verschiedener Klebstoffe auf Methylcellulosebasis (Methocel A4C) in SAS- und Ü+V-Verklebungstechnik. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs *I. Sironi* (je 12 Fäden).

Als deutlich vielversprechender erwiesen sich alle betrachteten MC-Rezepturen für die Ü+V-Verklebungstechnik mit Werten von ca. 43,4-52,6 N F_{max} und einem langsameren Verklebungsversagen bei Bruch. Auch hier ließ sich durch Cellulosefaser- oder MCC-Zusatz zur MC mit 10 % Feststoffgehalt kaum eine Festigkeitssteigerung erzielen; jedoch wiesen die Mischungen im Vergleich zur puren MC erhöhte VK der F_{max} mit ca. 16-17 % statt lediglich ca. 10 % auf. Im Falle der Mischung mit nur 5 % Feststoffgehalt der MC lag der VK der F_{max} bei vergleichbaren ca. 15 %. Die Modifikation der MC mit Cellulosefa-

sern oder MCC erscheint daher keine grundlegenden Vorzüge zu bieten, sodass die reine Lösung des Celluloseethers in gelartiger Verarbeitungsform präferiert werden kann.

Methocel A4C ermöglicht somit grundsätzlich mit den Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen vergleichbare Verklebungsfestigkeiten (vgl. Abb. 8.01) bei tendenziell vergleichbaren bis reduzierten Streuungen (vgl. Abb. 8.06). Es liegt daher nahe, auch aufgrund u.a. vereinfachter Kaltverarbeitung, vorteilhafterer Alterung sowie verbesserter optischer Eigenschaften, statt Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen zukünftig gezielt MC für Ü+V-Verklebungen zu erwägen (vgl. Anm. 9). [Anm. 14]

EVA-Dispersion

Weitergehend wurde die EVA-Dispersion Lineco in bewährter Mischung mit Methocel A4C im Vergleich mit abgewandelten Rezepturen zur SAS-Verklebung betrachtet (vgl. Abb. 8.17).

Im Vergleich zur direkten Verklebung mit der klassischen Mischung (vgl. auch A.1.1; Lineco und Methocel A4C 5 %, 9:1 GT) mit ca. 21,4 N Fmax stellte sich bei vorheriger Imprägnierung der Fadenenden mit Methocel A4C in geringer Feststoffkonzentration (1 %) und SAS-Verklebung nach Trocknung der Vorbehandlung eine reduzierte Fmax von ca. 18,1 N dar. Die VK der Fmax waren mit ca. 14 % und ca. 13 % vergleichbar. Es ließ sich somit keine vorteilhafte Haftvermittlung durch Vorbehandlung der Fadenenden erzielen, wohl aufgrund verminderter Penetration des Klebstoffs zwischen die Fasern. [Anm. 15]

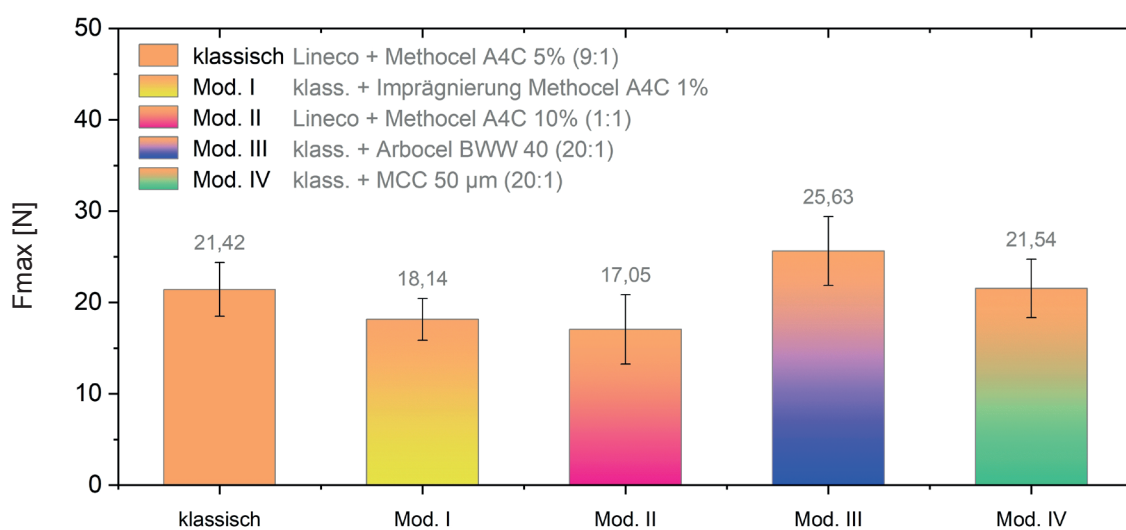


Abb. 8.17: Mittlere Höchstzugkraft (Fmax) verschiedener Modifikationen der EVA-Dispersion Lineco in SAS-Verklebungstechnik. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs *I. Sironi* (je 12 Fäden Streifenbreite).

Eine Erhöhung des Anteils der MC-Lösung (10%ig) auf 50 % in der Mischung führte zu einer Reduzierung der mittleren F_{max} auf ca. 17,1 N mit einem erhöhten zugehörigen VK von ca. 22 % durch die Verdünnung [Anm. 16]. Die SAS-Verklebungen verhielten sich somit weniger zugfest als mit der klassischen Rezeptur, aufgrund des Anteils EVA-Dispersion jedoch fester als bei Nutzung der reinen MC als Klebstoff (vgl. Abb. 8.17 und 8.16).

Eine Steigerung der mittleren F_{max} auf ca. 25,6 N zeigte sich durch zusätzlichen Cellulosefaserzusatz zur klassischen Mischung, mit vergleichbarem VK der F_{max} von ca. 15 %. Wurde bisher der Zusatz von Cellulosefasern zur zusätzlichen Armierung von Kunstharzdispersionen auch aufgrund befürchteter Filmstörungen nicht erwogen [Anm. 17], stellte sich dieser nun jedoch vorteilhaft in weiterer Erprobung dar. Hingegen zeigte sich durch Zusatz von MCC statt Cellulosefasern zur EVA-Dispersion Lineco keine wesentliche Erhöhung der F_{max} (ca. 21,5 N) bei ähnlichem VK (ca. 15 %).

Speziell für SAS-Verklebungen erscheint daher der Cellulosefaser-Zusatz zur zusätzlichen Armierung der EVA-Dispersion empfehlenswert, auch da so ggf. mit verminderten Kriechneigungen der Klebefugen unter Langzeitbelastung gerechnet werden kann. [Anm. 18]

Schmelzklebstoffe

Bei Vergleich der drei ausgewählten Schweißpulver auf Polyamid-Basis (PA) mit dem EVA-basierten Beva 371 in Reinform sowie in zusätzlicher Modifikation mit Cellulosefasern zeigten sich auffallend unterschiedliche Messkurvenverläufe (vgl. Abb. 8.18).

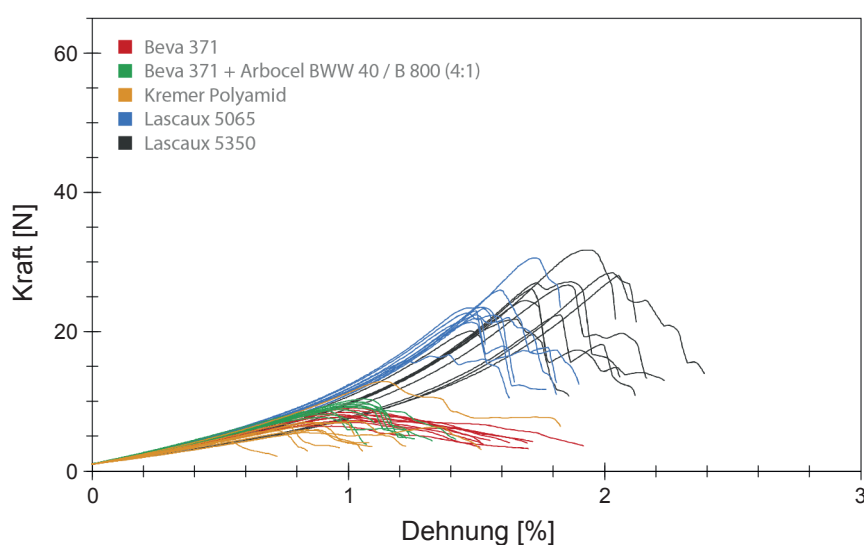


Abb. 8.18: Kraft-Dehnungs-Diagramm zur uniaxialen Zugprüfung an Gewebestreifen des Typs I. Sironi (12 Fäden Breite) mit SAS-Verklebungen unterschiedlicher Schmelzklebstoffe (vgl. A.1.5). [Anm. 19]

Während sich mit den PA-Schweißpulvern sowie dem mit Cellulosefasern modifizierten Beva 371 ein prinzipiell mit den zuvor betrachteten Klebstoffen besser vergleichbarer Kurvenverlauf darstellte [Anm. 20], zeigte sich im Falle der mit reinem Beva 371 verklebten Gewebestreifen ein sehr deutliches Fließen nach Erreichen der Höchstzugkraft. Obwohl sich mit allen Schmelzklebstoffen der Auswahl so besonders schonende, da nicht abrupte Klebungsöffnungen abbildeten, illustriert dies auch vergleichsweise dehnbare Klebefugen mit zu vermutend geringerer Formbeständigkeit unter Dauerbelastung.

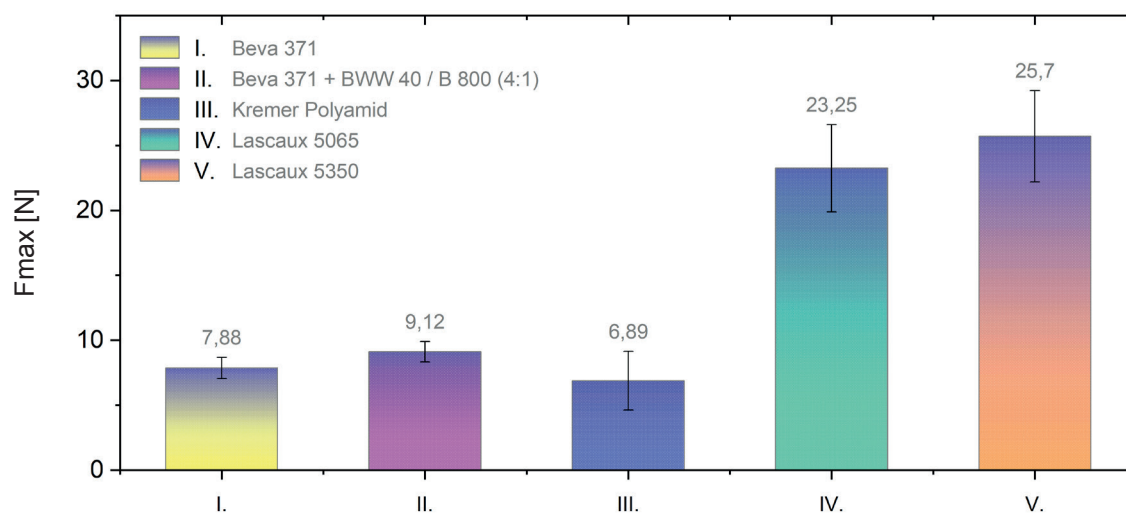


Abb. 8.19: Mittlere Höchstzugkraft (Fmax) verschiedener Schmelzklebstoffe in SAS-Verklebungstechnik. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs *I. Sironi* (je 12 Fäden Streifenbreite).

Mit den PA-Schweißpulvern Lascaux 5065 und 5350 ergaben sich an SAS-Verklebungen recht ähnliche mittlere Fmax von ca. 23,3 N und 25,7 N mit zugehörigen VK der Fmax von ca. 14 % [Anm. 21]. Eine auffallend geringere Fmax zeigte sich mit ca. 6,9 N bei Verklebung mit dem Kremer-PA, mit deutlich erhöhtem VK der Fmax von ca. 33 %. Dies ist insofern überraschend, da das Produkt einen erhöhten Schmelzbereich von ca. 130 °C statt nur ca. 80-100 °C wie die Lascaux-Produkte aufweist. REUBER nahm daher sogar explizit erhöhte Verklebungsfestigkeiten an.³ Möglicherweise sind die niedrigen Fmax auf die damit zusammenhängend etwas hochviskosere Schmelze zurückzuführen, sodass Penetration und Benetzung schlechter ausfielen. Aufgrund der mäßigen Festigkeit und hohen Streuungen sollte das Produkt unter den PA nicht präferiert werden.

Durch Zusatz von Cellulosefasern erhöhte sich die mittlere Fmax von Beva 371 nur unwesentlich von ca. 7,9 N auf ca. 9,1 N (VK der Fmax ca. 10 % und ca. 9 %). Ein deutlicherer

³ Vgl. REUBER 2010, S. 41.

Unterschied stellte sich im Bruchverhalten der Klebefuge dar, welche sich durch den Faserzusatz weniger stark aufdehnte. Dies deutet darauf hin, dass die Klebefuge auch unter Dauerbelastung weniger Kriechneigung aufweist, sodass die Modifikation mit Cellulosefasern in jedem Fall der Reinform von Beva 371 vorzuziehen ist. [Anm. 22]

Es bleibt zu überprüfen, inwiefern sich im Falle der häufigen Einsatzgebiete dieser Klebstoffe an hydrophobierten Cellulosefasergeweben oder synthetischen Bildträgern die dargestellten Tendenzen bestätigen lassen; vermutlich ist mit reduzierten F_{max} zu rechnen.

Vernetzende Klebstoffsysteme

Zuletzt werden die Verklebungen mit Klebstoffen auf Basis vernetzter Thermoplaste vorgestellt, dabei erfolgt der direkte Vergleich mit dem ausgewählten Epoxid. An den vernetzenden Klebstoffen zeigten sich sehr diverse F_{max} von ca. 5,2-31,5 N (vgl. Abb. 8.20).

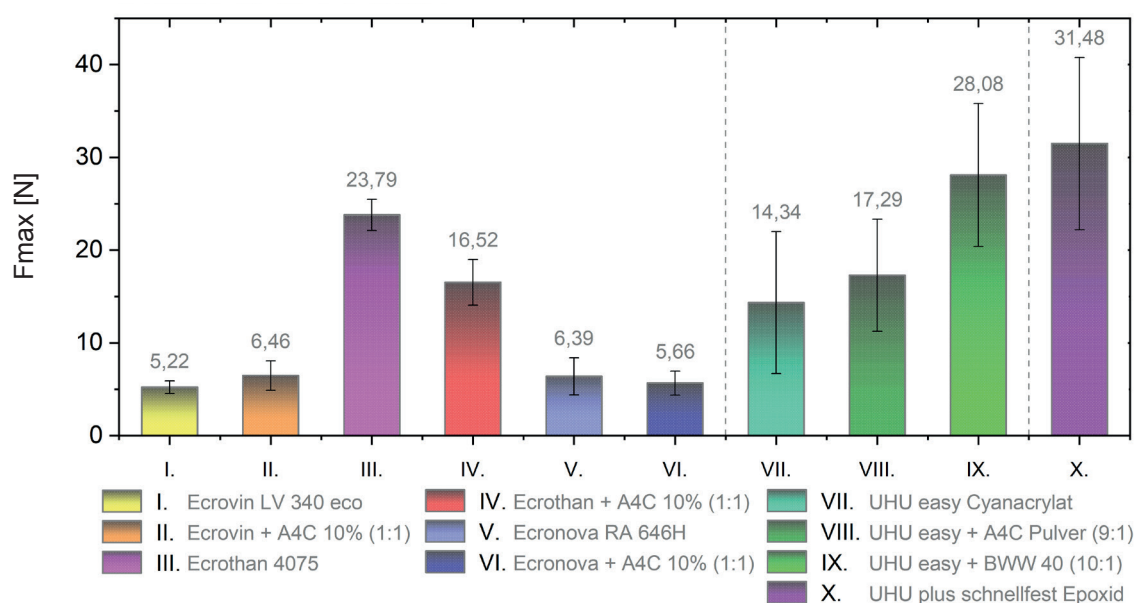


Abb. 8.20: Mittlere Höchstzugkraft (F_{max}) verschiedener vernetzter Klebstoffsysteme in SAS-Verklebungstechnik. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen des Typs *I. Sironi* (je 12 Fäden Streifenbreite). Die Klebstoffe I-VI. wurden durch Zusatz von Isocyanat modifiziert (vgl. Kap. 6.3.3, 6.4 und C.2).

Unter den betrachteten **Kunstharzdispersionen** ermöglichte die mit Isocyanat zusätzlich vernetzte Polyurethan-Dispersion (PU) Ecrothan 4075 (III.) die höchste mittlere F_{max} von ca. 23,8 N bei einem sehr geringen VK von nur ca. 7 % in SAS-Verklebung. Weniger überzeugend schnitten die isocyanatmodifizierten Dispersionen Ecrovin LV 340 eco (I.) sowie Ecronova RA 646H (V.) auf PVAc- und Acrylat-Basis ab; hier lagen die mittleren F_{max} le-

diglich bei ca. 5,2 N und ca. 6,4 N. Die VK der Fmax waren mit ca. 13 % und sogar 31 % erhöht, zudem stellten sich häufig frühe Öffnungen einzelner Einzelfadenverklebungen vor Erreichen der Fmax dar (vgl. A.1.5).

Durch weiteren Zusatz von MC ließ sich nur eine eingeschränkte Wiederanlösbarkeit mit Wasser erzielen (vgl. Kap. 6.3.3 / Anm. 19). An Ecrovin (II.) fiel die mittlere Fmax der Verklebungen mit ca. 6,5 N leicht erhöht aus, jedoch auch der VK der Fmax mit ca. 25 %. An Ecrothan (IV.) zeigte sich bei ebenfalls erhöhtem VK von ca. 15 % wie bereits zuvor an der EVA-Dispersion Lineco eine reduzierte mittlere Fmax durch vergleichsweise hohen MC-Zusatz von ca. 16,5 N (Verdünnungseffekt). An Ecronova (VI.) stellte sich mit MC-Zusatz eine vergleichbare Fmax von ca. 5,7 N mit reduziertem VK von ca. 23 % dar.

Eine geeignete Alternativoption für ein vernetztes thermoplastisches Klebstoffsystem erscheint daher lediglich das PU-basierte Ecrothan 4075 in Modifikation mit dem Isocyanat Bayhydur ultra 305 unter den betrachteten Dispersionen zu bieten. Durch erhöhten MC-Zusatz lässt sich eine leichte Wasserquellbarkeit trotz Vernetzung erzielen, was jedoch mit geringeren Verklebungsfestigkeiten sowie erhöhten Streuungen dieser einhergeht.

Der betrachtete **Cyanacrylatklebstoff** UHU easy erzielte in SAS-Verklebung eine mittlere Fmax von ca. 14,3 N mit sehr hohem zugehörigen VK von ca. 53 %. Die vergleichsweise geringen Verklebungsfestigkeiten bei hohen Streuungen hängen unmittelbar mit den schlechten Verarbeitungseigenschaften des extrem niedrigviskosen Klebstoffs zusammen [Anm. 23]. Durch Zusatz von MC-Pulver sowie insbesondere Cellulosefasern ließen sich die Verklebungsfestigkeiten steigern und Streuungen reduzieren. Mit MC-Zusatz ergab sich eine mittlere Fmax von ca. 17,3 N (VK ca. 35 %), während durch Cellulosefaser-Zusatz sogar ca. 29,1 N Fmax mit nur noch ca. 27 % VK verzeichnet werden konnten.

Da auch mit 10 % MC-Anteil keine Wasserlöslichkeit erzielt werden konnte (vgl. Kap. 6.3.3. / Anm. 20), sollte die Rheologiemodifizierung und Armierung mit Cellulosefasern bei Erwägung des Cyanacrylats zur Verklebung präferiert werden.

Mit dem **Epoxidklebstoff** UHU plus schnellfest ergab sich für SAS-Verklebungen unter den betrachteten vernetzenden Klebstoffsystemen mit ca. 31,5 N die höchste mittlere Fmax, jedoch gleichzeitig ein eher hoher VK von ca. 30 %. Es wird so deutlich, dass der Epoxidklebstoff in herkömmlichen Leinengeweben den Störleim-Cellulosefaser-Klebstoffen keineswegs überlegen ist (vgl. Abb. 8.14-15 und 8.20).

Sofern sich nicht die konkrete Erfordernis nach vernetzten Klebstoffsystemen ergibt, sollte auf andere Klebstoffe zurückgegriffen werden (vgl. Kap. 4.1 und 6.3.3). Im Falle bspw. unbedingt zu vermeidender Kriechdeformation der Klebefugen, erwünscht hoher Resistenz gegenüber Feuchtigkeit oder ggf. bei hydrophobierten sowie unpolaren Eigenschaften des Gewebesubstrats könnten die betrachtete PU-Dispersion mit Isocyanat-Zusatz, das Cyanacrylat mit zugesetzten Cellulosefasern oder das Epoxid mögliche Optionen darstellen.

8.1.2 Biaxiale Gewebekreuzproben / unbeschichtet

Bei Übertragung der Verklebungen in biaxial zuggeprüfte Gewebestrukturen zeigten sich in der Regel mehr oder weniger stark reduzierte Verklebungsfestigkeiten (vgl. Abb. 8.21).

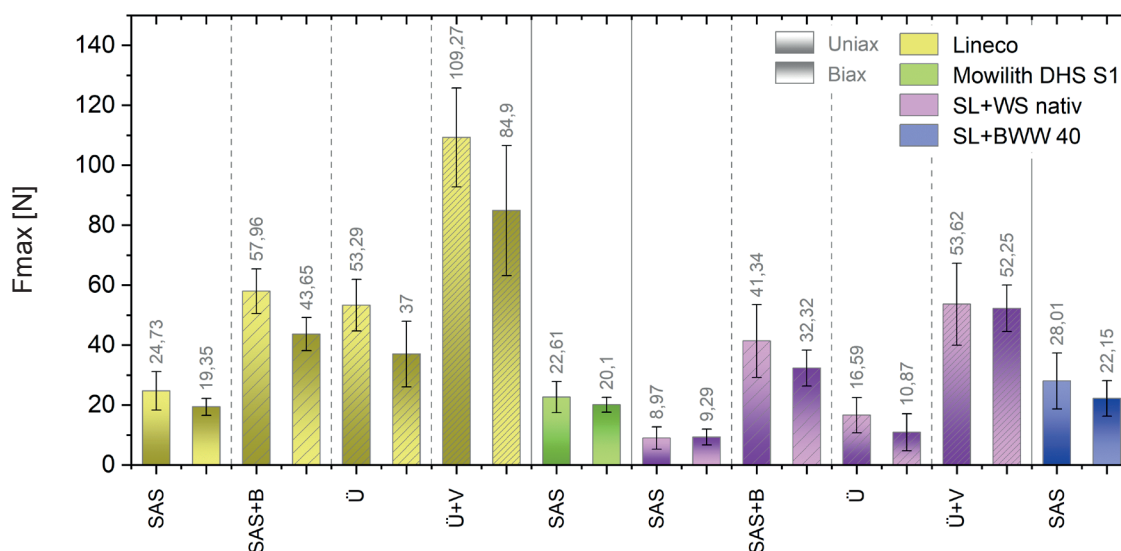


Abb. 8.21: Mittlere Höchstzugkraft (F_{max}) verschiedener Klebstoffe und Verklebungstechniken. Ergebnisse der uni- und biaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen und Gewebekreuzproben des Typs *I. Sironi* im Vergleich (mit je 12 Fäden zugbelasteter Breite). Für nähere Details siehe A.1.1 und A.2.1.

Die grundsätzlich geringeren F_{max} deuten darauf hin, dass ein allgemeiner Trend abgebildet wird und sich dies nicht allein durch zufällige Messwertstreuungen darstellte (vgl. Kap. 7.1). Vermutlich äußern sich sowohl die erschwerte Verklebung als auch insbesondere der orthogonale Querzug des Kettensystems zum verklebten Schussfadensystem in verringerten Verklebungsfestigkeiten, sodass in der Praxis mit schwächeren Verklebungen als anhand der uniaxialen Zugprüfung zu erwarten gerechnet werden muss (vgl. Kap. 7.3.1). Allgemein stellten sich Reduzierungen der mittleren F_{max} um bis zu ca. 35 %, d.h. um maximal

etwa ein Drittel je nach Klebstoff und Verklebungstechnik dar. Möglicherweise ist dies auch auf eine partielle Verklebung der zwei Fadensysteme zurückzuführen, sodass der Querkzug des Kettensystems sich direkt schwächend auf die Verklebungen des Schussfadensystems auswirkte. Folglich ist bei der Verklebung maßgeblich darauf zu achten, eine Trennung der Fadensysteme zu gewährleisten und diese nicht durch den Klebstoff zu verbinden. Im Hinblick auf die Applikation von Fadenbrücken liegt es daher auch nahe, diese ggf. lediglich lokal auf den freiliegenden Bereichen der jeweils unterstützten Fäden zu befestigen und die Bindungspunkte des kreuzenden Fadensystems gezielt auszusparen.⁴

Dabei wiesen die VK der F_{max} sowohl vergleichbare, als auch mehr oder weniger stark erhöhte bzw. reduzierte Werte bei Vergleich der uni- und biaxialen Zugprüfungen auf (vgl. Abb. 8.22). Etwas häufiger zeigten sich reduzierte VK der F_{max} an Verklebungen in den biaxialen Zugprüfungen, möglicherweise bedingt durch sich weniger deutlich äußernde lokale Steifigkeitsunterschiede der Einzelfäden im biaxial zugbelasteten Gewebebereich mit Verklebung (vgl. Kap. 7.1). Im Falle der intakten Proben und stattfindenden Fadenbrüchen über die Gesamtlänge der Gewebekreuzproben hinweg, d.h. auch in den uniaxialen „Armlängen“, findet sich die Tendenz reduzierter VK der F_{max} hingegen so nicht wieder.

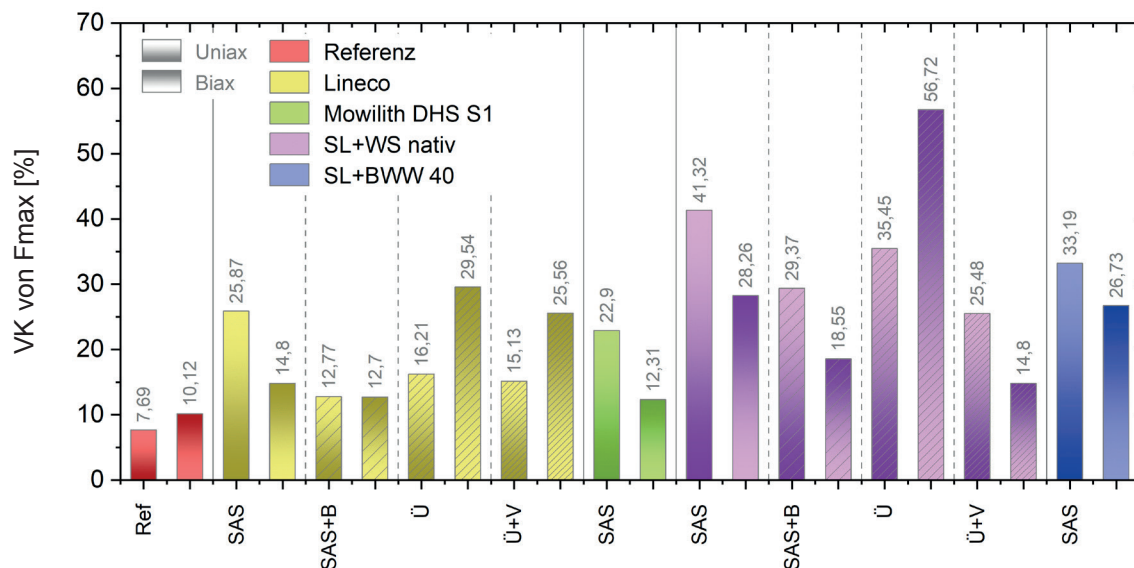


Abb. 8.22: Variationskoeffizienten (VK) der Höchstzugkräfte (F_{max}) verschiedener Klebstoffe und Verklebungstechniken im Vergleich zur intakten Referenz. Ergebnisse der uni- und biaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen und Gewebekreuzproben des Typs *I. Sironi* im Vergleich (mit je 12 Fäden zugbelasteter Breite).

4 Vgl. FLOCK 2014, S. 112.

Bei Betrachtung der VK der Fmax aus uni- und biaxialen Zugprüfungen ändern sich die Verhältnismäßigkeiten zwischen den einzelnen Klebstoffen jedoch nicht grundlegend. Störleim-Weizenstärkekleister generierte auch bei biaxialer Zugprüfung die inhomogensten Verklebungsfestigkeiten der betrachteten Klebstoffauswahl (vgl. Kap. 8.1.1).

Durch Vernachlässigung der lediglich uniaxial zugbelasteten Probenbereiche in der lokalen Dehnungsauswertung der biaxial gespannten Gewebekreuzprobenmitte via DIC ergaben sich niedrigere Höchstzugkraftdehnungen (ϵ -Fmax) für die intakten Referenzproben im Vergleich zur technischen Dehnungsermittlung der uniaxialen Zugprüfungen (vgl. Kap. 5.2 sowie Kap. 7.2.2 / Anm. 13). Bei Vergleich der Dehnungsauswertungen der uni- und biaxialen Gewebeproben mit Verklebungen stellten sich hingegen uneinheitliche Tendenzen dar. Die DIC bildete hier mitunter auch erhöhte ϵ -Fmax ab (vgl. Abb. 8.23).

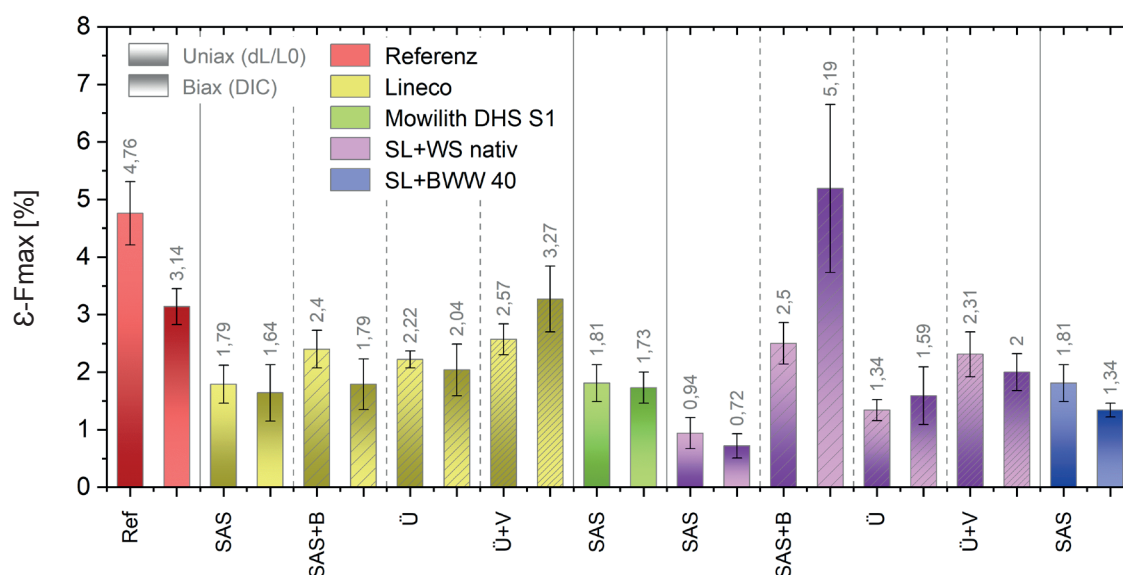


Abb. 8.23: Mittlere Höchstzugkraftdehnungen (ϵ -Fmax) verschiedener Klebstoffe und Verklebungstechniken. Ergebnisse der uni- und biaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen und Gewebekreuzproben des Typs *I. Sironi* im Vergleich (mit je 12 Fäden zugbelasteter Breite), bei Auswertung der technischen Dehnung (dL/L0) sowie Nutzung der DIC. Für nähere Details siehe A.1.1 und A.2.1.

Allgemein könnten auch im Falle der Verklebungen tendenziell geringere Dehnungen erwartet werden, da eine Auswertung des biaxial versteiften Mittelbereichs erfolgt. Tatsächlich stellt die Auswertung via DIC bei Betrachtung der ϵ -Fmax jedoch auch das erhöhte Aufdehnen der Klebefugen im Zuge des Klebungsversagens vor Öffnung dar. Dies erklärt auch die auffällig doppelt so hohen mittleren ϵ -Fmax im Falle der SAS+B-Verklebung mit

Störleim-Weizenstärkekleister (nativ) im Gegensatz zur technischen Dehnungsermittlung der uniaxialen Prüfung (siehe auch nachfolgend Abb. 8.36).

Auch die VK der ε -Fmax fallen somit je nach uni- oder biaxialer Zugprüfung unterschiedlich aus (vgl. Abb. 8.24). Häufiger zeigen sich erhöhte Streuungen der biaxialen Versuchsauswertungen, da sich die individuellen Dehnungen der Verklebungen differenzieren.

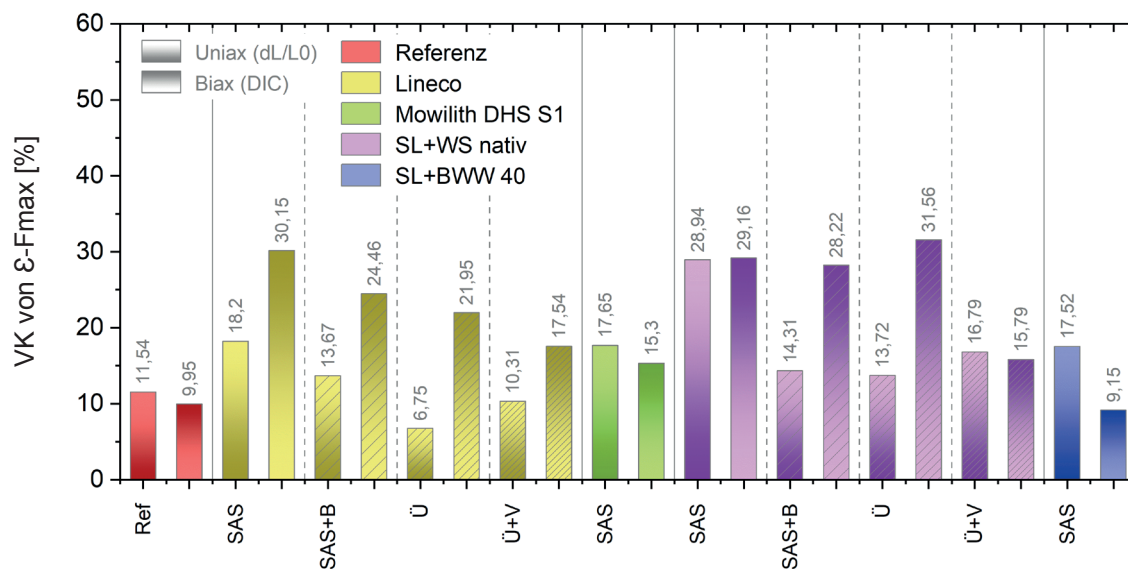


Abb. 8.24: Variationskoeffizienten (VK) der Höchstzugkraftdehnungen (ε -Fmax) verschiedener Klebstoffe und Verklebungstechniken. Ergebnisse der uni- und biaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen und Gewebekreuzproben des Typs *1. Sironi* im Vergleich (mit je 12 Fäden zugbelasteter Breite), bei Auswertung der technischen Dehnung (dL/L0) sowie Nutzung der DIC.

Während im Falle der uniaxialen Zugprüfungen mit technischer Dehnungsermittlung das Gewebesubstrat die ermittelten ε -Fmax dominierte, bestimmten im Falle der biaxialen Zugprüfungen und DIC-Auswertung mitunter die Verklebungen maßgeblich die gemittelt ausgewertete ε -Fmax. Die dargestellten ε -Fmax der biaxialen Zugversuche bilden so näherungsweise eher das Dehnverhalten der Klebungen selbst ab (vgl. Kap. 7.2.1 und 7.3.1).

Dehnungsauswertung

Zwar ist das Prüfsetup der uni- und biaxialen Zugprüfungen grundsätzlich verschieden, nachfolgend werden trotz dessen die unterschiedlich ermittelten Dehnungen anhand der Kraft-Dehnungs-Diagramme (K-D-Diagramme) gegenübergestellt, um die wesentlichen Unterschiede und Ähnlichkeiten darzustellen. Auf diese Weise lässt sich darstellen, inwiefern die technische Dehnung im gewählten uniaxialen Prüfaufbau (vgl. Kap. 7.2.2) das

Verklebungsverhalten annähernd abzubilden vermag [Anm. 24]. Des Weiteren erfahren die Auswertungen der Verklebungstechniken aus Kap. 8.1.1 Überprüfung.

Klebstoff: Lineco

Im Falle der SAS-Verklebungen mit der EVA-Dispersion Lineco illustrierte die Dehnung via DIC im Gegensatz zur technischen Dehnung eindrücklich, dass bereits unterhalb der F_{max} ein verstärktes Aufdehnen der Klebefugen eintrat. Bereits ab ca. 10 N stellte sich ein von den intakten Referenzproben abweichender Kurvenverlauf dar (vgl. Abb. 8.25-26).

Bei der vergleichsweise hohen Zuggeschwindigkeit im Kurzzeitversuch ließen sich im biaxialen Versuchsaufbau so bereits dehnbare Verklebungseigenschaften und eine langsam fortschreitende Klebungsöffnung erkennen, sodass auch von einer gewissen Kriechneigung des Klebstoffs unter Dauerbelastung ausgegangen werden kann.

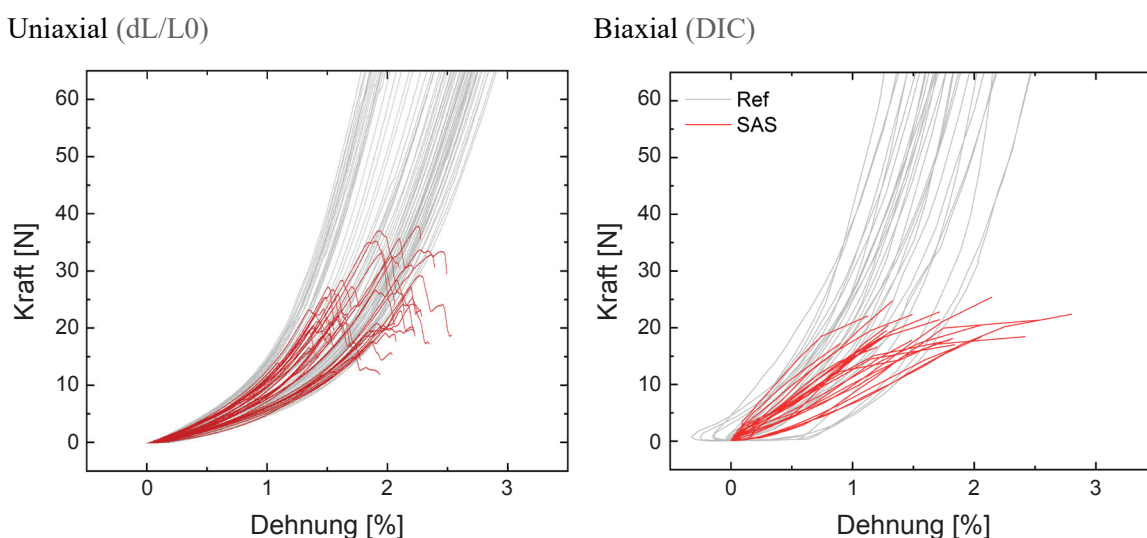


Abb. 8.25-26: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1). SAS-Verklebungen mit der EVA-Dispersion **Lineco** (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und Gewebekreuzproben in Grau).

Bei Vergleich der SAS+B-Verklebungen ließ sich im Zuge der DIC-Auswertung deutlich die Versteifung durch die applizierten Fadenbrücken im Vergleich zu intakten Referenz erkennen, während anhand der technischen Dehnung keine Auffälligkeiten im Kurvenverlauf sichtbar waren. Auch die erst im Zuge erhöhter Kraft bei ca. 30 N einsetzende, zunehmende Aufdehnung der SAS-Verklebungen fand in den Kurven des uniaxialen Versuchs keine Abbildung (vgl. Abb. 8.27-28). Anhand der DIC-Auswertung wurde so deutlich, wie stark die Fadenbrücken das Gesamtverhalten der Verklebung im Unterschied zur reinen SAS-Verklebung bestimmten (vgl. Abb. 8.26 und 8.28).

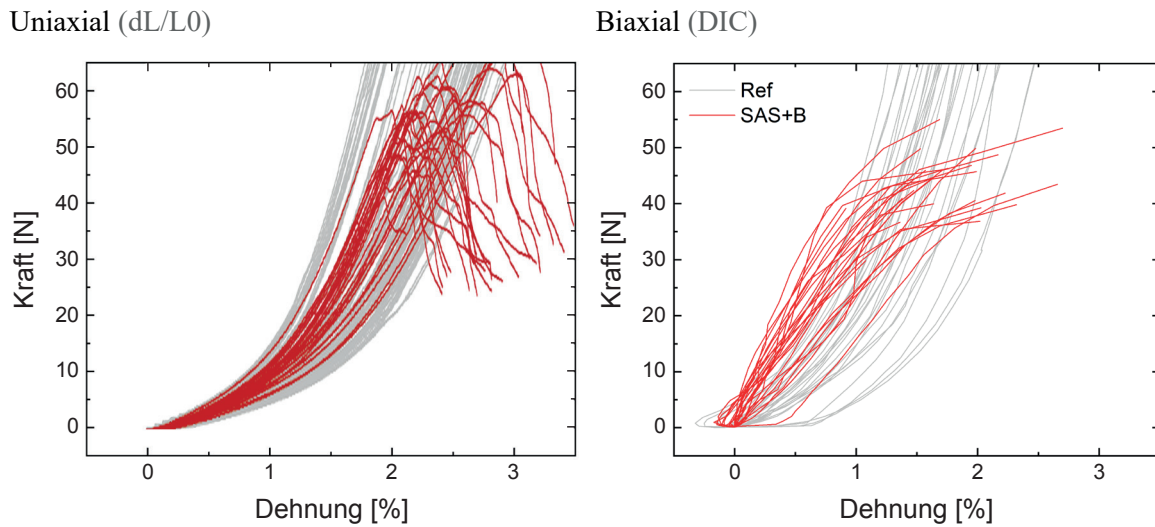


Abb. 8.27-28: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1).
SAS+B-Verklebungen mit der EVA-Dispersion **Lineco** (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und Gewebekreuzproben in Grau).

Auch für die \ddot{U} -Verklebungen erlaubte erst die DIC-Auswertung die Darstellung der sich steigernden Klebungsdehnung ab ca. 10 N (vgl. Abb. 8.29-30). Die Steigung der Proben mit Verklebung stellte sich dabei jedoch im Vergleich zur SAS-Verklebung erhöht dar, die Verklebung verhielt sich unter Scherbelastung insgesamt steifer (vgl. Abb. 8.26 und 8.30).

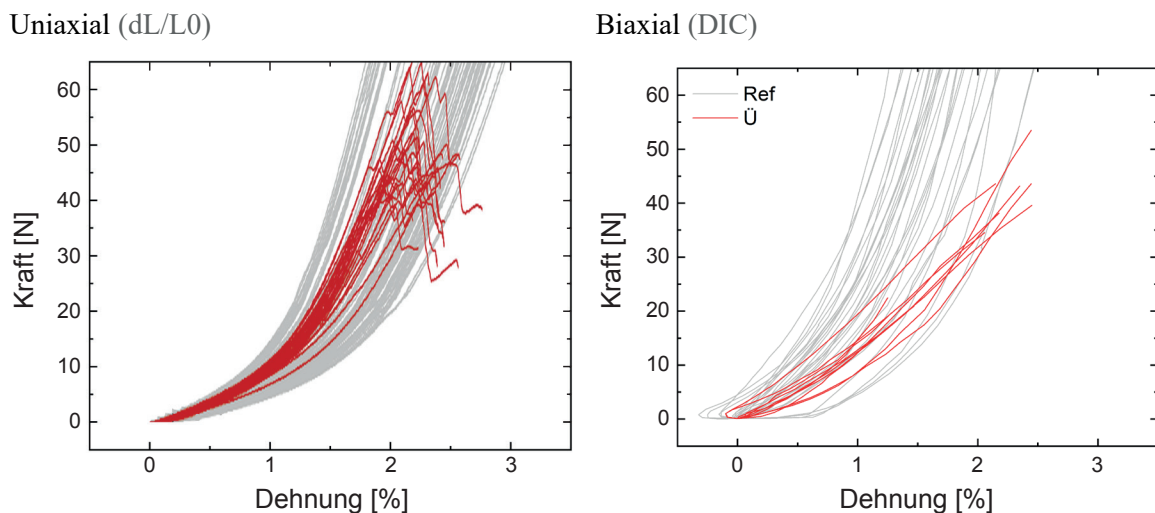


Abb. 8.29-30: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1).
 \ddot{U} -Verklebungen mit der EVA-Dispersion **Lineco** (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und Gewebekreuzproben in Grau).

Speziell bei Vergleich der \ddot{U} +V-Verklebungen zeigten sich im Vergleich zur intakten Referenz vermeintlich steifere Verklebungseigenschaften anhand der technischen Dehnung,

während durch DIC-Auswertung die bereits ab ca. 20 N eintretende erhöhte Dehnungszunahme deutlich wurde (vgl. Abb. 8.31-32).

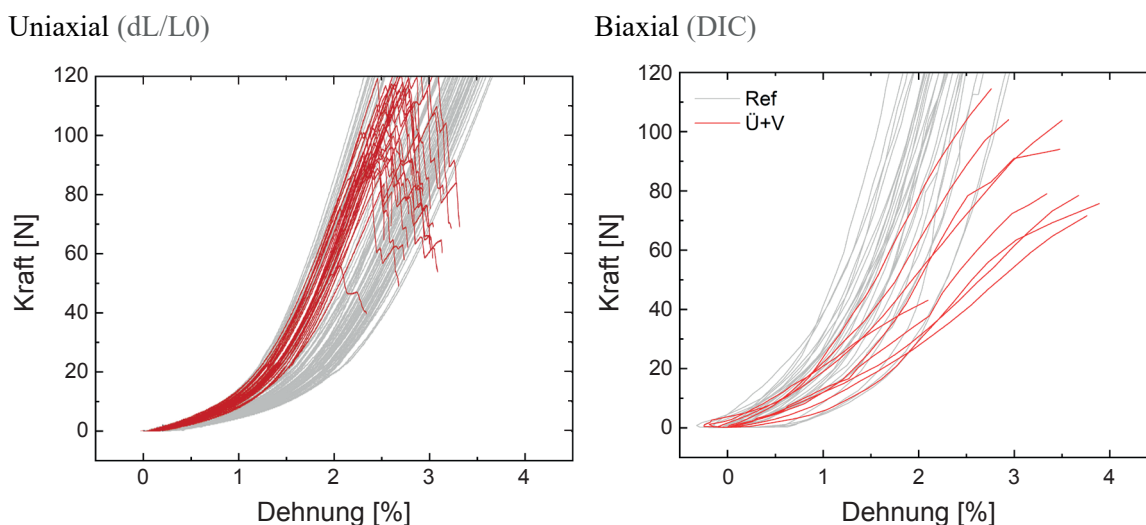


Abb. 8.31-32: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1).

Ü+V-Verklebungen mit der EVA-Dispersion **Lineco** (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und Gewebekreuzproben in Grau).

Klebstoff: Mowilith DHS S1

Auch mit der PVAc-Dispersion Mowilith DHS S1 stellte sich erst bei DIC-Auswertung die ab ca. 10 N eintretende gesteigerte Dehnungszunahme als deutlich flachere Steigung der Verklebungskurven im Unterschied zur intakten Referenz dar (vgl. Abb. 8.33-34). Trotz geringerer Dehnbarkeit des Klebstoffreinmaterials im Vergleich zur EVA-Dispersion (vgl. Kap. 6.3.2 / Abb. 6.01) ist der Kurvenverlauf sehr ähnlich der SAS-Verklebung mit Lineco (vgl. Abb. 8.26 und 8.34). Die vergleichsweise schonende Klebungsöffnung durch zunehmendes Aufdehnen deutet auch hier auf das Kriechpotential der Verklebung unter Dauerbelastung hin. Es kann damit gerechnet werden, dass sich in niedrigeren Zuggeschwindigkeiten aufgrund der viskosen Eigenschaftsanteile sowohl für die betrachtete EVA-, als auch die PVAc-Dispersion erhöhte Dehnungen der Klebefugen abbilden würden (vgl. Kap. 3.3.2 und A.1.7). Für beide Dispersionen erscheint daher die Modifikation mit MC (und ggf. Cellulosefasern) ratsam.

Inwiefern durch den MC-Zusatz effizient eine erhoffte Versteifung der Klebefuge erzielt wird, vermögen die bisherigen Betrachtungen nicht auszusagen. Hierfür sind weitergehend die Mischungen der Dispersionen mit MC-Zusatz (sowie auch Cellulosefasern) im Vergleich zu prüfen. Eine Aussage zur erhofften Minimierung potentiellen Kriechens im Anwendungsfall erlauben jedoch letztlich nur biaxiale Langzeitbetrachtungen (vgl. 8.2.1).

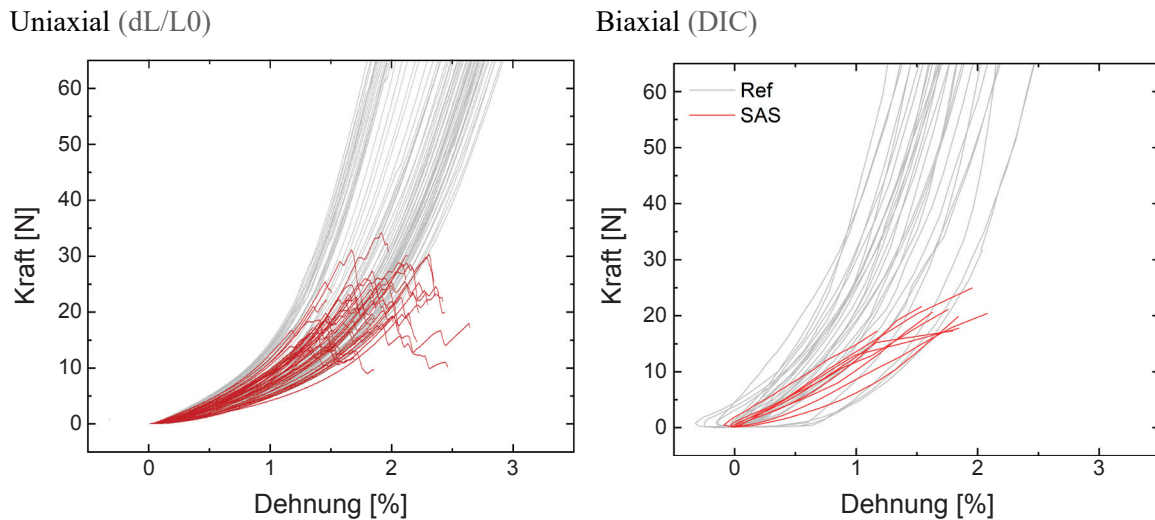


Abb. 8.33-34: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1).
SAS-Verklebungen mit der PVAc-Dispersion Mowilith DHS S1 (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und Gewebekreuzproben in Grau).

Klebstoff: Störleim + Weizenstärkekleister (nativ)

Deutlich ähnlicher fielen die unterschiedlich ermittelten Kurvenverläufe im Falle der SAS-Verklebung mit Störleim-Weizenstärkekleister aus (vgl. Abb. 8.35-36). Durch die weniger dehnbaren Verklebungseigenschaften trat eine abruptere Verklebungsöffnung ein. Auch bei DIC-Auswertung entsprach der Verlauf der verklebten Proben somit annähernd dem der intakten Referenzen. Bei Detailauswertung der Klebefuge wies diese eine mit dem umliegenden Gewebe vergleichbare ϵ -Fmax im biaxialen Auswertungsbereich auf.

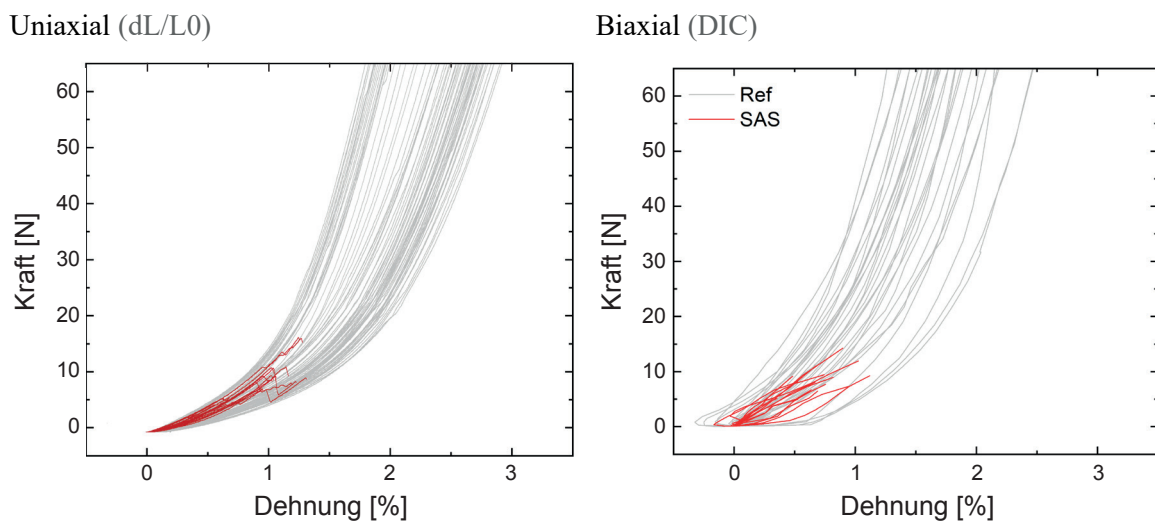
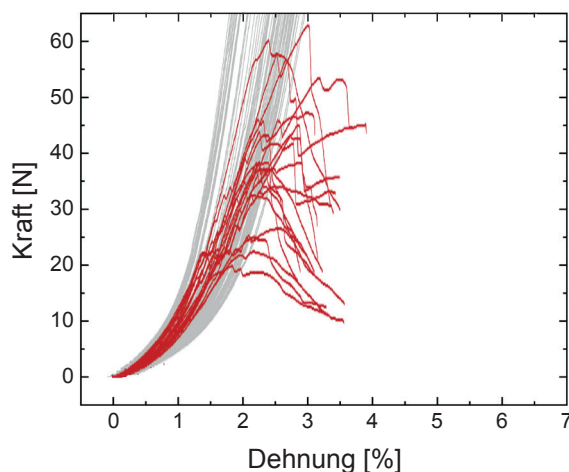


Abb. 8.35-36: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1).
SAS-Verklebungen mit Störleim + Weizenstärkekleister nativ (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und Gewebekreuzproben in Grau).

Bei Betrachtung der SAS+B-Verklebungen mit Störleim-Weizenstärkekleister vermochte die technische Dehnung nicht ansatzweise abzubilden, dass bereits ab ca. 10 N eine massive Dehnungszunahme durch einsetzende Öffnung der SAS-Verklebungen erfolgte (vgl. Abb. 8.37-38). Anhand der uniaxialen Kurven ließ sich vielmehr ein mit dem Klebstoff Lineco vergleichbares Verhalten der SAS+B-Verklebung vermuten (vgl. Abb. 8.27 und 8.37). Während mit Lineco die gesteigerte Verklebungsfestigkeit jedoch auch mit einer deutlichen Versteifung und Aufdehnung der SAS-Verklebung erst bei erhöhter Kraft einherging, bewirkten die Fadenbrücken bei Störleim-Weizenstärkekleister kaum eine Festigkeitssteigerung der SAS-Verklebungen, sodass deutlich vor Erreichen der F_{\max} und $\varepsilon\text{-}F_{\max}$ nur noch die Brücken trugen.

Uniaxial (dL/L0)



Biaxial (DIC)

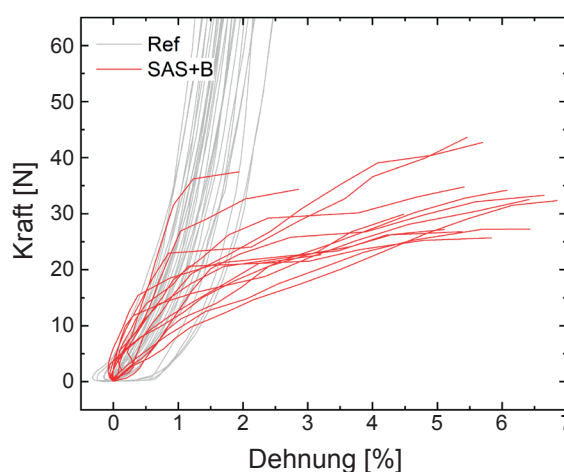


Abb. 8.37-38: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1).
SAS+B-Verklebungen mit Störleim + Weizenstärkekleister nativ (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und -kreuzproben in Grau).

Erst mit DIC-Auswertung zeigte sich für Ü-Verklebungen mit Störleim-Weizenstärkekleister deutlich das bereits ab ca. 5 N einsetzende Versagen (vgl. Abb. 8.39-40); die Klebefugen reagierten sehr empfindlich auf Scherbelastung. Zwar öffneten sich die einzelnen Verklebungen abrupt, jedoch nicht alle gleichzeitig, sodass Dehnungssprünge in der DIC-Auswertung auftraten. Diese sind daher nicht als sich aufdehnende Klebefugen zu interpretieren, sondern durch Längenzunahmen aufgrund einzelner getrennter Fadenenden im Auswertungsbereich begründet.

Bei Vergleich mit Lineco wurde deutlich, dass die EVA-Dispersion es weitaus besser vermag, unter Scherbelastung der Klebefuge Kräfte zu übertragen (vgl. Abb. 8.30 und 8.40).

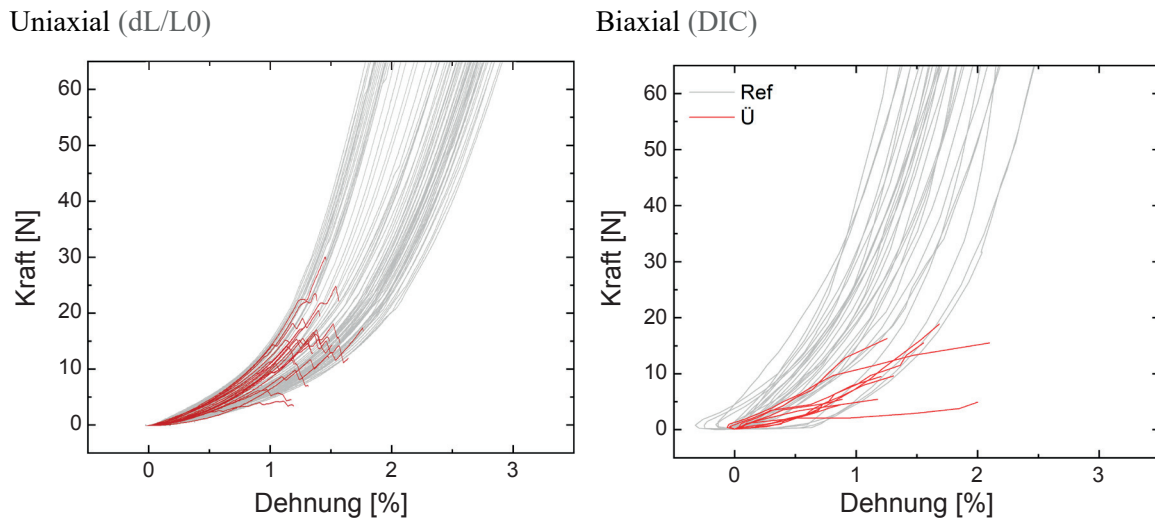


Abb. 8.39-40: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1).
 Ü-Verklebungen mit **Störleim + Weizenstärkekleister nativ** (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und -kreuzproben in Grau).

In Ü+V-Verklebungen mit Störleim-Weizenstärkekleister stellten sich deutlich besser vergleichbare Kurvenverläufe dar (vgl. Abb. 8.41-42). Auch hier zeigten sich Dehnungssprünge in der DIC-Auswertung durch einzelne sich öffnende Fadenverklebungen. Die Dehnungsentwicklung war stark unterschiedlich zur EVA-Dispersion Lineco in Ü+V-Technik, bei der bereits ab ca. 10 N die beginnende Aufdehnung der Klebefugen nachvollziehbar war, während sich mit Störleim-Weizenstärkekleister vorteilhaft erst ab ca. 30-40 N Unterschiede zur intakten Referenz darstellten (vgl. Abb. 8.32 und 8.42).

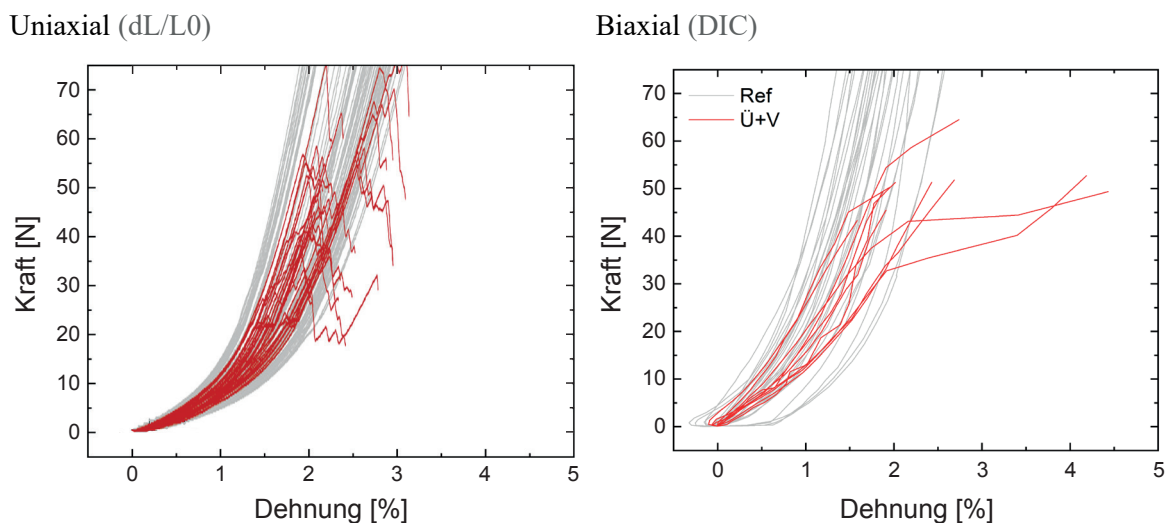


Abb. 8.41-42: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1).
 Ü+V-Verklebungen mit **Störleim + Weizenstärkekleister nativ** (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und -kreuzproben in Grau).

Klebstoff: Störleim + Cellulosefasern

Mit dem Störleim-Cellulosefaser-Klebstoff in SAS-Technik erscheinen die Diagramme auf den ersten Blick vergleichbar, da auch hier im Falle der wenig dehnbaren Klebefugen die DIC-Auswertung deutlich das Gewebeverhalten abbildete (vgl. 8.43-44). Bei Vergleich mit den SAS-Verklebungen der EVA- und PVAc-Dispersion stellte sich anhand der DIC-Auswertungen deutlich dar, dass einzig die Störleim-Arbocel-Mischung vergleichsweise hohe Verklebungsfestigkeiten bei gleichzeitig keiner signifikanten Aufdehnung der Klebefugen ermöglichte (vgl. Abb. 8.26, 8.34 und 8.44). Vor diesem Hintergrund kann für diesen Klebstoff daher auch eine hohe Formstabilität unter Dauerbelastung angenommen werden.

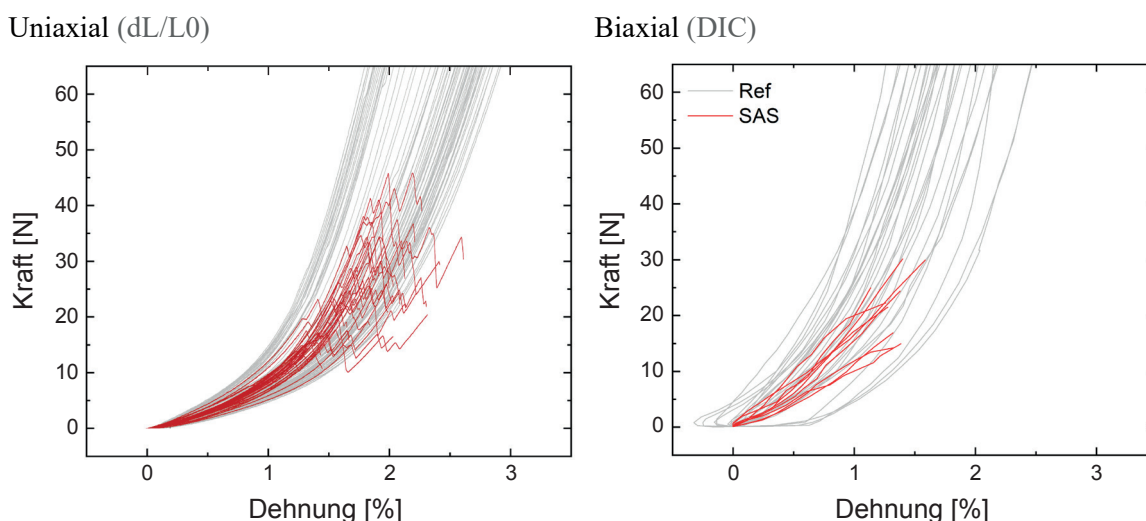


Abb. 8.43-44: K-D-Diagramme zur uni- und biaxialen Zugprüfung (vgl. A.1.1 und A.2.1).
SAS-Verklebungen mit **Störleim + Arbocel BW 40** (im Vergleich zur intakten Referenz der Gewebestreifen und -kreuzproben in Grau).

Die vergleichenden Betrachtungen zeigen deutlich die unzureichende Verklebungsscharakterisierung anhand der technischen Dehnung, speziell im Falle sich aufdehnender Klebefugen. Ein Vergleich des Dehnverhaltens unterschiedlicher Verklebungen ist somit nicht sinnvoll möglich (vgl. Kap. 7.2.1).

Durch lokale Dehnungsauswertung via DIC lassen sich die Verklebungseigenschaften gezielt auswerten. Für die Klebstoffauswahl finden sich die unter Kap. 8.1.1 aufgeführten vorläufigen Empfehlungen bestätigt. Bei uniaxialer Prüfung unter Auswertung der technischen Dehnung ist daher auch das beobachtete Bruchverhalten der Verklebungen wesentlich. Auch alle DIC-Auswertungen fanden jedoch lediglich an unbeschichteten Geweben im Kurzzeitversuch statt, sodass nochmals explizit auf das abweichende Verhalten beschichteter Strukturen unter Langzeitbelastung hingewiesen werden soll (vgl. Kap. 8.2).

8.1.3 Uniaxiale Gewebestreifen / beschichtet

Im Zuge der uniaxialen Zugprüfung SAS-verklebter Gewebestreifen mit Beschichtung stellten sich sowohl erhöhte, als auch reduzierte F_{max} dar. Zwar ist die Benetzung der vollständigen Fadenquerschnitte bei Verklebung durch die aufliegende Beschichtung merklich erschwert, vermutlich kommt es neben den Einzelfäden des Gewebes jedoch mitunter auch unweigerlich zu einer gewissen Verklebung der Beschichtung, sodass beide Tendenzen begründet erscheinen (vgl. Abb. 8.45). [Anm. 25]

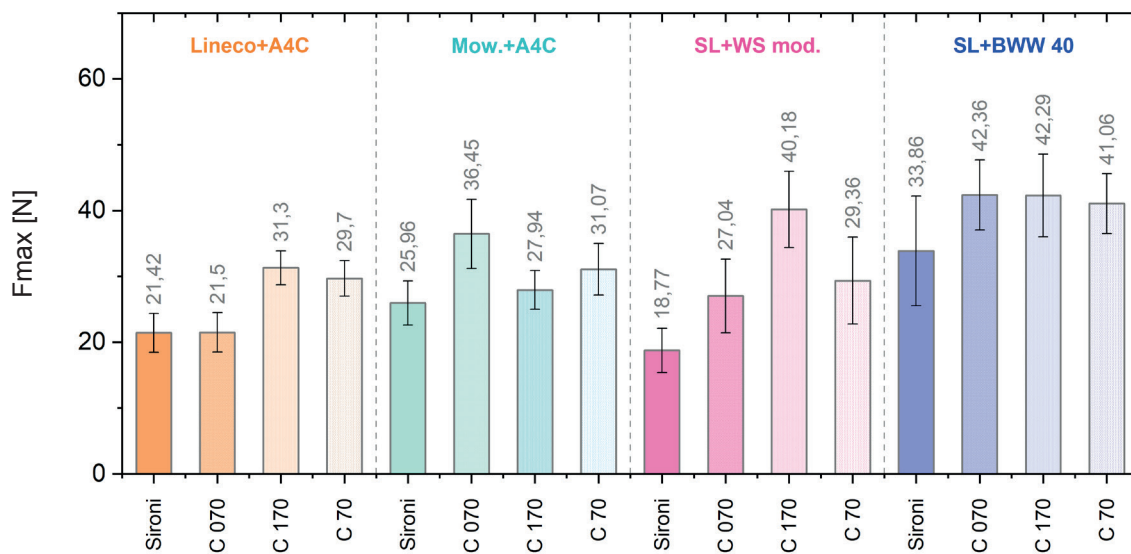


Abb. 8.45: Mittlere Höchstzugkraft (F_{max}) verschiedener Klebstoffe in SAS-Verklebungstechnik. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen der unbeschichteten Typen 1. *Sironi* und 2. *Claessens 070* im Vergleich mit den beschichteten Varianten 3. *Claessens 170* (Acrylgrundierung) und 4. *Claessens 70* (Ölgrundierung). Für nähere Details siehe A.1.3.

Auffällig ist die oftmals gesteigerte F_{max} bei Prüfung der SAS-Verklebungen im unbeschichteten Testgewebe 2. *Claessens 070* statt dem bisherigen unbeschichteten „Standard-Testgewebe“ 1. *Sironi*. Das Gewebe 2. *C 070* weist einen leicht erhöhten Fadendurchmesser auf, sodass erhöhte Verklebungsfestigkeiten bei vergrößerter Verklebungsfläche nachvollziehbar sind (vgl. C.1.1 und C.1.2).

Unerwartet hoch fiel trotz dessen die mittlere F_{max} der SAS-Verklebungen im Gewebe 2. *C 070* mit Mowilith DHS S1 + Methocel A4C aus. Auch die mittlere F_{max} der SAS-Verklebung im beschichteten Gewebe 3. *C 170* mit Störleim + Weizenstärkekleister (modifiziert) erscheint extrem hoch, wobei sich die Verklebungsfestigkeiten in allen vier Testge-

weben als unerwartet gesteigert darstellen [Anm. 26]. Diese Tendenzen wären nochmals gezielt zu überprüfen und sind ggf. streuungsbedingt nicht repräsentativ (vgl. Kap. 7.1).

Die Tendenzen fielen somit recht uneinheitlich aus und bedürfen der weiteren Überprüfung. Vorläufig erscheinen die F_{\max} bei Verklebung beschichteter Gewebe im Falle der betrachteten Klebstoffe leicht herabgesetzt oder gesteigert.

Die VK der F_{\max} stellten sich an SAS-Verklebungen der beschichteten Varianten des Testgewebes 2. C 070 oftmals als reduziert dar. Bei Vergleich mit den VK der F_{\max} der intakten Referenzproben wird zudem deutlich, dass sich die VK der F_{\max} von SAS-Verklebungen in den beschichteten Geweben teils deutlich den Streuungen des Gewebesubstrats annähern (vgl. Abb. 8.46).

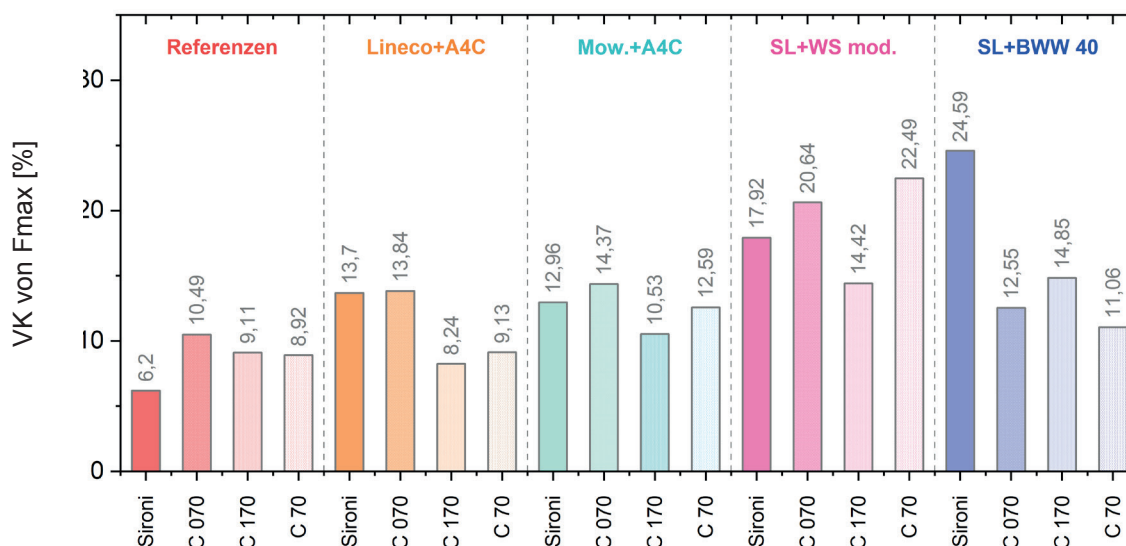


Abb. 8.46: Variationskoeffizienten (VK) der Höchstzugkräfte (F_{\max}) verschiedener Klebstoffe in SAS-Verklebungstechnik. Ergebnisse der uniaxialen Zugprüfungen an Gewebestreifen der unbeschichteten Typen 1. *Sironi* und 2. *Claessens 070* im Vergleich mit den beschichteten Varianten 3. *Claessens 170* (Acrylgrundierung) und 4. *Claessens 70* (Ölgrundierung). Für nähere Details siehe A.1.3.

Möglicherweise hängen die reduzierten Streuungen der Verklebungsfestigkeiten bei Prüfung in beschichteten Geweben explizit (auch) mit der ausgleichenden Beschichtung zusammen, welche die lokalen Steifigkeitsunterschiede der Gewebestruktur homogenisiert und so eine „gleichzeitigere“ Belastung der Klebungen erzielt (vgl. Kap. 7.1 und 7.2.2). Tendenziell zeigen sich die Streuungen der Klebstofftypen wieder ähnlich verteilt, sodass die Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung die größten Streubereiche aufweist (vgl. Abb. 8.06 und 8.46). [Anm. 27]

8.2 Beständigkeit im Langzeitversuch

Abschließend werden die Ergebnisse der biaxialen Dauerstandversuche an Verklebungen im Testgewebe Typ 3. *Claessens 170* mit Acrylbeschichtung vorgestellt (vgl. A.3). Zur Auswertung werden die via DIC ermittelten Dehnungsentwicklungen diskutiert.

Alle präsentierten Ergebnisse können aufgrund der geringen Stichprobengrößen (vgl. Kap. 7.1) sowie des noch optimierungsbedürftigen Versuchsaufbaus (vgl. Kap. 7.4) lediglich als erste Tendenzen verstanden werden.

8.2.1 Biaxiale Gewebeflächen / beschichtet

Anhand der Vorversuche ließ sich für das Testgewebe 3. *Claessens 170* ein sehr ähnliches Gewebeverhalten in Schuss- und Kettfadenrichtung nachweisen, vermutlich aufgrund der anisotropie-ausgleichenden Beschichtung sowie möglicher weiterer Schritte der strukturellen Gewebepreparation im Zuge der industriellen Beschichtung (vgl. Kap. 7.2.2, A.1.3 und A.2.3). Für den äquibiaxialen Langzeitaufbau konnte daher mit einer ähnlichen Dehnungsentwicklung in beiden Gewebeachsen gerechnet werden, welche sich grundsätzlich bestätigt fand (vgl. A.3). [Anm. 28]

Aus den gewählten Zielspannungen von ca. 130 N/m, ca. 165 N/m und ca. 200 N/m ergaben sich (unter Annahme der homogenen Spannungsverteilung durch den Innenrahmen sowie vergleichbarer Streckung aller Bereiche) lediglich theoretische Dauerbelastungen < 3 N für die Verklebungsbreite von 13 Einzelfäden im Schussfadensystem (vgl. Kap. 5.3.1). Damit wurden die zuvor in den Kurzzeitversuchen ermittelten F_{\max} der ausgewählten Klebstoffe in SAS- und SAS+B-Technik (12 Einzelfäden Breite) nicht annähernd erreicht, sodass eine gewisse Verklebungsbeständigkeit angenommen werden konnte [Anm. 29]. Auch diese Annahme schien zutreffend; so konnten keine Verklebungsbrüche oder -öffnungen bei makro- oder mikroskopischer Untersuchung der Klebestellen festgestellt werden (vgl. Abb. 8.47). Es stellten sich jedoch trotz vergleichsweise geringer Dauerbelastung deutliche Unterschiede in der Dehnungsentwicklung je nach Klebstoff und Verklebungstechnik dar. [Anm. 30]

Des Weiteren konnte eine abweichende Dehnungsentwicklung und deutliche Öffnung des Schnittbereichs für die einzelne unverklebte Referenz dokumentiert werden (vgl. Abb. 8.49).

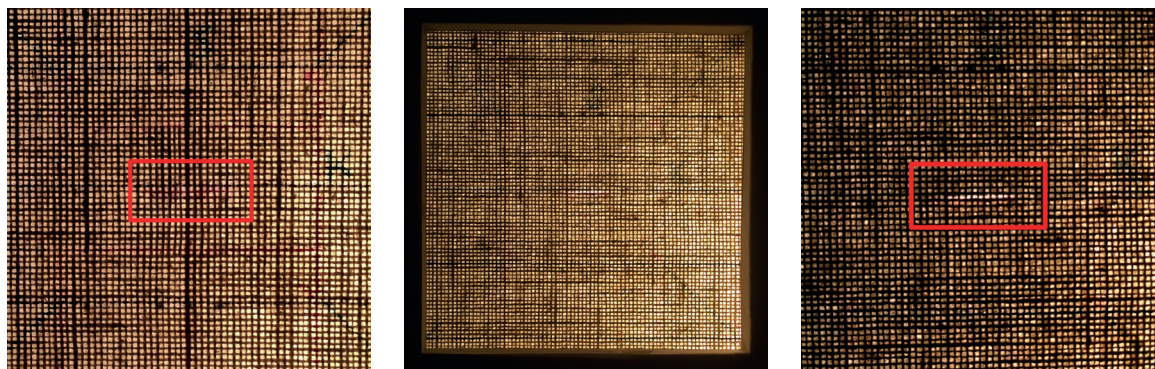
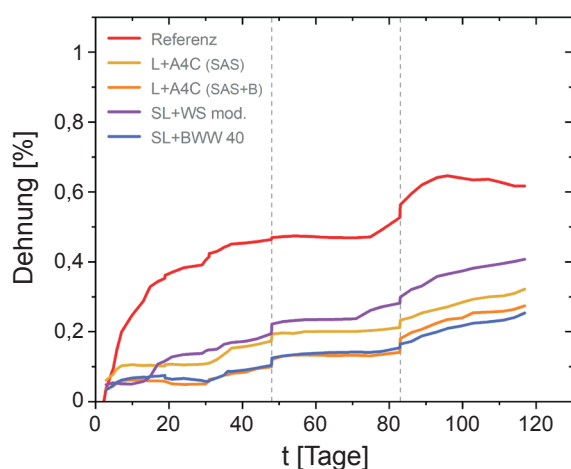


Abb. 8.47-48: Ganz links eine exemplarische Nahaufnahme einer unverändert intakten SAS-Verklebung mit Lineco + Methocel A4C sowie mittig die unverklebte Referenz in Gesamtansicht, jeweils nach ca. 120 Tagen Dauerbelastung bei Durchlichtbe-
trachtung zur Verklebungs- und Schnittkontrolle.

Abb. 8.49: Rechts in der Nahaufnahme zeigt sich nochmals deutlicher die im Durchlicht bereits makroskopisch erkennbare Öffnung des unverklebten Schnitts.

Alle verklebten Proben wiesen in Schussrichtung eine deutliche geringere Dehnungszunahme als die unverklebte Referenz mit Schnitt auf (vgl. Abb. 8.50-51). [Anm. 31]

Gesamtbereich



Schnittbereich / Klebestelle

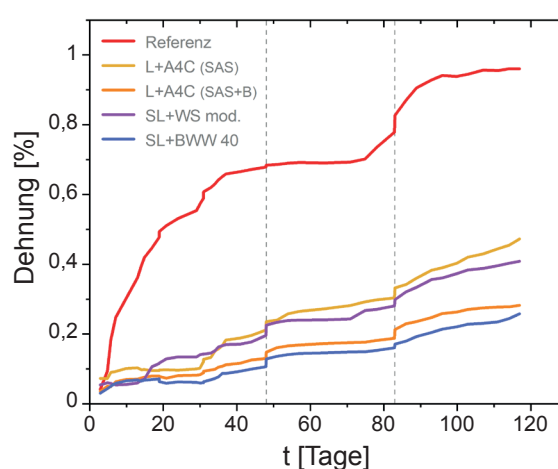


Abb. 8.50-51: D-Z-Diagramme zum biaxialen Dauerstandversuch, Auswertung der Dehnung in Schussrichtung für den dokumentierten Gesamtbereich sowie den un-/verklebten Schnitt (vgl. A.3). Vergleich von SAS-Verklebungen unterschiedlicher Klebstoffe sowie exemplarisch zusätzlicher SAS+B-Verklebungen des Serienversuchs im Wechselgestell (jeweils Darstellung der gemittelten Kurven mit leichter Glättung). Theoretische Spannung im zeitlichen Versuchsverlauf: Tag 3-48 ca. 130 N/m, Tag 48-83 ca. 165 N/m sowie Tag 83-117 ca. 200 N/m.

Die Probe mit unverklebtem Schnitt zeigte zudem eine stark abweichende Dehnungsentwicklung bei vergleichender Betrachtung des Gesamtbereichs und des lokalen Schnittbereichs. Im Schnittbereich stellten sich nochmals deutlich erhöhte Dehnungen während des

Auswertungszeitraums dar, wenngleich die zunehmende Schnittöffnung die Gesamtdehnungen maßgeblich beeinflusste. So wiesen alle verklebten Proben deutlich reduzierte Dehnungen sowohl bei gesamter, als auch lokaler Auswertung auf. Auch an den verklebten Proben stellten sich lokal erhöhte Dehnungen im Verklebungsbereich dar, diese fielen jedoch im Vergleich mit den Gesamtbereichen der Gewebe deutlich geringer erhöht als an der unverklebten Referenz aus. [Anm. 32]

Während die mit Störleim (SL) + Arbocel BWW 40 Cellulosefaser SAS-verklebten Proben insgesamt die geringste Dehnungsentwicklung verzeichneten, ließen sich bei SAS-Verklebung mit der EVA-Dispersion Lineco (L) + Methocel A4C-Zusatz sowie Störleim (SL) + Weizenstärkekleister (WS) etwas höhere Dehnungswerte dokumentieren. Dabei zeigten die mit SL + WS verklebten Proben die größten Gesamtdehnungen, während bei lokaler Verklebungsauswertung bei L + A4C erwartbar höhere Dehnungen ausgewertet wurden. Durch zusätzliche Applikation von Fadenbrücken stellten sich in SAS+B-Verklebung deutlich reduzierte Dehnungen ähnlich der mit SL + BWW 40 SAS-verklebten Proben mit L + A4C dar (vgl. Abb. 8.52-53).

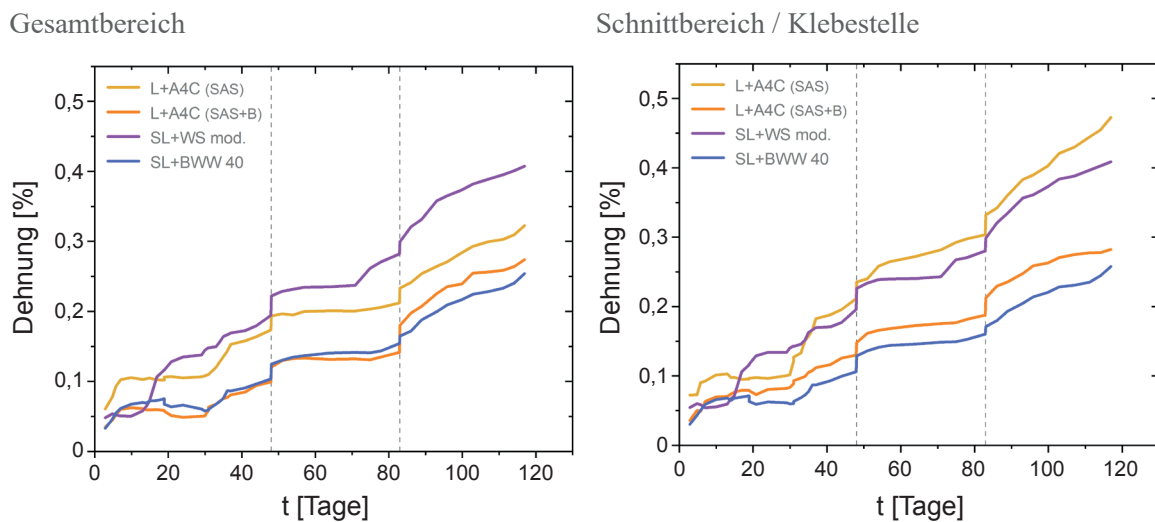


Abb. 8.52-53: D-Z-Diagramme zum biaxialen Dauerstandversuch, Auswertung der Dehnung in Schussrichtung für den dokumentierten Gesamtbereich sowie den verklebten Schnitt (vgl. A.3). Vergleich von SAS-Verklebungen unterschiedlicher Klebstoffe sowie exemplarisch zusätzlicher SAS+B-Verklebungen des Serienversuchs im Wechselgestell (jeweils Darstellung der gemittelten Kurven mit leichter Glättung). Theoretische Spannung im zeitlichen Versuchsverlauf: Tag 3-48 ca. 130 N/m, Tag 48-83 ca. 165 N/m sowie Tag 83-117 ca. 200 N/m.

Die im Gesamtvergleich erhöhte Dehnungsentwicklung der mit SL + WS verklebten Proben im lokalen Bereich der SAS-Verklebung, ohne erkennbares Klebungsversagen, erscheint anhand der uni- und biaxialen Kurzzeitversuche nicht unmittelbar nachvollziehbar. Da sich an diesen Proben auch die höchste Dehnung des Gesamtbereichs darstellte, könnten die Ergebnisse möglicherweise durch insgesamt etwas dehnbarere Gewebevoraussetzungen beeinflusst worden sein. Dies wäre im Rahmen ohnehin erforderlicher Validierungsversuche zu überprüfen [Anm. 33]. Gleichzeitig zeigten vorbereitende biaxiale Kurzzeit-Zugversuche an Verklebungen im selben beschichteten Gewebe 3. Claessens 170, dass sich das beginnende Klebungsversagen auf Grund der formerhaltenden Beschichtung ggf. erst deutlich verzögert erkennen lässt (vgl. A.2.3 und Kap. 7.3.2). So könnten doch bereits (noch) nicht sichtbare Schädigungen der spröderen SAS-Verklebungen mit SL + WS vorliegen, welche somit keine ununterbrochene Kraftübertragung mehr gewährleisten und daher erhöhte Dehnungen begründen.

Da bislang gemittelte Kurven betrachtet wurden, muss zudem darauf hingewiesen werden, dass sich an den betrachteten Proben auch innerhalb der betrachteten Klebstoffe und Verklebungstechniken uneinheitliche Dehnungsentwicklungen darstellten (vgl. Abb. 8.54).

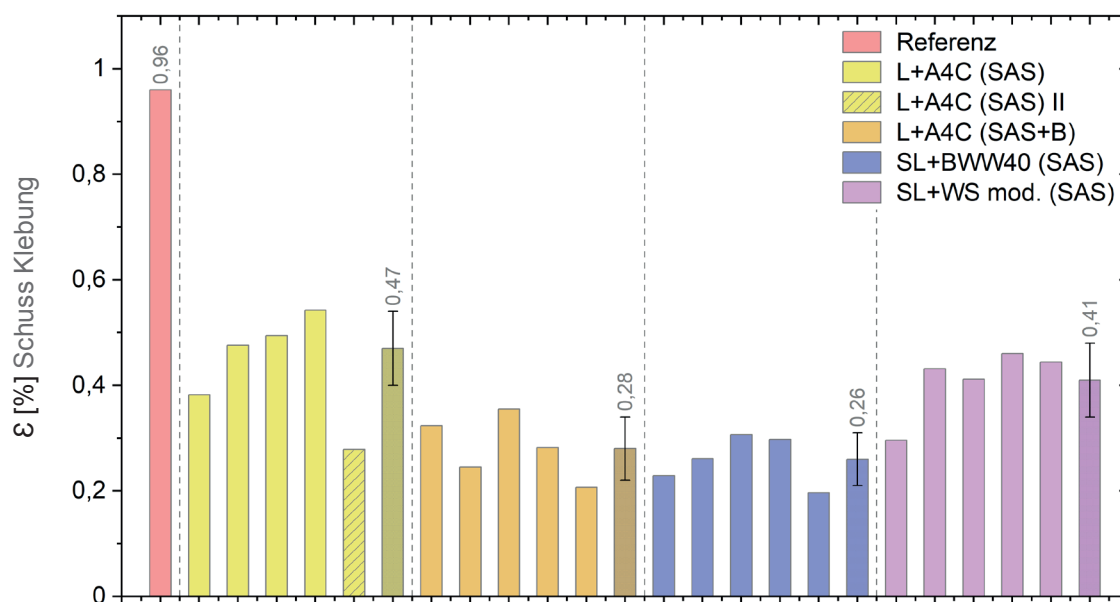


Abb. 8.54: Lokale Dehnungen der Einzelproben im Schnitt- bzw. Verklebungsbereich zum Ende der Versuchsbeobachtung nach 117 Tagen (Schussrichtung). Für die Verklebungen sind auch die Mittelwerte der Einzelproben dargestellt. Bei L+A4C erfolgte die Bildung des Mittelwerts ohne den Typ II des konstanten Idealaufbaus aufgrund der abweichenden Versuchsvoraussetzungen (vgl. B.5 und A.3).

Bei Vergleich der lokalen Dehnungsauswertungen zum Ende der Versuchsbeobachtung zeigt sich deutlich, dass im Falle des unverklebten Schnitts die höchste Dehnung auftrat (ca. 1 %). Weniger als die Hälfte zeigte sich an den SAS-Verklebungen mit Lineco + Methocel A4C (ca. 0,5 %) sowie mit Störleim + Weizenstärkekleister (ca. 0,4 %). Durch zusätzliche Applikation von Fadenbrücken (vgl. Abb. 8.55-56) stellten sich mit Lineco + Methocel A4C durchschnittlich sehr ähnliche Dehnungen wie in einfacher SAS-Verklebungstechnik mit Störleim + Arbocel BWB 40 dar (ca. 0,3 %). [Anm. 34]

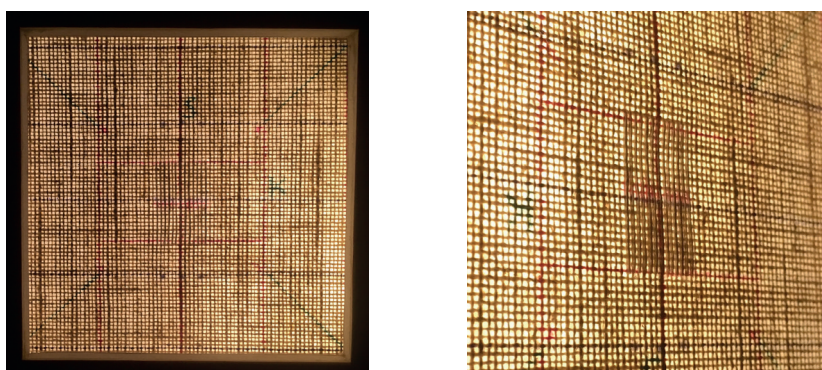


Abb. 8.55-56: Exemplarische SAS+B-Verklebung mit Lineco+A4C (SAS) und Beva 371 (B), links in Gesamtansicht und rechts im Detail bei Durchlichtbetrachtung zur Verklebungskontrolle nach ca. 120 Tagen Dauerbelastung. Die Brücken erscheinen im Durchlicht als annähernd unsichtbar und weisen keinerlei abgelöste Fadenenden o.ä. auf, sie werden erst in bestimmten Betrachtungswinkeln deutlich.

Diese ersten Langzeitbetrachtungen verdeutlichen so zum einen die Effizienz von Einzelfadenverklebungen in der Sicherung von Schadstellen in zugbelasteten Gemälden, zum anderen bestätigten sich die unter Kap. 8.1.1 und 8.1.2 festgehaltenen Klebstoffeinschätzungen: Die Verklebungen mit der EVA-Dispersion Lineco wiesen trotz MC-Modifikation die höchsten Dehnungen unter allen betrachteten Klebstoffen in SAS-Technik im Serienversuch auf. Im Falle von Störleim-Weizenstärkekleister muss ein beginnendes Klebungsversagen des für diese Verklebungstechnik wenig geeigneten Klebstoffs befürchtet werden. Durch Fadenbrücken lässt sich die Verklebung mit Lineco zusätzlich sichern und die Dehnungszunahme der Klebung unter Belastung reduzieren. Bei entsprechend belastbaren Bildträger Voraussetzungen oder unter hoher Last ist jedoch die SAS-Verklebung mit Störleim-Cellulosefaser-Mischung zu bevorzugen, da diese auch ohne Fadenbrücken die geringste Deformationsneigung aufweist.

Anhand der initialen Versuche wurde noch nicht deutlich, inwiefern bei andauernder Belastung ggf. auch nachteilige Verklebungsentwicklungen durch Kriechen auftreten. [Anm. 35]

Wiederherstellung der Gesamtstruktur

Für die kurz- und langfristige Belastbarkeit von Einzelfadenverklebungen sei zudem abschließend auf die erforderliche Gewährleistung der Kraftübertragung in möglichst allen Schichten der ursprünglichen Gemäldestruktur hingewiesen.

Bereits an intakten Geweben von Gemälden formen sich durch das Craquelé der Malerschicht mitunter Schwachstellen aus, da dort durch die Unterbrechung der Beschichtung eine erhöhte Belastung des textilen Bildträgers vorliegt (vgl. Kap. 3.3.3).⁵

Erst durch die materialgerechte Verklebung, Kittung und/oder Retusche, d.h. die Rekonstruktion der auf der Einzelfadenverklebung aufliegenden Beschichtung im Sinne der Parallelschaltung, lässt sich daher die lokale Überlastung des textilen Bildträgers im Vergleich zur nebenliegend intakt beschichteten Gemäldestruktur verhindern (vgl. Abb. 8.57).

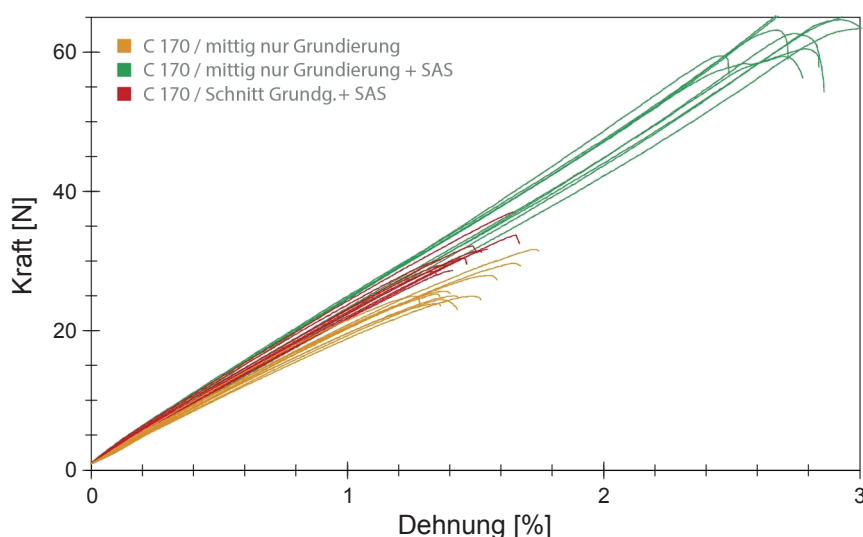


Abb. 8.57: Kraft-Dehnungs-Diagramm zur uniaxialen Zugprüfung an Gewebestreifen des Typs 3. *Claessens 170* (12 Fäden Breite) in Schussrichtung:
Die orangenen Kurven zeigen die Höchstzugkraft der alleinigen Acrylgrundierung (mittlere F_{max} ca. 26,3 N), nachdem im Vorfeld alle tragenden Schussfäden lokal zertrennt wurden (vgl. B.2.5 / Abb. 12).
Die roten Kurven zeigen die übliche SAS-Verklebung am einfach vollständig durchtrennten Streifen (F_{max} ca. 31,3 N), während die grünen Kurven die SAS-verklebten Proben ohne zuvor durchtrennte Grundierung darstellen (vgl. B.2.5 / Abb. 13-14); an diesen ist die mittlere F_{max} durch die durchgängige Parallelschaltung von Einzelfäden und Grundierung in der Kraftübertragung deutlich erhöht (ca. 65,1 N).

⁵ Vgl. MECKLENBURG, TUMOSA 1991 (b), S. 189.

Anmerkungen Kap. 8

[1] Es erfolgt die Auswertung anhand der Höchstzugkräfte statt der Kraft bei beginnendem Verklebungsversagen, da so eine sinnvolle Normierung des Bruchs zum Gesamtvergleich stattfindet. Das beginnende Verklebungsversagen ist mitunter nicht immer klar erkenn- und definierbar, zudem ergeben sich bei Auswertung dessen deutlich erhöhte Streuungen. Die Höchstzugkräfte bedeuten somit nicht zwangsläufig, dass sich zuvor nicht bereits erste Einzelfadenverklebungen der geprüften Gewebe geöffnet haben.

Die Höchstzugkraftdehnungen werden nur mit aufgeführt, sofern dies einen konkreten Mehrwert in der Auswertung darstellt; daher wird in der Regel bei den uniaxialen Versuchsreihen mit technischer Dehnungsermittlung auf die Darstellung verzichtet (vgl. Kap. 7.2 und 8.1.2). Alle ermittelten Werte werden jedoch im Anhang gleichermaßen aufgeführt. Des Weiteren sind dort mitunter zusätzliche Messkurvenauswertungen (Steigung, Kraft bei Dehnungsvorgabe u.a.) dokumentiert.

[2] Innerhalb der Diagramme werden die aufgeführten Zahlenwerte bis auf die zweite Nachkommastelle entsprechend der Messdaten des Anhangs angegeben. Für die Auswertung der Höchstzugkräfte und -dehnungen wird jedoch wie üblich auf die erste Nachkommastelle oder ganze Zahlen gerundet. Im Falle der Variationskoeffizienten erfolgt das Runden auf ganze Zahlenwerte.

[3] An dieser Stelle sei nochmals explizit darauf hingewiesen, dass im Zuge dieser ersten Validierungsversuche noch keine optimierte Applikation warm zu verarbeitender Störleim-Mischungen mit dem Consolidation Pen Winnie erfolgte. Durch Nutzung dieses Geräts zur erwärmten Klebstoffdosierung lassen sich für Störleim-Cellulosefaser-Klebstoffe homogenere Faserverteilungen in der Klebstoffmischung und somit reduzierte Streuungen der Verklebungsfestigkeiten erzielen (vgl. FLOCK et al. 2019; DEMUTH, FLOCK 2019). Ebenso sind homogenere Verklebungsqualitäten für die warm zu verarbeitenden Störleim-Weizenstärkekleister-Mischungen zu erwarten.

[4] Dies gilt auch für die zuvor genannten Versuche A.1.1, unabhängig von den verwendeten Klebstoffen zur SAS-Verklebung.

[5] Allgemein sollte die Schließung von Durchtrennungen im Gewebe immer durch Wiederherstellung der Gewebeebene und nicht durch ausschließliche Applikation von Fadenbrücken oder Flickern erfolgen (vgl. Kap. 4.1); die Prüfung von Fadenbrücken ohne Verklebungen erfolgte daher lediglich zum Vergleich und zwecks Differenzierung der Parameter (vgl. Kap. 5.1.3).

[6] Es wäre zu überprüfen, inwiefern sich Evacon-R ohne MC-Zusatz besser zur Fadenbrückenapplikation eignet (vgl. Kap. 6 / Anm. 15). Auch andere Acrylharzdispersionen mit vergleichsweise geringen Tg-Werten könnten eine weitere Alternative zu Beva 371 als Schmelzklebstoff darstellen.

[7] In den nachfolgenden uniaxialen Testreihen wurde zur Dosierung der warm verarbeiteten Klebstoffe der Consolidation Pen Winnie genutzt (vgl. DEMUTH, FLOCK 2019; FLOCK et al. 2019). Aufgrund der verbesserten Applikationsmethode sowie ggf. auch der leicht variierten Klebstoffdosierung und damit verbunden möglicherweise idealeren Benetzung (vgl. B.2) zeigen sich in der Regel gesteigerte Verklebungsfestigkeiten im Vergleich zu den ersten Validierungsversuchen.

[8] Es bleibt zu überprüfen, ob andere Gelatinetypen ggf. ähnlicher abschneiden (vgl. Kap. 6.1).

[9] Auf die Schwächung des potentiell klebstarken Glutinleims durch Zusatz von Weizenstärkekleister wies bereits HEIBER hin (vgl. HEIBER 2003, S. 41). Die höhere Festigkeit von Verklebungen mit reinem Störleim konnte auch bereits im Zuge erster Einzelfadenprüfungen dargestellt werden (vgl. FLOCK 2014, S. 74). Zudem lässt sich an Klebstofffilmen eine gestörte Filmbildung durch den Zusatz von Weizenstärkekleister nachvollziehen (FLOCK 2014, S. 213).

Vor diesem Hintergrund drängt sich die Frage auf, inwiefern Störleim-Weizenstärkekleister überhaupt als Klebstoffmischung bevorzugt werden sollte, auch wenn diese Mischung mitunter befriedigende Resultate in Ü+V-Verklebungstechnik erzielt. Materialgerechter erscheint es, den Störleim entweder so zu modifizieren, dass keine Materialschwächung erfolgt, oder auf andere Klebstoffe auszuweichen, welche das erforderliche Anforderungsprofil für die Einzelfadenverklebung direkt erfüllen.

[10] Es sollte daher darauf geachtet werden, dass bei Vorbereitung der Filme die Herstellung der Klebstoffmischung sowie ihrer beiden Komponenten frisch erfolgt und die getrockneten Klebstofffilme nur einmalig erneut in Lösung gebracht werden.

[11] Aufgrund der äußerst schlechten Verarbeitungseigenschaften und Verklebungsqualitäten wurden mit der Mischung 15% Störleim + Arbocel BWB 40 (GT 20:1) jedoch nur je fünf Proben in SAS- und Ü+V-Technik erfolgreich geprüft (vgl. A.1.5). Die erhöhten VK der F_{max} sind daher wohl auch auf die verringerte Probekörperanzahl zurückzuführen und würden bei $n = 10$ möglicherweise etwas geringer ausfallen.

[12] Erst durch weitere Prüfung von reinem Störleim als Klebstoff in Ü+V-Verklebung ließe sich eindeutig nachvollziehen, ob auch ohne zusätzlich zugesetzte Cellulosefasern Faserbrüche des Originalsubstrats auftreten. Es kann vermutet werden, dass dies ohne Zusatz von Weizenstärkekleister als schwächende Komponente der Fall ist (vgl. Anm. 9).

[13] Es wurden je $n = 10$ Stichproben betrachtet, insofern ist noch keine Abbildung des Streubereichs gewährleistet (vgl. Kap. 7.1); so zeigt sich auch bereits in der Wiederholung mit dem Typen BWB 40 ein erweiterter Streubereich im Vergleich zu den initialen Betrachtungen.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse scheinen sich jedoch ggf. eine besonders vorteilhafte Armierung bei Mischung der Arbocel-Typen B 800 + BC 600-30 sowie etwas reduzierte Streuungen mit der Mischung BWB 40 + B 800 darzustellen (vgl. FLOCK et al. 2019, S. 122 f.).

Zur Erzielung vergleichbarer Verklebungsqualitäten sollte die Klebstoffdosierung mittels Consolidation Pen Winnie erfolgen; andernfalls stellen sich mitunter geringere Verklebungsfestigkeiten sowie erhöhte Streuungen dar, wie auch im Vergleich zu den Ergebnissen A.1.1 zu sehen (vgl. FLOCK et al. 2019, S. 119 f.; DEMUTH, FLOCK 2019).

[14] Zu ähnlichem Ergebnis kam bereits GAASCH, der unterschiedliche Methyl- und Hydroxypropylmethylcellulosen betrachtete, jedoch den Typ A4M statt A4C. In vergleichbarem Versuchsaufbau (Orientierung an FLOCK 2014) erzielte GAASCH mit dem Typ A4M in 10 % Feststoffkonzentration eine mittlere F_{max} von ca. 51 N mit einem VK der F_{max} von ca. 14 % (vgl. GAASCH 2019, S. 48). Der Typ A4M zeigte die höchste mittlere F_{max} der betrachteten Celluloseether (vgl. GAASCH 2019, S. 42) und kann dahingehend ggf. auch dem Typ A4C vorgezogen werden.

GAASCH erwähnt zudem die optional zusätzliche Einarbeitung von Elementarfasern mehrerer Millimeter Länge zur Erhöhung der F_{max} bei Nutzung von Celluloseethern zur Ü+V-Verklebungen, welche jedoch bislang noch nicht in Geweben getestet wurde (vgl. GAASCH 2019, S. 44).

[15] Die vorbereitende Imprägnierung der Fadenenden mit gering konzentrierten Lösungen ($\leq 1\%$) Störleim oder MC wird häufig im Zuge der Vorbereitung der Gewebeschadstellen bei Sortierung zur anschließenden Verklebung vorgenommen, um die aufgefaserten Fadenenden übersichtlich zu bündeln (vgl. Kap. 2.2 / Anm. 4).

Im vorliegenden Falle der betrachteten SAS-Verklebungen stellte sich jedoch eine leicht verminderte F_{\max} durch Vorbehandlung dar; es bleibt daher zu prüfen, ob sich diese Tendenz allgemein bestätigen lässt. Vorläufig bleibt darauf hinzuweisen, dass zur verbesserten Penetration und Benetzung trotz Imprägnierung eine leichte Auffaserung der gebündelten Fadenenden im Zuge der Verklebung sowie eine gezielte Klebstoffverteilung mit den Sondenwerkzeugen stattfinden sollte.

[16] Die EVA-Dispersion Lineco weist einen Feststoffgehalt von ca. 50-54 % auf (vgl. FLOCK 2014, A.3.1/S. 205). In 9:1-Mischung (GT) mit Methocel A4C mit 5 % Feststoffgehalt ergibt sich somit ein Gesamtfeststoffgehalt der Mischung von mindestens 45,5 %; bei Methocel A4C mit 10% Feststoffgehalt in selben Anteilen nur eine unwesentliche Erhöhung auf mindestens 46 % Gesamtfeststoffgehalt bei deutlich erschwerter Erzielung einer homogenen Mischung. Die Mischung von Lineco und Methocel A4C mit 10 % Feststoffgehalt führt bei 1:1-Mischung (GT) hingegen zu einem im Vergleich deutlich reduzierten Gesamtfeststoffgehalt von ca. 30 %.

[17] Erste Betrachtungen erfolgten im Zuge der Versuche 2013: Während sich in der uniaxialen Zugprüfung verklebter Einzelfäden bei der EVA-Dispersion Evacon-R durch Cellulosefaserzusatz eine Zunahme der F_{\max} zeigte, waren die F_{\max} bei gleicher Modifikation von Lineco leicht vermindert (vgl. FLOCK 2014, S. 67, 70). Es wurde daher keine Empfehlung zur Cellulosefaser-Modifikation von Dispersionen gefolgert und stattdessen auf die weitere erforderliche Überprüfung verwiesen (vgl. FLOCK 2014, S. 76, 131).

[18] Diese Hypothese ist weiterführend zu überprüfen. Auch sollte die Modifikation mit Cellulosefaser-Zusatz ebenfalls für die Ü+V-Verklebungstechnik sowie auch für die PVAc-Dispersion Mowilith DHS S1 betrachtet werden. Da die zugesetzten Cellulosefasern wasserbindend und somit verdickend wirken, wäre zudem die Prüfung kürzerer Faserlängen mit geringerem Wasserbindevermögen speziell für die Anwendung in Ü+V-Technik naheliegend, um verbesserte Verarbeitungseigenschaften zu ermöglichen. Dahingehend sollte auch nochmals der MCC-Zusatz untersucht werden, da dieser sich kaum viskositätssteigernd auswirkt und so ggf. in anderer Verklebungstechnik doch vorzuziehen sein könnte.

[19] Aufgrund der vorgenommenen Einstellung der genutzten Software wurden die Kurvenverläufe bis zur automatisierten Brucherkennung aufgezeichnet. Als Bruchvorgabe wurde für alle vorgestellten uniaxialen Zugversuche ein Kraftabfall von 50 % der aufgezeichneten Höchstzugkraft (F_{\max}) hinterlegt. Daher dokumentieren diese dargestellten Kurven auch immer mindestens einen Teil des teils langsamer fortschreitenden Klebungsversagens nach Erreichen der F_{\max} .

Da die Einspannlänge 100 mm betrug, entspricht die technische Dehnung in Prozent annähernd der Wegänderung in mm (nur annähernd aufgrund der vorab aufgetragenen Vorkraft und dadurch bedingt minimal erhöhten Ausgangslänge vor eigentlichem Versuchs- und Auswertungsbeginn).

[20] Als typischer Kurvenverlauf zeigte sich an verklebten unbeschichteten Gewebestreifen zu meist ein „vertreppter“ Kraftabfall nach Höchstzugkraft durch sich nacheinander öffnende Einzelfadenverklebungen des Streifens. Seltener stellten sich auch erste öffnende Einzelfadenverklebungen als Zacken bereits vor Erreichen der Höchstzugkraft dar. Im Falle der Schmelzklebstoffe ist der dokumentierte Kraftabfall „weicher“ und weniger stark vertreppt, da auch das zunehmende Auf-

dehnen der Klebefugen statt der mit anderen Klebstoffen in der Regel abrupteren Klebungsöffnungen etwas abgebildet wird. Ähnlich präsentieren sich die Kurvenverläufe im Falle aufgebrachteter Fadenbrücken, da hier das zunehmende Abgleiten der Fadenbrücken festgehalten wird.

[21] Der Kurvenverlauf könnte darauf hindeuten, dass sich die Verklebung mit dem Typ 5350 möglicherweise etwas weicher und dehnbarer bei trotz dessen leicht erhöhter Zugfestigkeit verhält (vgl. Abb. 8.18). Der Typ 5065 ist nicht mehr erhältlich und wurde durch Lascaux 5350 ersetzt. Vermutlich findet sich das Vorgängerprodukt jedoch noch in zahlreichen Restaurierungsateliers und wurde daher ebenfalls berücksichtigt. Möglicherweise erweisen sich Verklebungen mit dem alten Typ 5065 als etwas formbeständiger unter Dauerbelastung. Dies wäre gezielt zu überprüfen.

[22] Gleichsam könnte sich auch die Modifikation der PA mit Cellulosefasern anbieten. Hierzu sind Nachfolgeuntersuchungen notwendig.

[23] Siehe auch Kap. 6.3.3. Die sehr niedrige Viskosität bedingte ein starkes Abdriften des Klebstoffs in die Längen der Fadenenden, sodass kaum Klebstoff in der Fuge selbst verblieb. HEIBER sprach in vergleichbarem Kontext auch von „verhungerten“ Klebefugen (vgl. HEIBER 1996, S. 133).

[24] Dazu wurde eine Formatanpassung der Kraft-Dehnungs-Diagramme der uniaxialen Zugprüfungen (vgl. A.1.1) vorgenommen. Diese weisen aufgrund der automatisierten Erstellung in der Zwick-Prüfsoftware TestXpert ein leicht abweichendes Layout zu den Diagrammen der biaxialen Versuche auf, welche manuell mit der Software Origin Pro erstellt wurden (vgl. A.2.1).

Während in der uniaxialen Zugprüfung zudem die Aufzeichnung bis zur Brucherkennung verfolgt wurde (vgl. Anm. 19), ließ sich für die biaxialen Zugprüfungen keine Visualisierung des weiteren Probenversagens nach Erreichen der Höchstzugkraft (F_{max}) umsetzen, da mit der deutlichen Verklebungsöffnung das Probenmuster für die weitere Auswertung via DIC zu nachhaltig gestört ist (vgl. Kap. 5.2 / Abb. 5.24-29).

[25] Für den direkten Vergleich wurden auch das bisher betrachtete unbeschichtete „Standard-Testgewebe“ Typ 1. *Sironi* sowie das unbeschichtete Gewebe Typ 2. *Claessens 070* neben dessen beschichteten Varianten betrachtet. Die SAS-Verklebungen wurden auch am Gewebe 1. *Sironi* wiederholt, da im Zuge dieser Testreihen eine erhöhte Vorkraft sowie eine leicht abweichende Klebstoffdosierung gewählt wurden. Von besonderer Relevanz ist zudem die im Unterschied zu den Testreihen A.1.1 erfolgte Nutzung des Consolidation Pen Winnie für die Dosierung der glutinleimbasierten Klebstoffe (vgl. A.1.3 und B.2).

[26] Für die Klebstoffdosierung wurde der Consolidation Pen Winnie genutzt (vgl. Anm. 7); es ist jedoch unwahrscheinlich, dass dies allein die hier maßgebliche Festigkeitssteigerung in diesem Einzelfall begründet.

[27] Im Gesamtvergleich dieser Testreihe deutlich erhöht erscheint lediglich der VK der F_{max} von SAS-Verklebungen im Testgewebe Typ 1. *Sironi* mit Störleim + Arbocel BWW 40. Hier wäre zu überprüfen, inwiefern sich dieser Trend im Zuge von Validierungsversuchen bestätigt oder ob insbesondere auch die Verklebungen in den anderen drei Gewebetypen mit diesem Klebstoff prinzipiell einen erhöhten Streubereich aufweisen. Hierbei ist des Weiteren auffällig, dass sonst bei allen drei weiteren Klebstoffen die Verklebungen im Testgewebe 2. *C 070* einen leicht erhöhten VK der F_{max} im Vergleich mit dem Typ 1. *Sironi* zeigen. Dies lässt sich anschaulich anhand der unregelmäßigeren Faden- und Gewebestruktur nachvollziehen (vgl. C.1.1 und C.1.2).

[28] Es wurden sowohl annähernd deckungsgleiche sowie leicht erhöhte, als auch reduzierte Dehnungen im Vergleich zum orthogonalen Schussfadensystem verzeichnet (vgl. A.3). Hierbei ist zu bedenken, dass die lokale Verklebung des zertrennten Fadensystems lediglich in Schussrichtung vorgenommen wurde (vgl. B.2).

[29] Mischbetrachtungen parallel geprüfter intakter und verklebter Fäden ließen zudem vermuten, dass sich im Gewebeverbund lokal eingefügte Einzelfadenverklebungen durch günstigere Kraftumverteilungen als potentiell zugfester darstellen (vgl. Kap. 7.4.1, A.1.9 und A.2.2).

[30] Hierzu sei nochmals auf die zusätzliche Einflussnahme der Bewegung im Zuge der Fotodokumentation des Serienversuchs im Wechselgestell verwiesen (vgl. Kap. 7.4.2).

[31] Auf die weitere Darstellung der Proben wird an dieser Stelle verzichtet, da sich anhand der einfachen Bilddokumentation die Dehnungsentwicklungen nicht unmittelbar nachvollziehen lassen. Auch auf die Visualisierung der via DIC ausgewerteten Dehnungsentwicklung wird verzichtet (vgl. Kap. 5.2 / Abb. 5.24-29), da sich aufgrund der unsteten Probenentwicklung die Bildbereiche als sehr inhomogen darstellten und sich so kaum unmittelbar einfach visuell interpretierbare Bildfolgen der Dehnungsauswertung ergaben (vgl. Kap. 7.4).

[32] Auch bei Auswertung des orthogonalen Kettfadensystems ließen sich mitunter erhöhte Dehnungen bei insbesondere lokaler Dehnungsauswertung im Verklebungsbereich verzeichnen, obwohl dieses Fadensystem keine unmittelbare Zertrennung und Verklebung erfahren hat. Vermutlich hängt die trotz dessen verzeichnete Dehnungszunahme mit der Unterbrechung der Beschichtung zusammen, welche sich lokal auch auf das Kettfadensystem auswirkt (vgl. A.3).

[33] Ein erstes Indiz für unter Umständen abweichende Gewebevoraussetzungen stellte sich bei eingehender nachträglicher Untersuchung in Form eines leicht abweichenden Farbtons einzelner Gewebeproben dar. Darunter fielen die Referenzprobe sowie zwei mit Störleim + Weizenstärke-leister SAS-verklebte Proben. Dies könnte auch auf Eigenschaftsunterschiede trotz gleicher Lieferung und Probenzuschnitt mit Abstand zur Webkante (vgl. B.1) hindeuten.

[34] Da die Dehnungsauswertung erst ab Tag 3 mit dem vollständigen Gewicht für die erste gewählte Zielspannung von 130 N/m begann (vgl. B.5), bilden die genannten Dehnungswerte sowie aufgeführten Dehnungs-Zeit-Diagramme nicht ab, was zuvor bereits an Dehnung der Proben stattfand. Es ist daher von erhöhten Dehnungen auszugehen. Die Auswertung der ersten dokumentierten Versuchsbilder noch während der Lasterhöhung gestaltete sich aufgrund zu starker Veränderungen im Zuge der Probenausrichtung als nicht erfolgreich. Daher wurde der Kurvenbeginn auch nicht bei Null gesetzt. Die anfänglichen Ausrichtungen der Proben und damit verbundenen Bewegungen der Lager und Gesamtkonstruktion begründen zudem die oftmals insbesondere zu Anfang recht unruhigen Verläufe der Dehnungsauswertungen.

[35] Im Wesentlichen stellt sich die Frage nicht nur nach sich öffnenden Verklebungen, sondern insbesondere nach Dehnungszunahmen, die zu angrenzender Spannungserhöhung sowie lokalen Deformationen der verklebten Schadstellen außerhalb der Bildebene führen. Zur gezielten Überprüfung würde sich die Betrachtung vergrößerter Verklebungsbereiche sowie die zeitlich verlängerte Durchführung empfehlen.

9

Bewertung und Ausblick

Abschließend erfolgt die Bewertung der Ergebnisse sowie ein Ausblick auf anknüpfende Forschung. Als Basis dient die Zusammenfassung der Ergebnisse von mehr als 2400 ausgewerteten Probekörpern sowie der vergleichenden Betrachtung von 37 Klebstoffrezepturen.

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Entsprechend der unter Kap. 5 formulierten Ziele dieser Arbeit erfolgte die **Reproduktion vorausgegangener Versuchsreihen zur Validierung**. Im Zuge dessen wurde sich intensiv mit den auftretenden Messwertstreuungen beschäftigt. Es konnte dargestellt werden, dass die Streuungen von Einzelfadenverklebungen unter gewissen Voraussetzungen als material- und technikimmanent akzeptiert werden müssen. Daher empfiehlt sich die Prüfung hoher Stichprobengrößen sowie die Prüfung von Probekörpern mit einer möglichst hohen Anzahl verklebter Einzelfäden. Unter Gewährleistung der Vergleichbarkeit von Testreihen bietet sich die Erstellung von Gesamtstatistiken der Ergebnisse wiederholter Prüfungen an. Um die Streuungsbereiche treffend darzustellen zu können, erscheinen Validierungsversuche im Falle vergleichsweise geringer Probenanzahlen unerlässlich.

Des Weiteren wurde eine **Übertragung von Einzelfadenverklebungen in beschichtete Gewebe** zur Annäherung an den üblichen Gemäldeaufbau umgesetzt. Dabei stellten sich im Unterschied zur Prüfung von Verklebungen in unbeschichteten Geweben leicht abweichende Ergebnistendenzen in Form sowohl etwas erhöhter, als auch verringerter Verklebungsfestigkeiten dar. Des Weiteren erschienen die Streuungen leicht reduziert.

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde eine reduzierte Klebstoffauswahl ausführlicher im Zuge der konsekutiven Versuchsreihen betrachtet. Daneben erfolgte eine erste **Evaluierung weiterer potentiell geeigneter Klebstoffe** sowie die vergleichende Betrachtung anderer bereits eingesetzter Klebstofftypen. So konnten grundsätzliche Verhältnismäßigkeiten der Klebstoffe anhand der Verklebungsfestigkeiten und des Bruchverhaltens charakterisiert sowie vielversprechende neue Klebstoffoptionen benannt werden.

Zudem wurde die **Entwicklung eines Langzeitversuchsaufbaus zur Charakterisierung des Verklebungsverhaltens** unter dauerhafter Beanspruchung umgesetzt. Der neu entwickelte Prüfaufbau erlaubt eine deutliche Annäherung an den praktischen Belastungsfall im Gemälde und ist als Dauerstandversuch unter konstanter Last konzipiert. Der eingesetzte Zugrahmenaufbau sollte in einigen Aspekten eine weitere Optimierung erfahren, erlaubt jedoch bereits grundsätzlich die serielle Prüfung von Einzelfadenverklebungen unter Langzeitbelastung zum Vergleich von Klebstoffen, Verklebungstechniken und qualitativem Verklebungsverhalten.

Im Zuge der durchgeführten Versuchsreihen erfolgte ebenso die kritische **Überprüfung bisheriger Prüfparameter** zur Formulierung eines geeigneten Vorschlags zur zukünftigen Prüfsystematik. Hierbei wurden speziell Möglichkeiten zur Optimierung des einfachen uniaxialen Streifenzugversuchs als breit verfügbaren Standardprüfaufbaus diskutiert.

Dabei wurde allgemein auch die **Berücksichtigung möglicher Optionen zur Versuchserweiterung** vorgenommen.

Einen wesentlichen Schwerpunkt stellte zudem die **Umsetzung der transparenten Dokumentation** zur Erzielung von Nachvollziehbarkeit, Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit der vorgestellten Versuche dar. So wurde eine umfassende Anhangstruktur mit erarbeiteten Protokollformaten hinterlegt, welche auch die Möglichkeiten weiterführender Auswertungen bietet.

Entsprechend der durchgeführten Betrachtungen werden nachfolgend die wesentlichen Ergebnisse zu Prüfsystematik, Klebstoffauswahl und Verklebungstechnik zusammengetragen.

9.1.1 Prüfsystematik

Vergleichende Festigkeitsevaluierung (I)

Zur ersten vergleichenden Evaluierung von Klebstoffen und Techniken für die Einzelfadenverklebung bietet sich zunächst die einfache uniaxiale Zugprüfung von unbeschichteten Gewebestreifen im Kurzzeitversuch an. Die Verklebung der Proben sollte zur klaren Parameterdifferenzierung auf voller Breite durchgeführt werden. So kann eine initiale Vergleichsbetrachtung der adhäsiven Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Gewebesubstrat anhand der Verklebungsfestigkeiten und des Bruchverhaltens erfolgen.

Dabei sind technische Dehnungen und deren Messkurvenverläufe nur sehr eingeschränkt interpretierbar. Die bisher genutzten hohen Einspannlängen erlauben kaum Rückschlüsse auf das Deformationsverhalten der Klebestellen, da die technischen Dehnungen stark vom Gewebesubstrat dominiert sind. Unter Umständen ließen sich die Interpretationsmöglichkeiten durch die Prüfung in verkürzter Einspannlänge optimieren. Zur Charakterisierung der Belastungsgrenzen intakter Gewebe sollte hingegen die Prüfung in hinreichend hohen Einspannlängen erfolgen.

Bei Prüfung muss allgemein auf ausreichend hohe Vorkräfte zur standardisierten Ausrichtung der Gewebe geachtet werden, um vergleichbare Prüfabläufe zu erzielen. Des Weiteren erscheint eine geringere als bisher genutzte Zuggeschwindigkeit ratsam, um das Klebverhalten besser abbilden zu können.

Die uniaxialen Kurzzeitversuche lassen sich in optionalen Schritten einfach erweitern, bspw. um die Prüfung von Verklebungen in beschichteten Geweben oder der Prüfung bei Extremklimata. Dabei ist die limitierte Übertragbarkeit von Ergebnissen auf biaxial langzeitbelastete Gemäldestrukturen zu bedenken.

Vorschlag zur uniaxialen Zugprüfung

Probekörper:	Gewebestreifen Pattina L 13 T. E. Sironi, unbeschichtet
Verklebung:	Schusssystem, ≥ 12 Fäden, volle Streifenbreite
Einspannlänge:	12,5 mm (kurz) 100 mm (bisheriger Standard)
Vorkraft:	1 N mit 5 mm/min
Prüfgeschwindigkeit:	5 mm/min (langsam) 20 mm/min (bisheriger Standard)
Stichprobengröße:	≥ 10 je Konfiguration

Charakterisierung des Deformationsverhaltens (II)

Um weitergehend auch das Deformationsverhalten von Verklebungen gezielt evaluieren und deren Dehnungen quantifizieren zu können, bietet sich die Nutzung der digitalen Bildkorrelation (DIC) zur Dehnungsauswertung an. Dabei erscheint es sinnvoll, direkt einen biaxialen Versuchsaufbau entsprechend der üblichen Gemäldeaufspannung zu verfolgen.

Biaxiale Kurzzeitversuche ermöglichen vergleichsweise kurzfristige Auswertungen sowie die Abbildung von Extremwerten zwecks allgemeinen Vergleichs, während ausschließlich Langzeitversuche zur praxisnahen Beurteilung der Klebungen geeignet sind.

Bei Durchführung biaxialer Kurzzeitversuche sollten die Parameter der vorausgegangenen uniaxialen Kurzzeitversuche aufgegriffen werden.

Langzeitbeständigkeit (III)

Erst im biaxialen Langzeitversuch lässt sich die Beständigkeit der Verklebungen für den praktischen Anwendungsfall abschließend prüfen und ein potentiell nachteiliges Kriechverhalten der Klebefugen bei ausreichender Versuchsdauer nachvollziehen.

Der vorgestellte Langzeitversuchsaufbau erlaubt ebenso die optionale Versuchserweiterung, bspw. um unterschiedliche Rissgeometrien oder äußere klimatische Einflüsse.

Für alle Versuchstypen stellt sich eine Abhängigkeit von den jeweils gewählten Parametern dar, sodass absolute Messwerte immer in den Kontext der jeweiligen Prüfungen und ihrer Details eingebettet werden müssen, während sich durch relativen Vergleich von Klebstoffen und Verklebungstechniken mitunter auch übertragbare Tendenzen ergeben.

9.1.2 Klebstoffauswahl

Besonders umfangreiche Untersuchung haben die EVA-Dispersion Lineco, die PVAc-Dispersion Mowilith DHS S1 sowie die Störleim-Weizenstärkekleister- und Störleim-Cellulosefaser-Mischung als Klebstoffe erfahren. Alle vier Klebstoffe weisen unterschiedliche Eigenschaftsprofile auf und eignen sich abweichend für verschiedene Verklebungstechniken. Bei Nutzung der Dispersionsklebstoffe empfiehlt sich die Modifikation mit Methylcelluloseether zur verbesserten Wiederanlösbarkeit sowie potentiellen Minimierung von Kriechneigungen. Zur Herstellung des Weizenstärkekleisters wird industriell modifizierte statt native Weizenstärke empfohlen. Im Falle der Klebstoffmodifikation mit Cellulosefasern ist auf die geeignete Auswahl eines Fasertyps bzw. der Fasermischungen zu achten.

Als weitergehend interessante Klebstoffoptionen stellten sich zudem insbesondere die Modifikation der EVA-Dispersion Lineco mit Arbocel-Cellulosefasern und der Methylcelluloseether Methocel A4C für den cellulosischen Bildträger Leinen dar.

Die Verwendung von Schmelzklebstoffen sollte lediglich bei Erfordernis in Einzelfällen erwogen werden. Besonders zugfeste Einzelfadenverklebungen ermöglichten die betrachteten Polyamid-Schweißpulver der Firma Lascaux. Die Modifikation von Beva 371 mit Cellulosefasern ist der Reinform vorzuziehen, generiert jedoch allgemein vergleichsweise schwache Verklebungen mit hohem Verformungspotential.

Für spezielle Sonderfälle könnten zudem vernetzte Klebstoffsysteme erwogen werden. Hier erwiesen sich die betrachtete Polyurethan-Dispersion Ecrothan 4075 mit zusätzlicher Isocyanat-Vernetzung und die Modifikation des Cyanacrylats UHU easy mit armierenden Arbocel-Cellulosefasern neben dem Epoxid UHU plus schnellfest als interessante Optionen der Auswahl. Vor deren Anwendung sollte die weitergehende Untersuchung erfolgen.

Für den praktischen Anwendungsfall erfordert es dabei immer die individuelle Konzeption der Klebstoffauswahl je nach Objektvoraussetzungen und Verklebungsanforderungen.

9.1.3 Bruchbilder und Verklebungstechniken

Für Leinengewebe lassen sich anhand der Versuchsreihen allgemein folgende vorläufige Empfehlungen für die einzelnen Verklebungstechniken festhalten:

Für **Stoß-auf-Stoß-Verklebungen** mit hohen Festigkeitsanforderungen kann die Mischung von Störleim und der Cellulosefaser Arbocel BWB 40 empfohlen werden. Für stärker abgebaute Gewebe sollten alternativ die EVA-Dispersion Lineco sowie PVAc-Dispersion Mowilith DHS S1 erwogen werden. Störleim-Weizenstärkekleister hingegen ist ungeeignet zur Stoß-auf-Stoß-Verklebung.

Speziell zur Reduzierung etwaiger Kriechneigungen sollte die Modifikation der Dispersio-
nen durch Zusatz von Celluloseether und (zudem) Cellulosefasern erfolgen.

Durch zusätzliche **Applikation von Fadenbrücken** lassen sich die durchgeführten Stoß-auf-Stoß-Verklebungen ergänzend sichern und ggf. potentielle Kriechneigungen reduzieren. Als besonders empfehlenswert stellt sich Beva 371 als Klebstoff für die Fadenbrückenapplikation dar.

Für **einfach überlappende Verklebungen** in vorzugsweise jungen, ungealterten Geweben mit hohen Verklebungsbelastungen lässt sich ebenfalls die Störleim-Cellulosefaser-Mischung benennen. In degradierten Geweben sollte auch hier stattdessen die Verklebung mit den genannten Dispersionen auf EVA- und PVAc-Basis in entsprechend zu bevorzugenden Modifikationen erfolgen. Störleim-Weizenstärkekleister ist aufgrund der Empfindlichkeit der Klebefugen gegenüber Scherbelastung als ungeeignet festzuhalten.

Im Idealfall erfolgt die **überlappend-vermengte Verklebung**, welche die höchsten Verklebungsfestigkeiten und optimalsten Eigenschaften unter den genannten Verklebungstechniken aufweist. Insbesondere in geschwächten Gewebevoraussetzungen kann die klassische Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung nach HEIBER¹ genutzt werden, zu bevorzugen erscheint jedoch zukünftig die alternative Verwendung des Celluloseethers Methocel A4C zur Verklebung. Für höhere Festigkeitsanforderungen sind ggf. die modifizierten Dispersionsstypen vorzuziehen, jedoch deren potentielle Kriechneigung zu bedenken. Nicht verwendet werden sollte die Mischung aus Störleim und der Cellulosefaser Arbocel BWW 40, da diese keine vollständig schadfreie Verklebungsöffnung bei Bruch ermöglicht.

9.1.4 Praktischer Anwendungsfall

Um das häufige Problem auftretender Biegedeformationen im Bereich der behandelten Schadstelle zu vermeiden, ist es zunächst grundlegend erforderlich, eine korrekte Kraftübertragung in der Geweebene zu erzielen. Der verklebte Einzelfaden soll den geraden, unabgelenkten Verlauf der Kraftvektoren ermöglichen. Auch im Falle aufgebrachter Fadenbrücken soll die Hauptkraftübertragung im verklebten originalen Fadenmaterial stattfinden, nicht in der applizierten Brücke.

Rekonstruktion der tragenden Ebenen

Eine von Restauratoren im Falle auftretender Deformationen durch Unterbrechungen des textilen Bildträgers oftmals als ultima ratio durchgeführte (flächige) Versteifung vermag mitunter zwar Deformationen (zumindest temporär) zu begegnen, löst jedoch nicht das oftmals zu Grunde liegende Problem abgelenkter Kraftvektorenverläufe. Vielmehr werden so häufig zusätzliche Probleme geschaffen. Ziel sollte es daher immer sein, das originale Gefüge möglichst lokal begrenzt so wiederherzustellen, dass die ursprünglichen Eigenschaften und Kraftübertragungswege rekonstruiert und erhalten werden.

¹ Vgl. HEIBER 1996; HEIBER 2003.

Dies schließt ein, dass im Falle einer Schadstelle im gesamten Schichtaufbau möglichst alle Einzelschichten eine Wiederverbindung erfahren. Nur so kann zuverlässig vermieden werden, durch lokale Spannungserhöhungen Schwachstellen beizubehalten.

Für die Praxis der Einzelfadenverklebungstechnik leitet sich daraus nicht nur das Verkleben der Einzelfäden der textilen Bildträger, sondern auch die Rekonstruktion der darüber liegenden Schichten ab. Gleichzeitig wird deutlich, dass die mitunter diskutierte Alternative der „reduzierten Einzelfadenverklebung“², bei welcher zur Risschließung nicht alle Fäden eine Verklebung erfahren, deutliche Nachteile birgt und nicht im ursprünglichen Sinne der Technik ist.

9.2 Anknüpfende Forschung

Die im Rahmen dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse und vorläufigen Tendenzen bedürfen allgemein der weitergehenden Untersuchung.

Ausgehend von der vorgeschlagenen Prüfsystematik wäre unter anderem die weitere Überprüfung der lediglich initial geprüften Klebstoffe in anderen Verklebungstechniken, die Fortführung der Dehnungsevaluierungen via DIC für weitere Klebstoffe und Verklebungstechniken sowie insbesondere die optimierte Langzeitbetrachtung der vielversprechendsten Verklebungstypen wünschenswert.

Dabei ist die beschriebene schrittweise Erweiterung der Betrachtungen anzustreben, bspw. hinsichtlich anderer Bildträgermaterialien und Adhäsionsvoraussetzungen, komplexerer Rissformen, „echter“ Risse statt standardisierter Schnitte oder der Verklebungsevaluierung in gealtertem Probenmaterial. Auch die Klebstoffauswahl ist nicht als abgeschlossen zu betrachten, sodass weiterhin die Erforschung bislang nicht betrachteter Klebstoffoptionen erfolgen sollte.

Speziell vor dem Hintergrund der wünschenswerten Etablierung des seriellen Langzeitversuchs sei zudem auf die Option entsprechender DIC-Open-Source-Freeware zur Dehnungsauswertung verwiesen.³ So könnte beispielsweise die Eignung der Software GOM Correlate (Fa. GOM GmbH, ZEISS Company) zur DIC-Auswertung geprüft werden.

Im Hinblick auf die Qualitätssicherung von Einzelfadenverklebungen erscheint auch die Auseinandersetzung mit Möglichkeiten der didaktischen Vermittlung als wichtiges Feld.⁴

2 Vgl. HOFFMANN 2009.

3 Vgl. u.a. BLABER et al. 2015.

4 Siehe u.a. SAKALYTE et al. 2017.

Ausblick Materialmodellierung

Mit Ausblick auf eine mögliche Materialmodellierung von Einzelfadenverklebungen in Gemäldestrukturen lässt sich festhalten, dass die Darstellung des rheologischen Verhaltens unterschiedlicher Bildträger und Beschichtungstypen bislang lediglich in ersten Grundlagen erfolgte. Entsprechende konservierungswissenschaftliche Untersuchungen sind vergleichsweise rar.⁵

Als Schwierigkeit bei dem Wunsch nach allgemeinen Hilfsmodellen zum Materialverständnis stellen sich dabei die bereits erwähnte enorme Materialvielfalt und der unterschiedliche Aufbau von Objekten dar. Neben u.a. dem feuchtephysikalischen Reaktionsverhalten⁶ sowie der Fragestellung nach der Materialantwort bei transportbedingten Erschütterungen (dynamische Belastungswechsel)⁷ bildet insbesondere auch der Versuch der Charakterisierung des Verhaltens unter Dauerbelastung einen Schwerpunkt bisheriger Betrachtungen, wobei die Themenkomplexe grundsätzlich einander bedingen.

Unterschiedliche Quellen beschreiben das zu beobachtende Relaxations- und Kriechverhalten an Gemäldestrukturen zumeist sehr allgemein mit „viskoelastischen Eigenschaften“. Konkrete Vorschläge und Definitionen bezüglich zusammengesetzter viskoelastischer Körper werden nicht unternommen. Des Weiteren finden die oftmals gleichzeitig vorliegenden plastischen Eigenschaftsanteile vielfach keine Berücksichtigung. Präzise betrachtet müsste man jedoch von viskos-elastisch-plastischen Materialeigenschaften vieler textiler Bildträger, ihrer Beschichtungen und eingebrachter Einzelfadenverklebungen sprechen.

In zumeist anderen Kontexten wurde sich bereits schon konkreteren Ansätzen zur Modellierung von (biaxial gespannten und beschichteten) Gewebestrukturen gewidmet, sodass sich dort präsentierte Ansätze möglicherweise aufgreifen ließen.⁸

Vor dem Hintergrund der weiteren erforderlichen Experimente zur Beantwortung praktisch motivierter Fragestellungen zur Einzelfadenverklebung wäre daher langfristig auch die anknüpfende Übertragung in entsprechende Materialmodelle wünschenswert.

5 Vgl. u.a. BALLARD 1996; BERGER, RUSSEL 1982; BERGER, RUSSEL 1986; BERGER, RUSSEL 1987; BERGER, RUSSEL 1990; BERGER, RUSSEL 1994; COLVILLE et al. 1982; KRARUP ANDERSEN 2013; MECKLENBURG, TUMOSA 1991 (a), (b); MICHALSKI 1991; PENAVA et al. 2016; ROGALA et al. 2019; TROSBACH 2002; YOUNG 1996 (a), (b).

6 Siehe u.a. VON REDEN 2018.

7 Siehe u.a. KRACHT, KLETSCHKOWSKI 2017.

8 Siehe u.a. BACKER 1969; BÖGNER 2004; GROSBERG 1969; HEARLE et al. 1969; HOHLER 1995; LOSCH 1971.

Literaturverzeichnis

ACKROYD et al. 2002

Paul Ackroyd, Alan Phenix, Caroline Villers: Not lining in the twenty-first century. Attitudes to the structural conservation of paintings. In: *The Conservator*, Vol. 26, 2002, S. 14-23.
DOI: 10.1080/01410096.2002.9995172.

AHMED, KOLISIS 2011

Harby E. Ahmed, Fragiskos N. Kolisis: A Study on Using of Protease for Removal of Animal Glues Adhesive in Textile Conservation. In: *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 124, 2012, S. 3565-3576.
DOI: 10.1002/app.34053.

ALTENBACH 2012

Holm Altenbach: *Kontinuumsmechanik. Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*. Berlin, Heidelberg ²2002.

ANGELOVA 2019

Lora V. Angelova: Adhesives and consolidants for wax and wax like materials. In: *Ceroplastics. The Art of Wax*. Hrsg. R. Ballestriero, O. Burke, F. M. Galassi. Rom 2019, S. 169-183.

BACKER 1969

Stanley Backer: An engineering approach to textile structures. In: *Structural mechanics of fibres, yarns, and fabrics*, Vol. I. Hrsg. John W. S. Hearle, Percy Grosberg, Stanley Backer. New York 1969, S. 1-59.

BADALONI et al. 2015

Michele Badaloni, Marco Rossi, Gianluca Chiappini, Pascal Lava, Dimitri Debruyne: Impact of Experimental Uncertainties on the Identification of Mechanical Material Properties using DIC. In: *Experimental Mechanics*, No. 55, 2015, S. 1411-1426. DOI: 10.1007/s11340-015-0039-8.

BALKE 2010

Herbert Balke: *Einführung in die Technische Mechanik. Statik*. Berlin, Heidelberg ³2010.

BALLARD 1996

Mary W. Ballard: Hanging out. Strength, elongation, and relative humidity. Some physical properties of textile fibres. In: *ICOM-CC Preprints, 11th Triennial Meeting Edinburgh 1-6 September 1996, Volume II*. Hrsg. J. Bridgland. London 1996, S. 665-669.

BALSER, ISERINGHAUSEN 1975

Klaus Balser, Martin Iseringhausen: Celluloseäther. In: Ullmanns Enzyklopädie der Technischen Chemie. Band 9: Butadien bis Cytostatika. Weinheim ⁴1975. S. 192-212.

BALTSCHKEIT 2011

Christine Baltschkeit: Die Stoß-auf-Stoß-Verklebung zur Risssschließung bei Leinengeweben. Vergleichende Untersuchungen zur Zugfestigkeit von Klebstoffen für die Einzelfadenverklebung. Diplomarbeit FH Köln 2011.

BANDERMANN 1980

Friedhelm Bander mann: Auswertung von Meßdaten. In: Ullmanns Enzyklopädie der Technischen Chemie. Band 5: Analysen- und Messverfahren. Weinheim ⁴1980, S. 41-49.

BARROSO et al. 2013

A. Barroso, E. Correa, J. Freire, D. Vega, F. París: Device for biaxial testing in uniaxial machines. Design, manufacturing and experimental results using cruciform specimens of composite materials. In: *Materiales Compuestos*, Vol. 13, 2013, S. 111-116.

BARROSO et al. 2018

A. Barroso, E. Correa, J. Freire, F. París: Device for biaxial testing in uniaxial machines. Design, manufacturing and experimental results using cruciform specimens of composite materials. In: *Experimental Mechanics*, Vol. 58, 2018, S. 49-53. DOI: 10.1007/s11340-017-0327-6.

BARTHEL 2007

Clemens Barthel: Numerische und experimentelle Untersuchungen an Klebverbindungen mit gradierter Klebschicht. Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Universität Kassel. Aachen 2007.

BATAL 2011

Jan Batal: Charakterisierung der mechanischen Grenzschicht in Polymer-Metall-Klebungen. Dissertation UdS Saarbrücken 2011.

BECKER 2002

Laurence Becker: Möglichkeiten und Grenzen der Einzelfadenverklebung in der Textilkonservierung. Diplomarbeit FH Köln 2002.

BEINER-BÜTH, BECKMANN 2007

Silke Beiner-Büth, Steffanie Beckmann: Faserbrei zur Schließung klaffender Risse – ein Werkstattbericht. In: *VDR-Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut*, Heft 2, 2007, S. 45-54.

BELTINGER 1992

Karoline Beltinger: Die Vernähung eines Risses in einem Leinwandgemälde. In: *ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, Heft 2, Jg. 6/1992, S. 353-359.

BERGER 1976

Gustav A. Berger: Formulating Adhesives for the Conservation of Paintings. In: *Conservation and Restoration of Pictorial Art*. Hrsg. Norman Brommelle. London 1976, S. 169-180.

BERGER 1981

Gustav A. Berger: The Role of Tension in the Preservation of Canvas Paintings. A Study of Panoramas. In: ICOM Preprints 6th Triennial Meeting Ottawa, Band 2, Nr. 3. Hrsg. Johan Rudolph Justus van Asperen de Boer. London 1981, S. 1-12.

BERGER, RUSSEL 1982

G. A. Berger, W. H. Russel: The behavior of canvas as a structural support for painting. Preliminary report. In: Science and Technology in the Service of Conservation. Preprints of the Contributions to the IIC Washington Congress 3-9 September 1982. Hrsg. N.S. Bromelle, G. Thomson. London 1982, S. 139-145.

BERGER, RUSSEL 1984

Gustav A. Berger, William H. Russel: The new stress tests on canvas paintings and some of their implications on the preservation of paintings. In: ICOM Committee of Conservation Preprints 7th Triennial Meeting, Kopenhagen 10-14 September 1984. Hrsg. Diana Froment / ICOM in association with the J. Paul Getty Trust. Paris 1984, S. 7-9.

BERGER, RUSSEL 1986

Gustav A. Berger, William H. Russel: Investigations into the reactions of plastic materials to environmental changes. Part I. The mechanics of the decay of paint films. In: Studies in Conservation, Vol. 31, 1986, S. 49-64.

BERGER, RUSSEL 1987

Gustav A. Berger, William H. Russel: Some conservation treatments in the light of the latest stress measurements. In: ICOM Committee of Conservation Preprints 8th Triennial Meeting, Sydney 6-11 September 1987. Hrsg. Kirsten Grimstad, JoAnn Hill / The Getty Conservation Institute. Paris 1984, S. 127-136.

BERGER, RUSSEL 1988

Gustav A. Berger, William H. Russel: An evaluation of the preparation of canvas paintings using stress measurements. In: Studies in Conservation, Volume 33, 1988, S. 187-204.

BERGER, RUSSEL 1989

Gustav A. Berger, William H. Russel: Untersuchungen zum Einfluß der Umwelt auf die Erhaltung von Leinwandgemälden. In: Restauro, Heft 3, 1989, S. 191-203.

BERGER, RUSSEL 1990

Gustav A. Berger, William H. Russel: Changes in resistance of canvas to deformation and cracking (modulus of elasticity „E“) as caused by sizing and lining. In: ICOM Committee for Conservation Preprints of the 9th Triennial Meeting Dresden 26-31 August 1990. Hrsg. ICOM Committee for Conservation. Paris 1990, S. 107-112.

BERGER, RUSSEL 1993

Gustav A. Berger, William H. Russel: Tears in Canvas Paintings. Resulting Stress Changes and Treatment. In: ICOM Committee for Conservation 10th Triennial Meeting, Washington DC 22-27 August 1993. Hrsg. Janet Bridgland. Paris 1993, S. 113-117.

BERGER, RUSSEL 1994

Gustav A. Berger, William H. Russel: Interaction between canvas and paint film in response to environmental changes. In: *Studies in Conservation*, Vol. 39, 1994, S. 73-86.

BERGER, RUSSEL 2000 (a)

Gustav A. Berger, William H. Russel: The Berger-Russel biaxial stress tester for stretched canvas. In: *Conservation of Paintings. Research and Innovations*. Hrsg. Gustav A. Berger. London 2000, S. 264-275.

BERGER, RUSSEL 2000 (b)

Gustav A. Berger, William H. Russel: The role of tension in the preservation of canvas paintings. In: *Conservation of Paintings. Research and Innovations*. Hrsg. Gustav A. Berger. London 2000, S. 245-262.

BETTEN 2001

Josef Betten: *Kontinuumsmechanik. Elastisches und inelastisches Verhalten isotroper und anisotroper Stoffe*. Berlin, Heidelberg ²2001.

BETTEN 2008

Josef Betten: *Creep Mechanics*. Berlin, Heidelberg 2008.

BIANCO et al. 2015

Lisa Bianco, Massimiliano Avalor, Alessandro Scattina, Paola Croveri, Cesare Pagliero, Oscar Chiantore: A study on reversibility of BEVA 371 in the lining of paintings. In: *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 16, 2015, S. 479-485. DOI: 10.1016/j.culher.2014.09.001.

BIEKER, SCHLIMMER 2004

M. Schlimmer, C. Barthel: Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen. Teil III. In: *Adhäsion Kleben und Dichten*, Heft 7-8, 2004, S. 38-42.

BLABER et al. 2015

J. Blaber, B. Adair, A. Antoniou: Ncorr. Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. In: *Experimental Mechanics*, No. 55, 2015, S. 1105–1122. DOI 10.1007/s11340-015-0009-1.

BLÜHER et al. 1999

Agnes Blüher, Ingrid Schwarz, Gerhard Banik, Gerlinde Romer, Elisabeth Thobois: Eine gebrauchsfertige Enzymkompresse zur Ablösung von Stärkekleisterverklebungen. In: Preprint vom 9. Internationalen Kongress der IADA. Kopenhagen 15.-21. August 1999. Hrsg. Mogens S. Koch. Kopenhagen 1999, S. 139-144.

BOBETH 1993

Wolfgang Bobeth: *Textile Faserstoffe. Beschaffenheit und Eigenschaften*. Berlin et al. 1993.

BODECHTEL 2000

Steffi Bodechtel: Über Polyamide in der Restaurierung. Betrachtungen zu Polyamid-Textilschweißpulver. Seminararbeit HfBK Dresden 2000.

BÖGNER 2004

Heidrun Bögner: Vorgespannte Konstruktionen aus beschichteten Geweben und die Rolle des Schubverhaltens bei der Bildung von zweifach gekrümmten Flächen aus ebenen Streifen. Dissertation Stuttgart 2004.

BORNEMANN, SCHLIMMER 2004 (a)

J. Bornemann, M. Schlimmer: Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen. Teil I. In: Adhäsion Kleben und Dichten, Heft 5, 2004, S. 30-33.

BORNEMANN, SCHLIMMER 2004 (b)

J. Bornemann, M. Schlimmer: Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen. Teil II. In: Adhäsion Kleben und Dichten, Heft 6, 2004, S. 40-42.

BOURIER 2008

Günther Bourier: Beschreibende Statistik. Wiesbaden 2008.

BRACHERT 2001

Thomas Brachert: Lexikon historischer Maltechniken. Quellen – Handwerk – Technologie – Alchemie. München 2001.

BRACHT et al. 2003

Elisabeth Bracht, Irene Glanzer, Louise Wijnberg, Jan van Adrichen: Barnett Newman's Cathedra. The restoration of slash damages in a colourfield painting. In: Alternatives to lining. Structural Treatment of Paintings on Canvas without Lining. Hrsg. Mary Bustin, Tom Caley. London 2003, S. 21-28.

BRAKEBUSCH 1996

Börries Brakebusch: Das mechanisch-physikalische Verhalten von Leinwandbildern. Überlegungen zum aktuellen Forschungsstand und seiner Umsetzung. Diplomarbeit FH Köln 1996.

BRIDAROLLI et al. 2018

Alexandra Bridarolli, Marianne Odlyha, Oleksandr Nechyporchuk, Krister Holmberg, Christina Ruiz-Recasens, Romain Bordes, Laurent Bozec: Evaluation of the Adhesion and Performance of Natural Consolidants for Cotton Canvas Conservation. In: Applied Materials and Interfaces, Vol. 10, 2018, S. 33652-33661. DOI: 10.1021/acsami.8b10727.

BRIDAROLLI et al. 2020

Alexandra Bridarolli, Anna Nualart-Torroja, Aurélie Chevalier, Marianne Odlyha, Laurent Bozec: Systematic mechanical assessment of consolidants for canvas reinforcement under controlled environment. In: Heritage Science, Vol. 8, 2020, S. 1-12. DOI: 10.1186/s40494-020-00396-x.

BUCHER 2000

Kerstin Bucher: Klaffende Risse. Untersuchungen zur Dehnung geschrumpfter Rissbereiche. Diplomarbeit ABK Stuttgart 2000.

BUCHER, HAUPT 2000

Kerstin Bucher, Tobias Haupt: Klaffende Risse mit gestauchter Malschicht - Eine Spannkonstruktion mit Zugfedern. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 1, Jg. 14/2000, S. 139-148.

CAPPITELLI et al. 2004

F. Cappitelli, E. Zanardini, C. Sorlini: The Biodeterioration of Synthetic Resins Used in Conservation. In: *Macromolecular Bioscience*, Vol. 4, 2004, S. 399-406. DOI: 10.1002/mabi.200300055.

CASTRO-GREUNE 1994

Silvia Castro-Greune: Eine Studie zu beidseitig bemalten Leinwandgemälden und deren restauratorische Bearbeitung. Diplomarbeit ABK Stuttgart 1994.

CEDERHOLM 1985

Kermit Cederholm: The treatment of small tears in canvas paintings. Postgraduate Diploma Thesis Courtauld Institute London 1985.

CIMINO et al. 2020

Dafne Cimino, Rebecca Ploeger, E. René De La Rie, Christopher W. McGlinchey, Tommaso Poli, Oscar Chiantore, Johannes A. Poulis: Progress in formulating new adhesives for conservation purposes. In: *Supporto e (') Immagine. Problematiche di consolidamento e di conservazione dei supporti nei dipinti contemporanei*. Symposium COLORE E CONSERVAZIONE, Venedig, 23.-24. November 2018. Hrsg. Barbara Caranza / CESMAR7. Saonara 2020, S. 148-164.

COLVILLE et al. 1982

James Colville, William Kilpatrick, Marion M. Mecklenburg: A finite element analysis of multi-layered orthotropic membranes with application to oil paintings on a fabric. In: *Science and Technology in the Service of Conservation. Preprints of the Contributions to the IIC Washington Congress 3-9 September 1982*. Hrsg. N.S. Bromelle, G. Thomson. London 1982, S. 146-150.

CONSTANTINI et al. 2020

Rosa Constantini, Frances Lennard, Jafar Alsayednoor, Philip Harrison: Investigating mechanical damage mechanisms of tapestries displayed at different angles using 2D DIC. In: *The European Physical Journal Plus*, 2020, S. 1-17. DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-00520-7.

DANIELS 1995

Vincent Daniels: The reversibility of starch paste. In: *Lining and Backing. The Support of Paintings, Paper and Textiles*. Papers delivered at the UKIC Conference, 7-8 November 1995. Hrsg. Andrew Durham. London 1995, S. 72-76.

DANTER 2003

Susanne Danter: Seide als Bildträger in der europäischen Malerei. Diplomarbeit FH Köln 2003.

DEMUTH 2020

Petra Demuth: Major and minor development steps in the tear treatment methods for canvas paintings. All art and technology has been contemporary. In: *Supporto e (') Immagine. Problematiche di consolidamento e di conservazione dei supporti nei dipinti contemporanei*. Symposium COLORE E CONSERVAZIONE, Venedig, 23.-24. November 2018. Hrsg. Barbara Caranza / CESMAR7. Saonara 2020, S. 55-83.

DEMUTH, FLOCK 2020

Petra Demuth, Hannah Flock: Der Consolidation Pen Winnie. Die Entwicklung eines kleinen, beheizbaren Klebstoff-Applikators als Generationenprojekt. In: *ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, Heft 1, Jg. 33/2019, S. 129-136.

DEMUTH, HEIBER 2000

Petra Demuth, Winfried Heiber: Der Trecker. Eine Spannkonstruktion für die Rissverklebung. In: *Restauro*, Heft 5, 2000, S. 344-347.

DEMUTH et al. 2011

Petra Demuth, Hanna Vogel, Christina Nägler, Lena Reuber: Review – Adhesives for Thread-by-Thread Tear Mending in Torn Fabric-Supported Paintings. Paper CCI Symposium Adhesives and Consolidants for Conservation: Research and Applications. Ottawa, 17.-21. Oktober 2011. Hrsg. Canadian Conservation Institute. Ottawa 2011.

DE WITTE et al. 1984

E. De Witte, S. Florquin, M. Goessens-Landrie: Influence of the Modification of Dispersions on Film Properties. In: *Adhesives and Consolidants. Preprints of the Contributions to the Paris Congress*, 2-8 September 1984. Hrsg. Norman S. Bromelle, Elizabeth M. Pye, Perry Smith, Garry Thomson. London 1984, S. 32-35.

DIEBELS et al. 2007

S. Diebels, M. Johlitz, H. Steeb, A. Chatzouridou, J. Batal, W. Possart: A continuum-based model capturing size effects in polymer bonds. In: *Journal of Physics Conference Series*, Vol. 62, 2007, S. 34-42. DOI: 10.1088/1742-6596/62/1/003.

DOWN 1984

Jane L. Down: The yellowing of epoxy resin adhesives. Report on natural dark ageing. In: *Studies in Conservation*, Vol. 29, 1984, S. 63-76.

DOWN 1986

Jane L. Down: The yellowing of epoxy resin adhesives. Report on high-intensity light aging. In: *Studies in Conservation*, Vol. 31, 1986, S. 159-170.

DOWN et al. 1996

Jane L. Down, Maureen A. MacDonald, Jean Te'treault, R. Scott Williams: Adhesive Testing at the Canadian Conservation Institute. An Evaluation of Selected Poly(Vinyl acetate) and Acrylic Adhesives. In: *Studies in Conservation*, Vol. 41, No. 1, 1996, S. 19-44.

DOWN 2009

Jane L. Down: Poly(vinyl acetate) and Acrylic Adhesives. A Research Update. In: *Holding it All Together. Ancient and Modern Approaches to Joining, Repair and Consolidation*. Hrsg. Janet Ambers, Catherine Higgitt, Lynne Harrison, David Saunders. London 2009, S. 91-98.

DOWN 2015

Jane L. Down: *Adhesive Compendium for Conservation*. Ottawa 2015.

DREYFUSS-DESEIGNE 2017

Rémy Dreyfuss-Deseigne: Nanocellulose Films in Art Conservation. A New and Promising Mending Material for Translucent Paper Objects. In: *Journal of Paper Conservation*, Vol. 18, No. 1, 2017, S. 18-29. DOI: 10.1080/18680860.2017.1334422.

DUDEW et al. 2019

Ella Dudew, Eva Krug von Nidda, Sandra Plötz: Zwei Studien zur Risssschließung mittels Faser-Bindemittel-Gemisch. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 2, Jg. 33/2019, S. 317-326.

DUFRESNE 2012

Alain Dufresne: Nanocellulose. From Nature to High Performance Tailored Materials. Berlin, Boston 2012. DOI: 10.1515/9783110254600.

EHRENSTEIN 1978

G. W. Ehrenstein: Polymerwerkstoffe. Struktur und mechanisches Verhalten. Grundlagen für das technische Konstruieren mit Kunststoffen. München, Wien 1978.

EIBNER 1982

A. Eibner: Entwicklung und Werkstoffe der Tafelmalerei. München ²1982.

EIPPER 1997

Paul-Bernhard Eipper: Die Behandlung von Rissen an Gemäldeträrgeweben mit Polyvinylacetaten. In: Arbeitsblätter für Restauratoren, Heft 2, 1997, S. 20-28.

ELIAS 2001

Hans-Georg Elias: Makromoleküle. Physikalische Strukturen und Eigenschaften (Band 2). Weinheim et al. ⁶2001.

ESSERS 1985

Günter Essers: Verschweißen von Gewebeträggerrissen mittels Lötnadel. In: Maltechnik / Restauro, Heft 2, 1985, S. 42-43.

FELLER 1994

Robert L. Feller: Accelerated Aging. Photochemical and Thermal Aspects. Los Angeles 1994.

FELLER, WILT 1990

Robert L. Feller, Myron Wilt: Evaluation of Cellulose Ethers for Conservation. Research in Conservation No. 3, Getty Conservation Institute. USA 1990.

FERRY 1980

J. D. Ferry: Viscoelastic Properties of Polymers. New York 1980.

FLOCK 2014

Hannah Flock: Neue Untersuchungen zur Risssschließung in Leinwandbildträgern. Uni- und biaxiale Zugprüfungen an Prüfkörpern aus verklebtem Leinengarn und -gewebe sowie freien Klebstofffilmen. Kölner Beiträge zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut, Digitale Edition Band 2. Köln 2014. URN: urn:nbn:de:hbz:832-epub4-6019.

FLOCK 2015

Hannah Flock: Neue Untersuchungen zur Risssschließung in Leinwandbildträgern. In: Einsichten. Beiträge zur Konservierung – Restaurierung – Kunsttechnologie. Hrsg. CICS / TH Köln. Köln 2015, S. 169-179.

FLOCK 2018

Hannah Flock: Uniaxiale Zugprüfung von Bindemittel- und Klebstofffilmen. Vorstellung der Testmethode und ausgewählter Ergebnisse. In: Konsolidieren und Kommunizieren. Materialien und Methoden zur Konsolidierung von Kunst- und Kulturgut im interdisziplinären Dialog. Hrsg. Angela Weyer. Peterberg 2018, S. 52-58.

FLOCK et al. 2019

Hannah Flock, Stefan Diebels, Elisabeth Jägers, Petra Demuth: Störleim-Cellulosefaser-Gemische zur Einzelfadenverklebung. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 1, Jg. 33/2019, S. 117-128.

FLOCK et al. 2020 (a)

Hannah Flock, Stefan Diebels, Elisabeth Jägers, Wulff Possart: Thread-by-thread tear mendings in conservation of canvas paintings. A problem of reproducibility in bonding qualities. In: The Journal of Adhesion, 2020, S. 1-22. DOI: 10.1080/00218464.2020.1761797.

FLOCK et al. 2020 (b)

Hannah Flock, Stefan Diebels, Elisabeth Jägers, Petra Demuth: New Investigations of Adhesives for Tear Repair of Canvas Paintings. In: Studies in Conservation, 2020, S. 1-21.
DOI: 10.1080/00393630.2020.1827185.

FINK 2017

Johannes Karl Fink: Chemicals and Methods for Conservation and Restoration. Paintings, Textiles, Fossils, Wood, Stones, Metals, and Glass. Hoboken 2017.

FISCHER, ESKA 2011

Andrea Fischer, Margarete Eska: Joining broken wax fragments. Testing tensile strength of adhesives for fragile and non-polar substrates. In: ICOM-CC Preprints of the 16th Triennial Meeting, Lissabon, 19.-23. September 2011. Hrsg. J. Bridgland. Paris 2011, S. 1-10.

FOSKETT 1994

Sarah Foskett: An investigation into the properties of isinglass. In: SSCR (Scottish Society for Conservation and Restoration) Journal, Vol. 5, No. 4, S. 11-14.

FRAUENDORFER 2006

Hans Frauendorfer: Riss- und Fehlstellenbehandlung an Baumwollbildträgern am Beispiel des Gemäldes "Ohne Titel" von Adolf Frohner, um 1960. Diplomarbeit Universität für angewandte Kunst Wien 2006.

FRIESKE 2019

Hans-Jürgen Frieske: Technische Mechanik. Statik. Einführung und Grundbegriffe. Wiesbaden 2019.

GAASCH 2019

Daniel Gaasch: Celluloseether als Klebstoff zur Risssschließung. Uniaxiale Zugversuche an geklebten Gewebestreifen aus Leinen mittels Methyl- und Hydroxypropylmethylcellulose. Masterthesis ABK Stuttgart 2019.

GABLER 1981

Wolfram Gabler: Eine Möglichkeit der Restaurierung von Rissen in Leinwandgemälden ohne Doublierung, dargestellt am Beispiel des Gemäldes "Die Nacht" von Ferdinand Hodler. In: Mitteilungen des Deutschen Restauratorenverbandes DRV 1980/81, S. 22-25.

GÄBLER 2003

Karen Gäbler: Gewebebrücken aus Baumwolle und Polyester zur Verstärkung einer Rissverklebung. Tendenzen anhand praktischer Versuche. Diplomarbeit HfBK Dresden 2003.

GALE-SCHODTERER 2016

Glynis Gale-Schodterer: Rissverklebung im Fokus. Theorie und Praxis der Rissbehandlung anhand eines entsprechend geschädigten, barocken Gemäldes aus der Sammlung des Stiftes Neukloster, Wiener Neustadt. Diplomarbeit Universität für angewandte Kunst Wien 2016.

GARSDIE, WYETH 2005

Paul Garsdie, Paul Wyeth: Assessing the physical state of the Fore-topsail of HMS Victory. In: Scientific Analysis of Ancient & Historic Textiles. Informing Preservation, Display and Interpretation. Postprints, AHRB Research Centre for Textile Conservation & Textile Studies, Second Annual Conference. Textile Conservation Centre, 13-15 July 2004. Hrsg. R. Janaway and P. Wyeth. London 2005, S. 118-125.

GARSDIE, WYETH 2006

Paul Garsdie, Paul Wyeth: Textiles (chapter 4). In: Conservation Science. Heritage Materials. Hrsg. E. May, M. Jones. Cambridge 2006, S. 56-91.

GIACHETTI 2000

A. Giachetti: Matching techniques to compute image motion. In: Image and Vision Computing, Vol. 18, 2000, S. 247-260. DOI: S0262-8856(99)00018-9.

GIESEKUSS 1994

Hanswalter Giesekuss: Phänomenologische Rheologie. Eine Einführung. Berlin, Heidelberg 1994.

GIORGI et al. 2002

Rodorigo Giprgi, Luigi Dei, Massimo Ceccato, Claudius Schettino, Piero Baglioni: Nanotechnologies for Conservation of Cultural Heritage. Paper and Canvas Deacidification. In: Langmuir (ACS) American Chemical Society, Vol. 18, 2002, S. 8198-8203. DOI: 10.1021/1a025964d.

GLANZER 1995

Irene Glanzer: Restaurierung des Gemäldes „Azak“ von Robert Pick, signiert und datiert 1974, aus dem Besitz der Magistratsabteilung für Kultur, Wien (Teil I). Ein Klebstoffsystem zur Rißverklebung am Gemälde (Teil II). Diplomarbeit Hochschule für angewandte Kunst Wien 1995.

GLANZER et al. 2006

Irene Glanzer, Elisabeth Bracht, Louise Wijnberg: Cathedra, Barnett Newman. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 1, Jahrgang 20/2006, S. 63-86.

GOETZ 2012

Lee Ann Goetz: Preparation and Analysis of crosslinked lignocellulosic fibers and cellulose nanowhiskers with poly(methyl-vinyl ether co maleic acid) – polyethylene glycol to create novel water absorbing materials. Dissertation Georgia Institute of Technology 2013. URI: <http://hdl.handle.net/1853/45893>.

GOLDSCHMIDT 2015

Florian Goldschmidt: Modellierung und Simulation von Klebeverbindungen mit gradierten mechanischen Eigenschaften. Dissertation UdS Saarbrücken 2015.

GRAßMANN 2004

Angelika Graßmann: Bildträger Hanf und Methoden zur Unterscheidung von Hanf- und Flachsfasern. Interne Semesterarbeit FH Köln 2004.

GROSBERG 1969

Percy Grosberg: The tensile properties of woven fabrics. In: Structural mechanics of fibres, yarns, and fabrics, Vol. I. Hrsg. John W. S. Hearle, Percy Grosberg, Stanley Backer. New York 1969, S. 269-339.

GRUBER et al. 1975

Erich Gruber, Thomas Krause, Josef Schurz: Cellulose. In: Ullmanns Enzyklopädie der Technischen Chemie. Band 9: Butadien bis Cytostatika. Weinheim ⁴1975. S. 184-191.

GUILLY et al. 1981

R. Guilly, M. Sotton, M. Chevalier: Etude de l'operation de décatissage des toiles de doublage en lin. Analyse comparative des caractéristiques des toiles décaties artisanalement et industriellement. In: Preprints of the 6th triennial meeting Ottawa, 21-25 September 1981. Hrsg. ICOM Committee for Conservation. Paris 1981, S. 81/2/4.

GÜTTLER 2005

Sabine Güttler: Untersuchungen zur Eignung von Stärkeethern als Festigungsmittel gelockerter Farbschichten auf Papier am Beispiel von zwei unterschiedlich gefassten Objekten. Diplomarbeit FH Köln 2005.

HABEL-SCHABLITZKY 1992

Andrea Habel-Schablitzky: Fischblasenleim – Geschichte und Eigenschaften sowie Anwendung in der Holzrestaurierung. Diplomarbeit FH Köln 1992.

HABENICHT 2008

Gerd Habenicht: Kleben – erfolgreich und fehlerfrei. Wiesbaden ⁵2008.

HABENICHT 2009

Gerd Habenicht: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin, Heidelberg ⁶2009.

HACKNEY, HEDLEY 1981

Stephen Hackney, Gerry Hedley: Measurements of the ageing of linen canvas. In: Studies in Conservation, Vol. 26, 1981, S. 1-14.

HACKNEY, HEDLEY 1993

Stephen Hackney, Gerry Hedley: The deterioration of linen canvas. Accelerated ageing tests to investigate the modes of deterioration and to assess retarding treatments. In: *Measured Opinions. Collected papers on the conservation of paintings*. Hrsg. Caroline Villers. London 1993, S. 66-69.

HACKNEY, ERNST 1994

Stephen Hackney, Torben Ernst: The Applicability of Alkaline Reserves to Paintings on Canvas. In: *Preventive Conservation Practice, Theory and Research*. IIC 1994 Ottawa Congress 12-16 September. Hrsg. Ashok Roy, Perry Smith. Ottawa 1994, S. 223-227.

HACKNEY et al. 1996

Stephen Hackney, Joyce Townsend, Nicolas Wyplosz: Studies on the Deacidification of Canvas Supports with Magnesium Methyl Methoxycarbonate (MMC). In: *Preprints of ICOM Edinburgh Conference*. Hrsg. ICOM Committee for Conservation. London 1996, S. 271-275.

HACKNEY 2020

Stephen Hackney: *On Canvas. Preserving the Structure of Paintings*. Los Angeles 2020.

HALLER et al. 2012

Ursula Haller, Stephanie Hilden, Karin Krüger: The Ermlitz project. Conservation and mounting of 310 square metres of painted wall hangings. In: *Studies in Conservation*, Vol. 57, 2012, S. 138-146. DOI: 10.1179/2047058412Y.0000000057.

HARTUNG 1995

Joachim Hartung: *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. München, Wien ¹⁰1995.

HARTWICH, PLÖTZ 2016

Claudia Hartwich, Sandra Plötz: Eine Rissverklebung mittels Faser-Bindemittel-Gemisch. In: *ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, Heft 1, Jg. 30/2016, S. 325-337.

HAUPT 2002

Peter Haupt: *Continuum Mechanics and Theory of Materials*. Berlin, Heidelberg 2002.

HAUPT 2004

Tobias Haupt: Zubereitung von Störleim. Auswirkung der Zubereitungstemperatur und -zeit auf Viskosität, Gelierverhalten und Molekulargewicht. In: *ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, Heft 2, Jg. 18/2004, S. 318-332.

HAUPT et al. 1990

Margaret Haupt, Deborah Dyer, Jim Hanlan: An Investigation into Three Animal Glues. In: *The Conservator*, Vol. 14, 1990, S. 10-16.

HEARLE et al. 1969

John W. S. Hearle, Percy Grosberg, Stanley Backer: *Structural mechanics of Fibres, Yarns and Fabrics*, Volume I. London, New York 1969.

HEDINGER 1997

Daniela Hedinger: *Rissvernähung am Gemälde*. Diplomarbeit ABK Stuttgart 1997.

HEDINGER 1999

Daniela Hedinger: Reißvernähung am Gemälde. Weiße Reihe des Instituts für Museumskunde an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart Band 15. München 1999.

HEDLEY 1975

Gerry Hedley: Some empirical determinations of the strain distribution in stretched canvases. In: Proceedings of the ICOM Committee for Conservation, Venice 6-11 September 1975. Paris 1975, S. 75/11/4-1 bis 75/11/4-17.

HEDLEY 1988

Gerry Hedley: Relative humidity and the stress/strain response of canvas paintings: Uniaxial measurements of naturally aged samples. In: Studies in Conservation, Vol. 33, 1988, S. 133-148.

HEDLEY 1993

Gerry Hedley: Some empirical determinations of the strain distribution of stretched canvases. In: Measured Opinions. Collected papers on the conservation of paintings. Hrsg. Caroline Villers. London 1993, S. 21-26.

HEERMANN 1931

P. H. A. Heermann: Mikroskopische und mechanisch-technische Textiluntersuchungen. Berlin, Heidelberg 1931. DOI: 10.1007/978-3-642-99411-1.

HEIBER 1984

Winfried Heiber: Kunstgriffe, Tüfteleien und Hilfsmittel aus Gemälderestaurierungswerkstätten. In: Mitteilungen des Deutschen Restauratorenverbandes DRV 1983/84, S. 36-38.

HEIBER 1996

Winfried Heiber: Die Reißverklebung. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 1, Jg. 10/1996, S. 117-146.

HEIBER 1999

Winfried Heiber: Mehr oder weniger 53 m². Die Konservierung und Restaurierung einer Leinwandtapete in Kalkar. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 2, Jg. 13/1999, S. 357-366.

HEIBER 2003

Winfried Heiber: The thread-by-thread tear mending method. In: Alternatives to lining. The structural treatment of paintings on canvas without lining. 19 September 2003 Conference Preprints. Hrsg. Mary Bustin, Tom Caley. London 2003, S. 35-47.

HEIBER 2006

Winfried Heiber: Der Gleitholzrahmen. Arbeitsspannrahmen mit beweglichen Befestigungspunkten – Die Behandlung von Deformationen in Gemälden mit textilem Bildträger. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 1, Jg. 20/2006, S. 47-62.

HEIBER et al. 2012

Winfried Heiber, Carolyn Tomkiewicz, Mikkel Scharff, Rustin Levenson: Tear mending and other structural treatments of canvas paintings before or instead of lining. In: Conservation of Easel Paintings. Hrsg. Joyce Hill Stoner, Rebecca Rushfield. London 2012, S. 384-396.

HEYDENREICH 1994

Gunnar Heydenreich: Removal of wax-resin lining and colour changes. A case study. In: The Conservator, Vol. 18, 1994, S. 23-27. DOI: 10.1080/01410096.1994.9995081.

HILLYER et al. 2010

Lynda Hillyer, Zenzie Tinker, Poppy Singer: Evaluating the use of adhesives in textile conservation. Part I: An overview and surveys of current use. In: The Conservator, Vol. 21, 1997, S. 37-47. DOI: 10.1080/01410096.1997.9995114.

HOFMANN 2003

Sylvia Hofmann: Konservierung und Restaurierung des Leinwandgemäldes „Ansicht der Jesuitenniederlassung Ebersberg“ zwischen 1710-1733, unbekannter Künstler, Bayrisches Nationalmuseum (Praktischer Teil). Testreihen zur Homogenität, Stabilität und Klebefestigkeit eines Stärkekleister-Störleim-Gemisches in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren des Kleisters (Theoretischer Teil). Diplomarbeit HfBK Dresden 2003.

HOFFMANN 2009

Regina Hoffmann: Untersuchungen zu reduzierten Einzelfadenverklebungen mit Faden- oder Gewebestützen an Rissen im textilen Bildträger. Seminararbeit HfBK Dresden 2009.

HOHLER 1995

R. Hohler: Finite Element Analysis of Canvas Paintings. 3rd Year Report Department of Mechanical Engineering (ICSTM). London 1995.

HORIE 2010

C. V. Horie: Materials for Conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings. Second Edition. Oxford, Burlington 2010.

JEDRZEJEWSKA 1981

Hanna Jędrzejewska: Problems in the Conservation of Textiles. Needle versus Adhesive. In: Preprints ICOM Committee for Conservation 6th Triennial Meeting, Ottawa 21.–25.09.1981. Hrsg. Johan Rudolph Justus van Asperen de Boer. Paris 1981, 81/9/1-10.

JOHLITZ 2008

Michael Gerth Johlitz: Experimentelle Untersuchung und Modellierung von Maßstabeffekten in Klebungen. Dissertation UdS Saarbrücken 2008.

JOHLITZ, DIEBELS 2011

M. Johlitz, S. Diebels: Characterisation of a polymer using biaxial tension tests. Part I: Hyperelasticity. In: Archive of Applied Mechanics, Heft 19, Jg. 81, 2011, S. 1333-1349. DOI: 10.1007/s00419-010-0480-1.

JOHLITZ et al. 2007

M. Johlitz, H. Steeb, S. Diebels, A. Chatzouridou, J. Batal, W. Possart: Experimental and theoretical investigation of nonlinear viscoelastic polyurethane systems. In: Journal of Materials Science, Heft 23, Jg. 42, 2007, S. 9894-9904. DOI: 10.1007/s10853-006-1479-4.

JOHLITZ et al. 2012

M. Johlitz, S. Diebels, W. Possart: Investigation of the thermoviscoelastic material behaviour of adhesive bonds close to the glass transition temperature. In: Archive of Applied Mechanics, Heft 8, Jg. 82, 2012, S. 1089-1102. DOI: 10.1007/s00419-012-0640- 6.

KAPUSCIAK 2007

Maxime Kapusciak: Le traitement des déchirures d'oeuvres peintes sur support toile. Diplomarbeit École nationale supérieure des arts visuels de la cambre Brüssel 2007.

KARAMPATAKI 2002

Efrosini Karampatakis: Synthetisches Gewebe als textiler Bildträger. Diplomarbeit FH Köln 2002.

KEIL 1995

Stefan Keil: Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmeßstreifen. Zwingenberg 1995.

KEIL 2017

Stefan Keil: Dehnungsmessstreifen. Wiesbaden 2017.

KENNEDY et al. 1985

J. F. Kennedy, G. O. Phillips, D. J. Wedlock, P. A. Williams: Cellulose and its Derivates. Chemistry, Biochemistry and Applications. New York et al. 1985.

KEYSERLINGK 1990

Michaela Keyserlingk: The use of adhesives in textile conservation. In: ICOM Committee for Conservation 9th Triennial Meeting, Dresden 26-31 August 1990. Hrsg. Kirsten Grimstad. Paris 1990, S. 307-312.

KLAPP 2002

Oliver Klapp: Mechanisches Verhalten elastomerer Klebeverbindungen. Dissertation Universität Kassel 2002.

KNECHT 2009

Lena Knecht: Jute als textiler Bildträger. Untersuchungen zu deren Alterung. Diplomarbeit ABK Stuttgart 2009.

KOHLER et al. 2018

Kevin Kohler, Karolina Soppa, Thomas Geiger, Franziska Grüneberger: Nanocellulose – Ein möglicher Zuschlagstoff für die Methylcellulose zur Herabsetzung der Viskosität und Klebkraftsteigerung bei der Holzverklebung. Poster Symposium Konsolidieren und Kommunizieren. Materialien und Methoden zur Konsolidierung von Kunst- und Kulturgut im interdisziplinären Dialog. Hildesheim, 25.-27. Januar 2018. DOI: 10.5165/hawk-hhg/365.

KOHLER, SOPPA 2018

Kevin Kohler, Karolina Soppa: Nanocellulose – Ein möglicher Zuschlagstoff für die Methylcellulose zur Herabsetzung der Viskosität und Klebkraftsteigerung bei der Holzverklebung. In: Konsolidieren und Kommunizieren. Materialien und Methoden zur Konsolidierung von Kunst- und Kulturgut im interdisziplinären Dialog. Hrsg. Angela Weyer. Petersberg 2018, S. 169.

KOLLER 1988

Manfred Koller: Das Staffeleibild der Neuzeit. In: Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken, Band 1. Hrsg. H. Kühn, H. Roosen-Runge, R. E. Straub, M. Koller. Stuttgart ²1988, S. 261-434.

KRACHT, KLETSCHKOWSKI 2017

K. Kracht, T. Kletschkowski: From art to engineering. A technical review on the problem of vibrating canvas Part I. Excitation and efforts of vibration reduction. In: Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 1, 2017, S. 163-182. DOI: 10.22190/FUME161010009K

KRARUP ANDERSEN 2013

Cecil Krarup Andersen: Lined Canvas Paintings. Mechanical properties and structural response to fluctuating relative humidity, exemplified by the collection of Danish Golden Age paintings at Statens Museum for Kunst (SMK). PhD Thesis KADK (Royal Danish Academy of Fine Arts / Det Kongelige Danske Kunstakademi) Kopenhagen 2013.

KUDRJAWZEW 1945

E. W. Kudrjawzew: Ausbessern von Rissen und Löchern in der Bildleinwand. In: Die Technik des Gemälderestaurierens. Hrsg. E. W. Kudrjawzew. Leipzig 1945, S. 44-53.

KÜHN 2001

Hermann Kühn: Erhaltung und Pflege von Kunstwerken. Material und Technik, Konservierung und Restaurierung. München ³2001.

KUJAWINSKA et al. 2011

M. Kujawinska, M. Malesa, K. Malowany, A. Piekarczyk, L. Tyminska-Widmer, P. Targowski: Digital image correlation method. A versatile tool for engineering and art structures investigations. In: 22nd Congress of the International Commission for Optics. Light for the Development of the World. Proceedings of SPIE Volume 8011. Hrsg. Ramón Rodríguez-Vera, Rufino Díaz-Urbe. 2011. Beitrag 8011 9R (S. 1-8). DOI: 10.1117/12.915566.

LAASER 2010

Tilly Laaser: Untersuchungen zum Eindringverhalten von Klebemittel-Mischungen bei der Konservierung von Leinwandgemälden am Beispiel von Methylcellulose-Glutinleim-Mischungen. Diplomarbeit ABK Stuttgart 2010.

LANZ 1996

Diane Lanz: Vergleichende Untersuchung nähtechnischer und klebetechnischer Materialien als Sicherungsmöglichkeiten für bemalte Textilien. Diplomarbeit FH Köln 1996.

LÄUCHLI 2004

Matthias Läuchli: Gemäldestrukturen unter permanenter Zugbelastung. Gewichtsbedingte Deformationen an großformatigen, modernen Gemälden. Diplomarbeit HKB Bern 2004.

LECOMPTE et al. 2006

D. Lecompte, A. Smits, S. Bossuyt, H. Sol, J. Vantomme, D. Van Hemelrijck, A. M. Habraken: Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. In: Optics and Lasers in Engineering, Vol. 44, 2006, S. 1132-1145. DOI:10.1016/j.optlaseng.2005.10.004.

LIPINSKI 2010

Wolff-Hartwig Lipinski: Untersuchungen zum feuchtephysikalischen Verhalten von Gemälden auf textilem Bildträger unter biaxialer Dehnung. Weiße Reihe des Instituts für Museumskunde an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart Band 26. München 2010.

LOSCH 1971

M. H. Losch: Bestimmung der mechanischen Konstanten für einen zweidimensionalen, nichtlinearen, anisotropen, elastischen Stoff am Beispiel beschichteter Gewebe. Dissertation Universität Stuttgart 1971.

MACKEN, SMITH 2019

Aisling Macken, Margaret J. Smith: Solvent Vapour Use – The Unintended Consequences in Textile Conservation. In: *Studies in Conservation*, Vol. 64, 2019, S. 352-362.
DOI: 10.1080/00393630.2018.1544347.

MALESA et al. 2011

Marcin Malesa, Krzysztof Malowany, Ludmiła Tyimińska-Widmer, Ewa A. Kwiatkowska, Małgorzata Kujawińska, Bogumiła J. Rouba, Piotr Targowski: Application of Digital Image Correlation (DIC) for tracking deformations of paintings on canvas. In: *O3A Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III. Proceedings of SPIE Volume 8084*. Hrsg. Luca Pezzati, Renzo Salimbeni. Bellingham. Washington 2011, Beitrag 8084 0L (S. 1-8). DOI: 10.1117/12.889452.

MALOWANY et al. 2014

Krzysztof Malowany, Ludmiła Tyimińska-Widmer, Marcin Malesa, Małgorzata Kujawińska, Piotr Targowski, Bogumiła J. Rouba: Application of 3D digital image correlation to track displacements and strains of canvas paintings exposed to relative humidity changes. In: *Applied Optics*, Vol. 53, No. 9, 2014, S. 1739-1749. DOI: 10.1364/AO.53.001739.

MASSA et al. 1991

V. Massa, G. Scicolone, E. Cozzi: Ein neuer Polyurethanklebstoff für die Textilrestaurierung. In: *Restauro*. Heft 3, 1991, S. 173-178.

MCGLINCHEY et al. 2011

Christopher McGlinchey, Rebecca Ploeger, Annalisa Colombo, Roberto Simonutti, Michael Palmer, Oscar Chiantore, Robert Proctor, Bertrand Lavédrine, E. René de la Rie: Lining and Consolidation Adhesives. Some New Developments and Areas of Future Research. Paper CCI Symposium Adhesives and Consolidants for Conservation: Research and Applications. Ottawa, 17.-21. Oktober 2011. Hrsg. Canadian Conservation Institute. Ottawa 2011.

MECKLENBURG, TUMOSA 1991 (a)

Marion F. Mecklenburg, Charles S. Tumosa: An introduction into the mechanical behavior of paintings under rapid loading conditions. In: *Art in Transit. Studies in the Transport of Paintings*. Hrsg. Marion F. Mecklenburg. Washington 1991, S. 137-171.

MECKLENBURG, TUMOSA 1991 (b)

Marion F. Mecklenburg, Charles S. Tumosa: Mechanical behavior of paintings subjected to changes in temperature and relative humidity. In: *Art in Transit. Studies in the Transport of Paintings*. Hrsg. Marion F. Mecklenburg. Washington 1991, S. 173-216.

MECKLENBURG et al. 2012

M. F. Mecklenburg, L. Fuster-López, S. Ottolini: A look at the structural requirements of consolidation adhesives for easel paintings. In: *Adhesives and Consolidants in Painting Conservation*. Hrsg. A. Barros D'sa, L. Bone, A. Gent, R. Clariocates. London 2012, S. 7-23.

MELIÀ-ANGULO et al. 2017

A. Melià-Angulo, L. Fuster-López, A. Vicente-Escuder: Study of the mechanical properties of selected animal glues and their implication when designing conservation strategies. Poster CeROArt Association, 2017. DOI: 10.4000/ceroart.5152.

MERLE 2016

Eva Merle: Faserbreite mit verschiedenen Bindemitteln zur Schließung von Fehlstellen in textilen Bildträgern. Masterthesis HAWK (Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst) Hildesheim 2016.

MICHALSKI 1991

Stefan Michalski: Paintings – their response to temperature, relative humidity, shock and vibration. In: *Art in Transit. Studies in the Transport of Paintings*. Hrsg. Marion F. Mecklenburg. Washington 1991, S. 223-251.

MILLER, ROOT 1991

Bruce F. Miller, William Root: Long-term storage of wheat starch paste. In: *Studies in Conservation*, Vol. 36, No. 2, 1991, S. 82-92.

NÄGLER 2005

Christina Nägler: Risse im Polyamidgewebe der Farbraumkörper von Gotthard Graubner. Möglichkeiten und Grenzen ihrer Verklebung. Diplomarbeit FH Köln 2005.

NICOLAUS 1998

Knut Nicolaus: *Handbuch der Gemälderestaurierung*. Köln 1998.

ORIOLA et al. 2018

M. Oriola, A. Nualart-Torroja, C. Ruiz-Recasens, G. Campo-Francés: Canvas consolidation survey and treatment requirements for the NANORESTART project. In: *Conserving Cultural Heritage: Proceedings of the 3rd International Congress on Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage (Technoheritage 2017)*. Cádiz, 21.-24. Mai 2017. Hrsg. María Jesús Mosquera, M.L. Almoraima Gil. Leiden 2017, S. 37-39.

ORIOLA-FOLCH et al. 2020

M. Oriola-Folch, G. Campo-Francés, A. Nualart-Torroja, C. Ruiz-Recasens, I. Bautista-Morenilla: Novel nanomaterials to stabilise the canvas support of paintings assessed from a conservator's point of view. In: *Heritage Science*, Vol. 8 (23), S. 1-12. DOI: 10.1186/s40494-020-00367-2.

OSMOND 1987

G. Osmond: A comparison of different adhesives and techniques for mending tears in paintings on canvas supports. Canberra 1987.

PACKHAM 2005

D. E. Packham: *Handbook of Adhesion*. Second Edition. Wiltshire 2005.

PAN et al. 2008:

Bing Pan, Huimin Xie, Zhaoyang Wang, Kemao Qian, Zhiyong Wang: Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. In: Optics Express, Vol. 16, No. 10, 2008, S. 7037-7048. DOI:10.1364/OE.16.007037.

PATTERSON et al. 2006

Eann A. Patterson, Erwin Hack, Philippe Brailly, Richard L. Burguete, Qasim Saleem, Thorsten Siebert, Rachel A. Tomlinson, Maurice P. Whelan: Calibration and evaluation of optical systems for full-field strain measurement. In: Optics and Lasers in Engineering, Vol. 45, 2007, S. 550-564. DOI:10.1016/j.optlaseng.2006.08.012.

PAHL et al. 1995

Manfred Pahl, Wolfgang Gleißle, Hans-Martin Laun: Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere. Düsseldorf 1995.

PENAVA et al. 2016

Željko Penava, Diana Šimić Penava, Marijana Tkalec: Experimental Analysis of the Tensile Properties of Painting Canvas. In: Autex Research Journal, 2016, S. 182-195. DOI: 10.1515/aut-2015-0023.

PLOEGER et al. 2015

Rebecca Ploeger, Chris W. McGlinchey, E. René de la Rie: Original and reformulated Beva 371. Composition and assessment as a consolidant for painted surfaces. In: Studies in Conservation, Vol. 60, No. 4, 2015, S. 217-226. DOI: 10.1179/2047058414Y.0000000132.

PLÖTZ 2002

Sandra Plötz: Klebstoffe für die Verklebung von Rissen in Polyestergeweben. Seminararbeit HfBK Dresden 2002.

PLÖTZ 2003

Sandra Plötz: Die Verklebung von Rissen in einem mit Wachs getränktem Gewebe (Theoretischer Teil). Diplomarbeit HfBK Dresden 2003.

PRETZEL 1997

Boris Pretzel: Evaluating the Use of Adhesives in Textile Conservation. Part 2: Tests and Evaluation Matrix. In: The Conservator, Vol. 21, 1997, S. 48–58.

PRZYBYLO 2006

Maria Przybylo: Langzeitlöslichkeit von Störleim. Tatsache oder Märchen? In: VDR-Beiträge 2006, S. 117-123.

REUBER 2010

Lena Reuber: Klebstoffe für die Rissverklebung an Leinengeweben. Kölner Beiträge zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut, Digitale Edition Band 1. Köln 2010. URN: urn:nbn:de:101:1-20100317282.

REUMANN 2000

Ralf-Dieter Reumann: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Berlin et al. 2000.

RIPPLINGER 2007

Cornelia Ripplinger: Stärkekleister. Einfluss verschiedener Zubereitungsmethoden und Aufbewahrungsbedingungen auf deren Haltbarkeit. Diplomarbeit HAWK Hildesheim 2007.

RIZZO, BURNSTOCK 2003

Adriana Rizzo, Aviva Burnstock: A Review of the Effectiveness of the Deacidification of Linen, Cotton and Flax Canvas after Seventeen Years of Natural Ageing. In: Alternatives to lining. The structural treatment of paintings on canvas without lining. 19 September 2003 Conference Preprints. Hrsg. Mary Bustin, Tom Caley. London 2003, S. 49-54.

ROGALA et al. 2019

Dawn V. Rogala, Paula T. DePriest, A. Elena Charola, Robert J. Koestler: The Mechanics of Art Materials and Its Future in Heritage Science. Smithsonian Contributions to Museum Conservation No. 10. Washington 2019.

ROOS et al. 2017

Eberhard Roos, Karl Maile, Michael Seidenfus: Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung. Berlin 2017.

RÖSLER et al. 2012

Joachim Rösler, Harald Harders, Martin Bäker: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Wiesbaden 2012.

ROUBA 1993

Bogumila J. Rouba: Die Leinwandstrukturanalyse und ihre Anwendung für die Gemäldekonservierung. In: Restauratorenblätter Band 13, Malerei und Textil. Wien 1993, S. 79-89.

ROUBA, TYMINSKA 2004

Bogumila J. Rouba, Ludmila Tyminska: Paper in Textile? Investigation into a New Method for the Structural Conservation of Paintings on Canvas Supports with Fibrous Pulp. In: VDR Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut, 2004, S. 20-31.

ROUX 1993

Anne-Sophie Roux: Traitement de déchirures de supports de toile. Diplomarbeit École Supérieure des Arts appliqués Bern 1993.

RUST 2009

Wilhelm Rust: Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. Kontakt, Geometrie, Material. Wiesbaden 2009.

SACHS, HEDDERICH 2006

Lothar Sachs, Jürgen Hedderich: Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. Berlin, Heidelberg 2006.

SACK 1989

Ulrike Sack: Kombinationsmöglichkeiten von Reißbehandlung und Doublierung an Leinwandbildern. Diplomarbeit HfBK Dresden 1989.

SAKALYTE et al. 2017

Viktorija Sakalyte, Tom Cassidy, Amy Holroyd: Designing an educational tool to revitalise woven textile mending. In: Research Journal of Textile and Apparel, Vol. 21, No. 4, 2017, S. 242-262.

DOI: 10.1108/RJTA-06-2017-0027.

SANDNER 1990

Ingo Sandner: The Treatment of Cracks in Canvas Paintings with Synthetic Adhesives. Procedures and Possible Combinations with the Lining Process. In: ICOM Committee for Conservation 9th Triennial Meeting, Dresden 26-31 August 1990. Hrsg. Kirsten Grimstad. Paris 1990, S. 133-138.

SARODNICK 1999

Nadja Sarodnick: Ein nützliches Werkzeug zur Rissverkebung. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 1, Jg. 13/1999, S. 150-153.

SAUER 1958

E. Sauer: Chemie und Fabrikation der tierischen Leime und der Gelatine. Berlin, Heidelberg 1958.

SCHÄFER 2010

Linda Schäfer: „Flicken“ für die Rissbehandlung am textilen Bildträger. Vergleichende Untersuchungen zu Materialien und Applikationstechniken. Diplomarbeit FH Köln 2010.

SCHEEL 1992

Elisabeth Scheel: Der textile Bildträger. In: Restauratorenblätter Band 13, Malerei und Textil. Wien 1992, S. 69-77.

SCHEFFER 2016

Tobias Scheffer: Charakterisierung des nichtlinear-viskoelastischen Materialverhaltens gefüllter Elastomere. Dissertation UdS Saarbrücken 2016.

SCHLIEFER 1975

Karl Schliefer: Cellulosefasern, natürliche. In: Ullmanns Enzyklopädie der Technischen Chemie. Band 9: Butadien bis Cytostatika. Weinheim ⁴1975. S. 247-253.

SCHLIMMER, BARTHEL 2011 (a)

M. Schlimmer, C. Barthel: Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen. Teil I: Systematische Ermittlung von Kennwerten. In: Adhäsion Kleben und Dichten, Heft 3, 2011, S. 28-38.

SCHLIMMER, BARTHEL 2011 (b)

M. Schlimmer, C. Barthel: Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen. Teil II: Fließbedingungen in Theorie und Praxis. In: Adhäsion Kleben und Dichten, Heft 4, 2011, S. 34-39.

SCHMITT 2011

Linda Schmitt: Zerbrochenes Wachs. Untersuchung von Fügetechniken am Beispiel der zeitgenössischen Wachsplastik Chevalier d'Eon von Milivoj Bijelic. Diplomarbeit FH Köln 2011.

SCHRAMM, HERING 1995

Hans-Peter Schramm, Bernd Hering: Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung. Bücherei des Restaurators Band 1. Weinsberg ²1995.

SCHREIER, SUTTON 2002

Hubert W. Schreier, Michael A. Sutton: Systematic Errors in Digital Image Correlation Due to Under-matched Subset Shape Functions. In: *Experimental Mechanics*, Vol. 42, 2002, S. 303-310.
DOI: 10.1007/BF02410987.

SCHUBERT, HARRISON 2016

Gerlind Schubert, Philip Harrison: Equi-biaxial tension tests on magneto-rheological elastomers. In: *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, 2016, S. 1-13. DOI: 10.1088/0964-1726/25/1/015015.

SCHWÄGERL 2015

Ilona Schwägerl: „Verklebt und zugenäht“ – Die Flügel der Teinacher Lehrtafel und Möglichkeiten zur Risschließung an beidseitig bemalten Leinwandgemälden. Masterthesis ABK Stuttgart 2015.

SCHWARZL 1990

Friedrich Rudolf Schwarzl: Polymermechanik. Struktur und mechanisches Verhalten von Polymeren. Berlin et al. 1990.

SEIBERT 2017

Henning Seibert: Multiaxiale, thermomechanische Charakterisierung und Modellierung poröser Elastomere. Dissertation UdS Saarbrücken 2017.

SEIBERT et al. 2014

Henning Seibert, Tobias Scheffer, Stefan Diebels: Biaxial testing of elastomers – Experimental setup, measurement and experimental optimisation of specimen's shape. In: *Technische Mechanik*, No. 34/2, 2014, S. 72-89.

SINDLINGER-MAUSHARDT, PETERSEN 2007

Kathrin Sindlinger-Maushardt, Karin Petersen: Methylcellulose als Klebemittel für die Malschichtbefestigung auf Leinwandbildern – Untersuchungen zur Klebkraft und zur mikrobiellen Resistenz. In: *ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, Heft 2, Jahrgang 21/2007, S. 371-382.

SOPPA 2018

Karolina Soppa: Die Klebung von Malschicht und textilem Bildträger. Dissertation ABK Stuttgart 2018.

SOPPA et al. 2018

K. Soppa, A. Hoess, M. Läuchli, S. Meyer, T. Geiger, N. Scherrer: Can cellulose beads save „The Circling of the Planets“? Paper Conference on Modern Oil Paints. Amsterdam, 23.-25. Mai 2018.
DOI: 10.13140/RG.2.2.33205.37607.

SOPPA et al. 2019

Karolina Soppa, Kevin Kohler, Elisa Carl, Electra d'Emilio, Thomas Geiger: Strengthen Methyl Cellulose with Nanocellulose for High Relative Humidity. In: *AIC's 47th Annual Meeting, AIC Wooden Artifacts Group Postprints*. Hrsg. American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. New England 2019, S. 9-17.

SPEICHER 2009

Katrin Speicher: Konstruktion, Aufbau und Steuerung einer Biaxialanlage. Studienarbeit UdS Saarbrücken 2009.

SPEICHER 2010

Katrin Speicher: Charakterisierung von Elastomeren mit dem Biaxialversuch. Diplomarbeit UdS Saarbrücken 2010.

SPRINGOB 2001

Caroline Springob: Stärkekleister als Verdickungsmittel von Störleim zur Malschichtfestigung. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 1, Jg. 15/2001, S. 111-132.

STROBL 2007

Gert Strobl: The Physics of Polymers. Concepts for Understanding Their Structures and Behaviour. Berlin, Heidelberg ³2007.

SUTTON et al. 2000

M. A. Sutton, S. McNeill, J. Helm, Y. Chao: Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision. In: Photomechanics. Hrsg. Pramod K. Rastogi. Berlin, Heidelberg 2000, S. 323-372. DOI: 10.1007/3-540-48800-6.

SUTTON et al. 2008

M. A. Sutton, J. H. Yan, V. Tiwari, H. W. Schreier, J. J. Orteu: The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. In: Optics and Lasers in Engineering, Vol. 46, 2008, S. 746-757. DOI:10.1016/j.optlaseng.2008.05.005.

SUTTON et al. 2009

Michael A. Sutton, Jean-José Orteu, Hubert W. Schreier: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications. New York 2009.

TEGGE 2004

Günther Tegge: Stärke und Stärkederivate. ³2004 Hamburg.

TEIXEIRA 2016

Andréa Carolina Teixeira: Canvas support impregnation materials and techniques. A study of Portuguese painting and its conservation issues. In: CeROArt, Vol. 5, 2016, S. 1-16. DOI: 10.4000/ceroart.4918.

TÍMÁR-BALÁZSY, EASTOP 1998

Ágnes Tímár-Balázsy, Dinah Eastop: Chemical Principles of Textile Conservation. Oxford et al. 1998.

TÍMÁR-BALÁZSY 1999

Ágnes Tímár-Balázsy: Drying behaviour of fibres. In: ICOM-CC Preprints, 12th Triennial Meeting, Vol. II, Lyon 1999. Hrsg. ICOM Committee for Conservation. Paris 1999, S. 661-666.

TOBOLSKY 1967

A. V. Tobolsky: Mechanische Eigenschaften und Struktur von Polymeren. Stuttgart 1967.

TROSBACH 2002

Gisela Trosbach: Physikalische Untersuchungen an historischen Tapisserien. Verformungsverhalten und Schräghängung. Diplomarbeit TU München 2002.

ULMANN 1970

Max Ulmann: Handbuch der Stärke in Einzeldarstellungen. Band V: Anwendung der Stärke und der Stärkederivate. Berlin, Hamburg 1970.

VEIGEL 2008

Stefan Veigel: Verstärkung von Klebstoffen mit Cellulosefibrillen und Cellulosefasern. Masterthesis Universität für Bodenkultur Wien 2008.

VITI, HAUDEK 1981

Erna Viti, Dr. Heinz Werner Haudek: Textile Fasern und Flächen. Textile Materialkunde. Band I. Wien 1981.

VOGEL 2010

Hanna Vogel: Modifizierte Weizenstärke zur Rissverklebung an textilen Bildträgern. Diplomarbeit FH Köln 2010.

VON FALKAI 1981

Béla von Falkai: Synthesefasern. Grundlagen, Technologie, Verarbeitung und Anwendung. Dormagen 1981.

VON DERSCHAU, UNGER 1998

Dorrit von Derschau, Joachim Unger: Epoxidharz-Restaurierungen. Zum Problem der Entfernung. In: Restauero, Heft 7, 1998, S. 486-493.

VON REDEN 2018

Anna von Reden: Studien zum hygri-schen Verhalten gealterter Leinwände. Dissertation HfBK Dresden 2018.

WALTRINY 2003

Isabella Waltriny: Stärkeether in der Restaurierung. In: Restauero, Heft 8, 2003, S. 571-574.

WANG et al. 2007

Z. Y. Wang, H. Q. Li, J. W. Tong, J. T. Ruan: Statistical Analysis of the Effect of Intensity Pattern Noise on the Displacement Measurement Precision of Digital Image Correlation Using Self-correlated Images. In: Experimental Mechanics, Vol. 47, 2007, S. 701-707. DOI: 10.1007/s11340-006-9005-9

WATERS 2006

Linda Waters: Tear Repair of Cotton Canvas. A Variation of the Heiber Technique. In: WAAC Western Association for Art Conservation Newsletter, Vol. 28, No. 2, 2006, S. 10-11.

WEDDINGEN 1979

Erasmus Weddingen: Zur Fragwürdigkeit des Doublierens. In: Mitteilungen des Deutschen Restauratorenverbandes DRV 1979, S. 30-34.

WEHLTE 2005

Kurt Wehlte: Werkstoffe und Techniken der Malerei. Stuttgart 2005.

WEILER 2009

Katharina Weiler: Alternative Klebstoffe für die Nachleimung degradierter und gewässerter Papiere. Diplomarbeit FH Köln 2009.

WELLMER, WELLMER 2006

D. Wellmer, E. Wellmer: Entwicklung und Konstruktion eines Streckrahmens zur Behandlung klaffender Leinwandrisse. Behandlungsmöglichkeiten eines typischen Schadenbildes an Leinwandgemälden. In: *Restauro*, Heft 8, 2006, S. 520-524.

WERANECK 2018

Klaus Weraneck: Strukturüberwachung mittels eingebetteter Fibre-Bragg-Gitter. Dissertation TU München 2018.

WESSEL 2000

Birgit Wessel: Baumwollgewebe als Bildträger. Diplomarbeit FH Köln 2000.

WILKER 2004

Holger Wilker: Weibull-Statistik in der Praxis. Norderstedt 2004.

WILKS 1987

Helen Wilks: Adhesives and Coatings. Science for Conservators, Book 3. Conservation Science Teaching Series. London 1987.

WORCH 2002

Maria Theresia Worch: Wenn Nähen unmöglich wird (...). In: *Historische Textilien. Beiträge zur Erhaltung und Erforschung. Veröffentlichung des Instituts für Kunsttechnik und Konservierung im Germanischen Nationalmuseum Nr. 6.* Hrsg. Sabine Martius, Sibylle Ruß. Nürnberg 2002, S. 67-76.

WÜLFERT 1999

Stefan Wülfert: Der Blick ins Bild. Lichtmikroskopische Methoden zur Untersuchung von Bildaufbau, Fasern und Pigmenten. Bücherei des Restaurators Band 4. Ravensburg 1999.

WUNTSCHKE 1997

Sabine Wuntschke: Ein vernetztes Klebstoffsystem zur Rißverklebung (Zusatzthema). Diplomarbeit Hochschule für angewandte Kunst Wien 1997.

YAOFENG, PANG 2007

Sun Yaofeng, John H. L. Pang: Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images. In: *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 45, 2007, S. 967-974.
DOI: 10.1016/j.optlaseng.2007.01.012

YONEYAMA 2016

Satoru Yoneyama: Basic principle of digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement. In: *Advanced Composite Materials*, 2016, S. 1-19. DOI: 10.1080/09243046.2015.1129681.

YOUNG 1996 (a)

Christina R. T. Young: Biaxial Properties of Sized Cotton-Duck. In: ICOM-CC Preprints, 11th Triennial Meeting Edinburgh 1-6 September 1996. Volume I. Hrsg. J. Bridgland. London 1996, S. 322-331.

YOUNG 1996 (b)

Christina R. T. Young: Measurement of the Biaxial Tensile Properties of Paintings on Canvas. PhD Thesis University of London 1996.

YOUNG 1999

C. Young: Measurement of the biaxial properties of nineteenth century canvas paintings using electronic speckle pattern interferometry. In: Optics and Lasers in Engineering, Heft 31/2, 1999, S. 163-170.

YOUNG 2003

Christina Young: The mechanical requirements of tear mends. In: Alternatives to lining. Hrsg. Mary Bustin, Tom Caley. London 2003, S. 55-58.

YOUNG 2012

Christina Young: The glass transition temperature of adhesives. Preliminary guidelines for canvas painting treatments. In: Adhesives and Consolidants in Painting Conservation. Hrsg. Angelina Barros D'Sa, Lizzie Bone, Rhiannon Clarricoates, Alexandra Gent. London 2012, S. 24-31.

YOUNG, HIBBERD 1999

C. R. T. Young, R. D. Hibberd: Biaxial tensile testing of paintings on canvas. In: Studies in Conservation, Vol. 44, 1999, S. 129-141.

YOUNG, HIBBERD 2000

Christina Young, Roger Hibberd: The Role of Canvas Attachments in the Strain Distribution and Degradation of Easel Paintings. In: Tradition and Innovation. Advances in Conservation. IIC Contributions to the Melbourne Congress 10.-14.10.2000. Hrsg. Ahshok Roy, Perry Smith. London 2000, S. 212-220.

YOUNG, JARDINE 2012

Christina Young, Suzanne Jarrdine: Fabrics for the twenty-first century. As artist canvas and for the structural reinforcement of easel paintings on canvas. In: Studies in Conservation, Vol. 57, No. 4, S. 237-253. DOI: 10.1179/2047058412Y.0000000007.

ZENKER 1998

Evelyn Zenker: Über Kett- und Schußfäden. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 2, Jahrgang 12/1998, S. 338-350.

ZIJDERVELD 1973

A.H. Zijdeveld: Stärke und Derivate. In: Produkte der Papierchemie. Eigenschaften. Frankfurt a. M. 1973, S. 40-53.

ZUGENMAIER 2008

Peter Zugenmaier: Crystalline Cellulose and Derivates. Characterization and Structures. Berlin, Heidelberg 2008.

ZUMBÜHL, SCHERRER 2003

Stefan Zumbühl, Nadine Scherrer: Aktive Passivierung der Degradation cellulotischer Strukturgefüge. In: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 1, Jahrgang 17/2003, S. 387-396.

Normen

DIN EN ISO 139

Textilien – Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung. Oktober 2011.

DIN EN ISO 13934-1

Zugeigenschaften von textilen Flächengebilden. Teil 1: Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraft-Dehnung mit dem Streifen-Zugversuch. Oktober 2012.

DIN EN ISO 13935-1

Zugversuche an Nähten in textilen Flächengebilden und Konfektionstextilien. Teil 1: Bestimmung der Höchstzugkraft von Nähten mit dem Streifen-Zugversuch. April 1999.

DIN EN ISO 2062

Textilien – Garne von Aufmachungseinheiten. Bestimmung der Höchstzugkraft und der Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten unter Verwendung eines Prüfgeräts mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit. April 2010.

(JIS) MSAJ / M-02 1995

Testing Method for Elastic Constants of Membrane Materials. Standard of Membrane Structures Association of Japan 1995.

Anhang

A	Versuchsdaten	217
A.1	Uniaxiale Kurzzeitversuche	217
A.1.1	Reproduktion erster Zugversuche	217
A.1.2	Gewebebehandlung und -beschichtung (Vorversuch)	269
A.1.3	Verklebungen in un- und beschichtetem Gewebe	273
A.1.4	Fadenbrücken	293
A.1.5	Erweiterte Klebstoffauswahl	303
A.1.6	Einspannlänge (Exkurs)	327
A.1.7	Ratenabhängigkeit (Vorversuch)	333
A.1.8	Zyklische Belastung (Vorversuch)	339
A.1.9	Mischbetrachtung intakte und verklebte Fäden (Exkurs)	353
A.2	Biaxiale Kurzzeitversuche	357
A.2.1	Reproduktion erster Zugversuche	357
A.2.2	Mischbetrachtung intakte und verklebte Fäden (Vorversuch)	379
A.2.3	Verklebungen in un- und beschichtetem Gewebe (Vorversuch) ...	381
A.2.4	Dehnungsevaluierung (Exkurs)	395
A.3	Biaxiale Langzeitversuche	399
A.3.1	Dokumentation der Einzelversuche	401
A.3.2	Einzelgruppenvergleich	410
A.3.3	Gesamtvergleich	414
B	Probenprotokolle	417
B.1	Probenherstellung	417

B.2	Verklebungsdurchführung	425
B.2.1	Stoß-auf-Stoß-Verklebung (SAS)	428
B.2.2	Stoß-auf-Stoß-Verklebung mit Fadenbrücken (SAS+B)	429
B.2.3	Überlappende Verklebung (Ü)	430
B.2.4	Überlappende Verklebung mit vermengten Fadenenden (Ü+V) ...	431
B.2.5	Proben mit Beschichtung	432
B.2.6	Schmelzklebstoffe	434
B.3	Rezepturen und Anleitungen	435
B.4	Gewebebehandlung	437
B.5	Langzeitaufbau	445
C	Materialverzeichnis	451
C.1	Gewebecharakterisierung	451
C.1.1	Pattina L 13 T. E. Sironi	451
C.1.2	Claessens Canvas 070	452
C.1.3	Claessens Canvas 170	453
C.1.4	Claessens Canvas 70	454
C.2	Klebstoffmaterialien	455
C.3	Geräte und Hilfsmittel	459
D	Abkürzungsverzeichnis	463
E	Abbildungsnachweise	467

A Versuchsdaten

A.1 Uniaxiale Kurzzeitversuche

A.1.1 Reproduktion erster Zugversuche

Probekörper			
Gewebe		Pattina L 13 (puro lino), Tessitura Enrico Sironi	
Probekörpertyp		Unbeschichtete Referenz und verklebte Proben (Schussrichtung)	
Klebstoffauswahl	1.	Lineco	
	2.	Lineco + Methocel A4C 5 % (9:1)	
	3.	Mowilith DHS S1	
	4.	Mowilith DHS S1 + Methocel A4C 5 % (9:1)	
	5.	Störleim 20 % + Weizenstärkekleister nativ 13 % (1:1)	
	6.	Störleim 20 % + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1)	
	7.	Störleim 25 % + Arbocel BWW 40 (20:1)	
Verklebungstechniken	a.	Stoß-auf-Stoß (SAS)	
	b.	Stoß-auf-Stoß mit Fadenbrücken (SAS+B 20 mm)	
	c.	Einfach überlappend (Ü)	
	d.	Überlappend mit vermengten Fadenenden (Ü+V)	
Probengeometrie		Gewebestreifen (L: 200 mm; B: 12 Fäden)	
Prüfbedingungen			
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.	
Prüfgerät		Zwick Universalprüfmaschine, Typ Z2.5/TN1S	
Prüfsoftware		TestXpert I V12.1	
Kraftaufnehmer		100 N / 2 kN	
Einspannlänge		100 mm	
Vorkraft und -geschwindigkeit		10 cN mit 5 mm/min	
Prüfgeschwindigkeit		20 mm/min	
Brucherkennung		Kraftabschaltsschwelle 50 % Fmax	
Spannungsberechnung		Nominalspannung: Fmax bezogen auf durchschnittliche, vereinfacht approximierte Probenquerschnittsfläche (B: 12,5 mm; D: 0,48 mm)	
Dehnungsermittlung		Via Längenänderung (Traversenweg)	
Versuchsstatistik		Ergebnisübersicht	
MW	Arithmetischer Mittelwert	L0	Einspannlänge nach Vorkraft [mm]
S	Standardabweichung	Fmax	Höchstzugkraft [N]
VK	Variationskoeffizient	σ Fmax	Zugfestigkeit [N/mm²]
Med	Median	ε Fmax	Höchstzugkraftdehnung [%]
Min	Minimum	F / ε Bruch	Kraft / Dehnung bei Brucherkennung [N] / [%]
Max	Maximum	F 2% ε	Kraft bei 2 % Dehnung [N]

Referenz / intakte Nullprobe Gewebe

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,21	275,64	45,94	4,06	187,92	4,34	67,79
	S	0,05	17,45	2,91	0,18	42,54	0,18	7,52
	VK	0,05	6,33	6,33	4,51	22,64	4,09	11,1
	Med	100,22	279,14	46,53	4,09	202,12	4,31	68,04
	Min	100,13	235,39	39,23	3,51	115,2	4,05	50,17
	Max	100,36	300,34	50,06	4,37	262,86	4,77	82,18
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,36	263,95	43,99	5,01	185,09	5,36	29,2
	S	0,19	24,07	4,01	0,21	50,34	0,23	6,45
	VK	0,19	9,12	9,12	4,1	27,2	4,32	22,08
	Med	100,32	262,82	43,8	4,99	180,68	5,42	27,03
	Min	100,14	211,33	35,22	4,65	111,12	4,92	21,22
	Max	101,02	297,34	49,56	5,57	281,97	5,78	40,69
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 3	MW	100,23	264,85	37,02	5,16	184,48	5,49	26,95
	S	0,04	18,11	2,53	0,24	36,48	0,2	2,8
	VK	0,04	6,84	6,84	4,59	19,78	3,66	10,39
	Med	100,25	259,47	36,27	5,09	185,23	5,44	26,96
	Min	100,13	245,27	34,28	4,87	126,94	5,16	22,77
	Max	100,27	301,27	42,11	5,56	233,79	5,75	32,41
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 4	MW	100,19	263,6	47,93	5,29	203,03	5,58	22,26
	S	0,07	19,68	3,58	0,23	36,53	0,17	2,01
	VK	0,07	7,47	7,46	4,36	17,99	2,99	9,05
	Med	100,17	264,19	48,04	5,37	193,69	5,55	22,06
	Min	100,11	236,61	43,02	4,87	159,26	5,3	20,1
	Max	100,33	300,27	54,59	5,51	269,64	5,83	26,07
Versuch	n = 60	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,26	267,94	44,13	4,76	188,92	5,08	40,53
	S	0,14	20,59	4,79	0,55	42,99	0,57	20,41
	VK	0,14	7,69	10,86	11,54	22,75	11,13	50,37
	Med	100,25	267,67	45,12	4,95	188,02	5,31	28
	Min	100,11	211,33	34,28	3,51	111,12	4,05	20,1
	Max	101,02	301,27	54,59	5,57	281,97	5,83	82,18

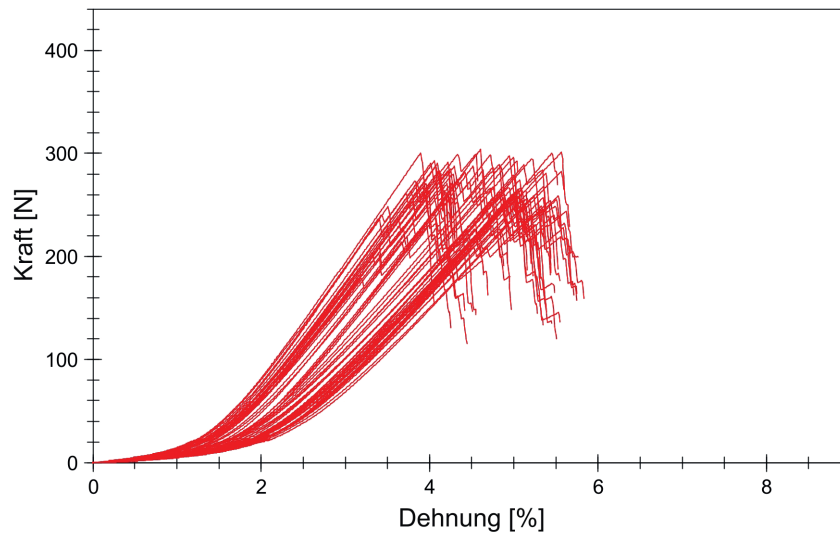
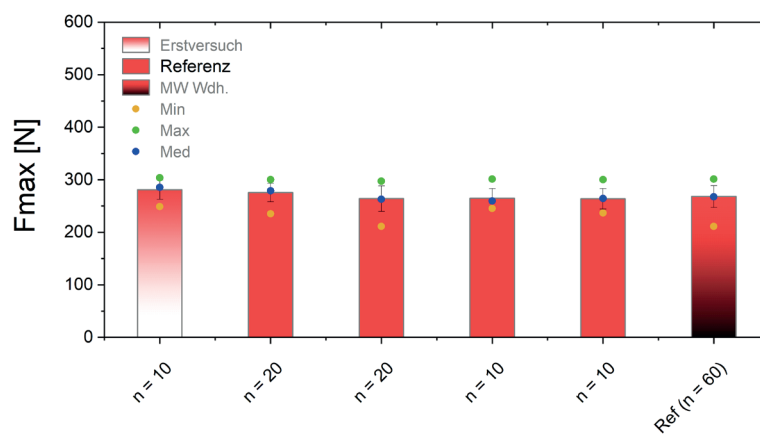
Abb. 01: Kraft-Dehnungs-Diagramm (K-D-Diagramm) der **Referenzproben**.

Abb. 02: Durchschnittliche Höchstzugkraft der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche.

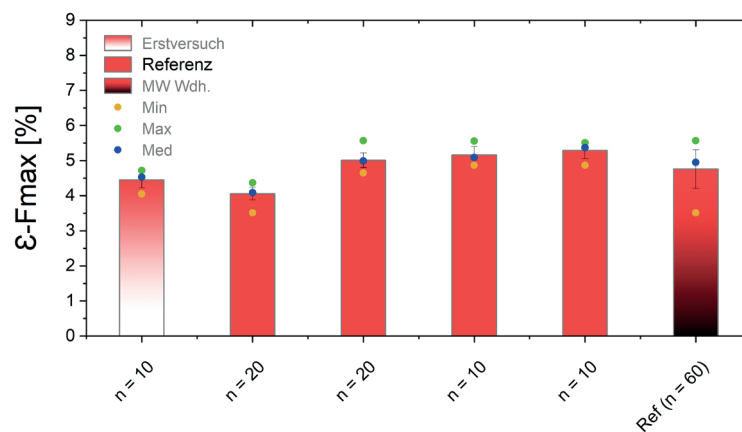


Abb. 03: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche.

1a. Lineco (SAS)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,2	22,21	3,7	1,51	18,86	1,59	-
	S	0,1	4,16	0,69	0,14	3,53	0,15	-
	VK	0,09	18,75	18,76	8,95	18,74	9,38	-
	Med	100,18	22,11	3,69	1,52	18,9	1,59	-
	Min	100,06	12,66	2,11	1,11	12,14	1,12	-
	Max	100,47	28,46	4,74	1,71	24,92	1,81	-
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,12	33,56	5,59	2,13	26,56	2,26	28,58
	S	0,06	3,06	0,51	0,16	5,5	0,17	4,19
	VK	0,06	9,1	9,09	7,67	20,7	7,63	14,67
	Med	100,12	33,41	5,57	2,1	26,85	2,25	28,96
	Min	100,04	28,5	4,75	1,91	18,88	2,07	21,47
	Max	100,24	37,83	6,3	2,37	35,59	2,54	35,89
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 3	MW	100,12	20,92	3,49	2,02	18,07	2,11	19,32
	S	0,03	3,82	0,64	0,19	2,96	0,18	1,83
	VK	0,03	18,27	18,27	9,17	16,38	8,73	9,46
	Med	100,12	20,02	3,34	2,05	18,26	2,15	20,01
	Min	100,09	15,17	2,53	1,74	12,02	1,8	15,27
	Max	100,18	27,15	4,53	2,22	23,22	2,35	20,36
Versuch	n = 40	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,16	24,73	4,12	1,79	20,59	1,89	24,77
	S	0,08	6,4	1,07	0,33	5,23	0,35	5,76
	VK	0,08	25,87	25,88	18,2	25,43	18,45	23,27
	Med	100,14	23,34	3,89	1,73	19,36	1,81	25,03
	Min	100,04	12,66	2,11	1,11	12,02	1,12	15,27
	Max	100,47	37,83	6,3	2,37	35,59	2,54	35,89

1b. Lineco (SAS+B)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,13	54,92	9,15	2,21	29,76	2,62	47,57
	S	0,1	6,11	1,02	0,15	4,74	0,26	4,44
	VK	0,1	11,12	11,12	6,65	15,94	9,88	9,33
	Med	100,11	56,7	9,45	2,18	28,57	2,72	47,94
	Min	100,05	41,41	6,9	1,96	24,1	2,13	37,2
	Max	100,45	66,12	11,02	2,46	40,43	3,15	56,49
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,15	64,06	10,68	2,79	35,86	3,25	33,42
	S	0,07	6	1	0,24	8,58	0,23	5,12
	VK	0,07	9,37	9,39	8,72	23,93	7,06	15,32
	Med	100,14	63,94	10,66	2,87	32,59	3,23	34,01
	Min	100,06	55,11	9,18	2,34	27,51	2,88	25,65
	Max	100,31	73,17	12,2	3,05	53,1	3,72	40,78
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,14	57,96	9,66	2,4	31,79	2,83	42,85
	S	0,09	7,4	1,23	0,33	6,79	0,39	8,19
	VK	0,09	12,77	12,78	13,67	21,37	13,8	19,11
	Med	100,12	57,37	9,57	2,34	30,08	2,8	45,79
	Min	100,05	41,41	6,9	1,96	24,1	2,13	25,65
	Max	100,45	73,17	12,2	3,05	53,1	3,72	56,49

1c. Lineco (Ü)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,15	55,1	9,18	2,2	43,98	2,36	46,59
	S	0,07	8,7	1,45	0,13	9,73	0,13	4,4
	VK	0,07	15,8	15,81	5,93	22,13	5,69	9,45
	Med	100,14	52,55	8,76	2,21	43,72	2,4	46,11
	Min	100,06	42,03	7,01	1,97	29,1	2,05	40,77
	Max	100,31	73,96	12,33	2,41	69,19	2,59	57,32
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,17	46,08	7,68	2,33	38,05	2,52	36,08
	S	0,05	2,58	0,43	0,19	7,18	0,21	4,53
	VK	0,05	5,6	5,62	8,36	18,87	8,48	12,56
	Med	100,15	45,05	7,51	2,23	37,36	2,58	37,72
	Min	100,12	43,45	7,24	2,12	28,73	2,21	29,76
	Max	100,23	49,59	8,27	2,56	48,68	2,78	40,83
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,15	53,29	8,88	2,22	42,79	2,39	44,49
	S	0,07	8,64	1,44	0,15	9,46	0,16	6,1
	VK	0,07	16,21	16,21	6,75	22,1	6,74	13,71
	Med	100,14	51,44	8,57	2,22	42,6	2,41	45,22
	Min	100,06	42,03	7,01	1,97	28,73	2,05	29,76
	Max	100,31	73,96	12,33	2,56	69,19	2,78	57,32

1d. Lineco (Ü+V)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,18	107,13	17,86	2,58	77,82	2,87	61,45
	S	0,05	18,3	3,05	0,19	17,9	0,27	6,92
	VK	0,05	17,08	17,09	7,36	23,01	9,52	11,26
	Med	100,18	108,33	18,06	2,6	76,3	2,85	61,16
	Min	100,08	56,66	9,44	2,07	40,56	2,35	46,29
	Max	100,26	144,53	24,09	2,87	114,13	3,33	75,17
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,35	113,55	18,92	2,56	71,07	2,94	31,84
	S	0,17	11,96	1,99	0,39	16,38	0,38	19,54
	VK	0,17	10,54	10,54	15,14	23,05	12,95	61,36
	Med	100,32	112,42	18,74	2,55	66,89	2,94	25,93
	Min	100,14	98,78	16,46	1,92	49,91	2,31	19,69
	Max	100,79	139,93	23,32	3,02	99,26	3,52	85,4
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,24	109,27	18,21	2,57	75,49	2,9	62,59
	S	0,13	16,53	2,76	0,27	17,41	0,31	8,53
	VK	0,13	15,13	15,13	10,31	23,06	10,68	13,63
	Med	100,21	111,85	18,64	2,6	74,65	2,85	61,36
	Min	100,08	56,66	9,44	1,92	40,56	2,31	46,29
	Max	100,79	144,53	24,09	3,02	114,13	3,52	85,4

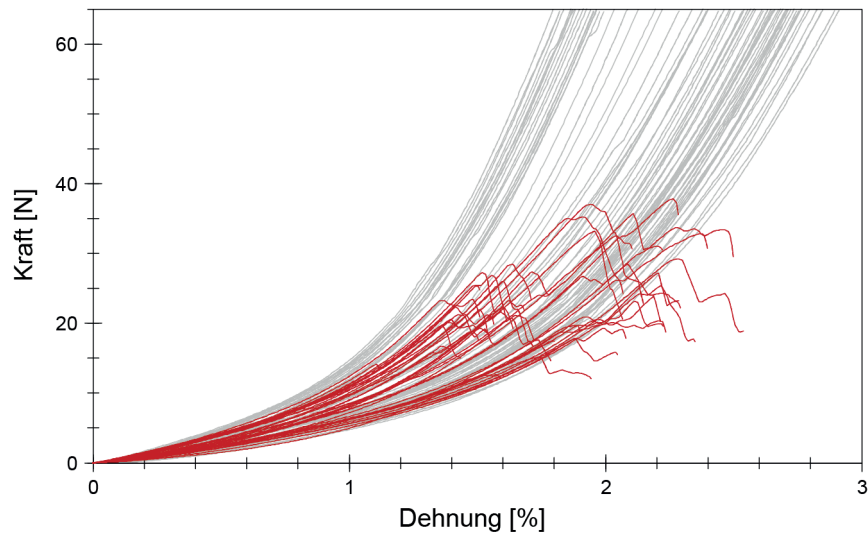


Abb. 04: K-D-Diagramm von Typ **1a. Lineco (SAS)** im Vergleich zur Referenz.

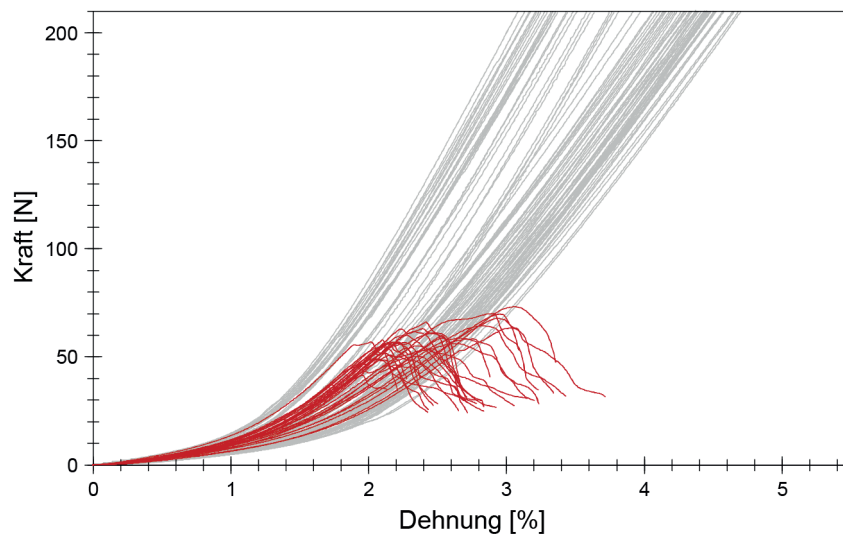


Abb. 05: K-D-Diagramm von Typ **1b. Lineco (SAS+B)** im Vergleich zur Referenz.

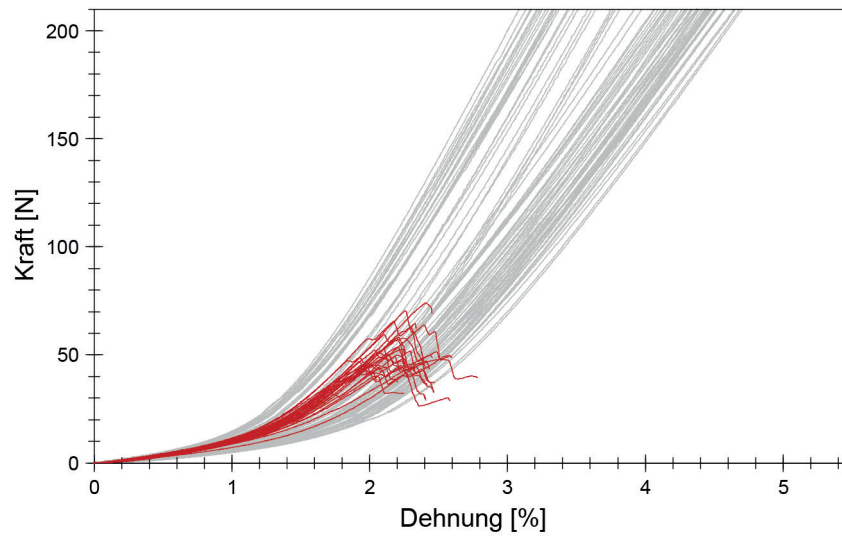


Abb. 06: K-D-Diagramm von Typ 1c. Lineco (\ddot{U}) im Vergleich zur Referenz.

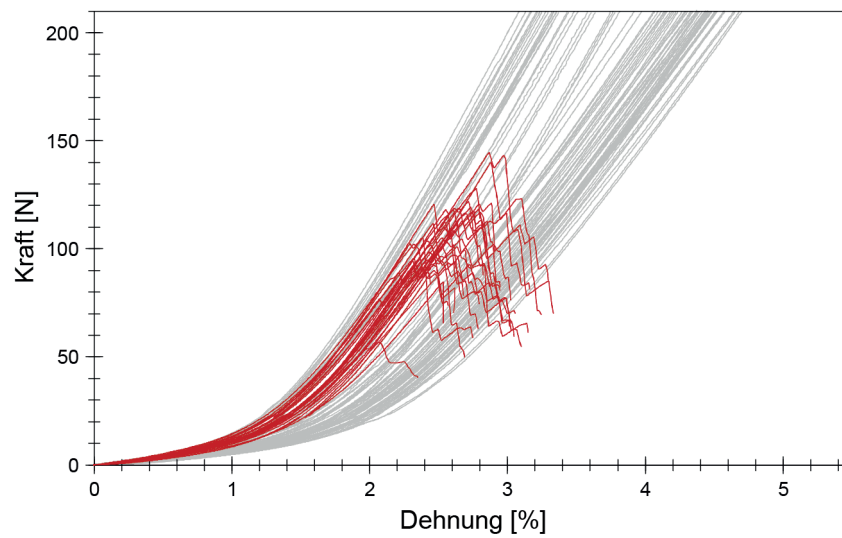


Abb. 07: K-D-Diagramm von Typ 1d. Lineco ($\ddot{U}+V$) im Vergleich zur Referenz.

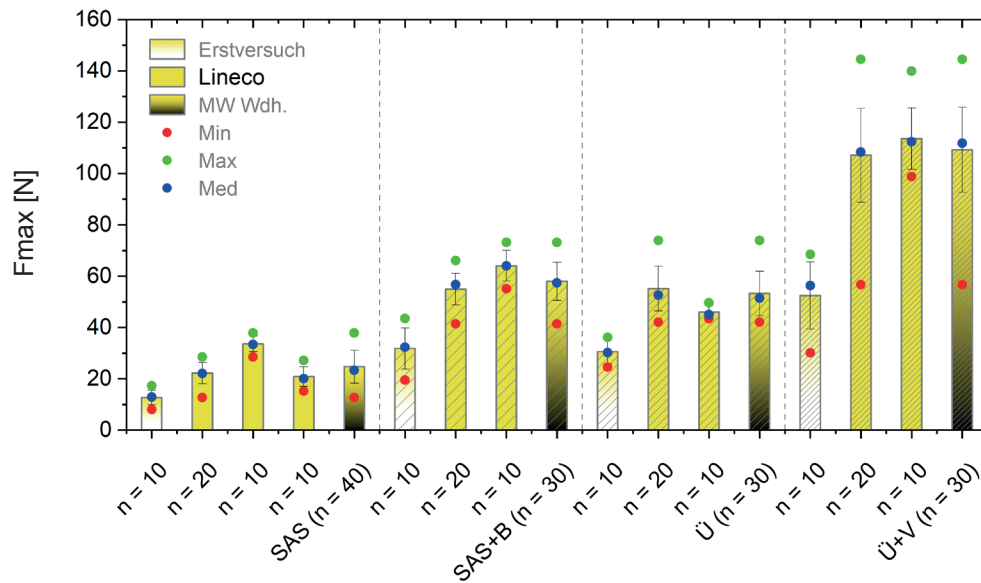


Abb. 08: Durchschnittliche Höchstzugkraft der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**1a-d. Lineco**).

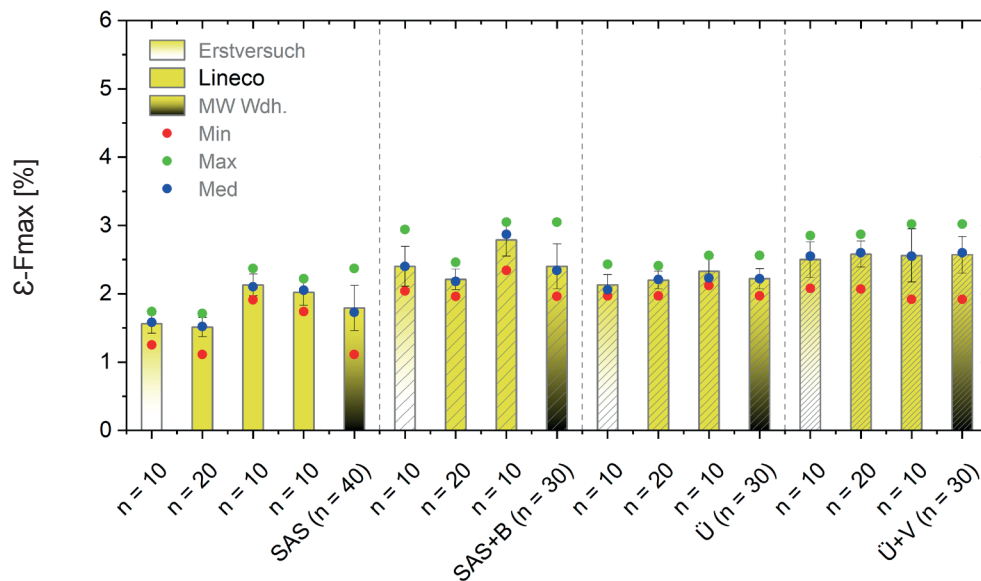


Abb. 09: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**1a-d. Lineco**).

2a. Lineco + Methocel A4C (SAS)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,39	16,71	2,78	1,37	13,57	1,52	-
	S	0,12	3,73	0,62	0,15	3,87	0,17	-
	VK	0,12	22,31	22,29	11,15	28,54	10,98	-
	Med	100,37	16,65	2,78	1,35	13,25	1,51	-
	Min	100,24	10,12	1,69	1,18	8,56	1,19	-
	Max	100,68	26,04	4,34	1,71	23,9	1,85	-
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,25	18,2	3,03	1,76	15,24	1,85	-
	S	0,08	2,38	0,4	0,12	3,71	0,12	-
	VK	0,08	13,09	13,12	7,03	24,33	6,49	-
	Med	100,23	17,64	2,94	1,79	15,83	1,82	-
	Min	100,17	14,17	2,36	1,47	8,46	1,69	-
	Max	100,46	22,01	3,67	1,89	19,43	2,05	-
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,35	17,21	2,87	1,5	14,13	1,63	-
	S	0,13	3,37	0,56	0,23	3,84	0,22	-
	VK	0,13	19,61	19,6	15,58	27,17	13,4	-
	Med	100,32	16,94	2,83	1,47	13,59	1,62	-
	Min	100,17	10,12	1,69	1,18	8,46	1,19	-
	Max	100,68	26,04	4,34	1,89	23,9	2,05	-

2b. Lineco + Methocel A4C (SAS+B)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,44	37,17	6,2	2,06	20,52	2,88	33,79
	S	0,1	4,35	0,72	0,13	5,04	0,41	4,39
	VK	0,1	11,69	11,7	6,2	24,58	14,1	12,99
	Med	100,45	37,82	6,31	2,07	19,08	2,83	34,04
	Min	100,29	30,86	5,14	1,84	15,47	2,08	26,18
	Max	100,66	45,48	7,58	2,27	34,17	3,71	40,93
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,14	57,31	9,55	2,46	31,19	2,89	40,87
	S	0,1	7,2	1,2	0,34	7,28	0,41	7,79
	VK	0,1	12,57	12,56	14,02	23,35	14,19	19,07
	Med	100,12	56,8	9,47	2,35	28,68	2,88	40,78
	Min	100,05	46,25	7,71	2,06	24,1	2,21	25,65
	Max	100,45	70,03	11,67	3,04	53,1	3,72	52,41
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,3	46,98	7,83	2,25	1067,27	2,89	37,24
	S	0,18	11,75	1,96	0,32	1083,43	0,4	7,16
	VK	0,18	25	25	14,39	101,51	13,96	19,22
	Med	100,31	45,48	7,58	2,15	1546,65	2,86	36,68
	Min	100,05	30,86	5,14	1,84	24,1	2,08	25,65
	Max	100,66	70,03	11,67	3,04	3417,3	3,72	52,41

2c. Lineco + Methocel A4C (Ü)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,37	44,1	7,35	1,98	32,5	2,23	42,79
	S	0,08	7,59	1,26	0,13	7,65	0,21	5,99
	VK	0,08	17,21	17,2	6,38	23,55	9,43	14
	Med	100,38	42,63	7,11	1,99	34,66	2,25	40,9
	Min	100,29	36,6	6,1	1,69	18,77	1,92	36,53
	Max	100,56	57,17	9,53	2,12	41,89	2,52	51,56
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,15	54,77	9,13	2,2	42,89	2,37	46,76
	S	0,08	7,32	1,22	0,12	8,08	0,12	4,47
	VK	0,08	13,36	13,38	5,48	18,85	4,97	9,57
	Med	100,13	52,55	8,76	2,21	43,72	2,4	46,11
	Min	100,06	45,68	7,61	1,97	29,1	2,08	40,77
	Max	100,31	70,35	11,73	2,41	62,24	2,59	57,32
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,23	50,65	8,44	2,12	39,15	2,31	45,39
	S	0,13	8,94	1,49	0,16	9,13	0,17	5,16
	VK	0,13	17,65	17,65	7,5	23,31	7,48	11,37
	Med	100,19	51,44	8,57	2,11	38,63	2,34	45,38
	Min	100,06	36,6	6,1	1,69	18,77	1,92	36,53
	Max	100,56	70,35	11,73	2,41	62,24	2,59	57,32

2d. Lineco + Methocel A4C (Ü+V)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,36	82,99	13,83	2,67	58,62	3,01	42,69
	S	0,11	15,7	2,62	0,23	16,85	0,3	10,46
	VK	0,11	18,92	18,92	8,51	28,75	10,03	24,51
	Med	100,35	84,3	14,05	2,67	54,3	2,99	41,75
	Min	100,23	60,44	10,07	2,14	31,72	2,52	27,54
	Max	100,73	107,41	17,9	3,05	89,75	3,81	62,2
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,18	107,86	17,98	2,59	80,47	2,88	61,88
	S	0,04	11,9	1,98	0,14	16,21	0,23	7,06
	VK	0,04	11,04	11,04	5,44	20,14	8,08	11,41
	Med	100,18	108,33	18,06	2,6	80,78	2,85	61,16
	Min	100,08	84,7	14,12	2,32	54,68	2,44	46,29
	Max	100,26	127,81	21,3	2,8	114,13	3,3	75,17
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,28	94,77	15,79	2,63	68,66	2,95	51,78
	S	0,13	18,71	3,12	0,19	19,71	0,28	13,17
	VK	0,13	19,74	19,75	7,32	28,71	9,39	25,43
	Med	100,26	95,07	15,85	2,63	70,06	2,98	54,1
	Min	100,08	60,44	10,07	2,14	31,72	2,44	27,54
	Max	100,73	127,81	21,3	3,05	114,13	3,81	75,17

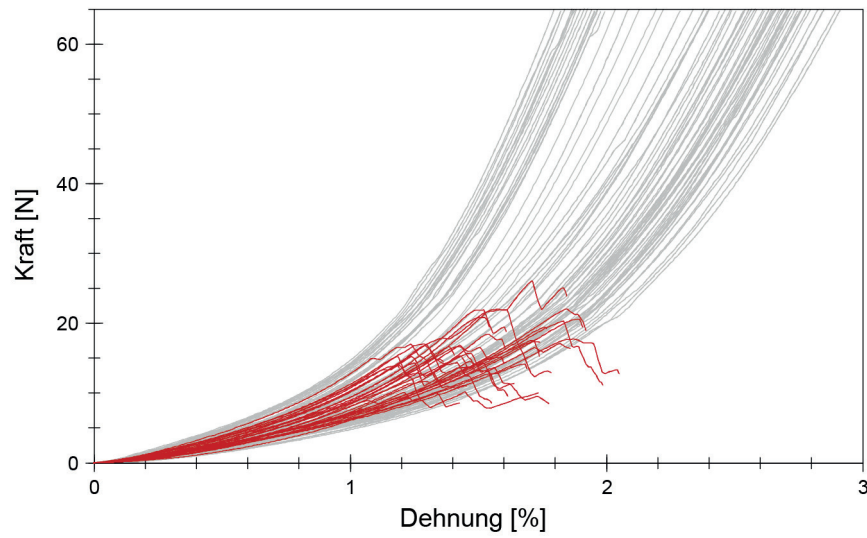


Abb. 10: K-D-Diagramm von Typ **2a. Lineco + Methocel A4C (SAS)** im Vergleich zur Referenz.

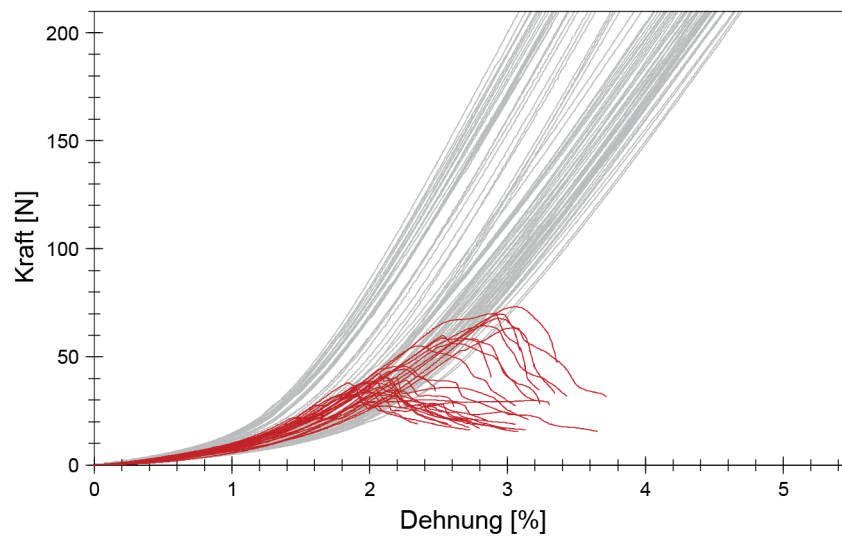


Abb. 11: K-D-Diagramm von Typ **2b. Lineco + Methocel A4C (SAS+B)** im Vergleich zur Referenz.

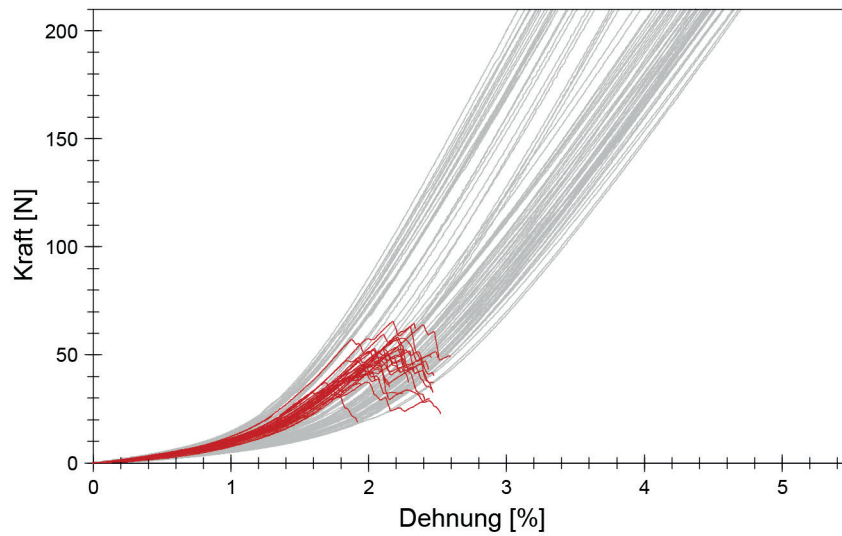


Abb. 12: K-D-Diagramm von **Typ 2c. Lineco + Methocel A4C (\ddot{U})** im Vergleich zur Referenz.

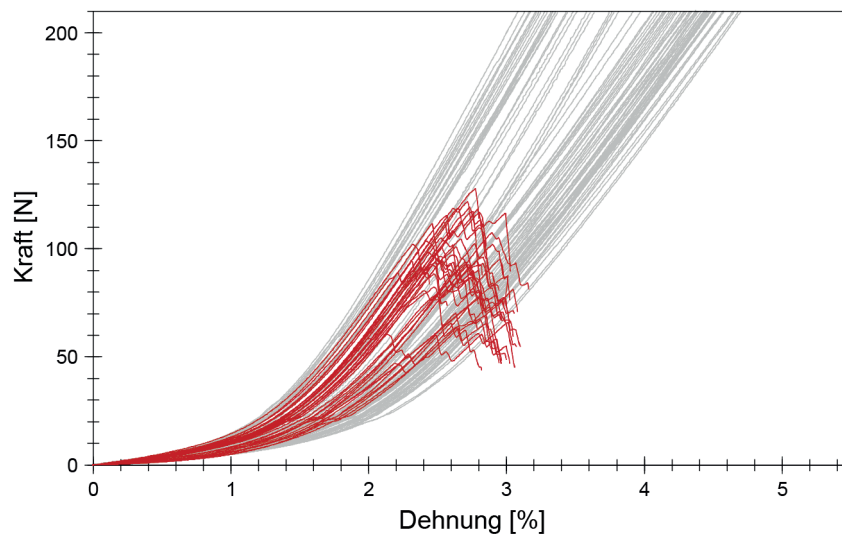


Abb. 13: K-D-Diagramm von **Typ 2d. Lineco + Methocel A4C ($\ddot{U}+V$)** im Vergleich zur Referenz.

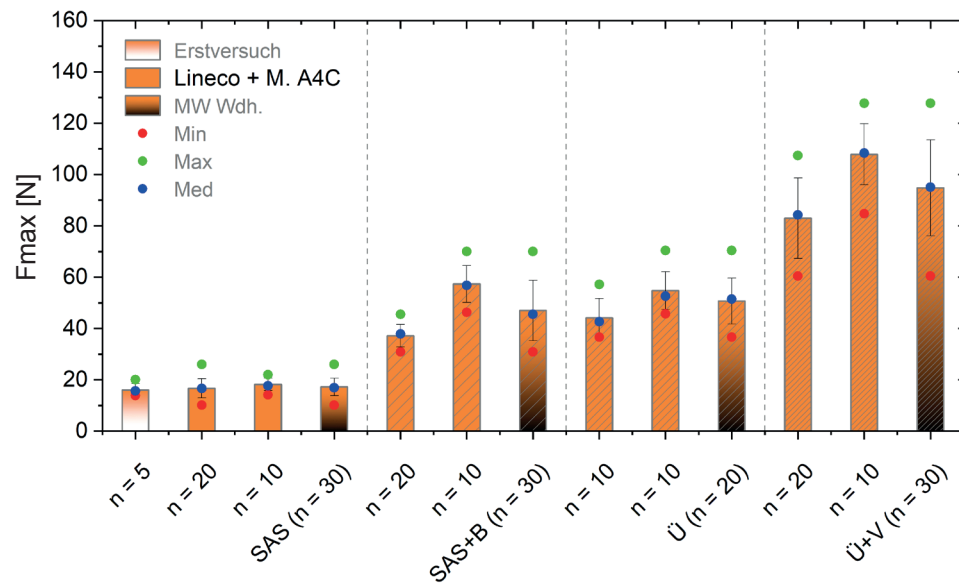


Abb. 14: Durchschnittliche Höchstzugkraft der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**2a-d. Lineco + Methocel A4C**).

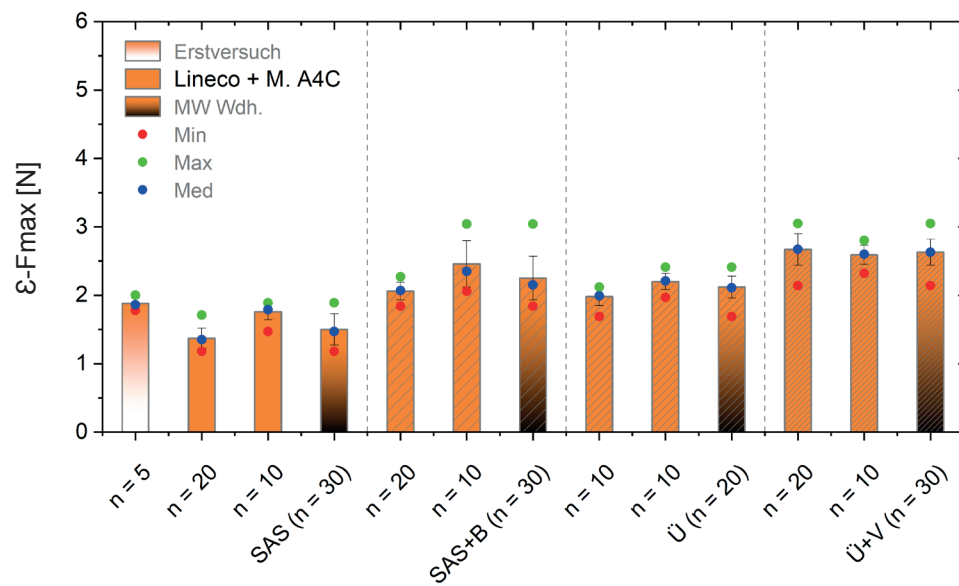


Abb. 15: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**2a-d. Lineco + Methocel A4C**).

3a. Mowilith DHS S1 (SAS)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,25	21,08	3,51	1,61	18,09	1,83	-
	S	0,09	5,93	0,99	0,3	5,16	0,48	-
	VK	0,09	28,13	28,1	18,44	28,52	26,35	-
	Med	100,25	20,1	3,35	1,56	18,19	1,7	-
	Min	100,12	13,36	2,23	1,33	9,64	1,35	-
	Max	100,52	34,08	5,68	2,68	30,79	3,48	-
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,15	24,2	4,03	2	20,16	2,12	21,94
	S	0,07	4,25	0,71	0,22	5,23	0,27	3,59
	VK	0,07	17,57	17,58	11,08	25,95	12,56	16,37
	Med	100,16	25,36	4,23	2,05	19,8	2,12	21,21
	Min	100,05	17,27	2,88	1,64	10,2	1,64	17,57
	Max	100,25	30,18	5,03	2,35	30,03	2,45	25,85
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 3	MW	100,24	24,06	4,01	2,01	20,31	2,15	21,12
	S	0,04	3,67	0,61	0,19	3,09	0,26	3,74
	VK	0,03	15,26	15,27	9,54	15,21	12,12	17,73
	Med	100,23	23,73	3,96	1,99	20,92	2,18	21,05
	Min	100,18	18,02	3	1,71	14,73	1,72	14,6
	Max	100,3	29,83	4,97	2,28	23,93	2,64	27,11
Versuch	n = 40	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,22	22,61	3,77	1,81	19,16	1,98	21,8
	S	0,09	5,18	0,86	0,32	4,76	0,41	3,53
	VK	0,09	22,9	22,88	17,65	24,85	20,79	16,21
	Med	100,23	22,68	3,78	1,8	19,42	1,86	21,21
	Min	100,05	13,36	2,23	1,33	9,64	1,35	14,6
	Max	100,52	34,08	5,68	2,68	30,79	3,48	27,11

3b. Mowilith DHS S1 (SAS+B)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,14	48,82	8,14	2,21	31,92	2,61	41,1
	S	0,06	7,73	1,29	0,18	10,14	0,26	7,23
	VK	0,06	15,83	15,83	8,23	31,77	9,81	17,59
	Med	100,12	50,93	8,49	2,19	29,12	2,69	42,22
	Min	100,06	33,63	5,61	1,9	16,8	2,21	28,92
	Max	100,29	59,39	9,9	2,55	50,87	2,97	54,4
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,11	60,35	10,06	2,69	33	3,3	33,71
	S	0,06	9,96	1,66	0,24	8,17	0,29	4,66
	VK	0,06	16,5	16,49	8,86	24,75	8,76	13,81
	Med	100,09	60,18	10,03	2,59	30,81	3,24	33,63
	Min	100,06	41,5	6,92	2,46	20,63	2,94	28,09
	Max	100,27	76,74	12,79	3,05	47,36	3,76	41,11
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,13	52,8	8,8	2,38	32,29	2,85	38,55
	S	0,06	10,07	1,68	0,3	9,37	0,42	7,3
	VK	0,06	19,08	19,07	12,79	29,02	14,89	18,94
	Med	100,12	52,44	8,74	2,34	29,27	2,83	37,82
	Min	100,06	33,63	5,61	1,9	16,8	2,21	28,09
	Max	100,29	76,74	12,79	3,05	50,87	3,76	54,4

3c. Mowilith DHS S1 (Ü)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,24	32,31	5,39	2	26,79	2,12	29,42
	S	0,09	3,78	0,63	0,15	5,12	0,12	5,49
	VK	0,09	11,69	11,72	7,25	19,12	5,52	18,67
	Med	100,23	32,57	5,43	2,02	27,05	2,11	30,64
	Min	100,07	23,67	3,94	1,81	15,4	1,92	16,58
	Max	100,4	36,55	6,09	2,23	33,93	2,27	35,79
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,19	32,23	5,37	2,33	27	2,51	22,65
	S	0,14	8,1	1,35	0,28	8,35	0,3	3,53
	VK	0,14	25,15	25,17	11,89	30,92	11,83	15,58
	Med	100,15	34,02	5,67	2,31	27,39	2,57	20,73
	Min	100,05	22,05	3,67	1,92	14,55	2,1	19,57
	Max	100,42	41,18	6,86	2,59	37,41	2,82	27,27
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,22	32,28	5,38	2,11	26,86	2,25	27
	S	0,11	5,29	0,88	0,25	6,07	0,27	5,81
	VK	0,11	16,37	16,4	11,64	22,58	11,84	21,5
	Med	100,21	33,03	5,51	2,04	27,27	2,19	27,41
	Min	100,05	22,05	3,67	1,81	14,55	1,92	16,58
	Max	100,42	41,18	6,86	2,59	37,41	2,82	35,79

3d. Mowilith DHS S1 (Ü+V)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,18	93,19	15,53	2,46	67,41	2,79	65,57
	S	0,06	17,18	2,86	0,27	13,92	0,37	10,89
	VK	0,06	18,43	18,43	10,95	20,65	13,1	16,61
	Med	100,18	91,95	15,32	2,4	66,26	2,81	62,79
	Min	100,09	47,36	7,89	1,74	44,07	2,18	46,85
	Max	100,33	120,8	20,13	2,9	90,9	3,63	99,26
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,37	52,82	8,8	2,75	43,2	2,91	27,57
	S	0,07	3,27	0,55	0,27	7,14	0,2	6,3
	VK	0,07	6,2	6,19	9,96	16,54	7	22,85
	Med	100,35	53,57	8,93	2,75	42,56	2,92	25,66
	Min	100,28	46,79	7,8	2,39	28,74	2,62	21,87
	Max	100,51	57,5	9,58	3,17	53,32	3,25	38,56
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,24	80,16	13,36	2,55	59,34	2,83	53,31
	S	0,11	23,83	3,97	0,3	16,66	0,32	20,42
	VK	0,11	29,73	29,72	11,76	28,08	11,37	38,3
	Med	100,22	84,13	14,02	2,51	57,6	2,87	59,97
	Min	100,09	46,79	7,8	1,74	28,74	2,18	21,87
	Max	100,51	120,8	20,13	3,17	90,9	3,63	99,26

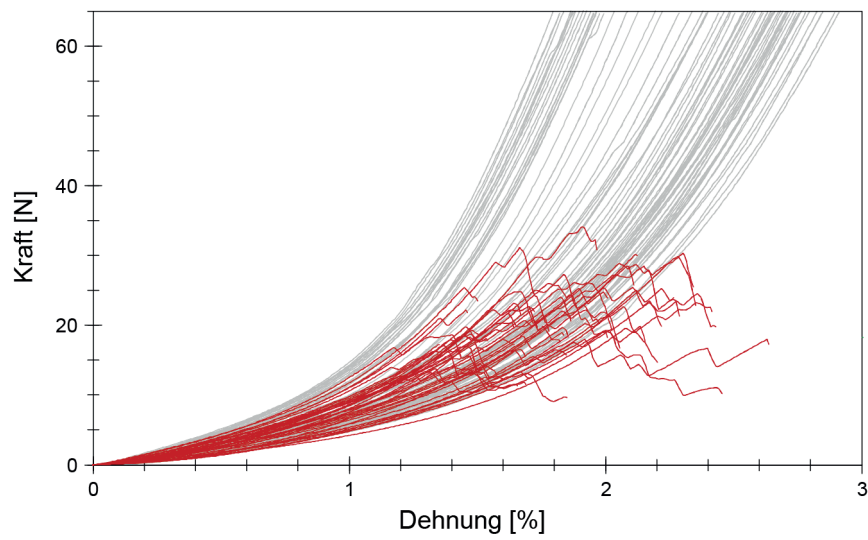


Abb. 16: K-D-Diagramm von Typ **3a**. **Mowilith DHS S1 (SAS)** im Vergleich zur Referenz.

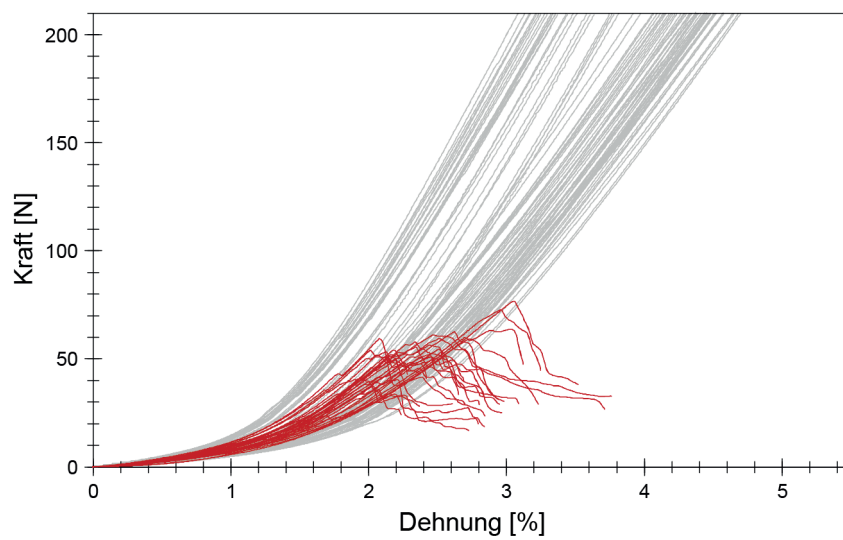


Abb. 17: K-D-Diagramm von Typ **3b**. **Mowilith DHS S1 (SAS+B)** im Vergleich zur Referenz.

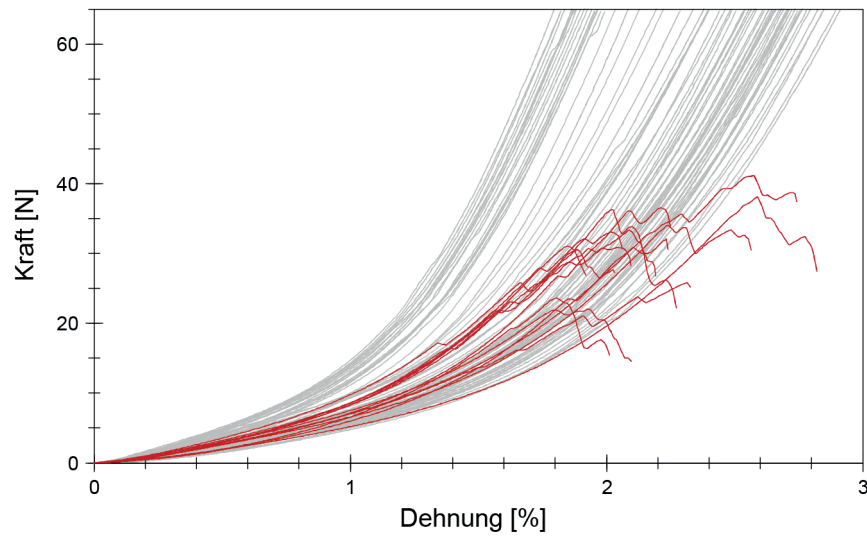


Abb. 18: K-D-Diagramm von Typ 3c. **Mowilith DHS S1 (Ü)** im Vergleich zur Referenz.

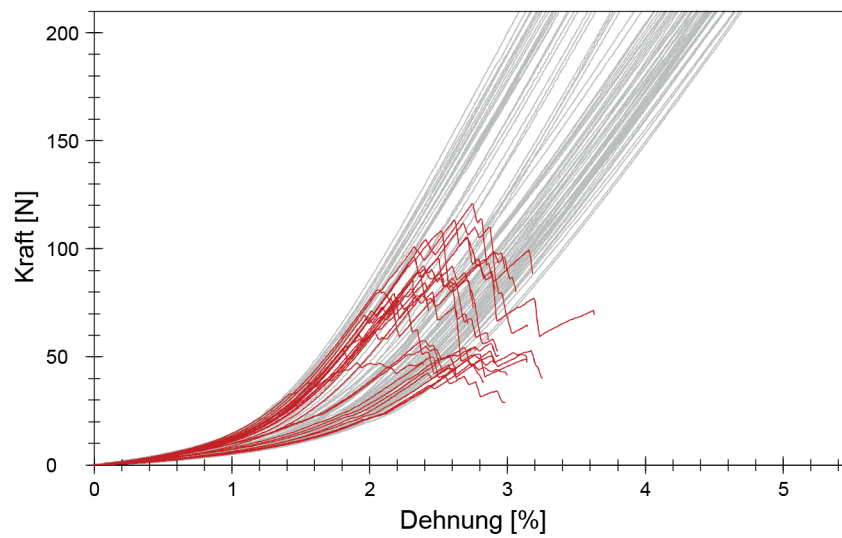


Abb. 19: K-D-Diagramm von Typ 3d. **Mowilith DHS S1 (Ü+V)** im Vergleich zur Referenz.

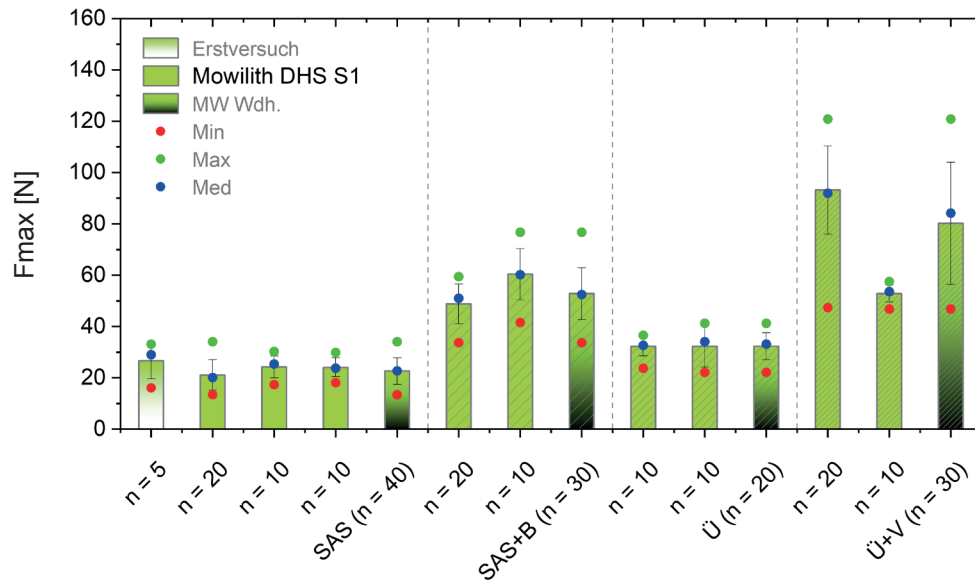


Abb. 20: Durchschnittliche Höchstzugkraft der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**3a-d. Mowilith DHS S1**).

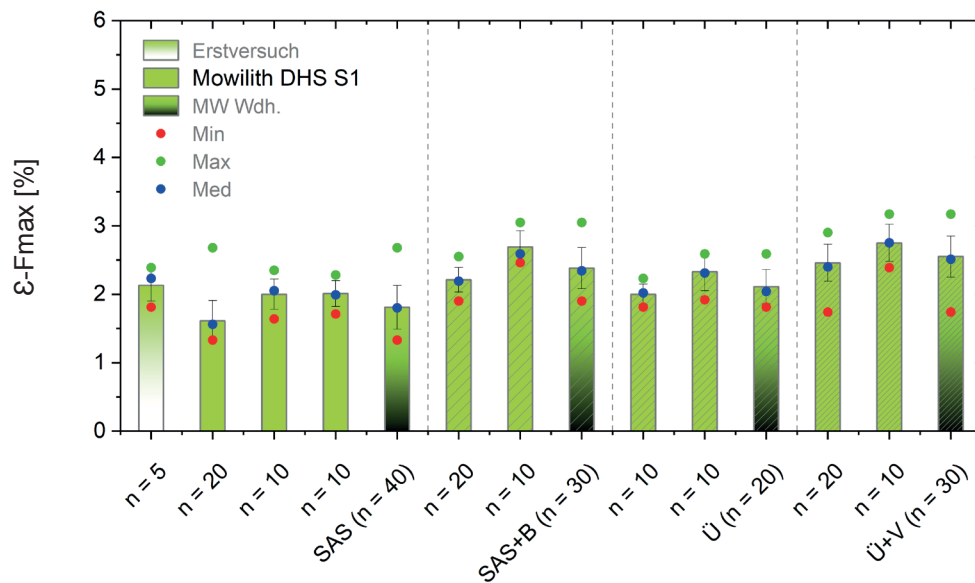


Abb. 21: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**3a-d. Mowilith DHS S1**).

4a. Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (SAS)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,15	28,66	4,78	1,79	25,55	1,86	-
	S	0,05	4,59	0,77	0,08	7,16	0,01	-
	VK	0,05	16,02	16,03	4,2	28,03	0,61	-
	Med	100,15	28,35	4,72	1,8	26,09	1,86	-
	Min	100,1	23,04	3,84	1,67	17,17	1,84	-
	Max	100,21	35,82	5,97	1,85	35,82	1,87	-
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,87	19,38	3,23	1,93	14,94	2,06	17,69
	S	0,52	4,55	0,76	0,23	3,28	0,21	3,8
	VK	0,51	23,48	23,47	11,8	21,93	10,34	21,47
	Med	100,6	19,31	3,22	1,93	14,22	2,06	16,94
	Min	100,44	13,51	2,25	1,64	10,9	1,66	12,52
	Max	101,66	28,08	4,68	2,37	22,39	2,44	24,15
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 3	MW	100,27	22,6	3,77	1,91	17,39	2,14	20,22
	S	0,12	3,9	0,65	0,17	4,4	0,18	5,38
	VK	0,12	17,26	17,29	8,83	25,29	8,62	26,6
	Med	100,25	22,67	3,78	1,87	17,75	2,07	21,3
	Min	100,14	17,22	2,87	1,67	9,73	1,85	11,79
	Max	100,56	30,03	5,01	2,19	24,11	2,39	27,48
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,47	22,65	3,78	1,89	18,17	2,05	18,96
	S	0,45	5,37	0,9	0,18	6,03	0,2	4,66
	VK	0,45	23,72	23,71	9,65	33,2	9,81	24,6
	Med	100,29	22,04	3,68	1,85	17,14	2,04	19,08
	Min	100,1	13,51	2,25	1,64	9,73	1,66	11,79
	Max	101,66	35,82	5,97	2,37	35,82	2,44	27,48

4b. Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (SAS+B)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,13	44,06	7,34	2,15	28,14	2,59	38,05
	S	0,04	6,47	1,08	0,18	9,64	0,31	4,39
	VK	0,04	14,69	14,68	8,3	34,26	11,92	11,55
	Med	100,12	43,83	7,31	2,14	24,53	2,61	37,92
	Min	100,09	34,97	5,83	1,9	18,72	2,21	30,84
	Max	100,19	51,04	8,51	2,49	45,06	2,97	44,41
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,14	53,56	8,93	2,29	37,27	2,61	43,69
	S	0,08	2,66	0,44	0,18	8,61	0,25	6,57
	VK	0,08	4,96	4,97	7,95	23,09	9,47	15,03
	Med	100,12	53,97	9	2,34	33,56	2,65	43,28
	Min	100,06	50,4	8,4	2,02	28,73	2,22	33,9
	Max	100,29	57,93	9,66	2,55	50,87	2,95	53,41
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,14	49,09	8,18	2,22	32,97	2,6	41,04
	S	0,06	6,76	1,13	0,19	9,99	0,27	6,2
	VK	0,06	13,78	13,78	8,54	30,29	10,34	15,11
	Med	100,12	50,93	8,49	2,21	29,2	2,65	42,22
	Min	100,06	34,97	5,83	1,9	18,72	2,21	30,84
	Max	100,29	57,93	9,66	2,55	50,87	2,97	53,41

4c. Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (Ü)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,23	32,86	5,48	2	27,32	2,12	30,81
	S	0,1	2,18	0,37	0,13	2,75	0,12	2,98
	VK	0,1	6,65	6,67	6,25	10,08	5,47	9,68
	Med	100,21	32,57	5,43	2,02	27,05	2,11	30,64
	Min	100,07	30,54	5,09	1,85	22,22	1,92	27,12
	Max	100,4	36,3	6,05	2,23	30,92	2,27	35,79

4d. Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (Ü+V)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,19	88,83	14,8	2,42	68,63	2,71	66,31
	S	0,07	13,49	2,25	0,37	15,87	0,37	13,31
	VK	0,07	15,19	15,18	15,16	23,13	13,68	20,07
	Med	100,19	84,64	14,11	2,36	66,89	2,76	62,39
	Min	100,09	70,63	11,77	1,74	44,07	2,18	50,83
	Max	100,33	113,36	18,89	2,9	90,9	3,15	99,26
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,17	100,06	16,68	2,48	66,17	2,87	66,6
	S	0,06	9,9	1,65	0,13	9,73	0,35	7,15
	VK	0,06	9,89	9,89	5,21	14,7	12,31	10,74
	Med	100,18	96,45	16,07	2,43	65,38	2,86	67,2
	Min	100,1	89,39	14,9	2,32	52,59	2,43	57,98
	Max	100,28	113,37	18,9	2,68	84,57	3,63	78,96
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,18	94,15	15,69	2,45	67,4	2,79	66,45
	S	0,06	12,95	2,16	0,27	12,83	0,36	10,55
	VK	0,06	13,76	13,75	11,24	19,04	12,96	15,88
	Med	100,18	91,95	15,32	2,4	66,26	2,81	62,79
	Min	100,09	70,63	11,77	1,74	44,07	2,18	50,83
	Max	100,33	113,37	18,9	2,9	90,9	3,63	99,26

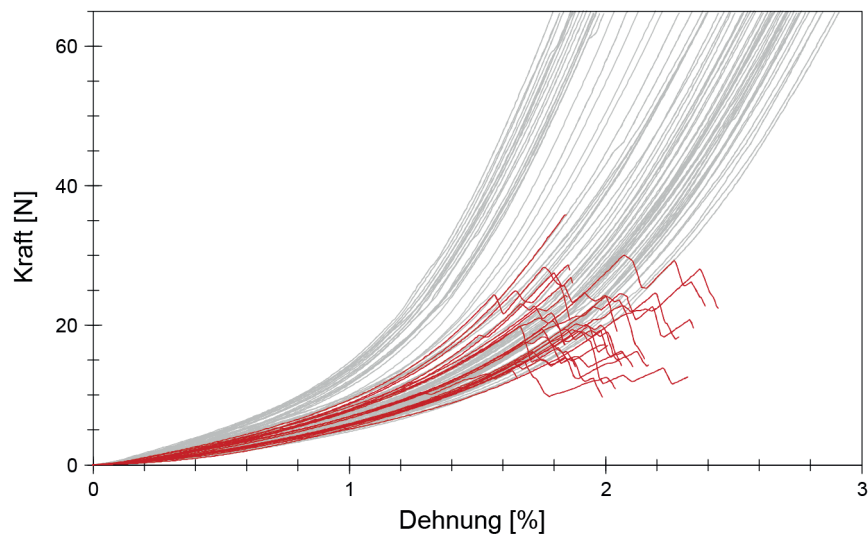


Abb. 22: K-D-Diagramm von Typ 4a. **Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (SAS)** im Vergleich zur Referenz.

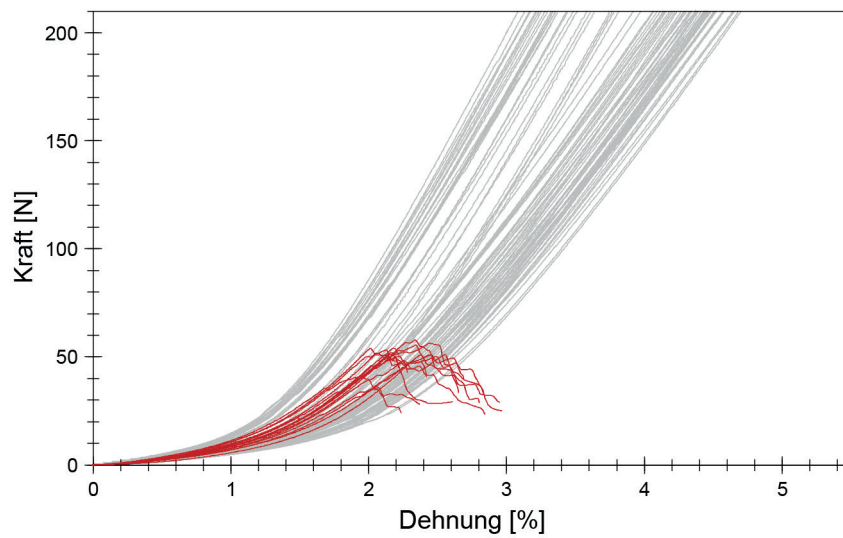


Abb. 23: K-D-Diagramm von Typ 4b. **Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (SAS+B)** im Vergleich zur Referenz.

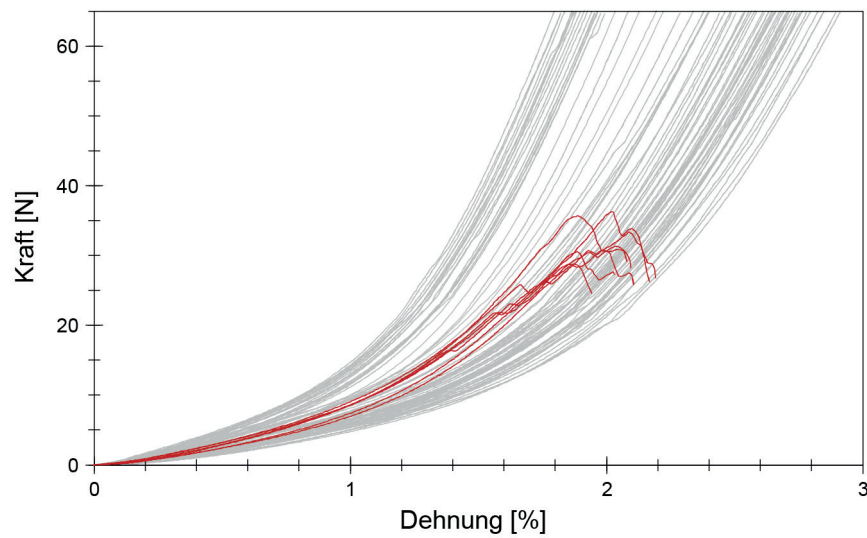


Abb. 24: K-D-Diagramm von Typ 4c. **Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (Ü)** im Vergleich zur Referenz.

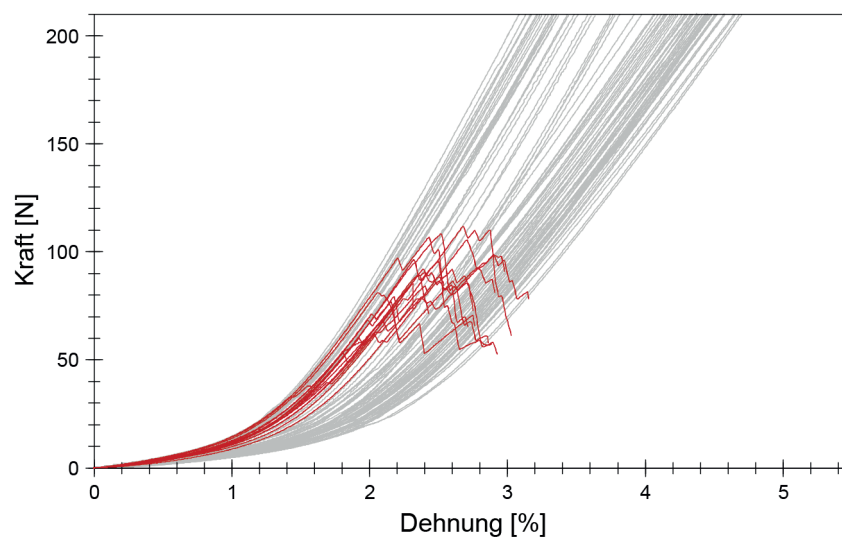


Abb. 25: K-D-Diagramm von Typ 4d. **Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (Ü+V)** im Vergleich zur Referenz.

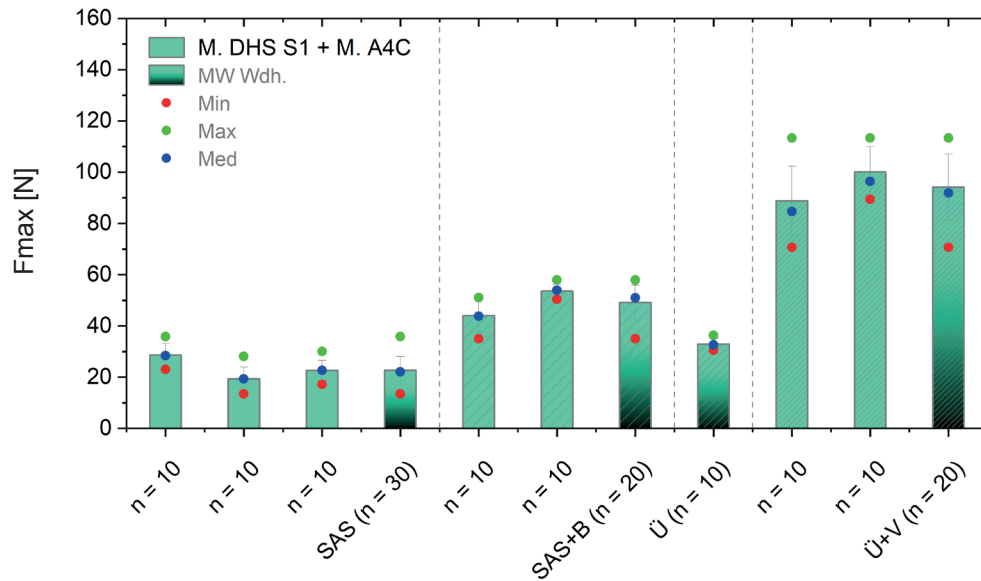


Abb. 26: Durchschnittliche Höchstzugkraft der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (4a-d. Mowilith DHS S1 + Methocel A4C).

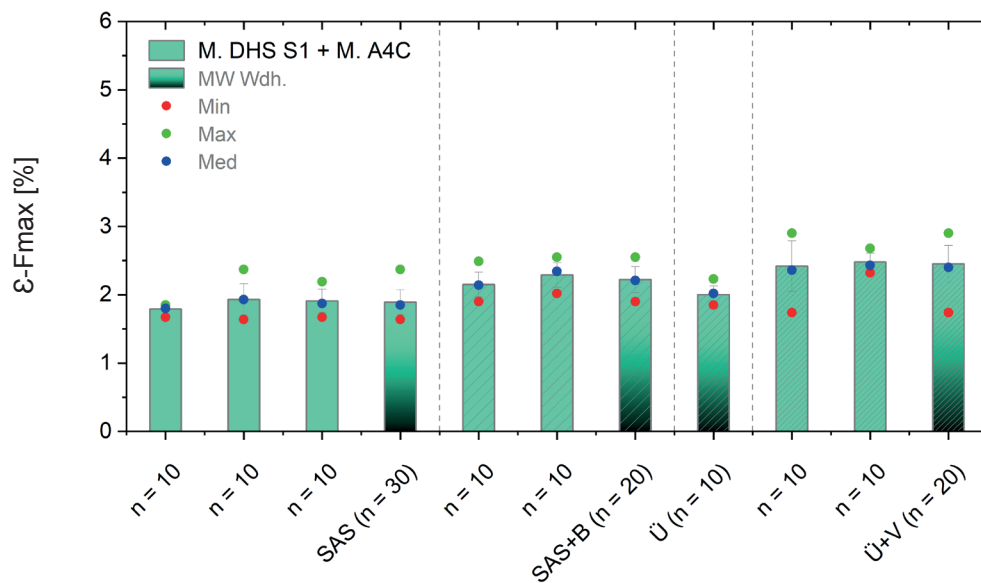


Abb. 27: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (4a-d. Mowilith DHS S1 + Methocel A4C).

5a. Störleim + Weizenstärkekleister nativ (SAS)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,3	11,32	1,89	1,1	10,48	1,14	-
	S	0,06	3,46	0,58	0,19	3,39	0,2	-
	VK	0,06	30,56	30,61	17,45	32,3	17,2	-
	Med	100,3	11,34	1,89	1,15	9,42	1,2	-
	Min	100,18	6,07	1,01	0,68	6,07	0,68	-
	Max	100,38	16,74	2,79	1,31	16,31	1,31	-
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,28	6,61	1,1	0,77	6,49	0,88	-
	S	0,06	2,17	0,36	0,24	2,1	0,33	-
	VK	0,06	32,88	32,85	30,68	32,37	36,93	-
	Med	100,27	6,07	1,01	0,69	5,79	0,94	-
	Min	100,22	3,06	0,51	0,4	2,99	0,4	-
	Max	100,41	9,92	1,65	1,06	9,59	1,53	-
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,29	8,97	1,49	0,94	8,49	1,01	-
	S	0,06	3,71	0,62	0,27	3,42	0,29	-
	VK	0,06	41,32	41,37	28,94	40,28	28,86	-
	Med	100,28	9,01	1,5	1,03	8,62	1,05	-
	Min	100,18	3,06	0,51	0,4	2,99	0,4	-
	Max	100,41	16,74	2,79	1,31	16,31	1,53	-

5b. Störleim + Weizenstärkekleister nativ (SAS+B)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,34	41,15	6,86	2,53	29,26	3,38	31,34
	S	0,1	11,82	1,97	0,46	13,66	0,31	6,83
	VK	0,09	28,73	28,72	18,12	46,67	9,09	21,79
	Med	100,31	42,07	7,01	2,48	30,6	3,37	31,25
	Min	100,23	20,32	3,39	1,85	10,13	2,86	19,06
	Max	100,51	57,84	9,64	3,18	45,64	3,91	39,62
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,26	41,52	6,92	2,48	21,9	3,25	33,11
	S	0,05	13,09	2,18	0,24	6,99	0,22	7,61
	VK	0,05	31,53	31,52	9,88	31,94	6,89	22,98
	Med	100,26	39,25	6,54	2,4	20,64	3,25	33,01
	Min	100,21	22,91	3,82	2,18	11,4	2,9	22,32
	Max	100,37	64,1	10,68	3,01	31,7	3,58	49,34
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,3	41,34	6,89	2,5	25,58	3,31	32,23
	S	0,08	12,14	2,02	0,36	11,22	0,27	7,09
	VK	0,08	29,37	29,36	14,31	43,85	8,16	22,02
	Med	100,29	39,29	6,55	2,4	21,95	3,31	32,73
	Min	100,21	20,32	3,39	1,85	10,13	2,86	19,06
	Max	100,51	64,1	10,68	3,18	45,64	3,91	49,34

5c. Störleim + Weizenstärkekleister nativ (Ü)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,36	14,73	2,46	1,28	13,23	1,36	-
	S	0,07	3,77	0,63	0,15	3,94	0,16	-
	VK	0,07	25,61	25,62	11,58	29,78	11,69	-
	Med	100,34	15,43	2,58	1,29	13,37	1,36	-
	Min	100,28	6,54	1,09	0,99	4,67	1,17	-
	Max	100,51	20,62	3,44	1,49	19,62	1,65	-
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,32	18,66	3,11	1,41	16,61	1,46	-
	S	0,04	7,26	1,21	0,2	7,9	0,17	-
	VK	0,04	38,92	39,01	14,45	47,55	11,94	-
	Med	100,31	17,59	2,93	1,4	16,97	1,47	-
	Min	100,26	4,47	0,74	1,12	3,61	1,21	-
	Max	100,41	30,15	5,03	1,77	29,59	1,78	-
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,34	16,59	2,77	1,34	14,83	1,41	-
	S	0,06	5,88	0,98	0,18	6,2	0,17	-
	VK	0,06	35,45	35,51	13,72	41,82	12,06	-
	Med	100,32	16,72	2,79	1,37	14,62	1,4	-
	Min	100,26	4,47	0,74	0,99	3,61	1,17	-
	Max	100,51	30,15	5,03	1,77	29,59	1,78	-

5d. Störleim + Weizenstärkekleister nativ (Ü+V)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ε Fmax [%]	F Bruch [N]	ε Bruch [%]	F 2% ε [N]
Nr. 1	MW	100,39	47,72	8,01	2,11	39,9	2,24	43,22
	S	0,1	9,04	1,52	0,2	10,55	0,2	7,87
	VK	0,1	18,95	19,01	9,57	26,44	8,8	18,21
	Med	100,37	47,36	8,02	2,07	40,47	2,18	43,45
	Min	100,23	32,37	5,4	1,91	25,91	1,97	28,93
	Max	100,62	66,08	11,01	2,78	60,7	2,8	54,88
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ε Fmax [%]	F Bruch [N]	ε Bruch [%]	F 2% ε [N]
Nr. 2	MW	100,39	64,34	10,72	2,68	47,36	2,86	31,79
	S	0,11	14,45	2,41	0,37	14,81	0,35	9,61
	VK	0,11	22,45	22,45	13,83	31,26	12,38	30,22
	Med	100,38	65,59	10,93	2,64	48,22	2,96	29,59
	Min	100,2	36,39	6,07	2,21	17,71	2,27	23,2
	Max	100,62	85,44	14,24	3,38	65,34	3,51	59,6
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ε Fmax [%]	F Bruch [N]	ε Bruch [%]	F 2% ε [N]
Gesamt	MW	100,39	53,62	8,94	2,31	42,54	2,45	38,96
	S	0,1	13,66	2,28	0,39	12,37	0,4	9,95
	VK	0,1	25,48	25,48	16,79	29,08	16,45	25,55
	Med	100,37	52,08	8,68	2,16	40,57	2,34	40,29
	Min	100,2	32,37	5,4	1,91	17,71	1,97	23,2
	Max	100,62	85,44	14,24	3,38	65,34	3,51	59,6

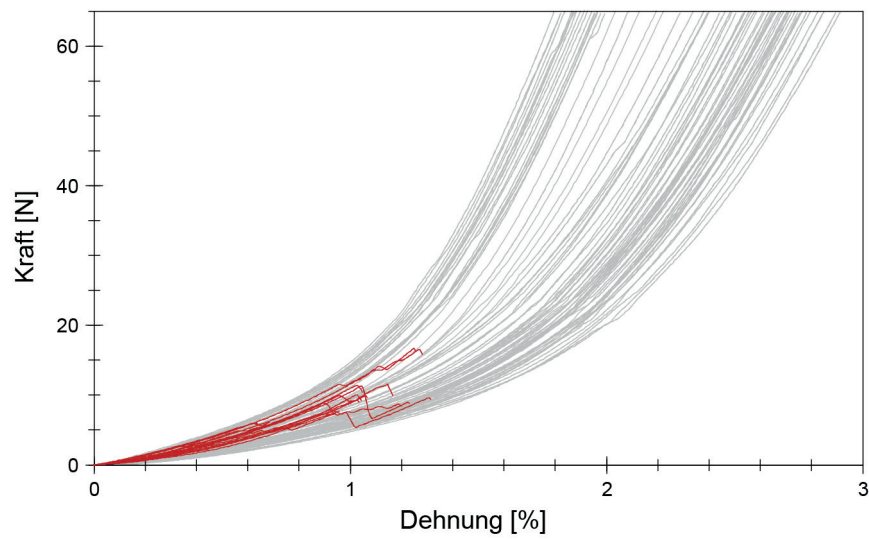


Abb. 28: K-D-Diagramm von Typ **5a. SL + WS nativ (SAS)** im Vergleich zur Referenz.

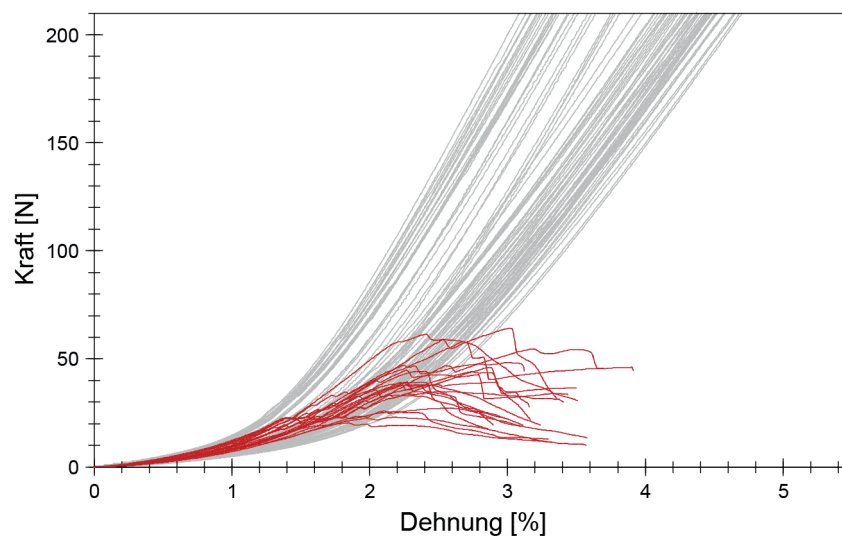


Abb. 29: K-D-Diagramm von Typ **5b. SL + WS nativ (SAS+B)** im Vergleich zur Referenz.

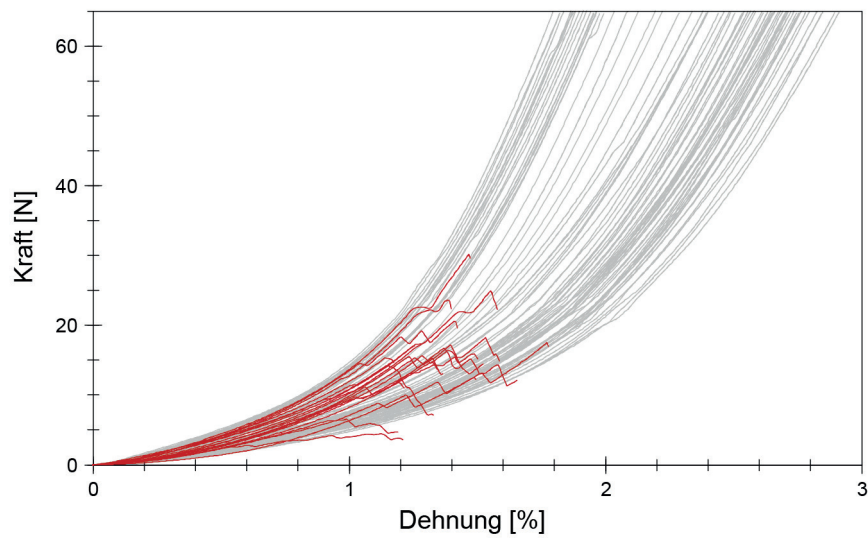


Abb. 30: K-D-Diagramm von Typ **5c. SL + WS nativ (\ddot{U})** im Vergleich zur Referenz.

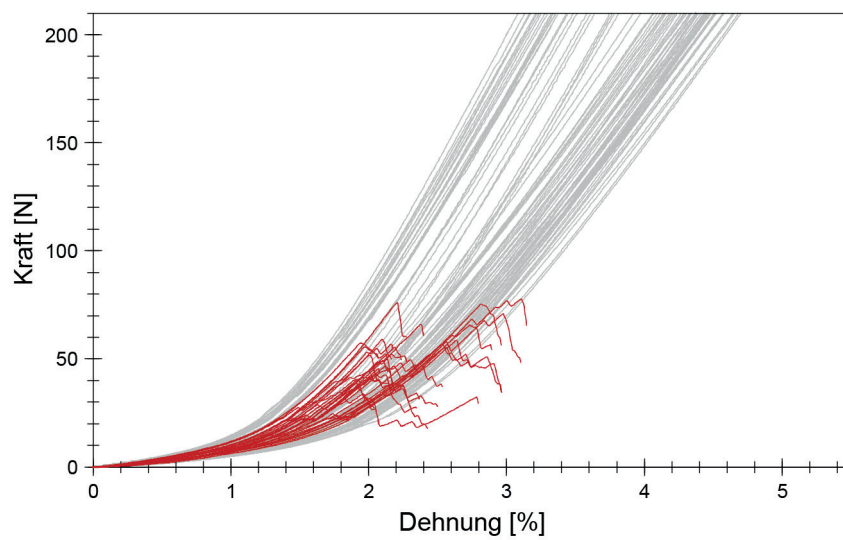


Abb. 31: K-D-Diagramm von Typ **5d. SL + WS nativ ($\ddot{U}+V$)** im Vergleich zur Referenz.

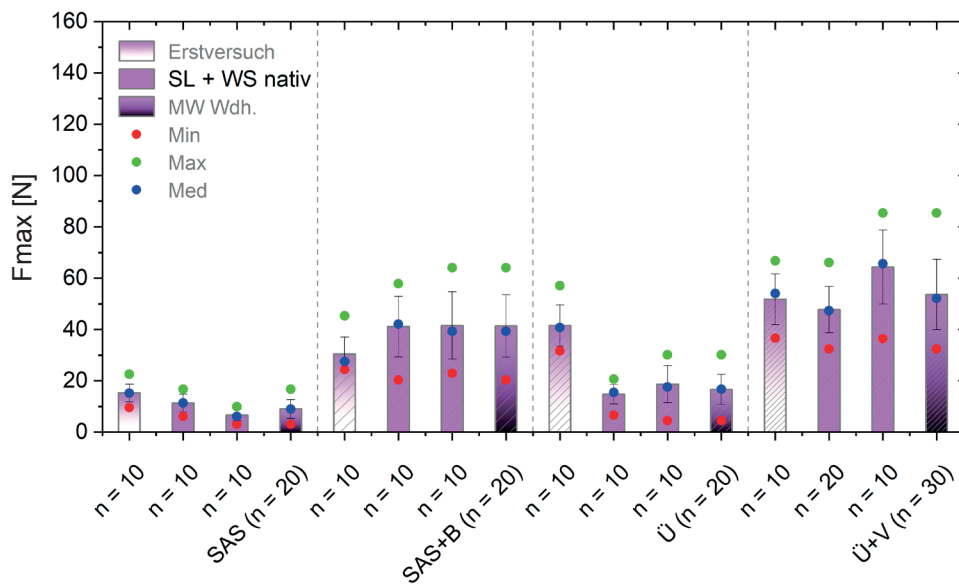


Abb. 32: Durchschnittliche Höchstzugkraft der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**5a-d. Störleim + Weizenstärkekleister nativ**).

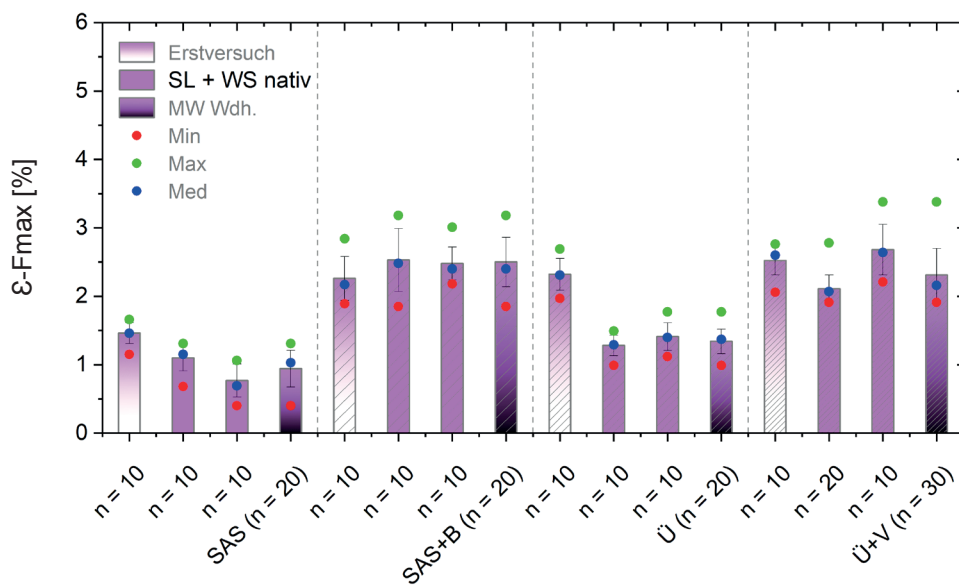


Abb. 33: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**5a-d. Störleim + Weizenstärkekleister nativ**).

6a. Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert (SAS)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ε Fmax [%]	F Bruch [N]	ε Bruch [%]	F 2% ε [N]
Nr. 1	MW	101,57	7,2	1,2	0,99	6,42	1,19	-
	S	0,08	2,19	0,36	0,21	2,29	0,24	-
	VK	0,08	30,44	30,42	21,39	35,6	20,58	-
	Med	101,56	6,98	1,17	0,95	6,14	1,16	-
	Min	101,46	4,39	0,73	0,75	3,5	0,76	-
	Max	101,72	10,69	1,78	1,45	10,69	1,55	-
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ε Fmax [%]	F Bruch [N]	ε Bruch [%]	F 2% ε [N]
Nr. 2	MW	101,51	11,34	1,89	1,16	10,86	1,19	-
	S	0,04	3,96	0,66	0,2	3,83	0,22	-
	VK	0,04	34,94	34,98	17,1	35,25	18,86	-
	Med	101,53	12,32	2,06	1,18	11,39	1,19	-
	Min	101,43	6,5	1,08	0,84	6,5	0,84	-
	Max	101,56	19,49	3,25	1,56	18,28	1,57	-
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ε Fmax [%]	F Bruch [N]	ε Bruch [%]	F 2% ε [N]
Gesamt	MW	101,54	9,27	1,54	1,08	8,64	1,19	-
	S	0,07	3,77	0,63	0,22	3,82	0,23	-
	VK	0,07	40,7	40,76	20,32	44,22	19,21	-
	Med	101,54	8,43	1,41	1,13	7,53	1,18	-
	Min	101,43	4,39	0,73	0,75	3,5	0,76	-
	Max	101,72	19,49	3,25	1,56	18,28	1,57	-

6b. Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert (SAS+B)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	101,55	40,63	6,77	2,45	23,13	3,36	30,88
	S	0,06	10,79	1,8	0,39	5,93	0,64	6,53
	VK	0,06	26,57	26,58	15,7	25,63	19,13	21,14
	Med	101,55	38,95	6,49	2,28	25,25	3,27	30,63
	Min	101,44	23,11	3,85	2,03	11,4	2,43	22,68
	Max	101,64	55,54	9,26	3,1	28,78	4,79	39,96
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	101,61	31,76	5,29	2,37	16,8	3,27	26,77
	S	0,12	5,43	0,9	0,18	4,56	0,29	5,13
	VK	0,11	17,09	17,09	7,45	27,16	8,79	19,16
	Med	101,56	31,67	5,28	2,34	15,83	3,22	26,79
	Min	101,5	22,78	3,8	2,16	11,12	2,86	17,6
	Max	101,86	37,96	6,33	2,71	27,28	3,86	35,81
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	101,58	36,19	6,03	2,41	19,96	3,31	28,83
	S	0,1	9,48	1,58	0,29	6,09	0,49	6,09
	VK	0,09	26,19	26,19	12,24	30,49	14,67	21,13
	Med	101,56	36,39	6,07	2,31	18,91	3,22	28,28
	Min	101,44	22,78	3,8	2,03	11,12	2,43	17,6
	Max	101,86	55,54	9,26	3,1	28,78	4,79	39,96

6c. Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert (Ü)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	101,59	20,4	3,4	1,55	18,6	1,63	-
	S	0,09	4,98	0,83	0,21	4,98	0,21	-
	VK	0,09	24,39	24,34	13,3	26,78	13,17	-
	Med	101,61	18,96	3,16	1,6	17,93	1,68	-
	Min	101,46	11,74	1,96	1,14	10,9	1,15	-
	Max	101,69	28,15	4,69	1,81	25,09	1,86	-

6d. Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert (Ü+V)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	101,55	48,28	8,05	2,19	40,19	2,31	38,83
	S	0,08	5,63	0,94	0,18	7,56	0,16	6,45
	VK	0,08	11,66	11,67	8,29	18,81	6,72	16,61
	Med	101,54	49,41	8,24	2,23	41,81	2,26	38,6
	Min	101,44	36,8	6,13	1,8	28,16	2,07	30,98
	Max	101,65	54,97	9,16	2,44	48,44	2,62	52,75
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	101,61	49,46	8,24	2,29	40,93	2,41	38,95
	S	0,08	6,52	1,09	0,17	8,22	0,2	6,67
	VK	0,08	13,17	13,17	7,43	20,08	8,34	17,11
	Med	101,6	48,05	8,01	2,27	41,18	2,48	38,47
	Min	101,43	39,07	6,51	2,09	26,67	2,09	28,73
	Max	101,77	59,91	9,99	2,55	55,44	2,75	52,74
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	101,58	48,87	8,15	2,24	40,56	2,36	38,89
	S	0,08	5,96	0,99	0,18	7,69	0,18	6,38
	VK	0,08	12,19	12,2	7,98	18,97	7,76	16,41
	Med	101,6	49,02	8,17	2,24	41,81	2,35	38,6
	Min	101,43	36,8	6,13	1,8	26,67	2,07	28,73
	Max	101,77	59,91	9,99	2,55	55,44	2,75	52,75

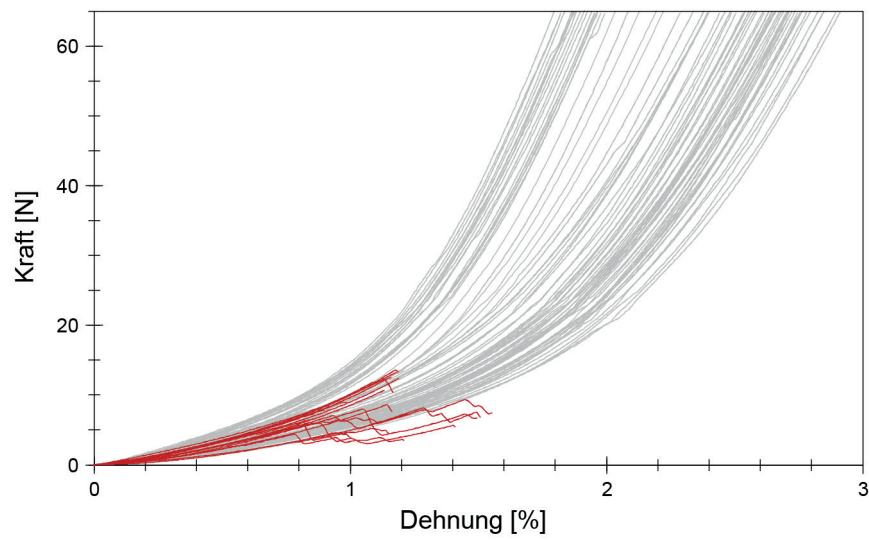


Abb. 34: K-D-Diagramm von Typ **6a**. **SL + WS modifiziert (SAS)** im Vergleich zur Referenz.

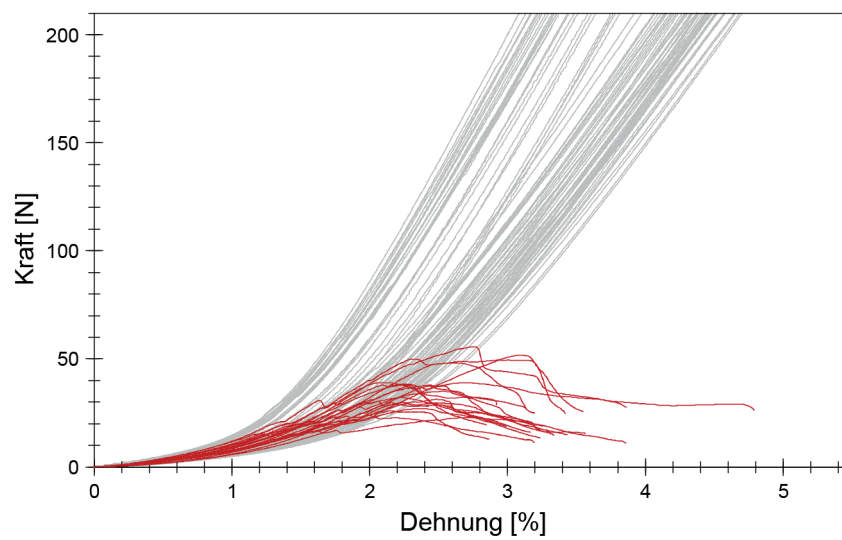


Abb. 35: K-D-Diagramm von Typ **6b**. **SL + WS modifiziert (SAS+B)** im Vergleich zur Referenz.

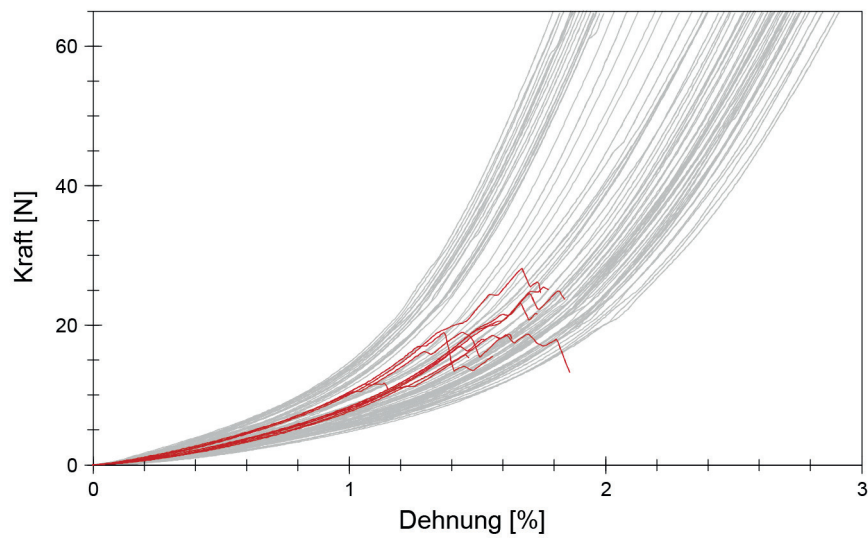


Abb. 36: K-D-Diagramm von Typ **6c**. **SL + WS modifiziert (\ddot{U})** im Vergleich zur Referenz.

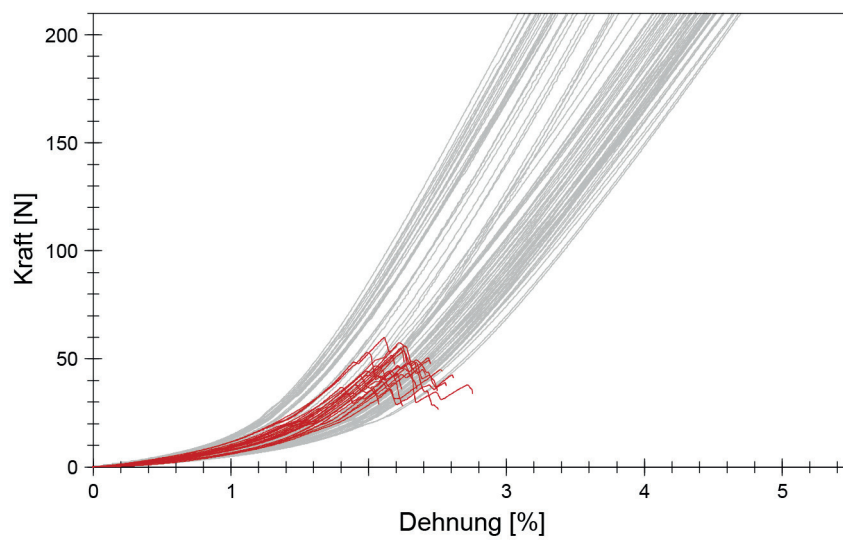


Abb. 37: K-D-Diagramm von Typ **6d**. **SL + WS modifiziert ($\ddot{U}+V$)** im Vergleich zur Referenz.

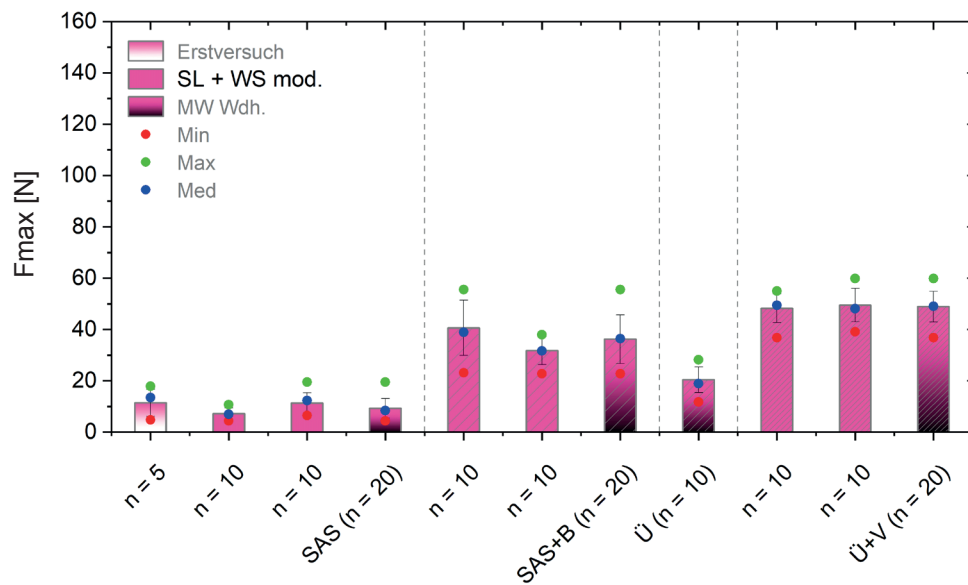


Abb. 38: Durchschnittliche Höchstzugkraft der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**6a-d. Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert**).

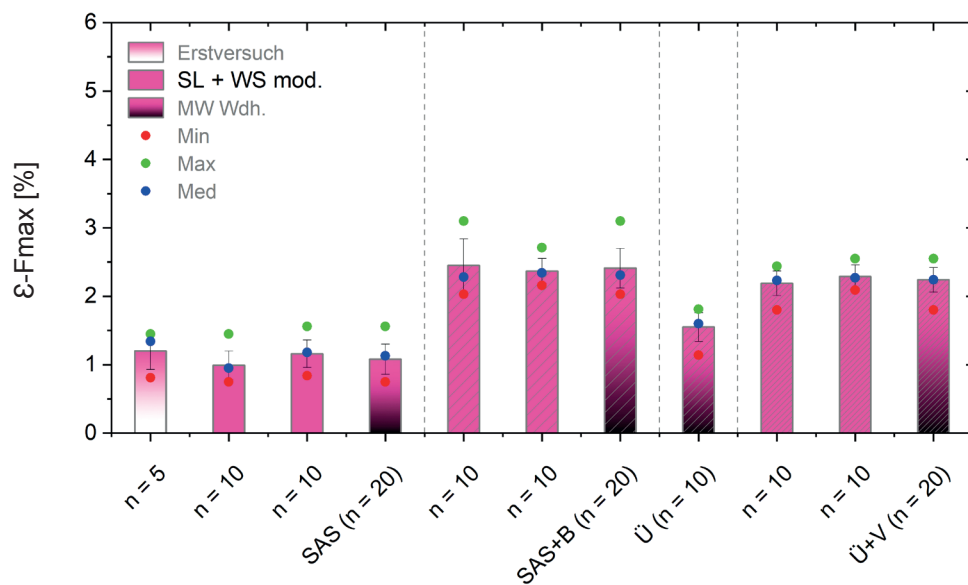


Abb. 39: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (**6a-d. Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert**).

7a. Störleim + Arbocel BWW 40 (SAS)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,2	23,13	3,86	1,67	20,65	1,76	17,46
	S	0,08	7,61	1,27	0,28	7,48	0,28	4,18
	VK	0,08	32,92	32,9	16,58	36,21	16,17	23,92
	Med	100,19	23,1	3,85	1,69	19,49	1,81	15,93
	Min	100,08	10,27	1,71	1,16	9,49	1,18	14,27
	Max	100,39	38,72	6,45	2,31	38,72	2,31	22,19
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,59	35,5	5,92	2,02	27,8	2,29	14,27
	S	0,26	6,18	1,03	0,25	5,3	0,31	1,74
	VK	0,26	17,4	17,42	12,4	19,05	13,33	12,2
	Med	100,71	34,39	5,73	1,99	26,84	2,24	14,04
	Min	100,12	25,82	4,3	1,6	21,86	1,89	11,56
	Max	100,93	45,73	7,62	2,55	38,97	2,98	17,3
Versuch	n = 30	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,35	28,01	4,67	1,81	23,47	1,97	15,23
	S	0,26	9,3	1,55	0,32	7,5	0,39	2,88
	VK	0,26	33,19	33,19	17,52	31,98	19,88	18,9
	Med	100,27	27,86	4,64	1,82	22,73	1,93	14,38
	Min	100,08	10,27	1,71	1,16	9,49	1,18	11,56
	Max	100,93	45,73	7,62	2,55	38,97	2,98	22,19

7b. Störleim + Arbocel BWB 40 (SAS+B)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,15	55,84	9,31	2,35	28,74	3,14	42,66
	S	0,06	9,11	1,52	0,22	5,66	0,32	5,85
	VK	0,06	16,31	16,3	9,28	19,71	10,17	13,72
	Med	100,15	55,54	9,26	2,32	28,3	3,12	42,18
	Min	100,04	42,06	7,01	2,09	21	2,6	35,12
	Max	100,26	67,47	11,24	2,82	38,61	3,6	52,41
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,14	60,46	10,08	2,57	33,89	3,38	43,6
	S	0,09	9,26	1,54	0,23	7,91	0,35	6,61
	VK	0,09	15,32	15,32	8,89	23,34	10,44	15,16
	Med	100,13	60,34	10,06	2,52	32,13	3,24	43,91
	Min	100,05	46,18	7,7	2,25	25,58	3,07	30,81
	Max	100,35	78,11	13,02	2,97	53,64	4,16	54,81
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,14	58,15	9,69	2,46	31,31	3,26	43,13
	S	0,08	9,25	1,54	0,24	7,2	0,35	6,1
	VK	0,08	15,91	15,9	9,93	22,99	10,73	14,13
	Med	100,14	59,53	9,92	2,43	31,3	3,22	43,24
	Min	100,04	42,06	7,01	2,09	21	2,6	30,81
	Max	100,35	78,11	13,02	2,97	53,64	4,16	54,81

7c. Störleim + Arbocel BWW 40 (Ü)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,12	58,65	9,77	2,7	41,2	2,92	29,23
	S	0,04	15	2,5	0,29	9,49	0,33	3,51
	VK	0,04	25,58	25,57	10,65	23,04	11,17	12
	Med	100,11	59,56	9,93	2,76	41,06	2,8	29,38
	Min	100,05	34,3	5,72	2,13	21,67	2,46	24,85
	Max	100,17	84,55	14,09	3,04	58,16	3,52	35,25
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,31	68,17	11,36	2,23	56,38	2,31	56,87
	S	0,08	9,32	1,55	0,17	13,84	0,2	5,3
	VK	0,08	13,68	13,67	7,45	24,54	8,48	9,31
	Med	100,31	71,1	11,85	2,18	54,74	2,36	55,65
	Min	100,22	54,61	9,1	1,97	38,95	1,97	49,37
	Max	100,49	81,3	13,55	2,49	78,05	2,55	64,46
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,22	63,41	10,57	2,46	49,19	2,6	42,32
	S	0,12	13,1	2,18	0,33	14,02	0,41	14,82
	VK	0,12	20,66	20,66	13,56	28,49	15,72	35,02
	Med	100,22	60,71	10,12	2,45	45,85	2,48	35,25
	Min	100,05	34,3	5,72	1,97	21,67	1,97	24,85
	Max	100,49	84,55	14,09	3,04	78,05	3,52	64,46

7d. Störleim + Arbocel BWB 40 (Ü+V)

Versuchsstatistik								
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 1	MW	100,31	117,65	19,61	3,01	90,94	3,37	47,22
	S	0,14	23,79	3,97	0,21	29,78	0,33	9,38
	VK	0,14	20,22	20,22	7,11	32,75	9,66	19,87
	Med	100,27	119,71	19,95	3,01	84,61	3,38	47,44
	Min	100,2	84,13	14,02	2,66	53,53	2,86	33,48
	Max	100,65	149,02	24,84	3,3	147,5	3,89	62,98
Versuch	n = 10	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Nr. 2	MW	100,33	124	20,67	3,06	104,19	3,32	45,84
	S	0,12	22,43	3,74	0,3	30,72	0,2	5,91
	VK	0,12	18,09	18,08	9,75	29,48	6,05	12,89
	Med	100,38	127,95	21,33	3,08	101,87	3,33	44,29
	Min	100,15	95,12	15,85	2,49	59,28	3,05	36,77
	Max	100,49	167,37	27,89	3,48	167,28	3,71	55,24
Versuch	n = 20	L0 [mm]	Fmax [N]	σ Fmax [MPa]	ϵ Fmax [%]	F Bruch [N]	ϵ Bruch [%]	F 2% ϵ [N]
Gesamt	MW	100,32	120,83	20,14	3,03	97,57	3,35	46,53
	S	0,13	22,74	3,79	0,25	30,22	0,26	7,66
	VK	0,13	18,82	18,81	8,38	30,97	7,89	16,47
	Med	100,31	125,45	20,91	3,05	93,6	3,34	45,41
	Min	100,15	84,13	14,02	2,49	53,53	2,86	33,48
	Max	100,65	167,37	27,89	3,48	167,28	3,89	62,98

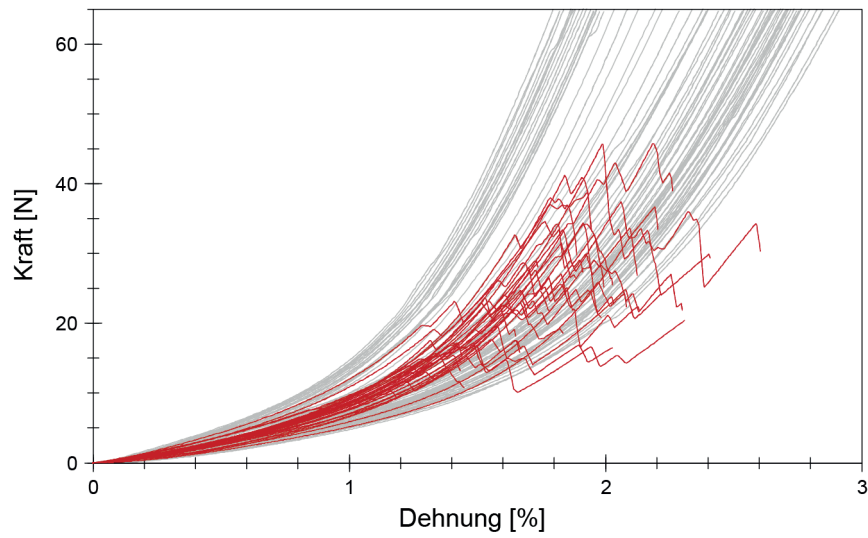


Abb. 40: K-D-Diagramm von Typ **7a. SL + BWW 40 (SAS)** im Vergleich zur Referenz.

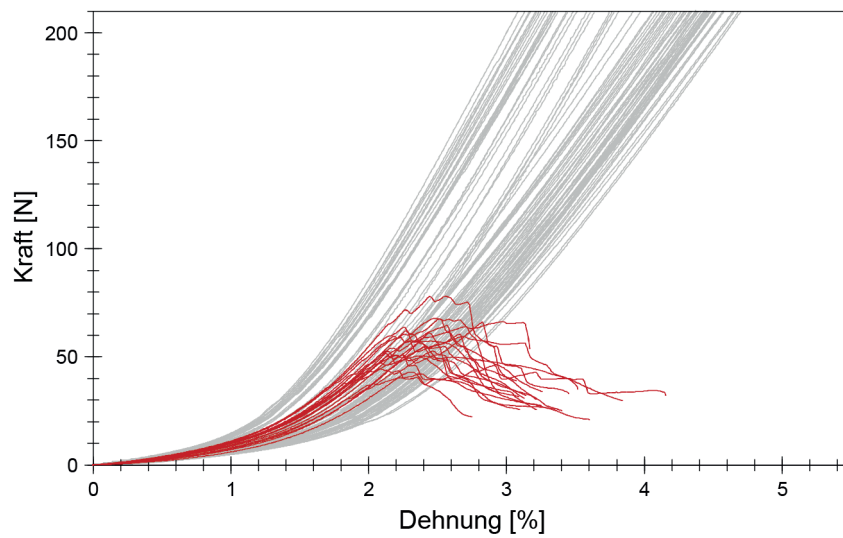


Abb. 41: K-D-Diagramm von Typ **7b. SL + BWW 40 (SAS+B)** im Vergleich zur Referenz.

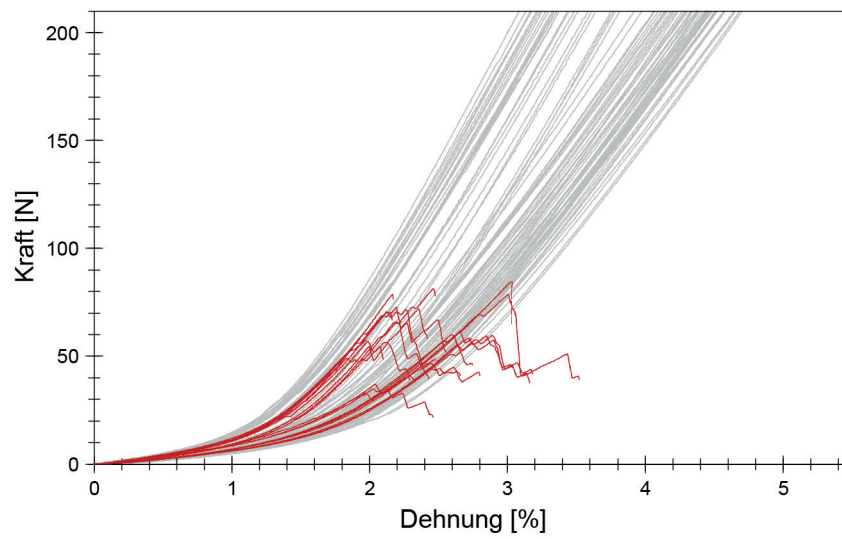


Abb. 42: K-D-Diagramm von Typ 7c. SL + BWW 40 (\ddot{U}) im Vergleich zur Referenz.

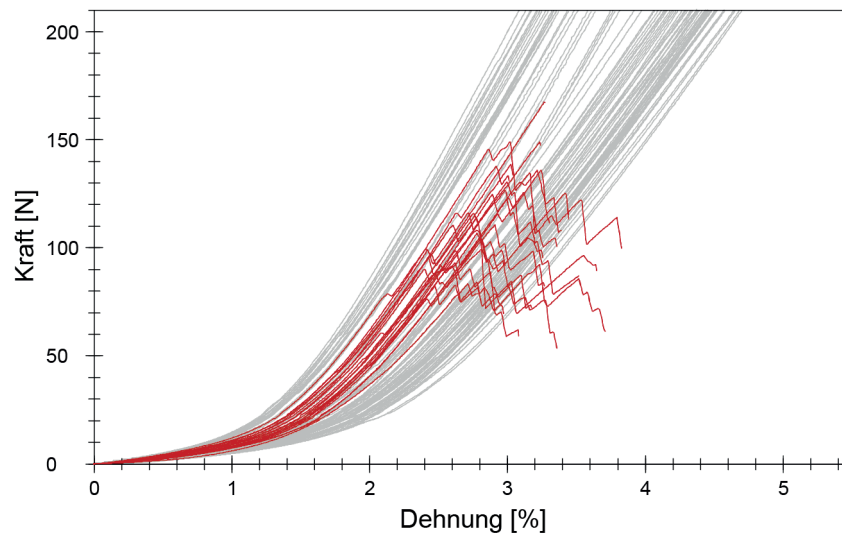


Abb. 43: K-D-Diagramm von Typ 7d. SL + BWW 40 ($\ddot{U}+V$) im Vergleich zur Referenz.

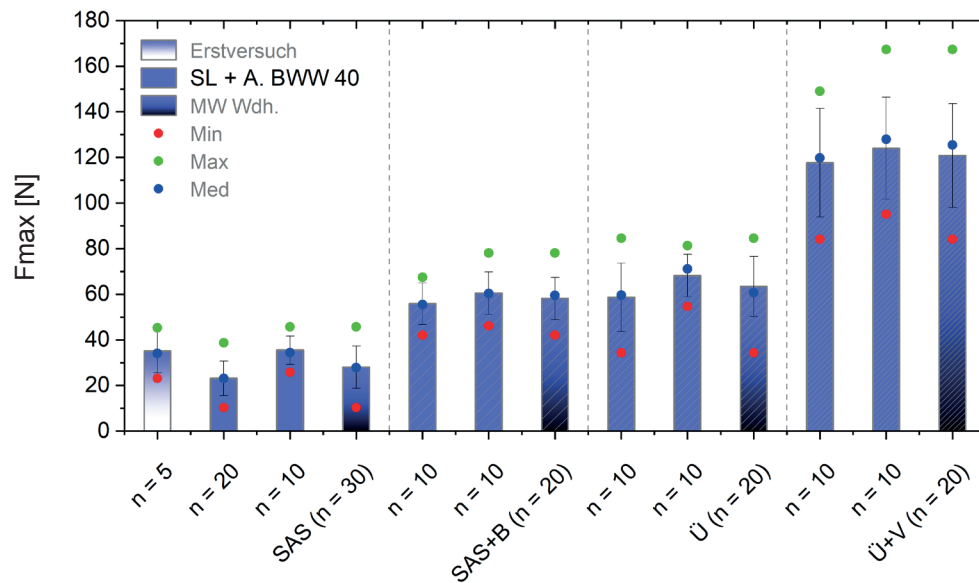


Abb. 44: Durchschnittliche Höchstzugkraft der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (7a-d. Störleim + Arbocel BWW 40).

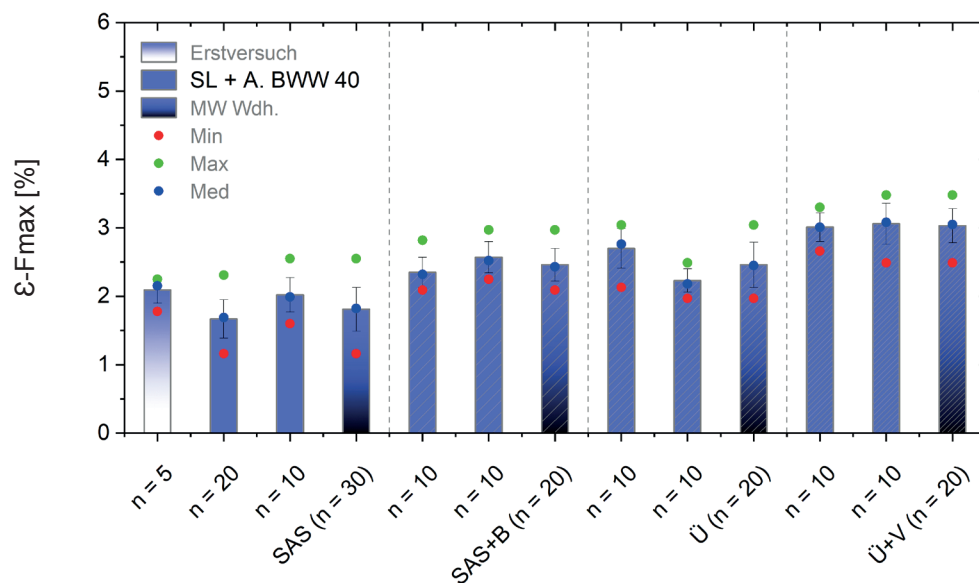


Abb. 45: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der wiederholten Einzelversuche im Vergleich zum Erstversuch sowie zum Mittelwert der wiederholten Einzelversuche (7a-d. Störleim + Arbocel BWW 40).

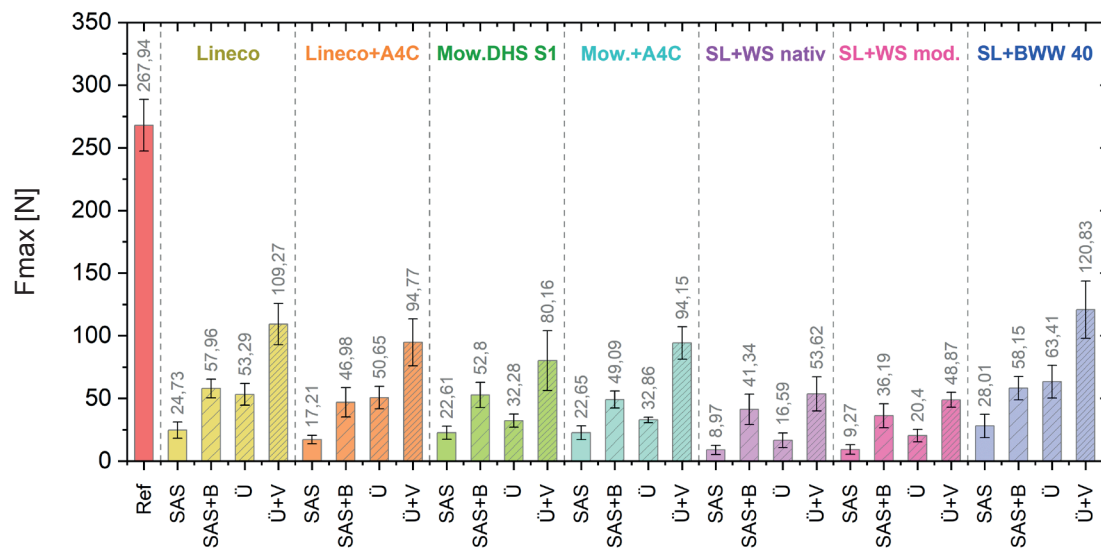


Abb. 46: Vergleich der durchschnittlichen Höchstzugkraft (Mittelwert der wiederholten Einzelversuche) von Referenz- sowie unterschiedlich verklebten Proben.

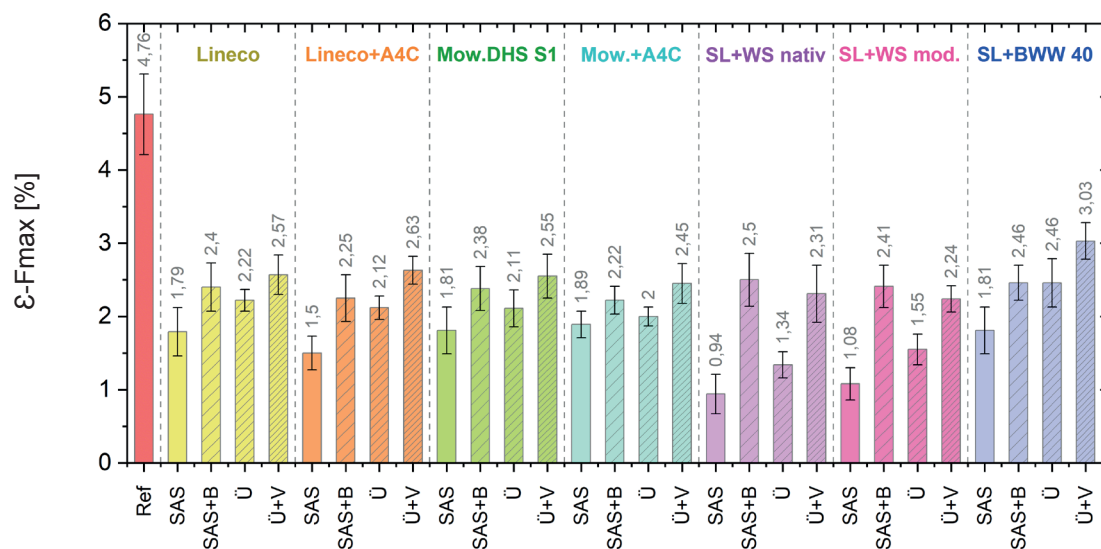


Abb. 47: Vergleich der durchschnittlichen Höchstzugkraftdehnungen (Mittelwert der wiederholten Einzelversuche) von Referenz- sowie unterschiedlich verklebten Proben.

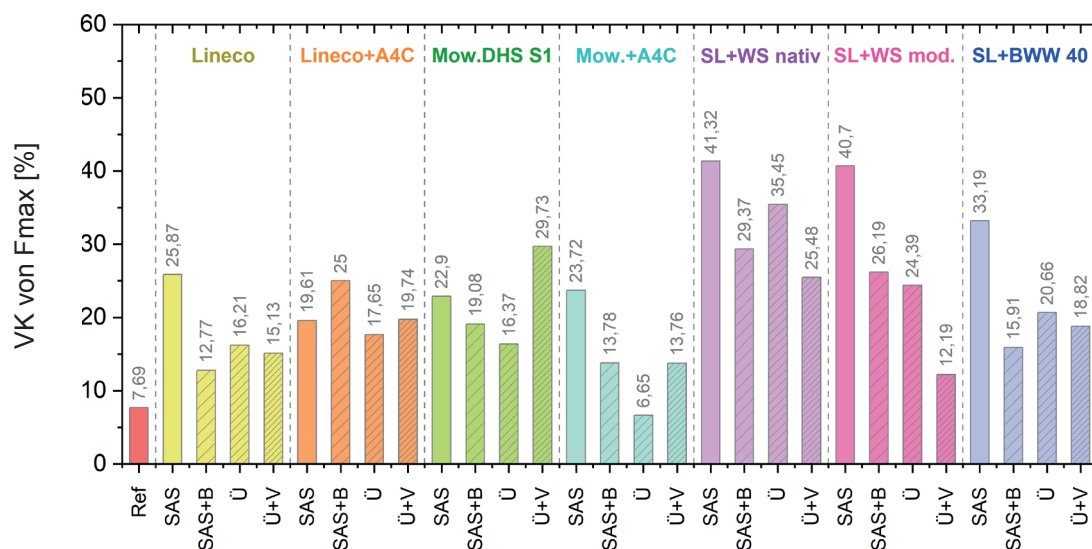


Abb. 48: Vergleich der Variationskoeffizienten der Höchstzugkraft (der wiederholten Einzelversuche) von Referenz- sowie unterschiedlich verklebten Proben.

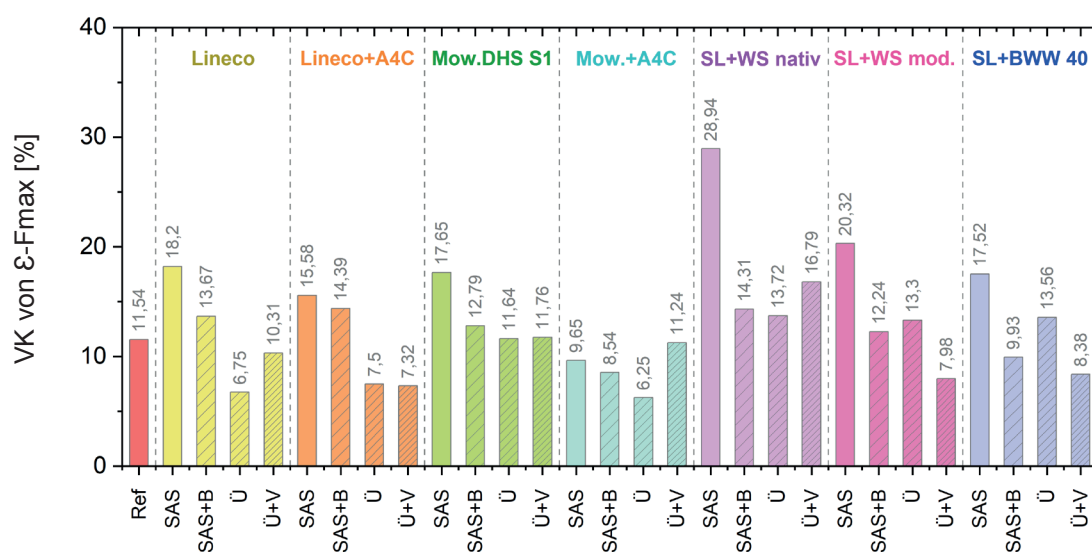


Abb. 49: Vergleich der Variationskoeffizienten der Höchstzugkraftdehnung (der wiederholten Einzelversuche) von Referenz- sowie unterschiedlich verklebten Proben.

A.1.2 Gewebebehandlung und -beschichtung (Vorversuch)

Probekörper		
Gewebe		Pattina L 13 (puro lino), Tessitura Enrico Sironi
Probekörpertyp	A.	Unbehandelt sowie behandelt / beschichtet (Schuss, n = 10)
	B.	Unbehandelt sowie behandelt / beschichtet (Kette, n = 10)
Gewebebehandlung	I.	Unbehandelt
	II.	Dekatur
	III.	Dekatur + warme Vorleimung
	IV.	Warme Vorleimung
	V.	Dekatur + kalte Vorleimung
	VI.	Kalte Vorleimung
	VII.	Grundierung
	VIII.	Dekatur + Grundierung
	IX.	Dekatur + warme Vorleimung + Grundierung
	X.	Warme Vorleimung + Grundierung
	XI.	Dekatur + kalte Vorleimung + Grundierung
	XII.	Kalte Vorleimung + Grundierung
Probengeometrie		Gewebestreifen Kett- / Schussrichtung (L: 200 mm; B: 12 Fäden)
Prüfbedingungen		
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.
Prüfgerät		Zwick Universalprüfmaschine, Typ Z2.5/TN1S
Prüfsoftware		TestXpert I V12.1
Kraftaufnehmer		2 kN
Einspannlänge		100 mm
Vorkraft und -geschwindigkeit		10 cN mit 5 mm/min
Prüfgeschwindigkeit		20 mm/min
Brucherkennung		Kraftabschaltsschwelle 50 % Fmax
Dehnungsermittlung		Via Längenänderung (Traversenweg)

Details zu den unterschiedlichen Gewebebehandlungen sowie der Probendokumentation finden sich unter B.4. Auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Versuchsstatistik wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung ausgewählter Auswertungen:

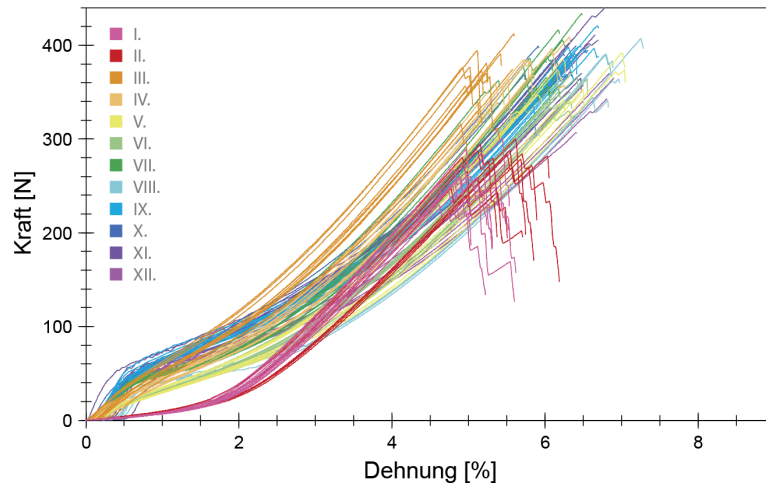


Abb. 01: Kraft-Dehnungs-Diagramm der Schussproben I-XII.

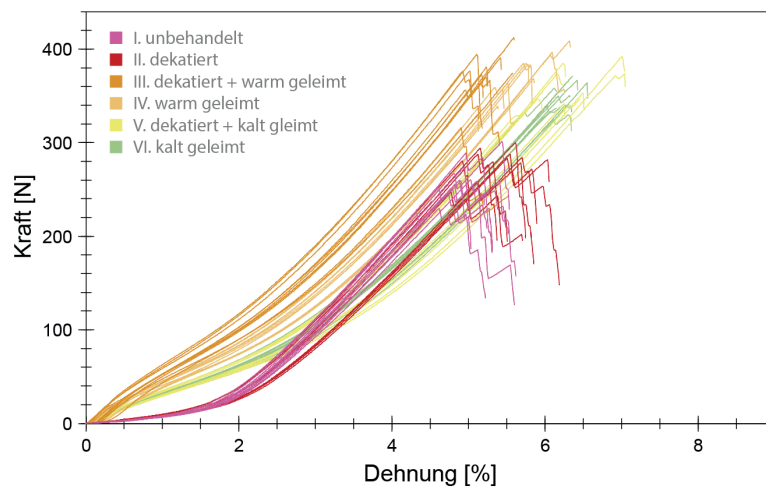


Abb. 02: Kraft-Dehnungs-Diagramm der Schussproben I-VI.

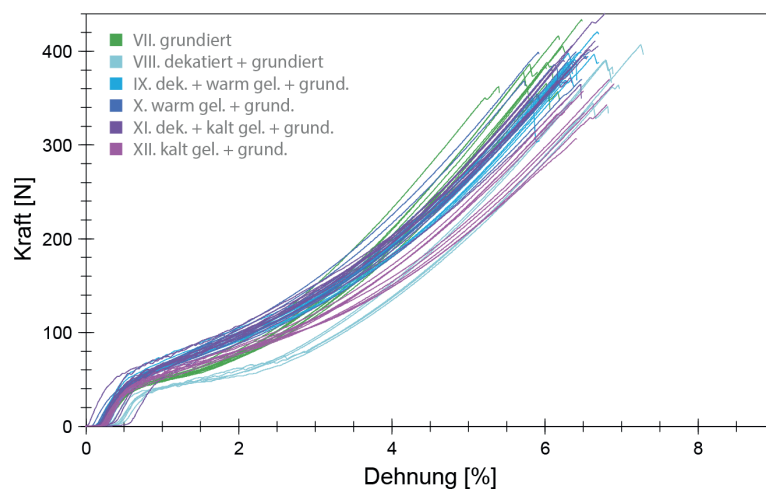


Abb. 03: Kraft-Dehnungs-Diagramm der Schussproben VII-XII.

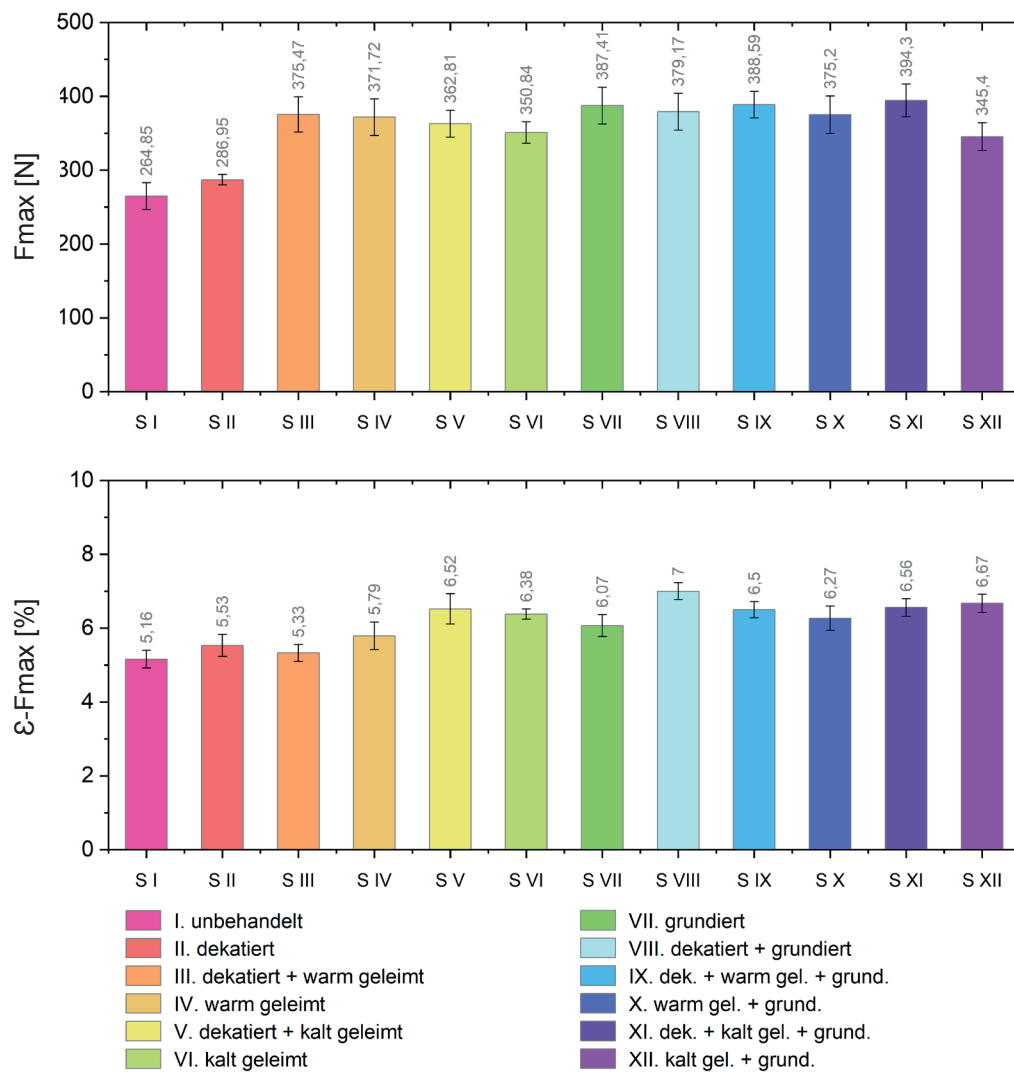
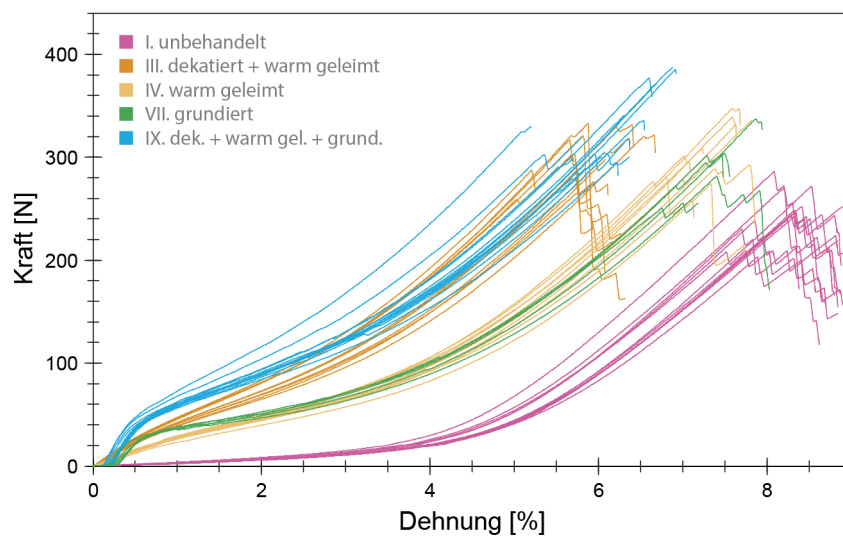
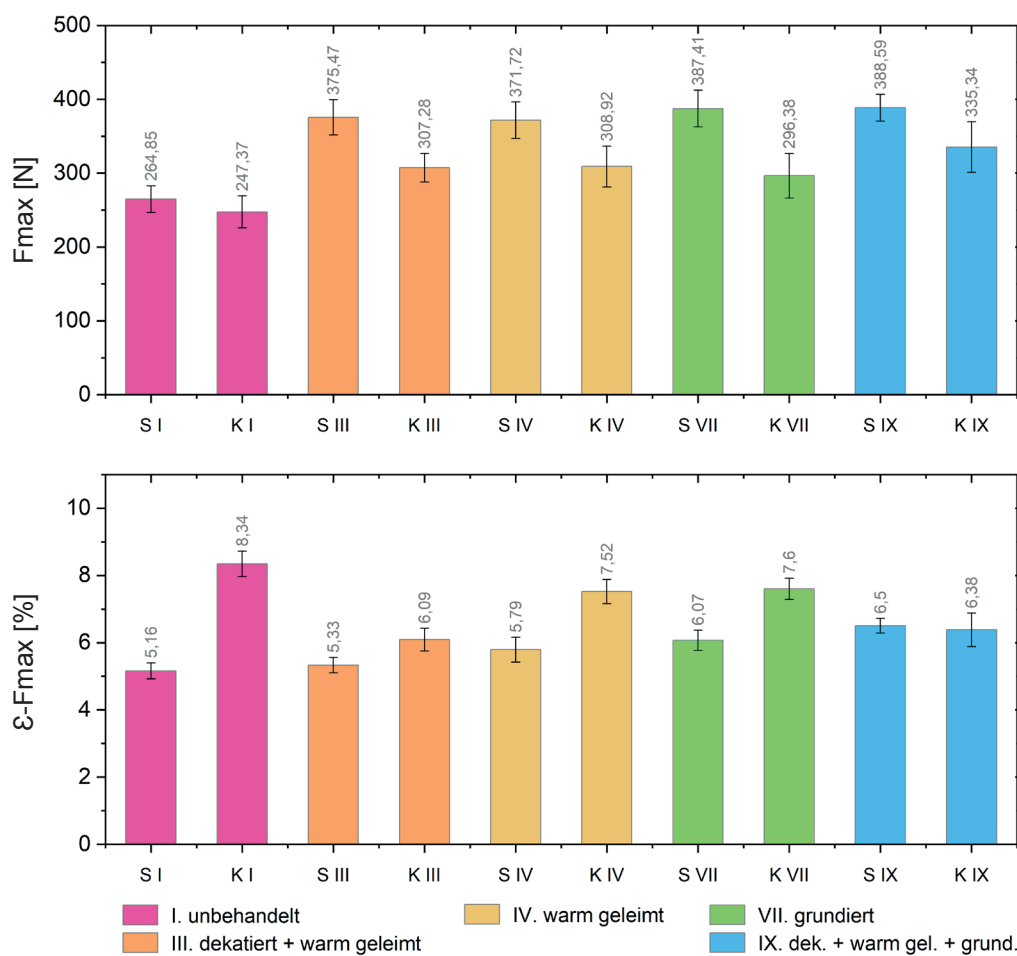


Abb. 04 und 05: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der unterschiedlichen **Schussproben (S)**.

Abb. 06: Kraft-Dehnungs-Diagramm der **Kettproben I, III, IV, VII und IX**.Abb. 07 und 08: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von **Schuss- (S) und Kettproben (K)** im Vergleich.

A.1.3 Verklebungen in un- und beschichtetem Gewebe

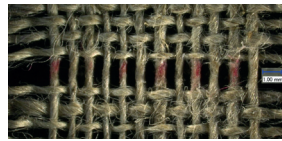
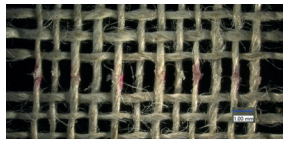
Probekörper			
Gewebe	1.	Pattina L 13 (puro lino), T. E. Sironi, unbeschichtet (Sironi)	
	2.	Claessens Canvas 070, unbeschichtet (C 070)	
	3.	Claessens Canvas 170, acrylgründiert (C 170)	
	4.	Claessens Canvas 70, ölgründiert (C 70)	
Probekörpertyp	A.	Unbeschichtete Referenzen (Schuss / Kette)	
	B.	Verklebte Proben (Schussrichtung)	
Klebstoffauswahl	a.	Lineco + Methocel A4C 5 % (9:1)	
	b.	Mowilith DHS S1 + Methocel A4C 5 % (9:1)	
	c.	Störleim 20 % + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1)	
	d.	Störleim 25 % + Arbocel BWW 40 (20:1)	
Verklebungstechnik		Stoß-auf-Stoß (SAS)	
Probengeometrie		Gewebestreifen Referenzen (L: 200 mm; B: 12 / 24 Fäden)	
		Verklebte Gewebestreifen (L: 200 mm; B: 12 Fäden)	
Prüfbedingungen			
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.	
Prüfgerät		Zwick Universalprüfmaschine, Typ Z2.5 (RetroLine)	
Prüfsoftware		TestXpert II V3.7	
Kraftaufnehmer		100 N / 2 kN	
Einspannlänge		100 mm	
Vorkraft und -geschwindigkeit		1 N mit 5 mm/min	
Prüfgeschwindigkeit		20 mm/min	
Brucherkennung		Kraftabschaltsschwelle 50% Fmax	
Dehnungsermittlung		Via Längenänderung (Traversenweg)	
Steigungsermittlung *	I.	Sekante im Bereich 0,1-1 % Dehnung	
	II.	Regressionsgerade ab 0,1 % Dehnung bis Steigungsrückgang auf 95 % der Maximalsteigung	
	*	weitere Analysen des Kurvenverlaufs wurden archiviert	
Versuchsstatistik		Ergebnisübersicht	
MW	Arithmetischer Mittelwert	Fmax	Höchstzugkraft [N]
S	Standardabweichung	Steigung X	Hilfssteigung gemäß Einstellung [N/mm] s.o.
VK	Variationskoeffizient	ε Fmax	Höchstzugkraftdehnung [%]
Med	Median	W Fmax	Weg / Längenänderung bei Fmax [mm]
Min	Minimum	ε Bruch	Dehnung bei Brucherkennung [%]
Max	Maximum	F X % ε	Kraft bei 0,5 / 1 / 2 % Dehnung [N]

Verklebungstypen / Bearbeitungs- und Rückseite

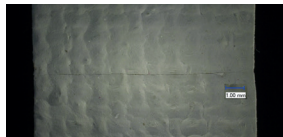
1. Sironi



2. C 070:



3. C 170:



3. C 70

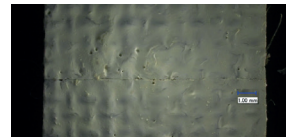
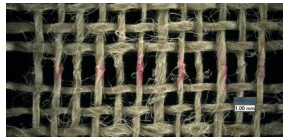
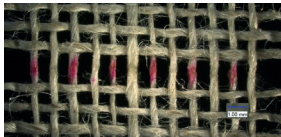
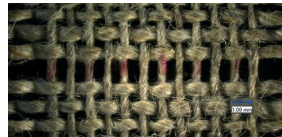


Abb. 01-08: Lineco + Methocel A4C (a).

1. Sironi



2. C 070



3. C 170



4. C 70

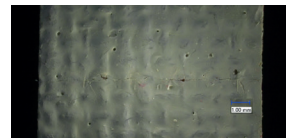
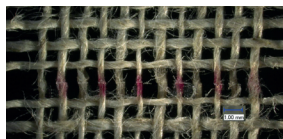
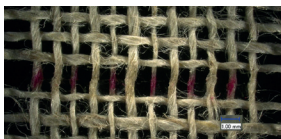
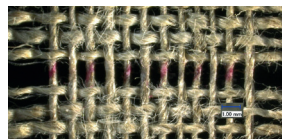


Abb. 09-16: Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (b).

1. Sironi



2. C 070



3. C 170



4. C 70

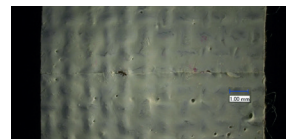
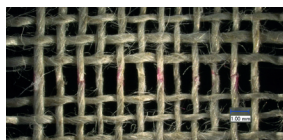
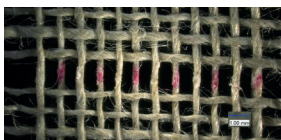
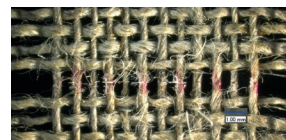
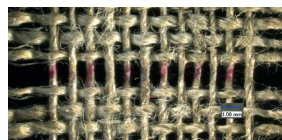


Abb. 17-24: Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert (c).

1. Sironi



2. C 070



3. C 170



4. C 70

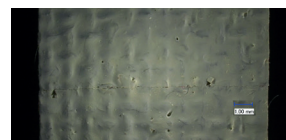


Abb. 25-32: Störleim + Arbocel BWW 40 (d).

1. Referenz / Sironi, unbeschichtet

Versuchsstatistik								
Typ	Schuss / B: 12 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	257,06	8,80	4,81	4,85	5,41	4,50	9,61	41,29
S	15,93	1,09	0,26	0,26	0,16	0,359	1,05	4,22
VK	6,20	12,40	5,49	5,41	2,96	7,96	10,88	10,22
Med	259,36	8,15	4,75	4,78	5,46	4,33	8,98	40,30
Min	235,22	7,60	4,41	4,44	5,10	4,16	8,48	35,28
Max	279,71	10,65	5,34	5,37	5,60	5,16	11,4	49,17
Typ	Schuss / B: 24 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	521,60	16,31	5,47	5,52	6,03	6,93	16,7	65,13
S	26,70	2,43	0,29	0,30	0,27	1,34	2,43	9,81
VK	5,12	14,87	5,33	5,35	4,51	19,30	14,54	15,06
Med	518,76	15,60	5,50	5,54	6,04	6,84	16,1	61,77
Min	469,52	13,37	4,87	4,92	5,59	5,33	13,8	54,45
Max	562,11	19,86	5,90	5,95	6,59	8,90	20,3	79,57
Typ	Kette / B: 12 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	249,83	3,81	7,52	7,60	8,18	2,78	4,82	10,07
S	21,71	0,18	0,20	0,20	0,15	0,0915	0,185	0,39
VK	8,69	4,84	2,62	2,60	1,79	3,29	3,85	3,86
Med	251,05	3,80	7,43	7,50	8,21	2,78	4,82	10,03
Min	215,83	3,58	7,32	7,39	7,95	2,66	4,58	9,57
Max	282,52	4,16	7,89	7,96	8,37	2,94	5,17	10,85

2. Referenz / Claessens 070, unbeschichtet

Versuchsstatistik								
Typ	Schuss / B: 12 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	276,53	10,94	4,82	4,86	5,41	5,13	11,6	48,96
S	29,01	1,50	0,24	0,25	0,27	0,505	1,43	7,33
VK	10,49	13,74	5,01	5,12	4,93	9,85	12,32	14,98
Med	279,13	10,94	4,80	4,83	5,51	5,08	11,6	49,31
Min	241,14	8,44	4,44	4,46	5,03	4,26	9,22	36,53
Max	326,68	12,96	5,17	5,22	5,78	5,79	13,5	60,38
Typ	Schuss / B: 24 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	532,39	18,20	5,53	5,56	6,43	8,07	18,6	69,06
S	37,59	1,93	0,24	0,24	0,38	0,546	1,81	9,82
VK	7,06	10,62	4,38	4,38	5,86	6,77	9,74	14,22
Med	535,67	17,58	5,58	5,61	6,39	7,79	17,9	67,31
Min	476,94	16,27	5,03	5,06	5,84	7,51	16,9	58,74
Max	577,73	22,14	5,80	5,83	7,32	9,11	22,3	89,10
Typ	Kette / B: 12 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	277,26	1,51	14,91	15,21	15,64	1,76	2,55	4,19
S	26,39	0,05	0,46	0,50	0,40	0,0191	0,0435	0,09
VK	9,52	3,49	3,08	3,29	2,57	1,09	1,71	2,16
Med	276,47	1,52	14,76	15,09	15,71	1,76	2,55	4,20
Min	239,15	1,41	14,39	14,60	14,94	1,72	2,47	4,05
Max	324,27	1,57	15,64	15,97	16,26	1,78	2,60	4,30

3. Referenz / Claessens 170, acrylgrundiert

Versuchsstatistik								
Typ	Schuss / B: 12 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	334,43	16,07	8,18	8,22	8,24	9,28	17,4	33,17
S	30,45	0,98	0,29	0,30	0,28	0,584	1,03	1,88
VK	9,11	6,12	3,57	3,61	3,42	6,29	5,93	5,67
Med	332,73	16,18	8,21	8,25	8,24	9,38	17,4	33,34
Min	283,34	14,64	7,74	7,77	7,87	8,09	15,7	30,66
Max	385,12	17,43	8,79	8,84	8,84	10,0	18,8	35,94
Typ	Schuss / B: 24 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	685,78	32,47	9,09	9,14	9,12	17,5	33,8	66,18
S	29,57	1,40	0,24	0,24	0,24	0,730	1,42	2,43
VK	4,31	4,31	2,61	2,61	2,65	4,18	4,21	3,66
Med	687,03	32,55	9,07	9,12	9,10	17,4	33,9	67,03
Min	643,53	30,23	8,65	8,70	8,68	16,1	31,4	62,19
Max	729,12	34,05	9,38	9,43	9,42	18,3	35,2	68,97
Typ	Kette / B: 12 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	315,54	14,57	8,43	8,50	8,50	8,26	15,8	33,01
S	19,29	0,41	0,24	0,24	0,23	0,246	0,434	0,87
VK	6,11	2,85	2,86	2,86	2,73	2,98	2,75	2,62
Med	310,17	14,60	8,42	8,49	8,51	8,21	15,7	33,11
Min	294,59	13,88	8,06	8,13	8,07	7,78	15,0	31,64
Max	347,35	15,21	8,78	8,85	8,83	8,59	16,3	34,29

4. Referenz / Claessens 70, ölgründiert

Versuchsstatistik								
Typ	Schuss / B: 12 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ϵ Fmax [%]	W Fmax [mm]	ϵ Bruch [%]	F 0,5% ϵ [N]	F 1% ϵ [N]	F 2% ϵ [N]
MW	375,58	37,08	6,22	6,26	6,24	20,0	38,2	68,95
S	33,52	1,17	0,27	0,27	0,28	1,01	1,34	2,35
VK	8,92	3,15	4,28	4,28	4,46	5,06	3,50	3,41
Med	372,38	37,28	6,30	6,34	6,31	19,9	38,1	68,45
Min	323,31	35,50	5,71	5,75	5,72	18,4	36,1	65,49
Max	428,81	38,43	6,53	6,57	6,60	21,9	39,7	72,42
Typ	Schuss / B: 24 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ϵ Fmax [%]	W Fmax [mm]	ϵ Bruch [%]	F 0,5% ϵ [N]	F 1% ϵ [N]	F 2% ϵ [N]
MW	784,46	60,66	7,23	7,29	7,24	23,3	57,6	126,21
S	48,58	8,67	0,21	0,21	0,21	5,90	8,30	10,04
VK	6,19	14,29	2,95	2,94	2,96	25,33	14,40	7,95
Med	774,77	60,73	7,17	7,22	7,18	23,8	57,7	126,82
Min	727,78	44,85	6,99	7,05	7,00	13,9	42,8	105,70
Max	892,64	71,99	7,70	7,76	7,72	31,5	68,5	139,05
Typ	Kette / B: 12 Fäden							
n = 10	Fmax [N]	Steigung I [N/mm]	ϵ Fmax [%]	W Fmax [mm]	ϵ Bruch [%]	F 0,5% ϵ [N]	F 1% ϵ [N]	F 2% ϵ [N]
MW	304,00	31,35	8,48	8,54	8,54	19,6	33,5	52,48
S	19,43	0,95	0,23	0,23	0,21	0,486	0,887	1,65
VK	6,39	3,04	2,66	2,65	2,45	2,48	2,65	3,15
Med	302,89	31,50	8,47	8,52	8,53	19,6	33,4	52,33
Min	274,14	29,90	8,15	8,21	8,19	19,0	32,3	50,23
Max	333,61	32,88	8,83	8,89	8,84	20,5	35,2	55,83

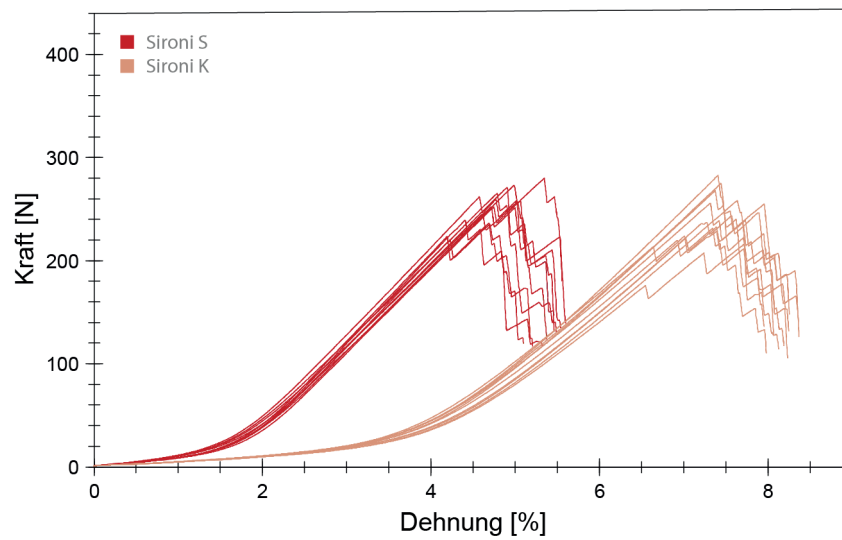


Abb. 33: K-D-Diagramm der Schuss- und Kettproben (S/K, B: 12 Fäden) des Typs **1. Sironi**.

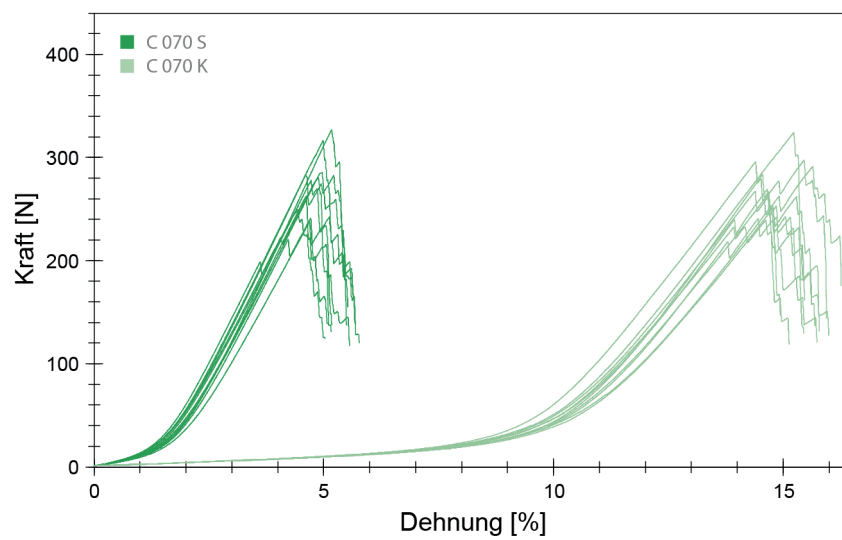


Abb. 34: K-D-Diagramm der Schuss- und Kettproben (S/K, B: 12 Fäden) des Typs **2. C 070**.

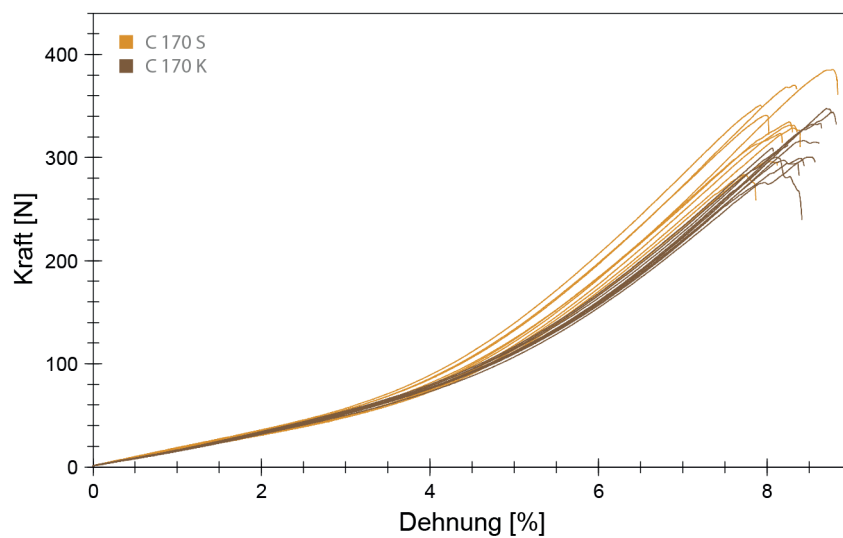


Abb. 35: K-D-Diagramm der Schuss- und Kettproben (S/K, B: 12 Fäden) des Typs 3. C 170.

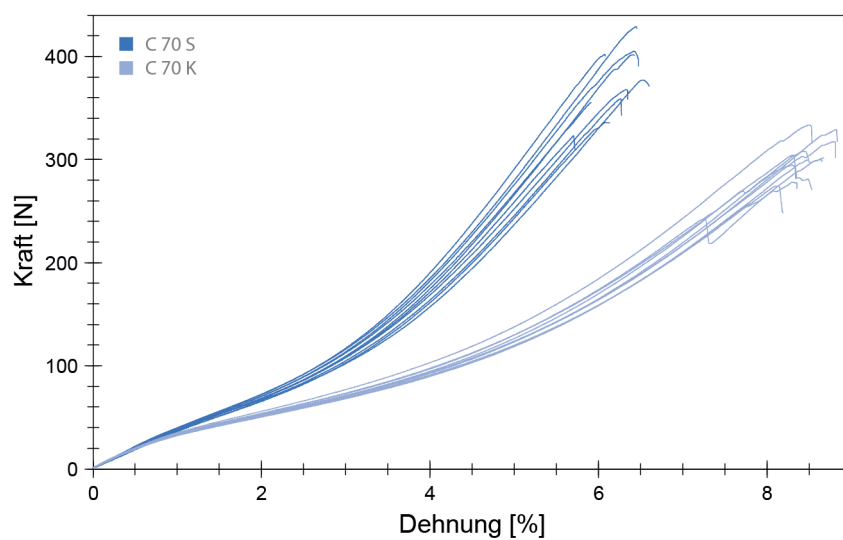
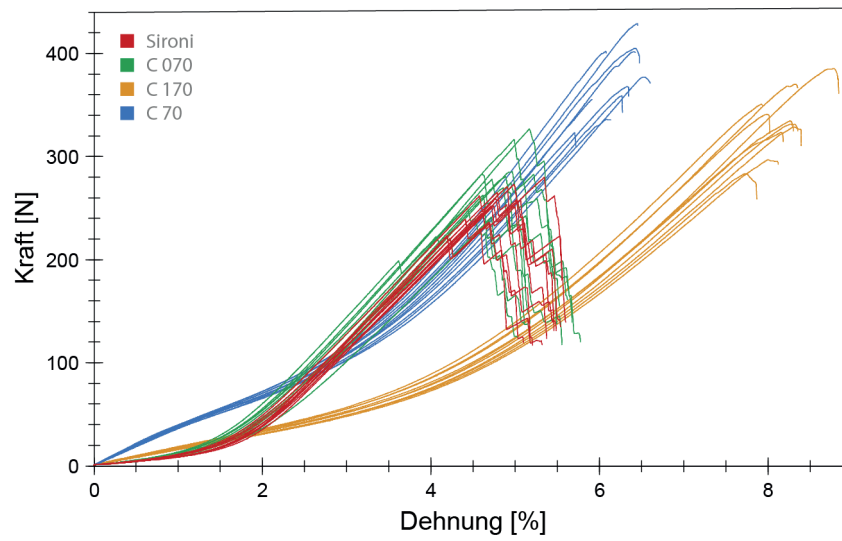
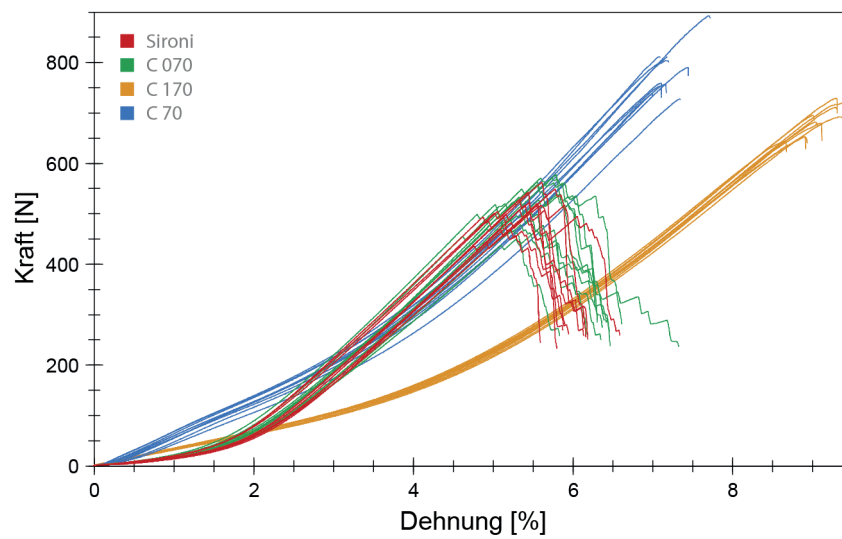


Abb. 36: K-D-Diagramm der Schuss- und Kettproben (S/K, B: 12 Fäden) des Typs 4. C 70.

Abb. 37: K-D-Diagramm der **Schussproben** (B: 12 Fäden) der **Typen 1-4**.Abb. 38: K-D-Diagramm der **Schussproben** (B: 24 Fäden) der **Typen 1-4**.

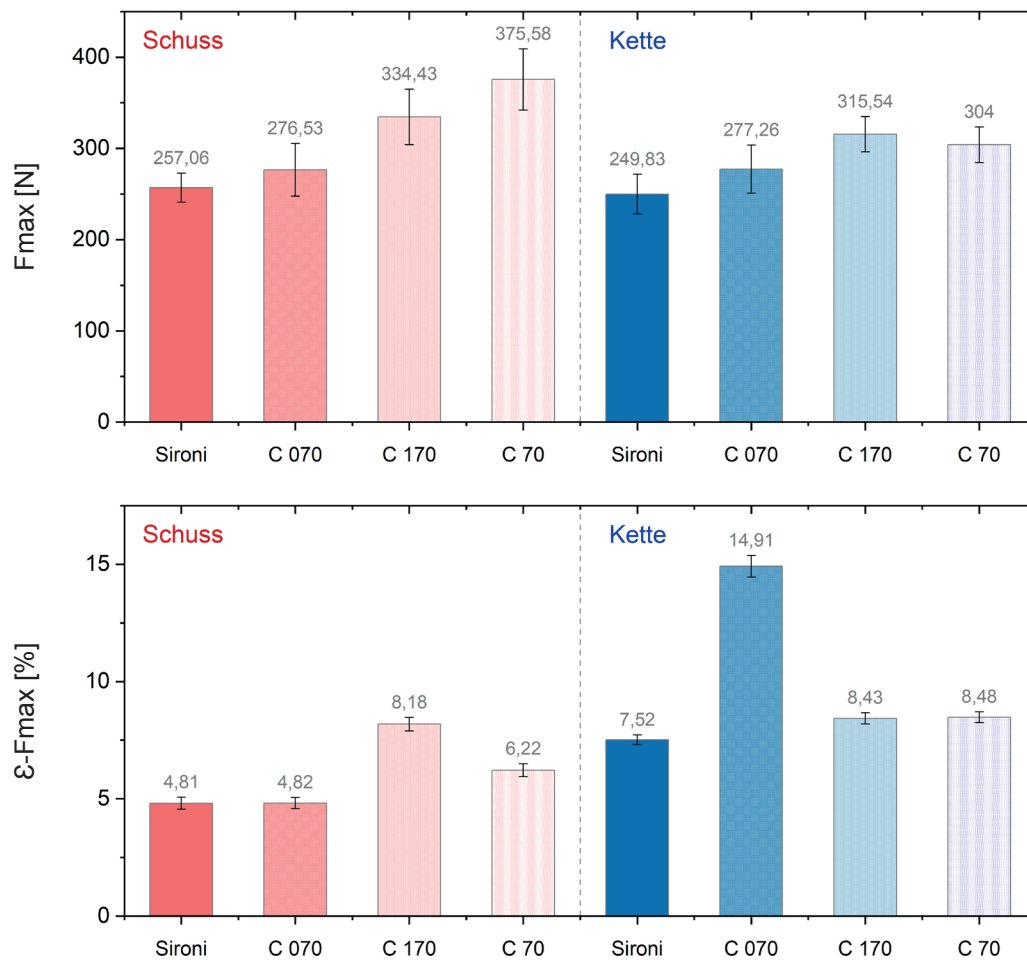


Abb. 39 und 40: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der **Schuss-** und **Kettproben** (S/K, B: 12 Fäden) der **Typen 1-4**.

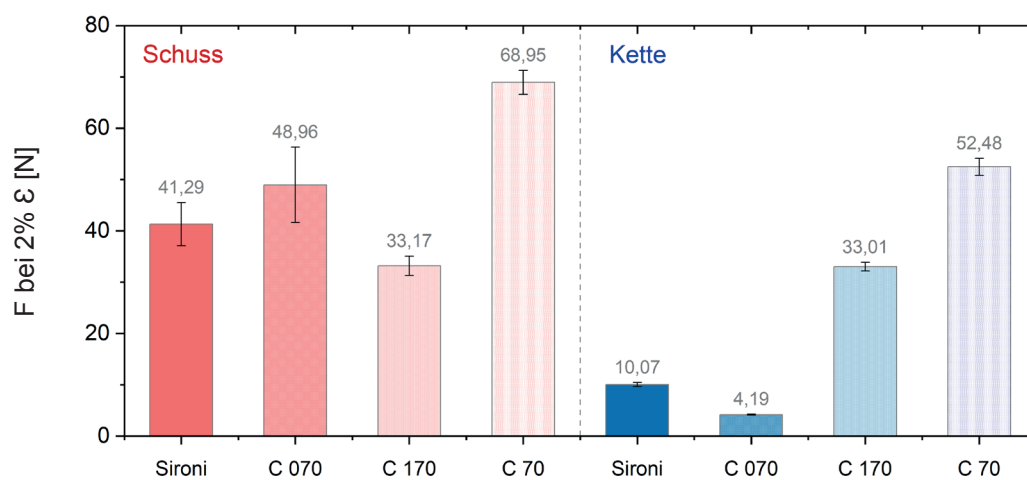


Abb. 41: Durchschnittliche Kraft bei 2 % Dehnung der **Schuss-** und **Kettproben** (S/K, B: 12 Fäden) der **Typen 1-4**.

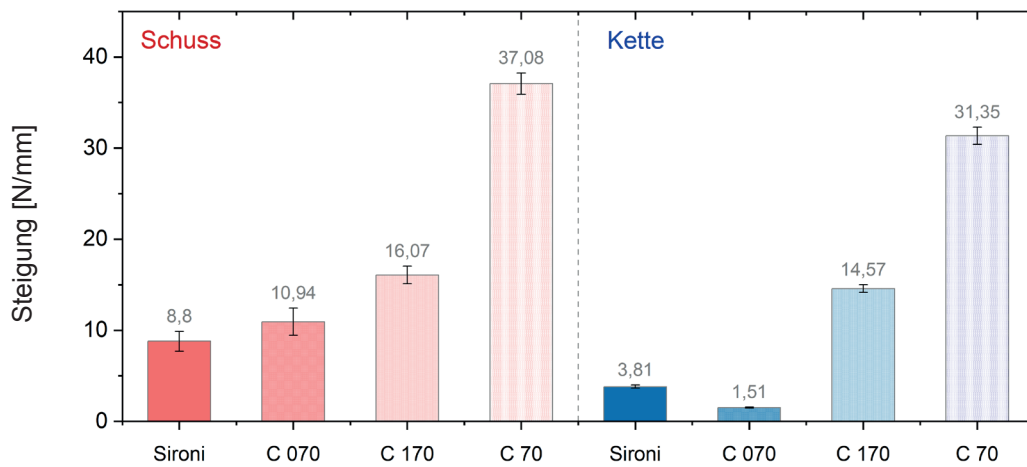


Abb. 42: Durchschnittliche Steigung im Bereich 0,1-1 % Dehnung der **Schuss- und Kettproben** (S/K, B: 12 Fäden) der **Typen 1-4**.

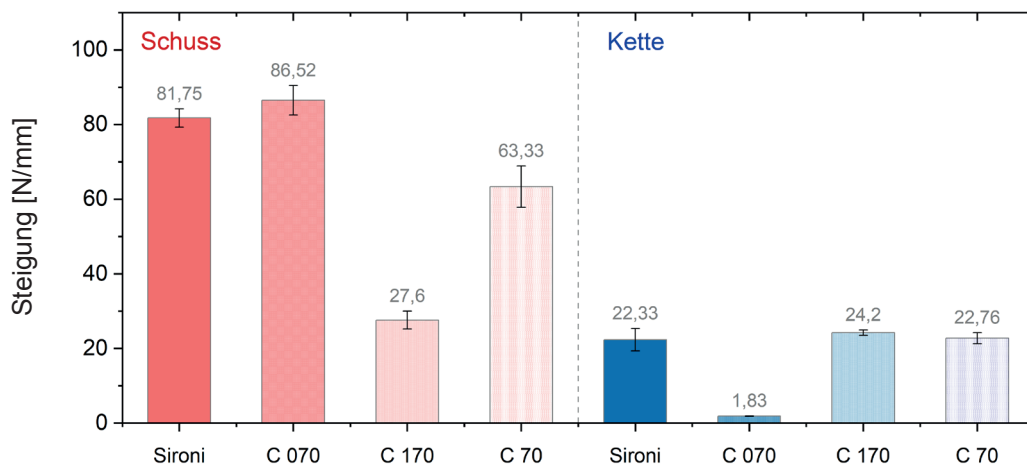


Abb. 43: Durchschnittliche Steigung im Bereich 3-4 % Dehnung der **Schuss- und Kettproben** (S/K, B: 12 Fäden) der **Typen 1-4**.

a. Lineco + Methocel A4C (SAS)

Versuchsstatistik								
Typ	1. Sironi, unbeschichtet							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	21,42	10,02	1,51	1,53	1,63	4,81	10,8	-
S	2,94	0,74	0,09	0,09	0,11	0,264	0,719	-
VK	13,70	7,38	5,83	5,88	6,72	5,48	6,68	-
Med	21,31	9,91	1,52	1,53	1,61	4,77	10,7	-
Min	17,74	8,61	1,39	1,40	1,48	4,31	9,38	-
Max	26,98	11,03	1,69	1,70	1,81	5,19	11,7	-
Typ	2. Claessens 070, unbeschichtet							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	21,50	12,42	1,40	1,41	1,62	5,56	13,0	-
S	2,98	2,07	0,13	0,14	0,16	0,670	1,96	-
VK	13,84	16,67	9,40	9,65	9,79	12,04	15,04	-
Med	21,37	12,60	1,36	1,37	1,57	5,66	13,2	-
Min	16,82	9,60	1,29	1,30	1,42	4,58	10,3	-
Max	26,10	15,20	1,72	1,75	1,92	6,55	15,7	-
Typ	3. Claessens 170, acrylgrundiert							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	31,30	21,20	1,48	1,48	1,49	12,3	22,7	-
S	2,58	0,79	0,12	0,12	0,11	0,508	0,827	-
VK	8,24	3,73	7,81	7,81	7,72	4,15	3,65	-
Med	30,92	21,13	1,47	1,48	1,48	12,2	22,5	-
Min	28,48	20,15	1,33	1,33	1,35	11,6	21,6	-
Max	36,97	22,60	1,66	1,67	1,67	13,2	24,2	-
Typ	4. Claessens 70, ölgrundiert							
n = 10	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	29,70	51,99	0,62	0,62	0,62	25,7	-	-
S	2,71	1,82	0,05	0,05	0,05	1,04	-	-
VK	9,13	3,50	7,83	7,83	8,07	4,06	-	-
Med	30,13	52,12	0,63	0,63	0,64	26,0	-	-
Min	24,17	48,12	0,54	0,54	0,54	23,3	-	-
Max	32,86	55,01	0,69	0,69	0,69	27,4	-	-

b. Mowilith DHS S1 + Methocel A4C (SAS)

Versuchsstatistik								
Typ	1. Sironi, unbeschichtet							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	25,96	9,01	1,79	1,80	2,02	4,46	9,78	21,11
S	3,36	1,50	0,20	0,20	0,22	0,425	1,40	6,96
VK	12,96	16,60	11,22	11,29	10,76	9,52	14,28	32,95
Med	25,90	9,17	1,77	1,79	1,94	4,50	9,89	23,03
Min	21,58	6,49	1,50	1,51	1,81	3,73	7,40	11,15
Max	32,78	10,82	2,14	2,16	2,50	4,98	11,5	27,24
Typ	2. Claessens 070, unbeschichtet							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	36,45	11,93	1,81	1,83	2,07	5,41	12,5	31,08
S	5,24	1,54	0,19	0,20	0,15	0,497	1,46	7,93
VK	14,37	12,88	10,56	10,70	7,29	9,18	11,61	25,52
Med	36,25	11,68	1,88	1,90	2,09	5,34	12,3	30,55
Min	26,23	10,30	1,55	1,56	1,74	4,86	11,0	21,20
Max	44,18	14,76	2,04	2,06	2,25	6,41	15,2	42,17
Typ	3. Claessens 170, acrylgrundiert							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	27,94	20,11	1,35	1,35	1,35	11,4	21,5	-
S	2,94	0,65	0,18	0,18	0,17	0,482	0,739	-
VK	10,53	3,24	13,02	13,08	12,89	4,22	3,45	-
Med	28,21	20,03	1,38	1,38	1,38	11,4	21,4	-
Min	23,87	19,00	1,12	1,12	1,12	10,6	20,2	-
Max	32,51	21,18	1,59	1,60	1,59	12,0	22,5	-
Typ	4. Claessens 70, ölgrundiert							
n = 10	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	31,07	44,62	0,75	0,75	0,75	22,6	-	-
S	3,91	2,89	0,16	0,16	0,16	1,41	-	-
VK	12,59	6,49	21,52	21,52	21,63	6,23	-	-
Med	30,67	44,63	0,70	0,70	0,70	22,6	-	-
Min	26,58	40,72	0,56	0,56	0,56	20,7	-	-
Max	39,72	48,69	1,07	1,08	1,08	24,4	-	-

c. Störleim + Weizenstärkekleister nativ (SAS)

Versuchsstatistik								
Typ	1. Sironi, unbeschichtet							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	18,77	8,68	1,67	1,68	1,80	4,40	9,48	-
S	3,36	1,73	0,28	0,28	0,24	0,532	1,64	-
VK	17,92	19,95	16,78	16,80	13,21	12,09	17,34	-
Med	19,60	8,57	1,71	1,72	1,89	4,41	9,40	-
Min	11,53	6,52	1,25	1,26	1,37	3,71	7,42	-
Max	22,11	12,34	1,97	1,99	1,99	5,50	12,9	-
Typ	2. Claessens 070, unbeschichtet							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	27,04	12,12	1,62	1,63	1,88	5,47	12,7	23,60
S	5,58	2,52	0,25	0,25	0,21	0,796	2,38	4,95
VK	20,64	20,79	15,34	15,47	11,20	14,56	18,71	20,98
Med	29,07	10,81	1,65	1,67	1,90	5,05	11,5	23,60
Min	17,03	8,99	1,09	1,09	1,45	4,47	9,76	20,10
Max	33,22	16,55	1,95	1,97	2,18	6,97	16,9	27,10
Typ	3. Claessens 170, acrylgrundiert							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	40,18	23,10	1,70	1,71	1,70	13,2	24,7	-
S	5,79	0,75	0,24	0,24	0,24	0,476	0,823	-
VK	14,42	3,23	14,04	14,04	14,09	3,60	3,33	-
Med	38,19	23,09	1,66	1,67	1,67	13,3	24,7	-
Min	34,08	21,92	1,39	1,40	1,39	12,3	23,2	-
Max	50,15	24,15	2,09	2,09	2,09	13,9	25,8	-
Typ	4. Claessens 70, ölgrundiert							
n = 10	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	29,36	50,47	0,59	0,59	0,59	25,9	-	-
S	6,60	2,89	0,14	0,14	0,14	1,36	-	-
VK	22,49	5,73	23,65	23,65	23,71	5,26	-	-
Med	30,76	50,44	0,65	0,65	0,65	25,8	-	-
Min	19,32	45,93	0,35	0,35	0,35	23,9	-	-
Max	41,38	54,72	0,81	0,81	0,81	27,7	-	-

d. Störleim + Arbocel BWB 40 (SAS)

Versuchsstatistik								
Typ	1. Sironi, unbeschichtet							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	33,86	9,78	1,87	1,88	2,15	4,76	10,5	27,89
S	8,33	0,88	0,14	0,14	0,14	0,383	0,874	8,54
VK	24,59	9,03	7,51	7,44	6,61	8,05	8,30	30,60
Med	33,69	9,69	1,88	1,90	2,15	4,78	10,5	26,83
Min	19,06	8,33	1,66	1,68	1,96	4,08	9,08	17,49
Max	44,63	11,47	2,08	2,09	2,34	5,47	12,2	38,30
Typ	2. Claessens 070, unbeschichtet							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	42,36	12,68	1,89	1,91	2,19	5,70	13,3	34,42
S	5,31	2,47	0,19	0,19	0,19	0,825	2,35	8,40
VK	12,55	19,45	10,04	10,14	8,88	14,45	17,70	24,39
Med	42,80	13,20	1,89	1,90	2,15	5,80	13,8	31,78
Min	34,61	9,17	1,66	1,67	1,85	4,50	9,94	22,09
Max	50,58	16,49	2,19	2,21	2,50	7,11	16,9	45,27
Typ	3. Claessens 170, acrylgrundiert							
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	42,29	20,75	2,03	2,04	2,04	12,0	22,2	41,48
S	6,28	1,30	0,34	0,34	0,34	0,720	1,32	1,61
VK	14,85	6,29	16,54	16,54	16,49	5,99	5,92	3,88
Med	42,16	20,25	2,04	2,05	2,05	11,8	21,8	41,01
Min	31,09	19,44	1,28	1,29	1,29	11,1	20,6	39,65
Max	53,87	23,72	2,57	2,58	2,57	13,6	25,1	44,23
Typ	4. Claessens 70, ölgrundiert							
n = 10	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	41,06	49,82	0,93	0,94	0,94	25,0	43,5	-
S	4,54	1,00	0,15	0,15	0,15	0,511	0,621	-
VK	11,06	2,00	15,90	15,90	15,77	2,05	1,43	-
Med	40,56	49,72	0,93	0,93	0,93	25,0	43,4	-
Min	34,96	48,18	0,71	0,71	0,72	24,2	42,9	-
Max	50,55	52,02	1,26	1,27	1,26	25,8	44,1	-

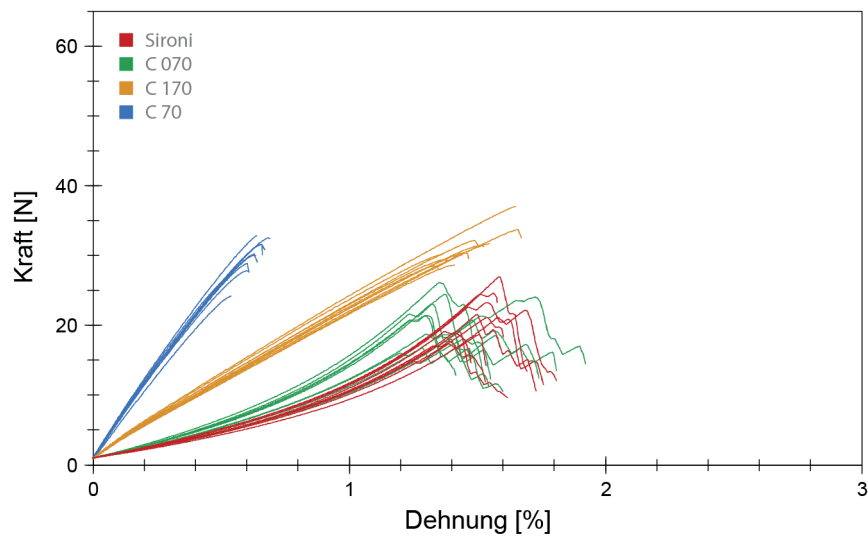


Abb. 44: Vergleichendes K-D-Diagramm der mit **a. Lineco + Methocel A4C** verklebten Schussproben der **Typen 1-4**.

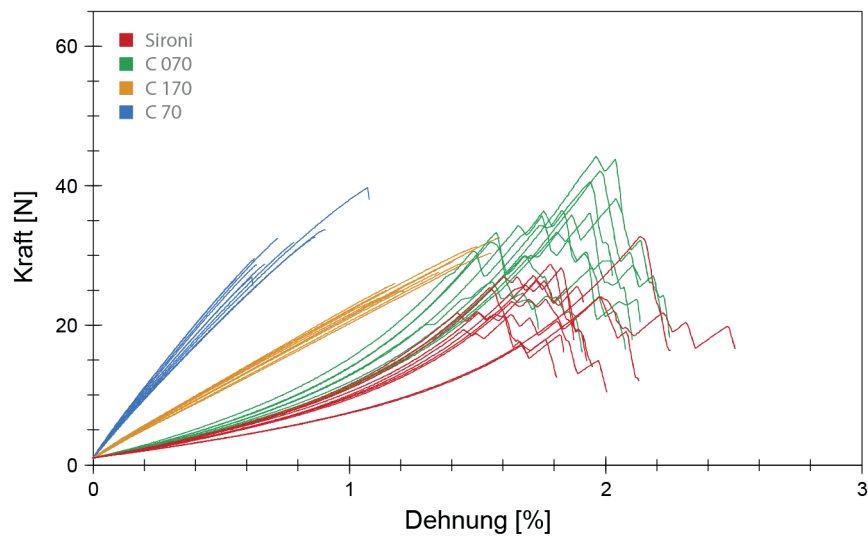


Abb. 45: Vergleichendes K-D-Diagramm der mit **b. Mowilith DHS S1 + Methocel A4C** verklebten Schussproben der **Typen 1-4**.

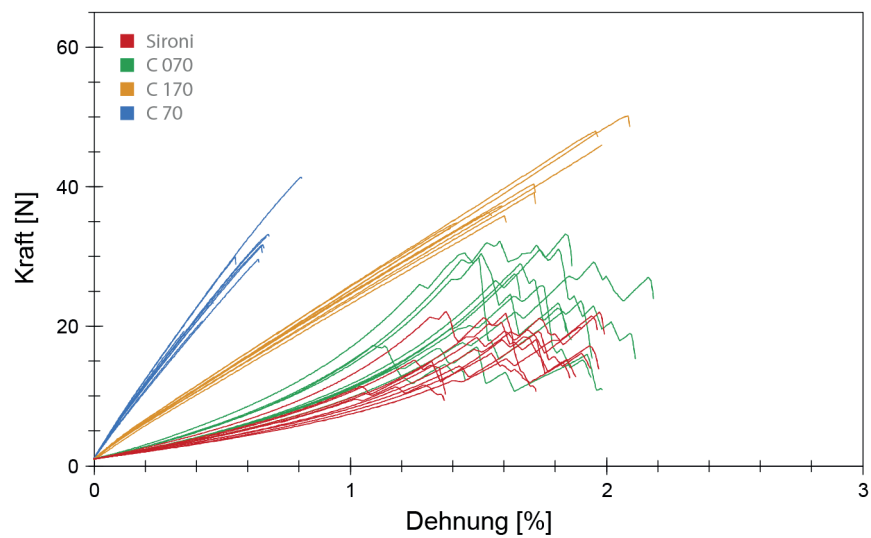


Abb. 46: Vergleichendes K-D-Diagramm der mit **c. Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert** verklebten Schussproben der **Typen 1-4**.

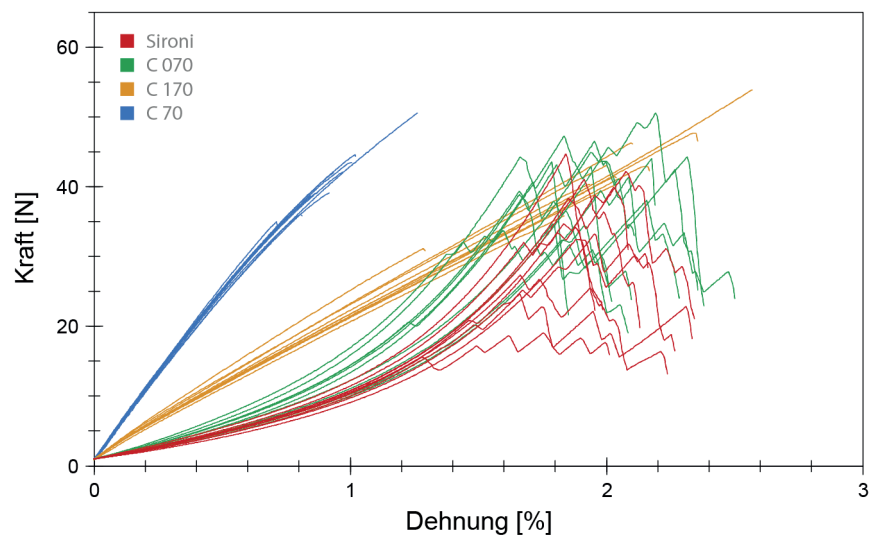


Abb. 47: Vergleichendes K-D-Diagramm der mit **d. Störleim + Arbocel BWW 40** verklebten Schussproben der **Typen 1-4**.

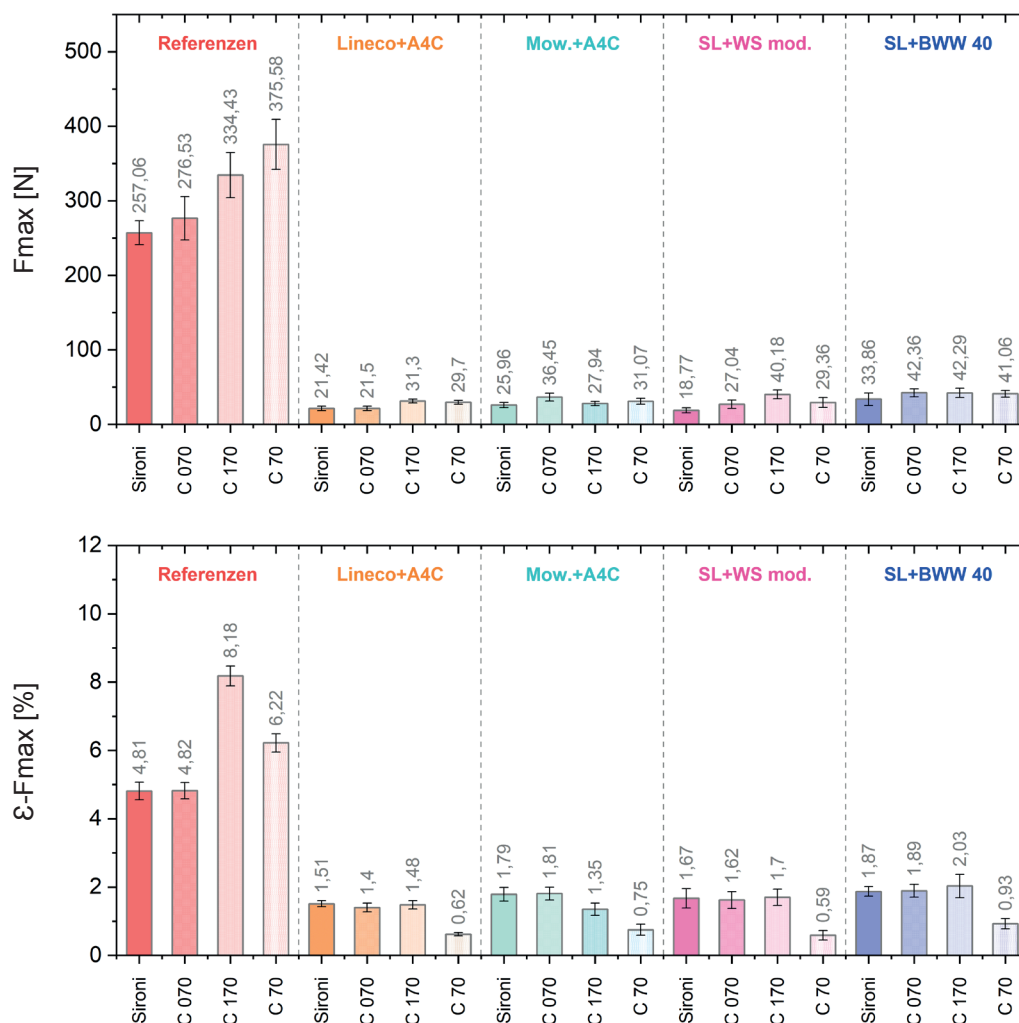


Abb. 48 und 49: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der intakten und verklebten (SAS) Schussproben der Typen 1-4.

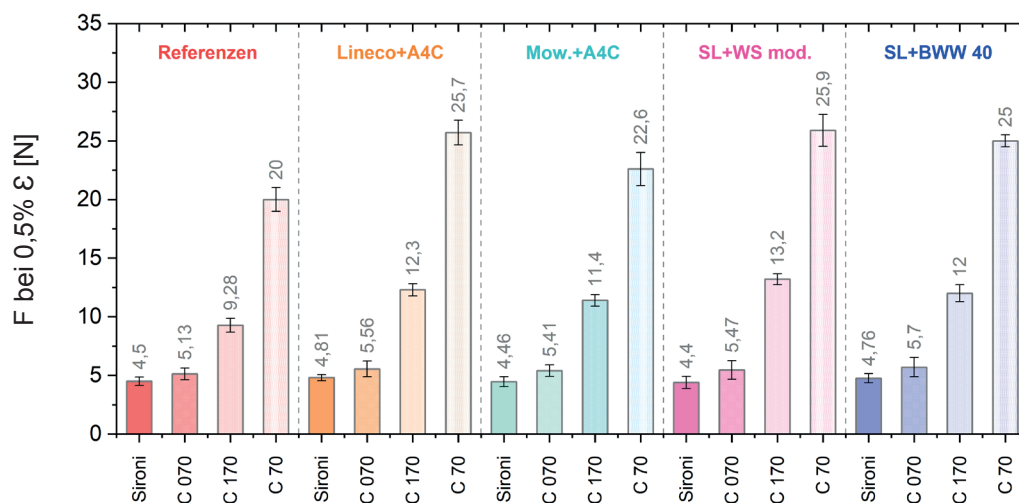


Abb. 50: Durchschnittliche Kraft bei 0,5 % Dehnung der verschiedenen Schussproben.

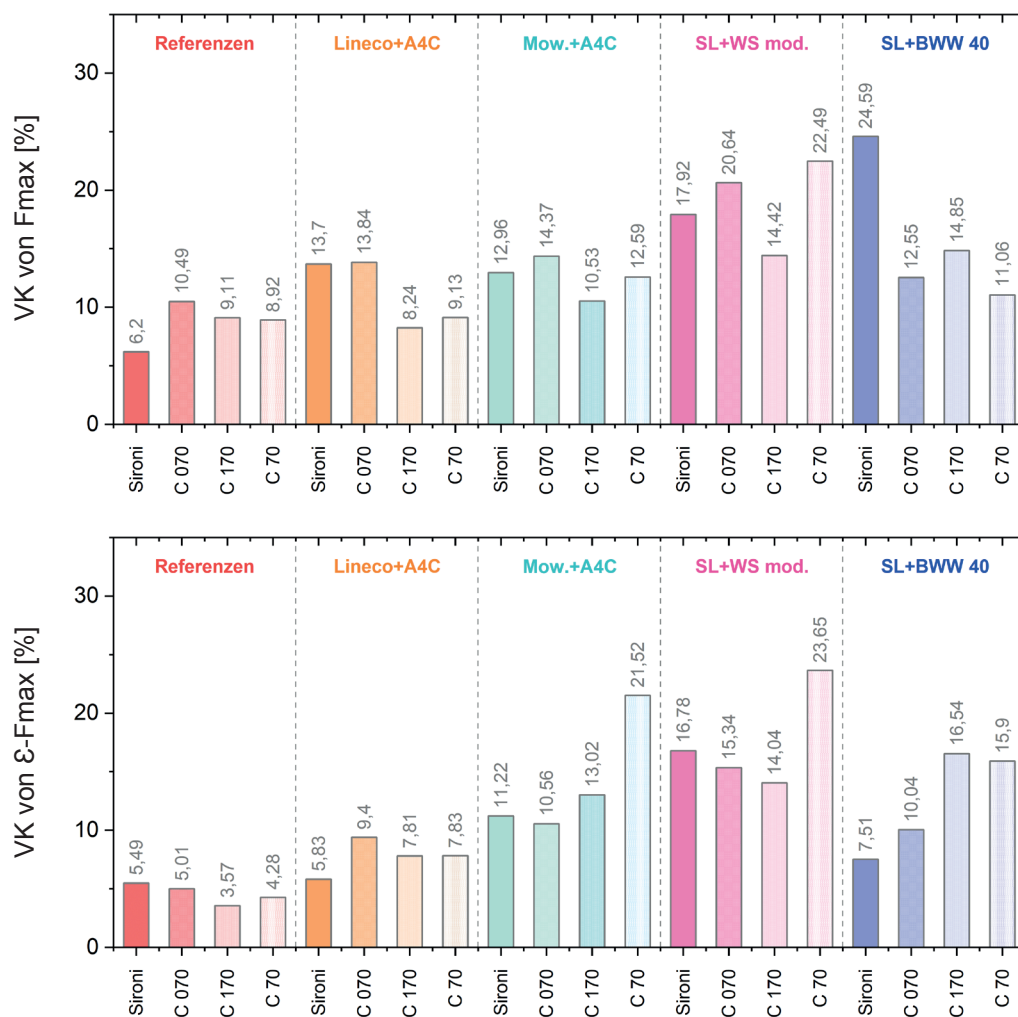


Abb. 51 und 52: Variationskoeffizienten der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der intakten und verklebten (SAS) Schussproben der Typen 1-4.

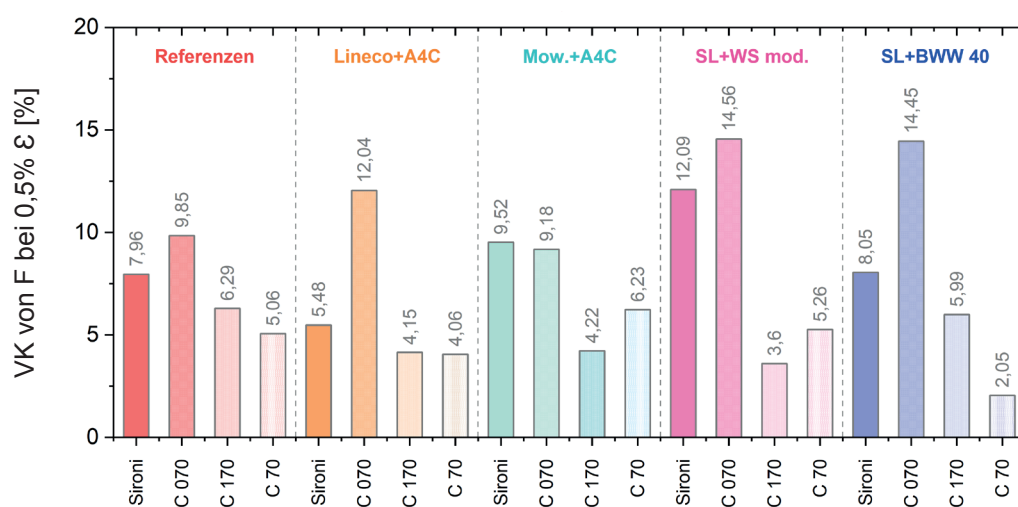


Abb. 53: Variationskoeffizienten der Kraft bei 0,5 % Dehnung der verschiedenen Schussproben.

A.1.4 Fadenbrücken

Probekörper			
Gewebe		Pattina L 13 (puro lino), Tessitura Enrico Sironi, unbeschichtet	
Probekörpertyp	a.	Unverklebter Schnitt + Fadenbrücken (B)	
	b.	Verklebter Schnitt + Fadenbrücken (SAS+B)	
Varianten	I.	a) + 10 mm Fadenbrücke (B / Beva 371)	
	II.	a) + 20 mm Fadenbrücke (B / Beva 371)	
	III.	a) + 30 mm Fadenbrücke (B / Beva 371)	
	IV.	a) + 20 mm Fadenbrücke (B / Evacon-R + Methocel A4C)	
	V.	b) + 10 mm Fadenbrücke (SAS+B / Beva 371)	
	VI.	b) + 20 mm Fadenbrücke (SAS+B / Beva 371)	
	VII.	b) + 30 mm Fadenbrücke (SAS+B / Beva 371)	
	VIII.	b) + 20 mm Fadenbrücke (SAS+B / Evacon-R + Methocel A4C)	
Verklebungstechnik		Stoß-auf-Stoß (SAS) mit Lineco + Methocel A4C 5 % (9:1)	
Fadenbrücken	Typ 1	Beva 371 (Film, 25 µm), thermoplastisch reaktiviert	
	Typ 2	Evacon-R + Methocel A4C 5 % (9:1), nass appliziert	
Probengeometrie		Gewebestreifen Schussrichtung (L: 200 mm; B: 12 Fäden)	
Prüfbedingungen			
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.	
Prüfgerät		Zwick Universalprüfmaschine, Typ Z2.5(RetroLine)	
Prüfsoftware		TestXpert II V3.7	
Kraftaufnehmer		100 N / 2 kN	
Einspannlänge		100 mm	
Vorkraft und -geschwindigkeit		1 N mit 5 mm/min	
Prüfgeschwindigkeit		20 mm/min	
Brucherkennung		Kraftabschaltsschwelle 50% Fmax	
Dehnungsermittlung		Via Längenänderung (Traversenweg)	
Steigungsermittlung *		Sekante im Bereich 0,1-1 % Dehnung	
		* weitere Analysen des Kurvenverlaufs wurden archiviert	
Versuchsstatistik		Ergebnisübersicht	
MW	Arithmetischer Mittelwert	Fmax	Höchstzugkraft [N]
S	Standardabweichung	Steigung X	Hilfssteigung gemäß Einstellung [N/mm] s.o.
VK	Variationskoeffizient	ε Fmax	Höchstzugkraftdehnung [%]
Med	Median	W Fmax	Weg / Längenänderung bei Fmax [mm]
Min	Minimum	ε Bruch	Dehnung bei Brucherkennung [%]
Max	Maximum	F X % ε	Kraft bei 0,5 / 1 / 2% Dehnung [N]

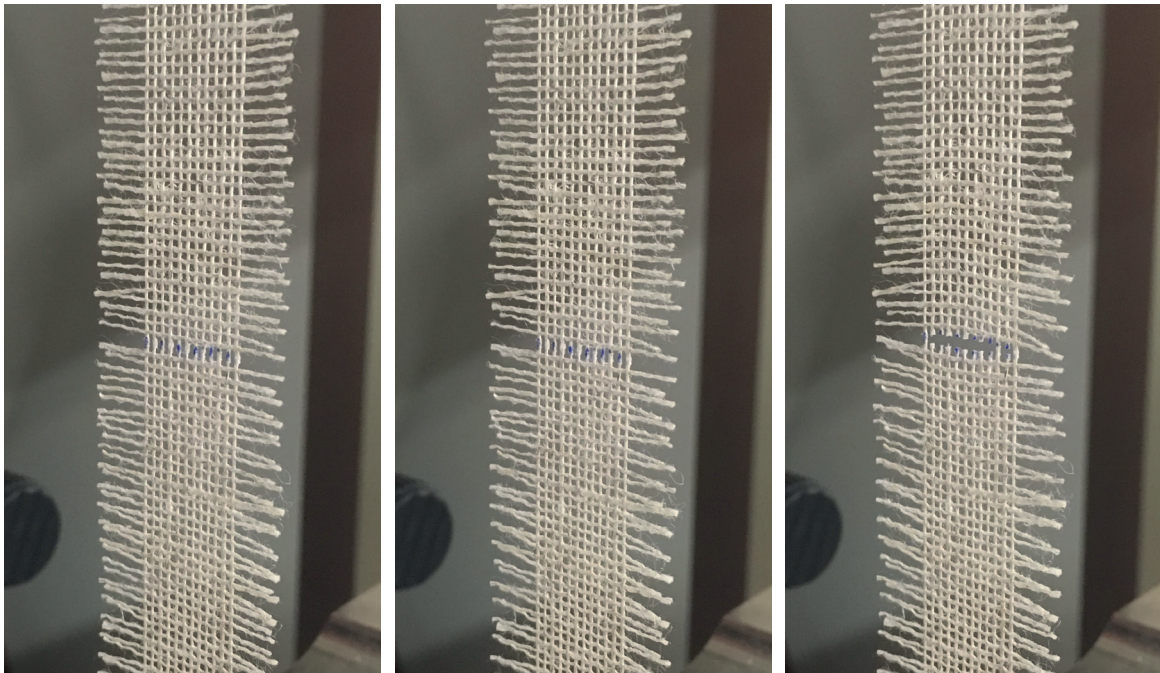
Probentypen im Versuch

Abb. 01-03: Referenz (SAS) **ohne Fadenbrücke**.

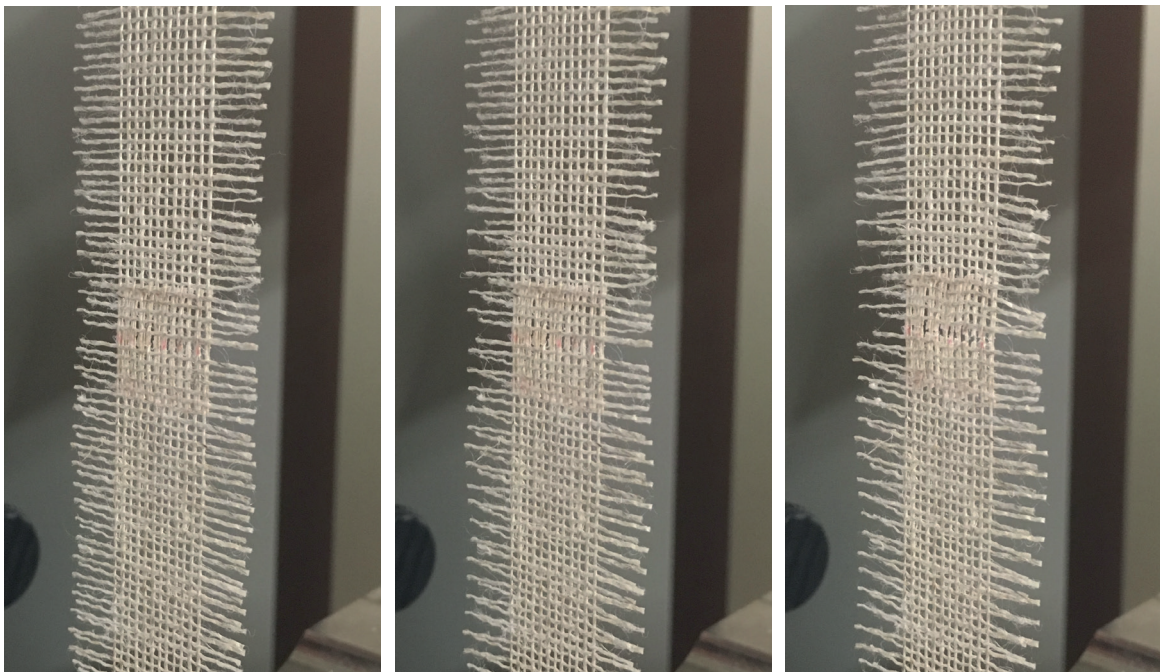


Abb. 04-06: **Typ V** Verklebung mit 10 mm Fadenbrücke, Beva 371 (SAS+B).

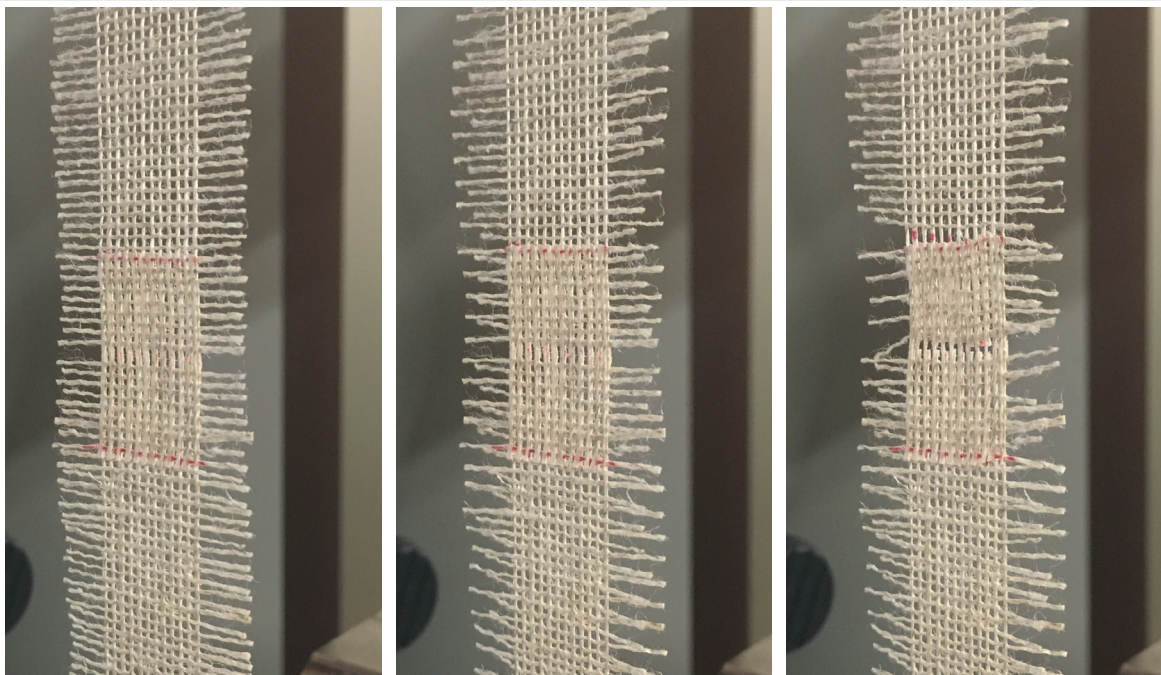
Probentypen im Versuch

Abb. 07-09: **Typ VI** Verklebung mit 20 mm Fadenbrücke, Beva 371 (SAS+B).

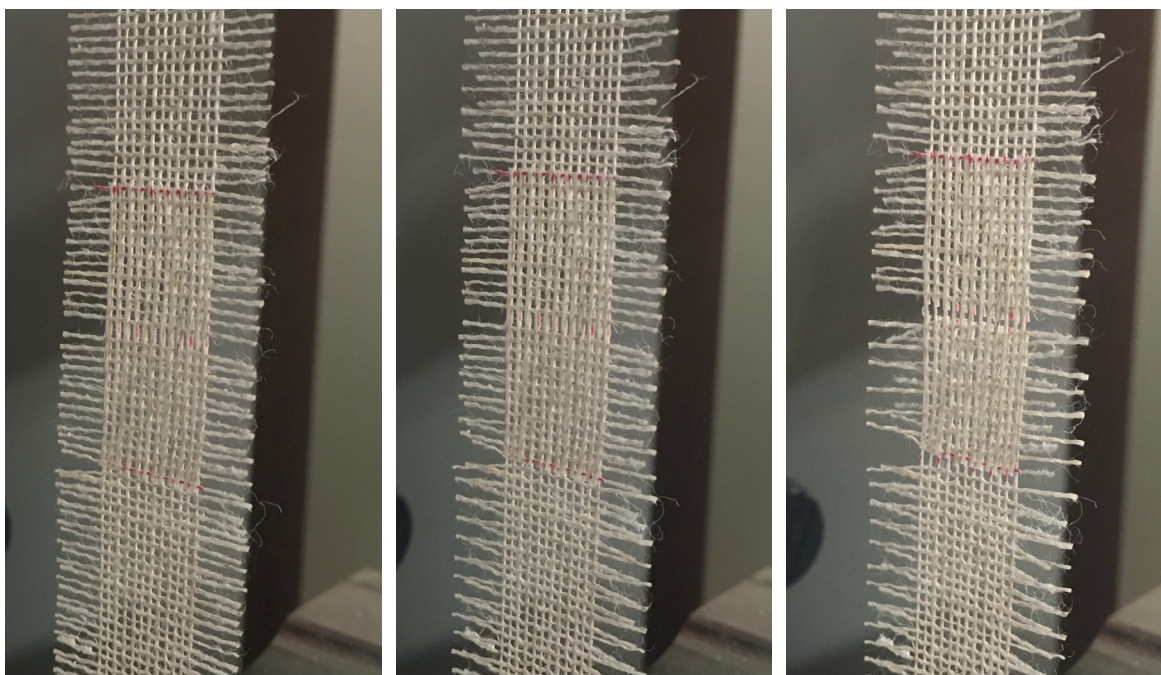


Abb. 10-12: **Typ VII** Verklebung mit 30 mm Fadenbrücke, Beva 371 (SAS+B).

Probentypen im Versuch

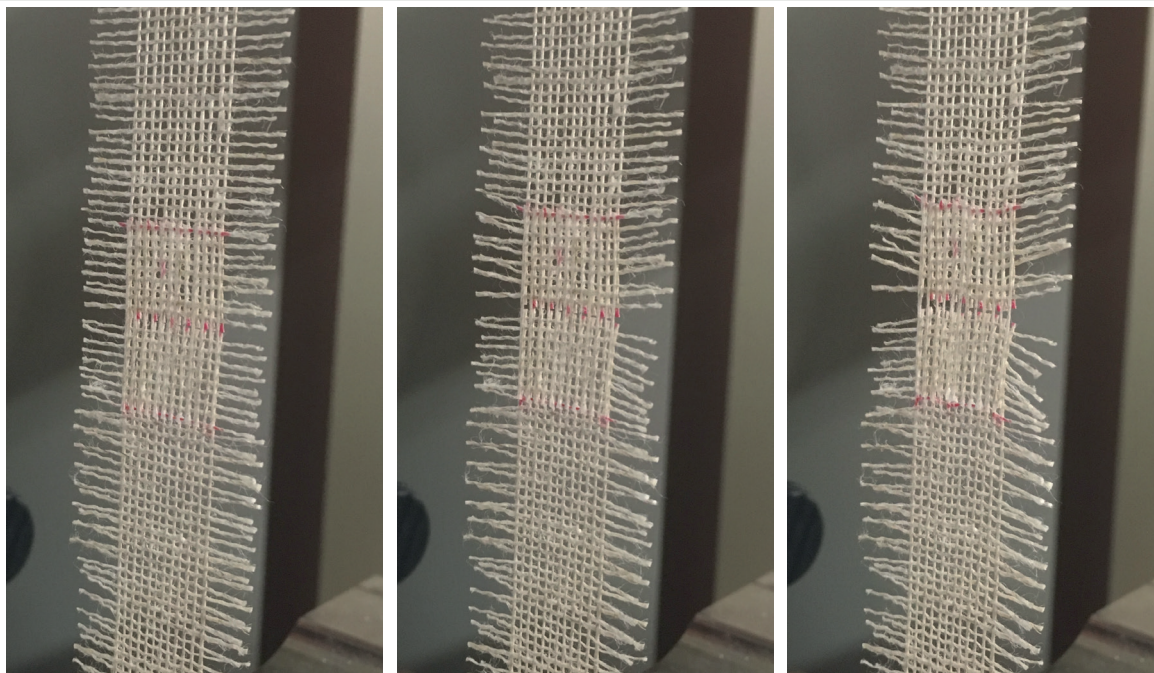


Abb. 13-15: **Typ VIII** Verklebung mit 20 mm Fadenbrücke, Evacon-R + M. A4C (SAS+B).

Referenz

Versuchsstatistik								
Typ	Verklebung SAS (Lineco + Methocel A4C) ohne Fadenbrücke							
n = 10	Fmax [N]	Steigung [N/mm]	ϵ Fmax [%]	W Fmax [mm]	ϵ Bruch [%]	F 0,5% ϵ [N]	F 1% ϵ [N]	F 2% ϵ [N]
MW	21,42	10,02	1,51	1,53	1,63	4,81	10,8	-
S	2,94	0,74	0,09	0,09	0,11	0,264	0,719	-
VK	13,70	7,38	5,83	5,88	6,72	5,48	6,68	-
Med	21,31	9,91	1,52	1,53	1,61	4,77	10,7	-
Min	17,74	8,61	1,39	1,40	1,48	4,31	9,38	-
Max	26,98	11,03	1,69	1,70	1,81	5,19	11,7	-

a. Unverklebter Schnitt + Fadenbrücken (B)

Versuchsstatistik								
Typ	I. 10 mm Fadenbrücke (B / Beva 371)							
n = 10	Fmax [N]	Steigung [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	18,85	9,83	1,59	1,60	2,07	4,81	10,6	15,50
S	4,42	0,83	0,24	0,24	0,23	0,349	0,783	6,75
VK	23,44	8,45	15,04	15,02	11,08	7,26	7,41	43,57
Med	18,81	9,74	1,58	1,60	2,08	4,81	10,4	14,39
Min	11,55	8,39	1,14	1,15	1,63	4,25	9,26	8,63
Max	26,64	11,20	2,02	2,04	2,43	5,50	12,0	26,58
Typ	II. 20 mm Fadenbrücke (B / Beva 371)							
n = 10	Fmax [N]	Steigung [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	44,79	10,90	2,24	2,26	2,89	5,16	11,6	38,72
S	7,53	1,14	0,17	0,17	0,26	0,493	1,13	3,48
VK	16,81	10,50	7,48	7,48	8,87	9,55	9,70	8,99
Med	44,16	10,74	2,20	2,22	2,81	5,15	11,5	39,59
Min	32,65	9,63	1,92	1,93	2,51	4,35	10,3	30,40
Max	56,62	13,89	2,53	2,55	3,41	6,34	14,5	41,91
Typ	III. 30 mm Fadenbrücke (B / Beva 371)							
n = 10	Fmax [N]	Steigung [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	54,78	11,22	2,32	2,34	2,77	5,19	11,9	44,07
S	5,97	0,96	0,14	0,14	0,07	0,316	0,942	3,46
VK	10,89	8,52	6,06	5,92	2,61	6,09	7,91	7,85
Med	53,45	10,92	2,35	2,37	2,75	5,14	11,6	43,01
Min	44,70	10,06	2,08	2,11	2,66	4,78	10,8	39,31
Max	67,30	12,87	2,53	2,56	2,91	5,71	13,6	51,12
Typ	IV. 20 mm Fadenbrücke (B / Evacon-R + Methocel A4C)							
n = 10	Fmax [N]	Steigung [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	77,19	11,84	2,61	2,63	3,08	5,35	12,5	51,09
S	10,15	0,85	0,19	0,19	0,23	0,326	0,825	2,99
VK	13,15	7,15	7,38	7,38	7,60	6,09	6,61	5,85
Med	77,84	11,93	2,58	2,60	3,12	5,38	12,5	52,41
Min	54,83	10,46	2,25	2,27	2,72	4,85	11,1	46,25
Max	89,39	13,48	2,99	3,01	3,42	6,00	14,1	54,65

b. Verklebter Schnitt + Fadenbrücken (SAS+B)

Versuchsstatistik								
Typ	V. 10 mm Fadenbrücke (SAS+B / Beva 371)							
n = 10	Fmax [N]	Steigung [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	53,52	9,08	2,36	2,38	2,74	4,46	9,84	38,69
S	4,74	0,63	0,10	0,10	0,16	0,240	0,611	2,75
VK	8,86	6,90	4,17	4,14	5,87	5,38	6,21	7,10
Med	53,89	9,18	2,33	2,35	2,68	4,46	9,94	39,73
Min	46,32	7,86	2,27	2,29	2,60	4,02	8,66	33,01
Max	62,58	10,00	2,60	2,63	3,04	4,81	10,7	41,96
Typ	VI. 20 mm Fadenbrücke (SAS+B / Beva 371)							
n = 10	Fmax [N]	Steigung [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	64,90	10,87	2,44	2,46	2,76	5,05	11,6	46,02
S	4,87	1,21	0,10	0,10	0,10	0,451	1,18	4,85
VK	7,50	11,15	4,02	4,01	3,55	8,95	10,20	10,54
Med	64,05	10,76	2,45	2,46	2,76	5,02	11,4	45,21
Min	59,04	9,27	2,23	2,25	2,56	4,35	9,98	40,43
Max	74,32	13,24	2,57	2,59	2,91	5,86	13,8	56,32
Typ	VII. 30 mm Fadenbrücke (SAS+B / Beva 371)							
n = 10	Fmax [N]	Steigung [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	76,93	11,67	2,63	2,65	2,99	5,30	12,3	47,65
S	7,13	0,63	0,16	0,16	0,18	0,260	0,604	2,10
VK	9,26	5,37	5,94	5,98	5,95	4,90	4,91	4,42
Med	75,96	11,82	2,57	2,59	2,95	5,35	12,5	47,80
Min	66,16	10,68	2,47	2,48	2,78	4,88	11,4	44,15
Max	86,88	12,73	2,94	2,96	3,31	5,70	13,3	51,28
Typ	VIII. 20 mm Fadenbrücke (SAS+B / Evacon-R + Methocel A4C)							
n = 10	Fmax [N]	Steigung [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	97,18	10,18	2,98	3,01	3,62	4,78	10,9	45,77
S	11,69	0,55	0,19	0,20	0,28	0,162	0,510	2,55
VK	12,03	5,40	6,54	6,52	7,68	3,39	4,68	5,56
Med	94,53	10,21	2,98	3,01	3,59	4,78	10,9	46,26
Min	77,32	9,19	2,65	2,67	3,17	4,51	9,95	41,37
Max	115,94	11,16	3,24	3,27	4,10	5,03	11,8	49,83

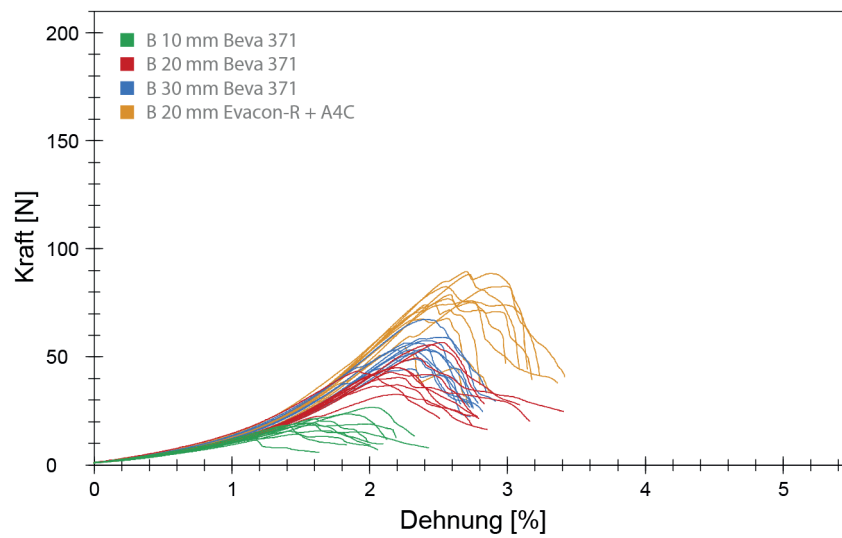


Abb. 16: K-D-Diagramm der Proben a. **unverklebter Schnitt + Fadenbrücken (B)**.

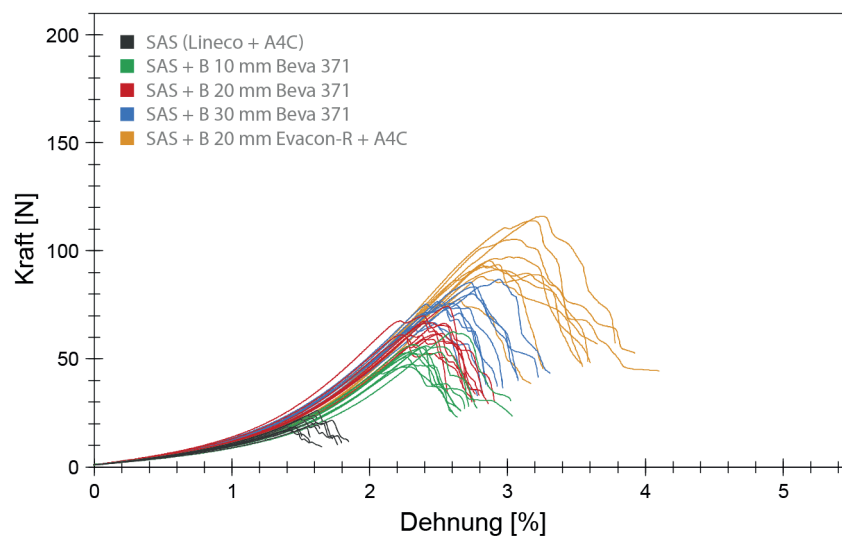


Abb. 17: K-D-Diagramm der Proben b. **verklebter Schnitt + Fadenbrücken (SAS+B)**, im Vergleich zur Referenz ohne Fadenbrücke (SAS).

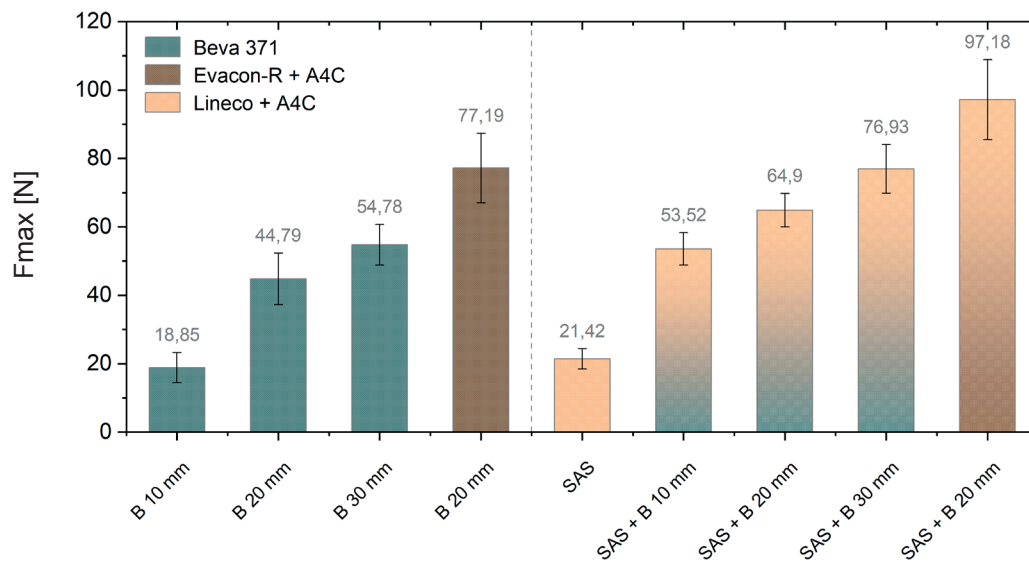


Abb. 18: Durchschnittliche Höchstzugkraft der Proben a. unverklebt (B) / b. verklebt (SAS+B), im Vergleich zur Referenz ohne Fadenbrücke (SAS).

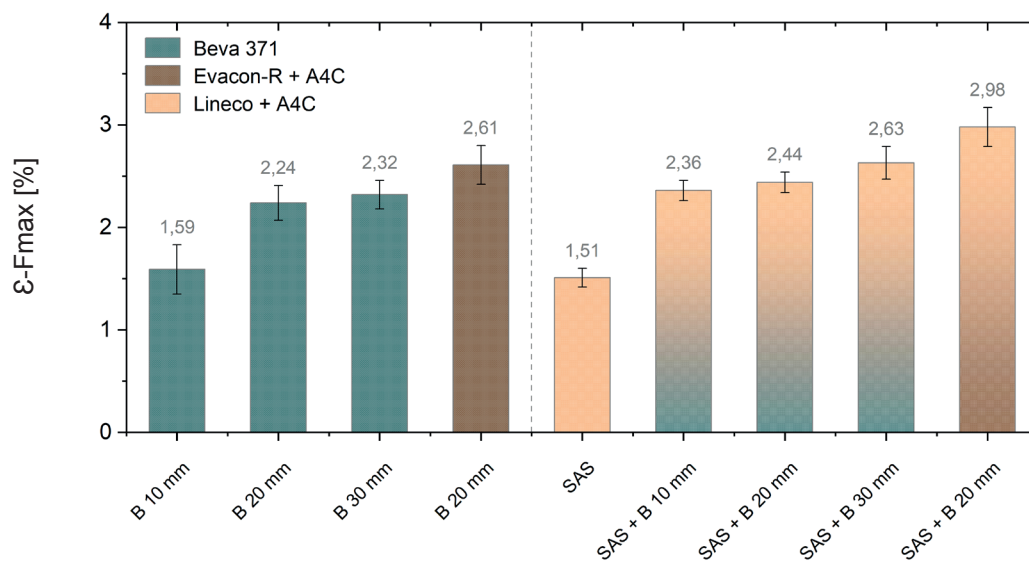


Abb. 19: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der Proben a. unverklebt (B) / b. verklebt (SAS+B), im Vergleich zur Referenz ohne Fadenbrücke (SAS).

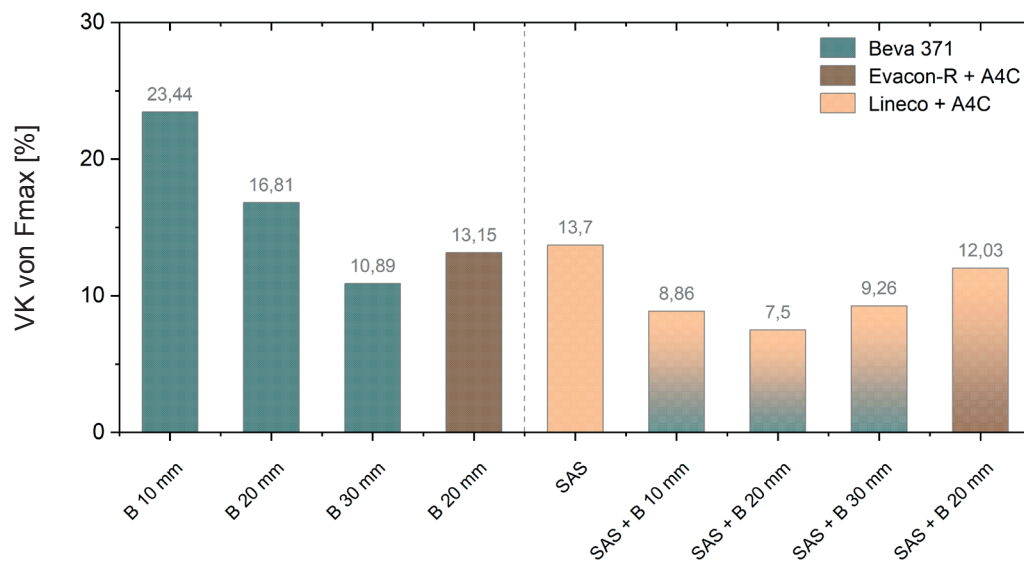


Abb. 20: Variationskoeffizient der Höchstzugkraft der Proben a. unverklebt (B) / b. verklebt (SAS+B), im Vergleich zur Referenz ohne Fadenbrücke (SAS).

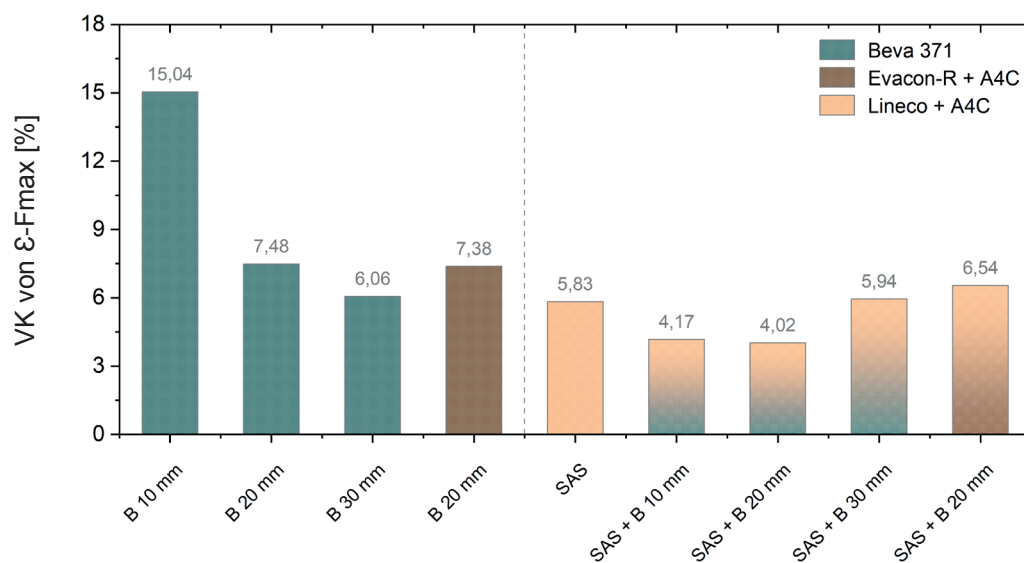
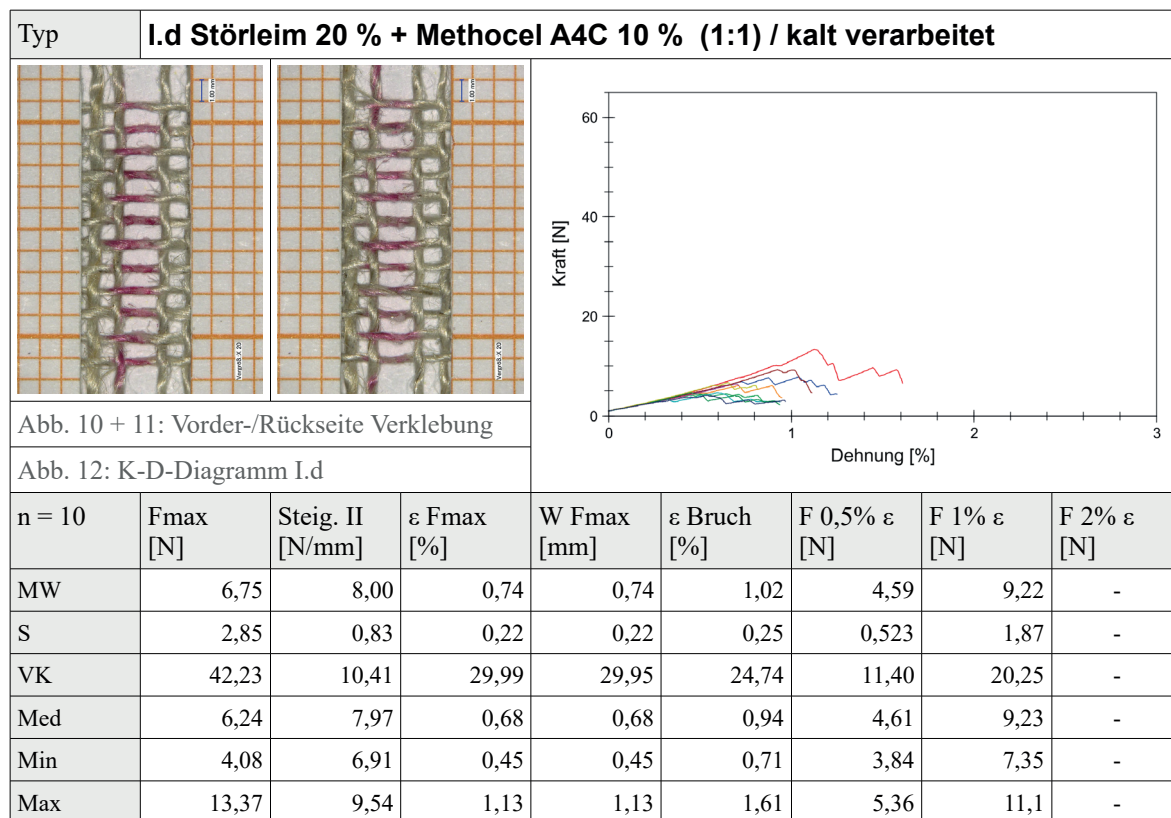
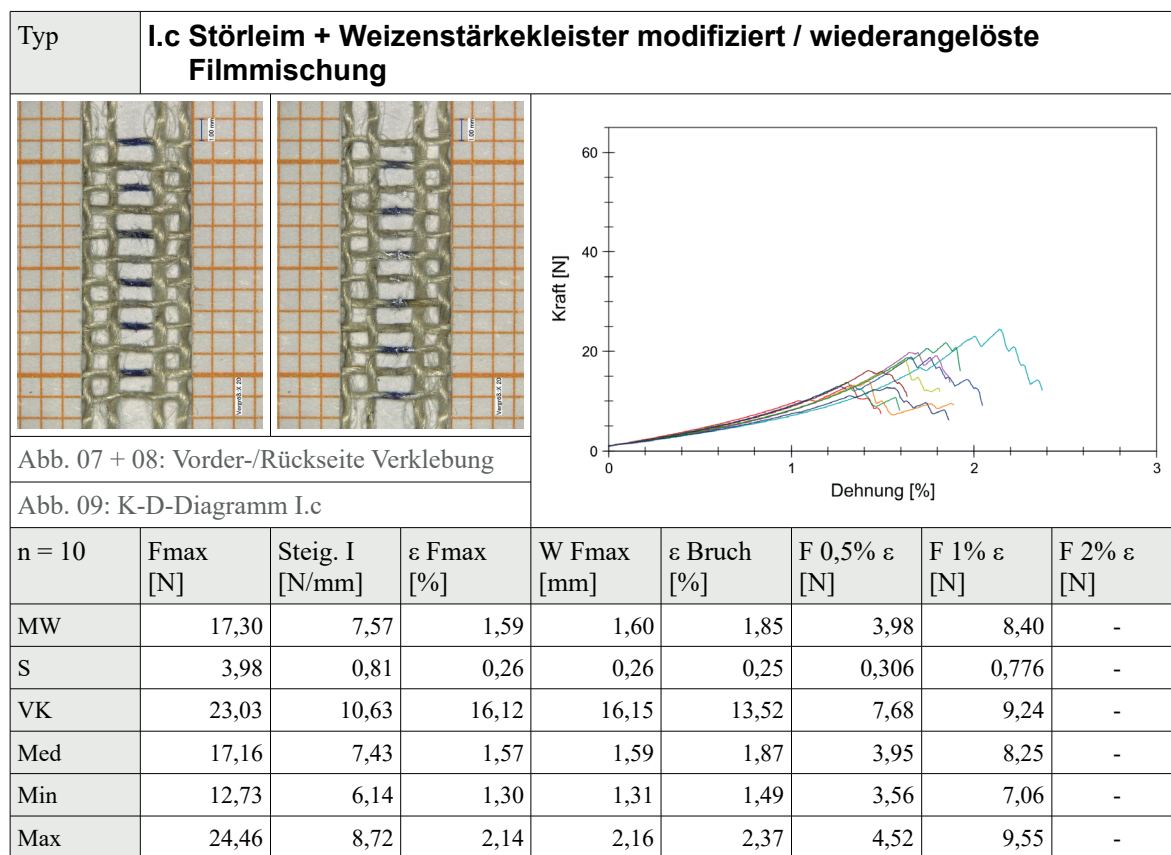


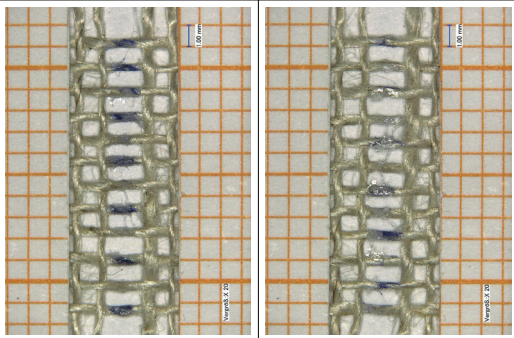
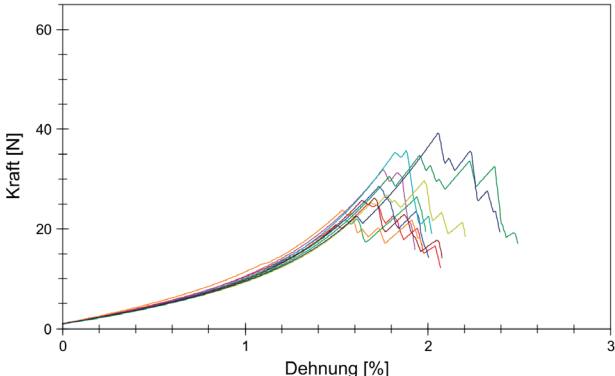
Abb. 21: Variationskoeffizient der Höchstzugkraftdehnung der Proben a. unverklebt (B) / b. verklebt (SAS+B), im Vergleich zur Referenz ohne Fadenbrücke (SAS).

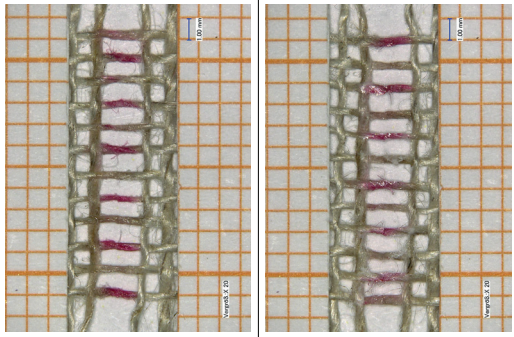
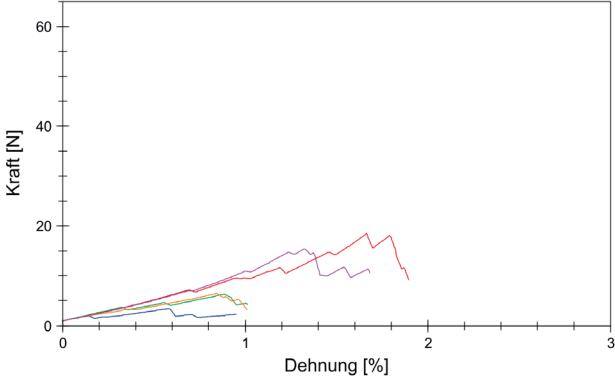
A.1.5 Erweiterte Klebstoffauswahl

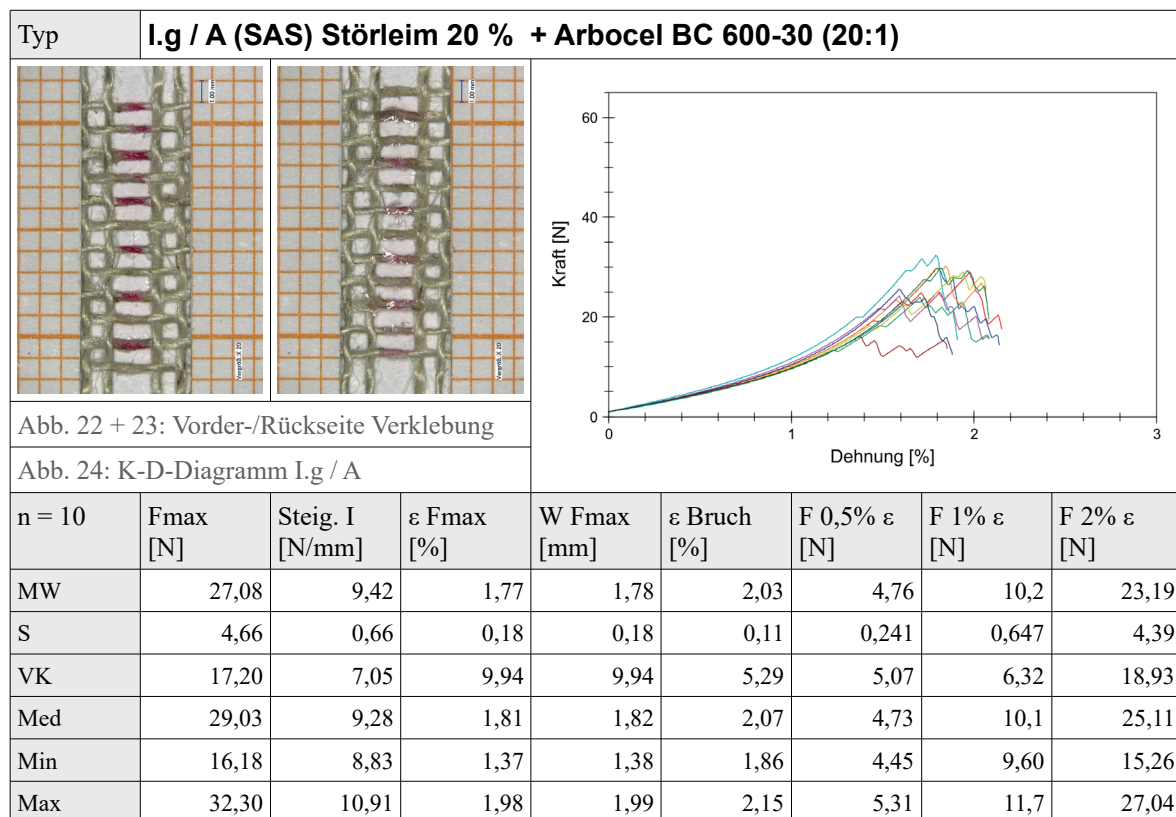
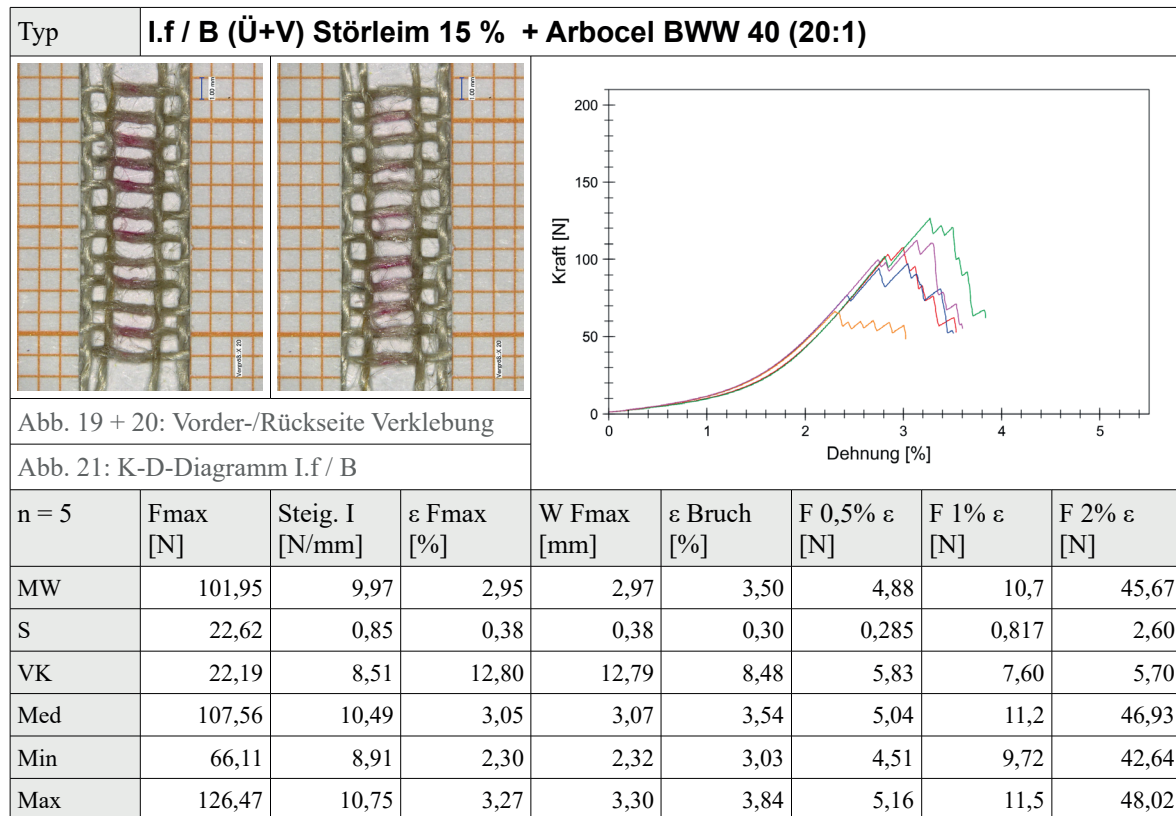
Probekörper			
Gewebe	1.	Pattina L 13 (puro lino), T. E. Sironi, unbeschichtet (Sironi)	
	2.	Claessens Canvas 070, unbeschichtet (C 070)	
	3.	Claessens Canvas 170, acrylgründiert (C 170)	
Klebstoffauswahl (s. nachfolgende Listenübersicht)	I.	Glutinleim / Modifikation	
	II.	Celluloseether / Modifikation	
	III.	Kunstharzdispersion / Modifikation	
	IV.	Schmelzklebstoff / Modifikation	
	V.	Vernetzer / Modifikation	
Verklebungstechnik	A.	Stoß-auf-Stoß (SAS)	
	B.	Überlappend und vermengt (Ü+V)	
Probengeometrie		Gewebestreifen Schussrichtung (L: 200 mm; B: 12 Fäden)	
Prüfbedingungen			
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.	
Prüfgerät		Zwick Universalprüfmaschine, Typ Z2.5(RetroLine)	
Prüfsoftware		TestXpert II V3.7	
Kraftaufnehmer		100 N / 2 kN	
Einspannlänge		100 mm	
Vorkraft und -geschwindigkeit		1 N mit 5 mm/min	
Prüfgeschwindigkeit		20 mm/min	
Brucherkennung		Kraftabschaltsschwelle 50% Fmax	
Dehnungsermittlung		Via Längenänderung (Traversenweg)	
Steigungsermittlung *	I.	I. Sekante im Bereich 0,1-1 % Dehnung	
	II.	II. Regression ab 0,1 % Dehnung bis Steigungsrückgang auf 95 % der Maximalsteigung	
	*	weitere Analysen des Kurvenverlaufs wurden archiviert	
Versuchsstatistik		Ergebnisübersicht	
MW	Arithmetischer Mittelwert	Fmax	Höchstzugkraft [N]
S	Standardabweichung	Steigung X	Hilfssteigung gemäß Einstellung [N/mm] s.o.
VK	Variationskoeffizient	ε Fmax	Höchstzugkraftdehnung [%]
Med	Median	W Fmax	Weg / Längenänderung bei Fmax [mm]
Min	Minimum	ε Bruch	Dehnung bei Brucherkennung [%]
Max	Maximum	F X % ε	Kraft bei 0,5 / 1 / 2% Dehnung [N]

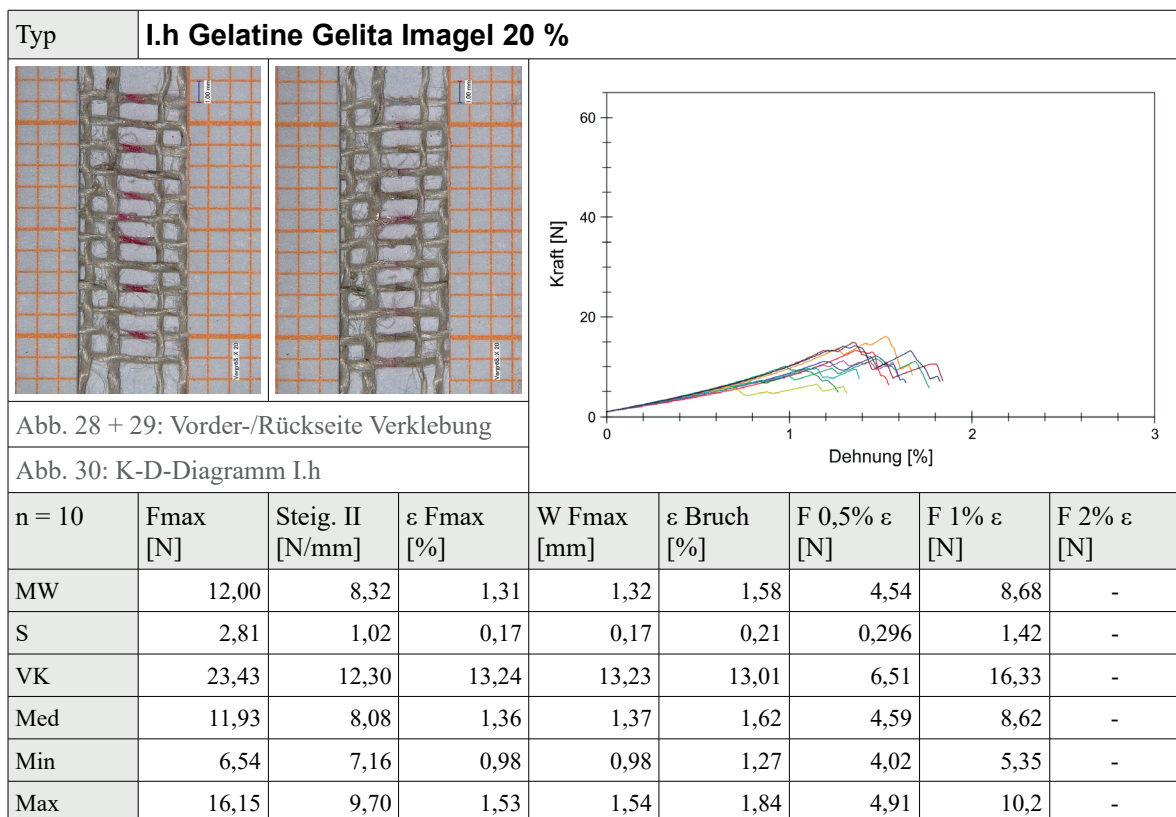
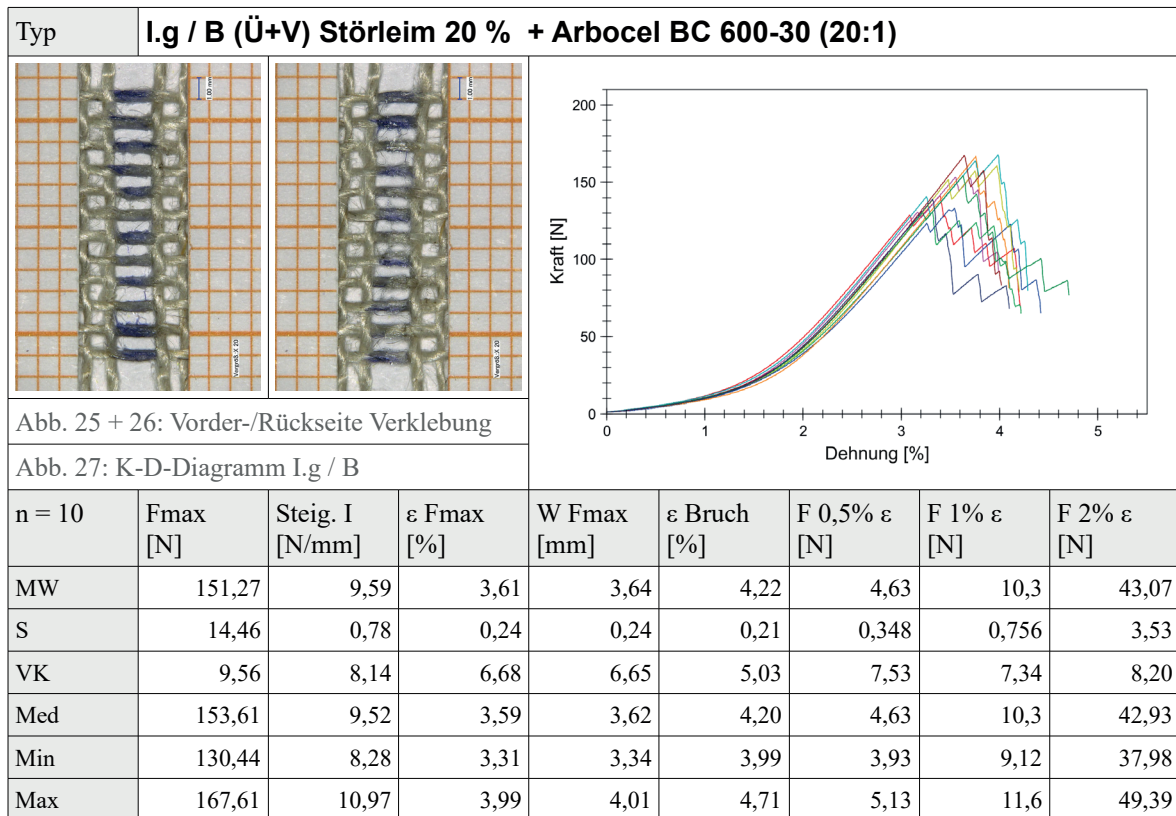
Klebstoffauswahl und Probekörpertyp			
I.	Glutinleim	Gewebe	Technik
a	Störleim 20 % in H ₂ O	1	A)
b	Störleim 25 % in H ₂ O	1	A)
c	Störleim 20% + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1) / wiederangelöst	1	A)
d	Störleim 20 % + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1) / kalt verarbeitet	1	A)
e	Störleim 25 % + Arbocel BW 40 (20:1) / wiederangelöst	1	A)
f	Störleim 15 % + Arbocel BW 40 (20:1)	1	A) + B)
g	Störleim 20 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)	1	A) + B)
h	Gelatine Gelita Imigel 20% in H ₂ O	1	A)
j	Gelatine Gelita Imigel 20 % + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1)	1	A)
k	Gelatine Gelita Imigel 20 % + Arbocel BW 40 (20:1)	1	A)
II.	Kunstharzdispersion	Gewebe	Technik
a	Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1) / Imprägnierung Methocel A4C 1 % in H ₂ O	1	A)
b	Lineco + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	1	A) + B)
c	[Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)] + Arbocel BW 40 (20:1)	1	A)
d	[Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)] + MCC 50 µm (20:1)	1	A)
III.	Celluloseether	Gewebe	Technik
a	Methocel A4C 10 % in H ₂ O	1 + 2 + 3	A) + B)
b	Methocel A4C 5 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)	1	A) + B)
c	Methocel A4C 10 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)	1	A) + B)
d	Methocel A4C 10% + MCC 50 µm (20:1)	1 + 3	A) + B)
IV.	Schmelzklebstoff	Gewebe	Technik
a	Beva 371	1	A)
b	Beva 371 + [Arbocel B 800 + BW 40 (1:1)] (4:1)	1	A)
c	Kremer Polyamidschweißpulver	1	A)
d	Lascaux 5065	1	A)
e	Lascaux 5350	1	A)
V.	Vernetzer	Gewebe	Technik
a	Ecrovin LV 340 eco + Bayhydur ultra 305 (19:1)	1	A)
b	[Ecrovin LV 340 eco + Bayhydur ultra 305 (19:1)] + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	1	A)
c	Ecronova RA 646 H + Bayhydur ultra 305 (19:1)	1	A)
d	[Ecronova RA 646 H + Bayhydur ultra 305 (19:1)] + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	1	A)
e	Ecrothan 4075 + Bayhydur ultra 305 (19:1)	1	A)
f	[Ecrothan 4075 + Bayhydur ultra 305 (19:1)] + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	1	A)
g	UHU easy (Cyanacrylat)	1	A)
h	UHU easy + Methocel A4C in Pulverform (9:1)	1	A)
j	UHU easy + Arbocel BW 40 (10:1)	1	A)
k	UHU plus schnellfest (2K-Epoxid)	1	A)

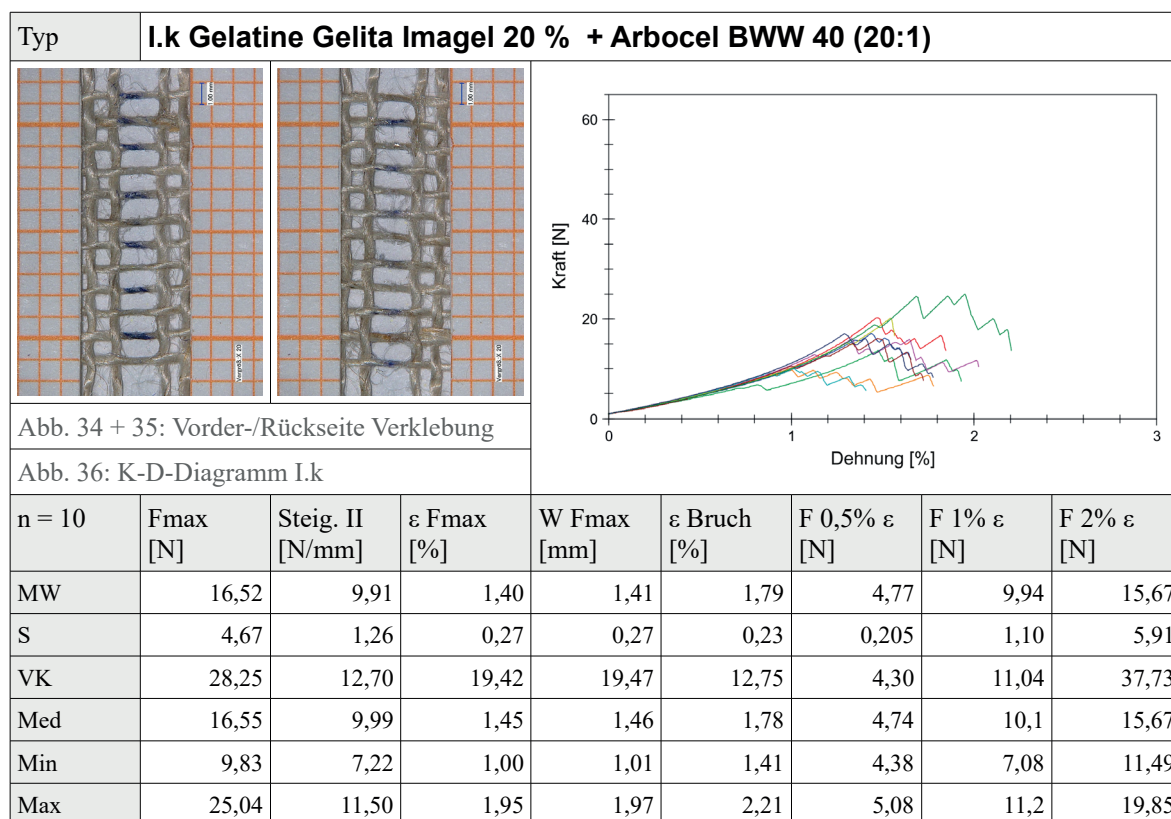
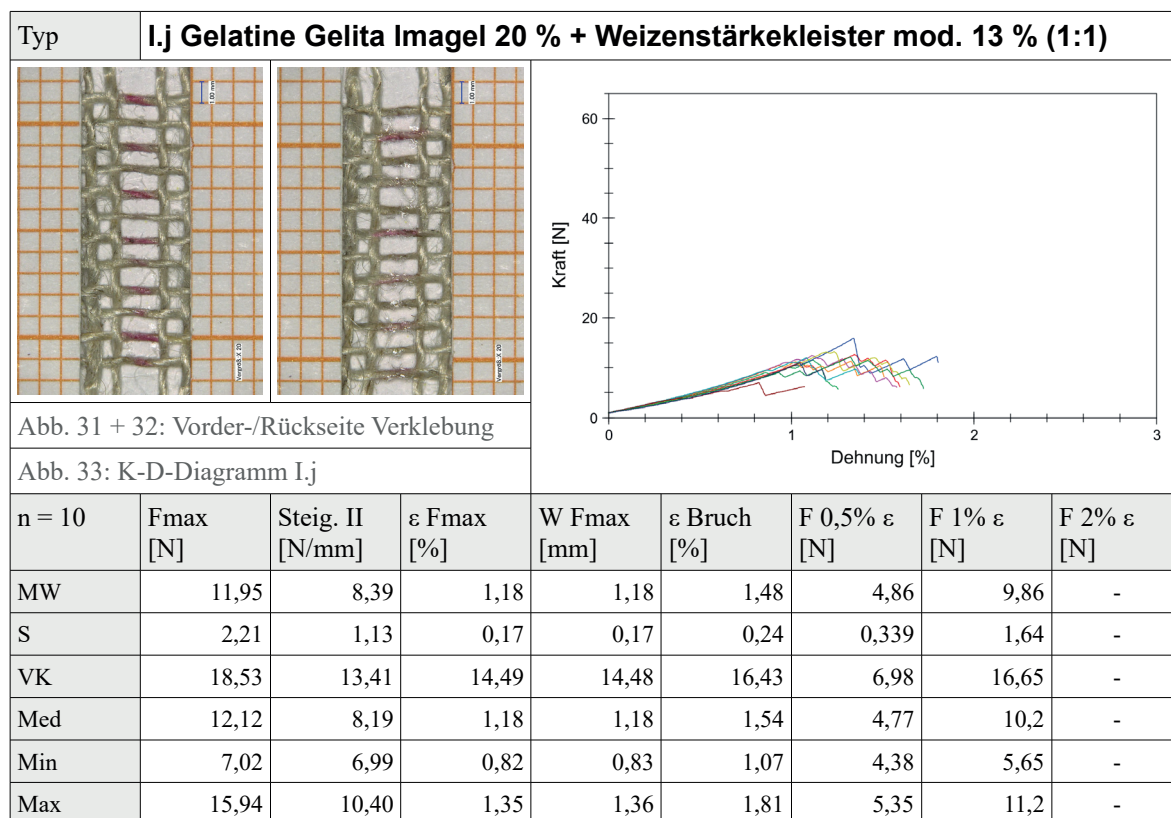


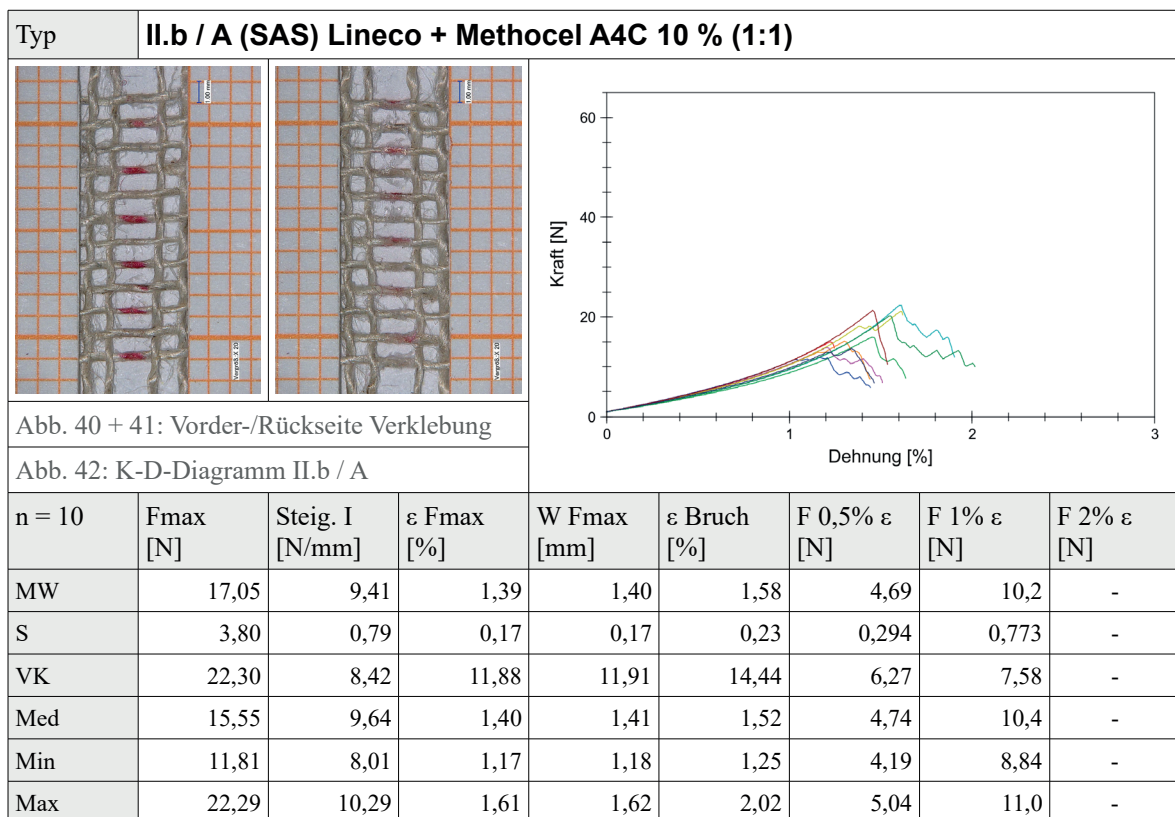
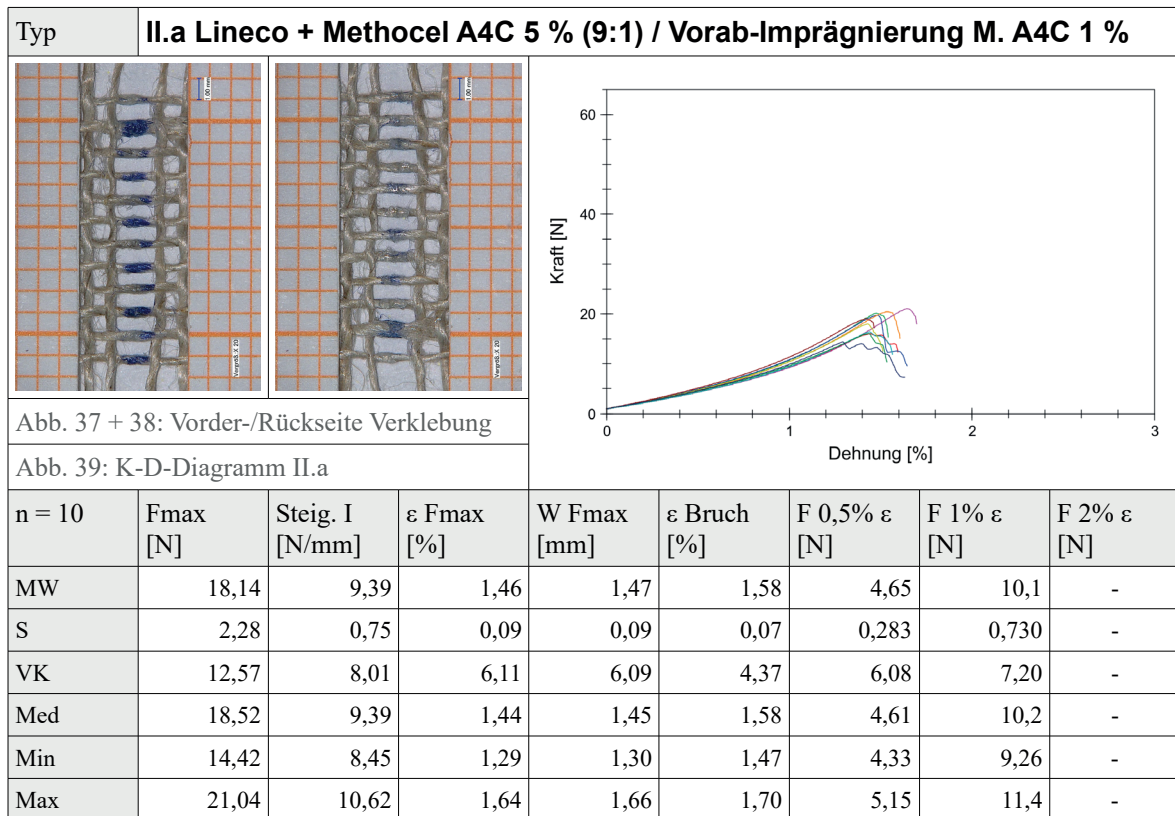
Typ	I.e Störleim + Arbocel BWW 40 / wiederangelöste Filmmischung							
								
Abb. 13 + 14: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 15: K-D-Diagramm I.e								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ϵ Fmax [%]	W Fmax [mm]	ϵ Bruch [%]	F 0,5% ϵ [N]	F 1% ϵ [N]	F 2% ϵ [N]
MW	30,10	9,29	1,82	1,83	2,12	4,61	10,1	23,57
S	5,13	0,62	0,17	0,17	0,19	0,254	0,609	8,56
VK	17,04	6,64	9,11	9,11	8,97	5,51	6,05	36,33
Med	29,07	9,20	1,82	1,83	2,04	4,54	9,99	22,42
Min	23,76	8,53	1,53	1,54	1,93	4,36	9,36	14,82
Max	39,17	10,61	2,05	2,07	2,49	5,19	11,4	36,38

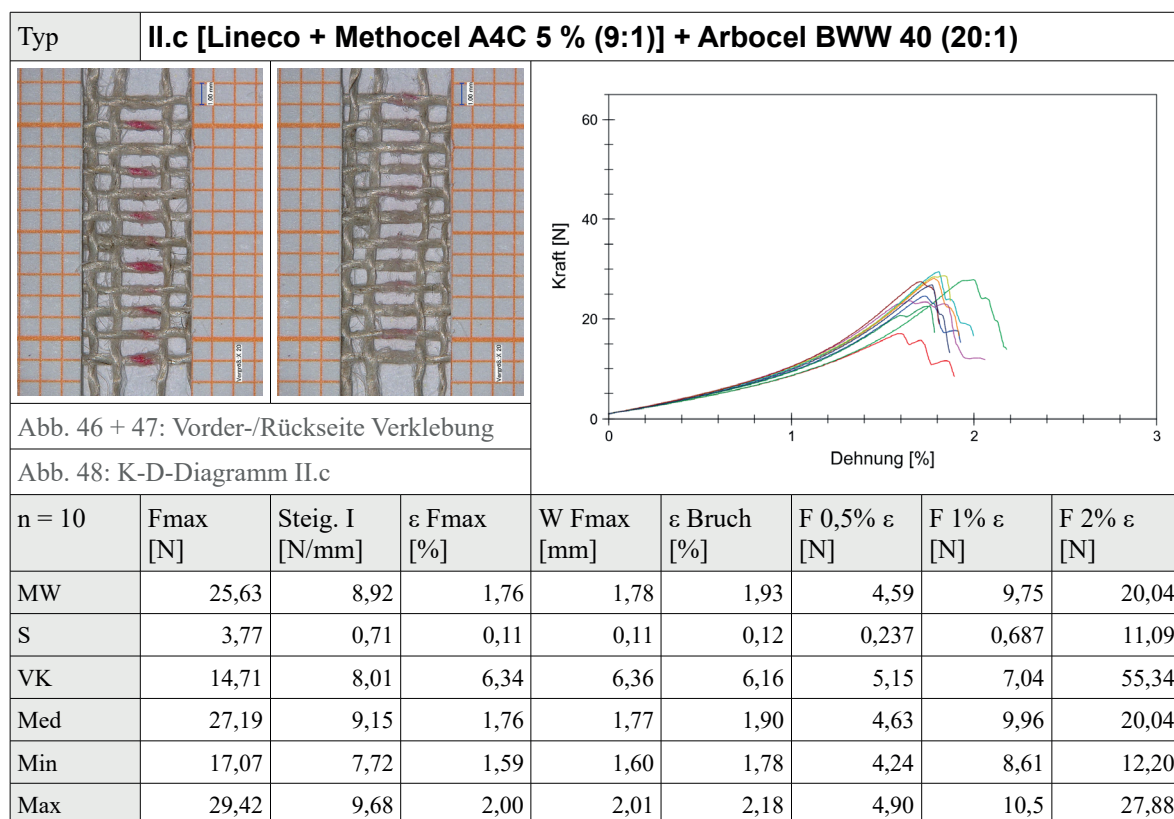
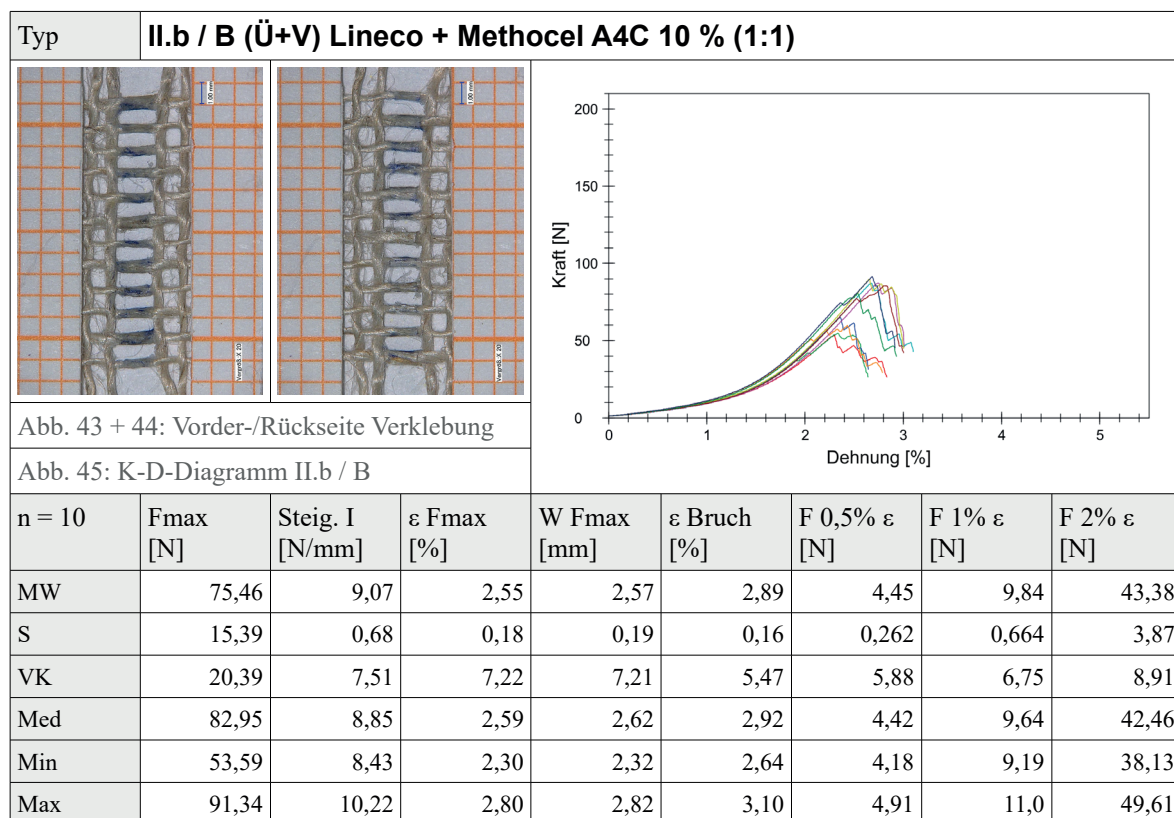
Typ	I.f / A (SAS) Störleim 15 % + Arbocel BWW 40 (20:1)							
								
Abb. 16 + 17: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 18: K-D-Diagramm I.f / A								
n = 5	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ϵ Fmax [%]	W Fmax [mm]	ϵ Bruch [%]	F 0,5% ϵ [N]	F 1% ϵ [N]	F 2% ϵ [N]
MW	10,04	7,62	1,06	1,07	1,31	4,28	7,17	-
S	6,52	1,68	0,43	0,43	0,44	0,904	3,61	-
VK	64,92	22,12	40,61	40,58	33,91	21,11	50,31	-
Med	6,46	8,55	0,88	0,89	1,01	4,20	7,04	-
Min	3,45	5,32	0,58	0,59	0,95	3,00	3,69	-
Max	18,46	9,07	1,66	1,68	1,90	5,19	10,9	-

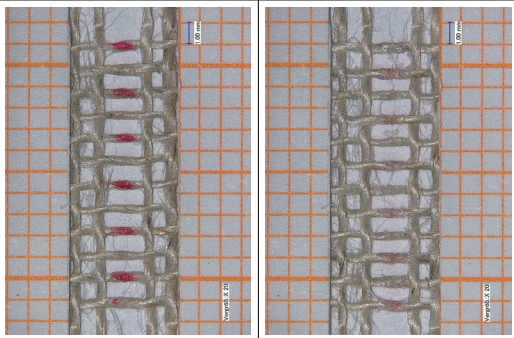
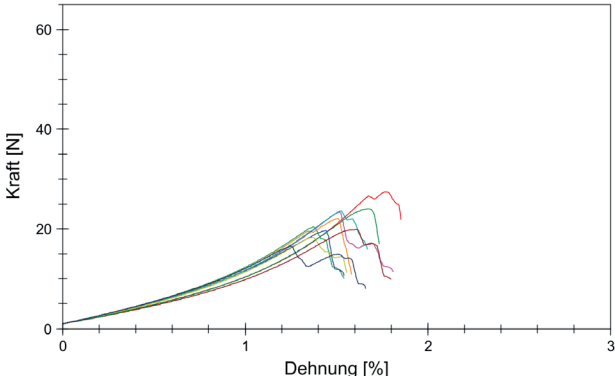


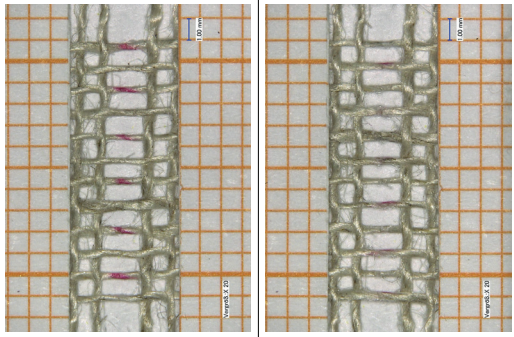
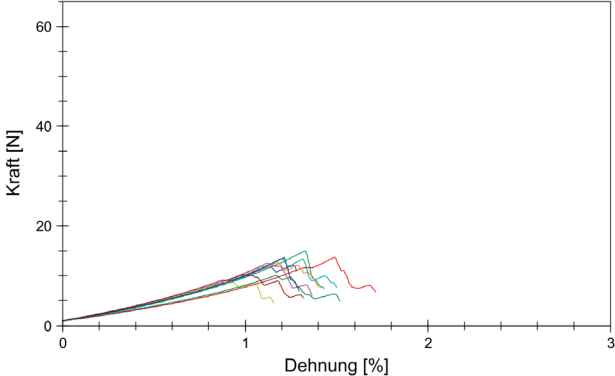


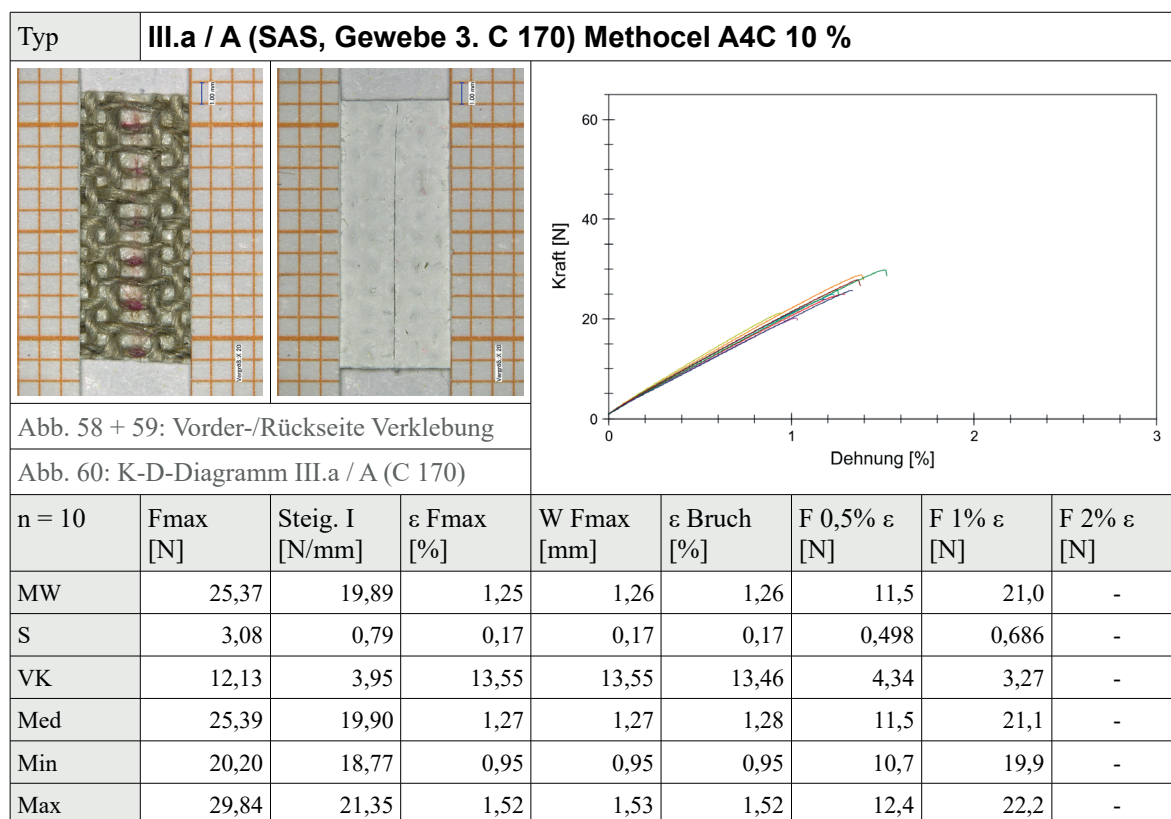
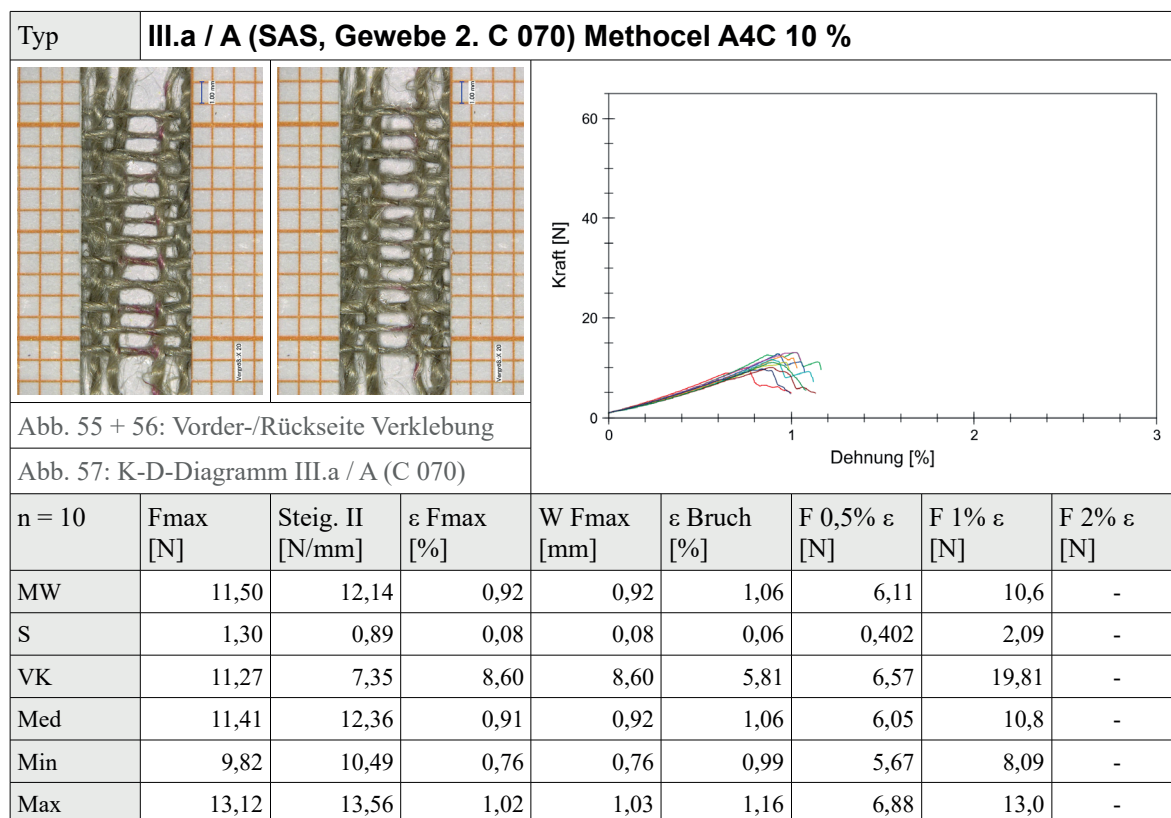


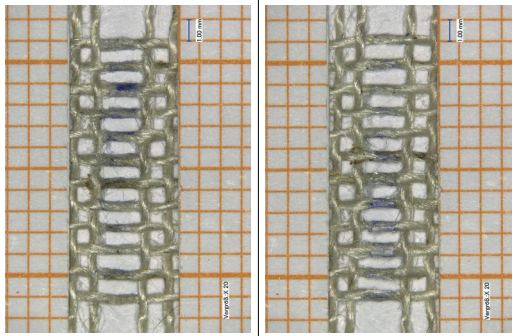
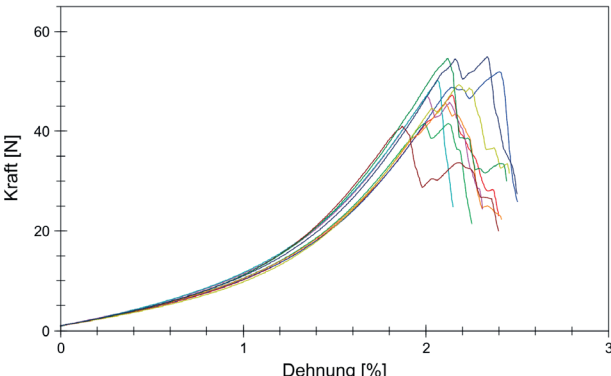


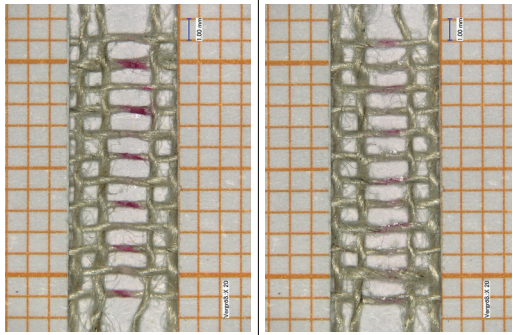
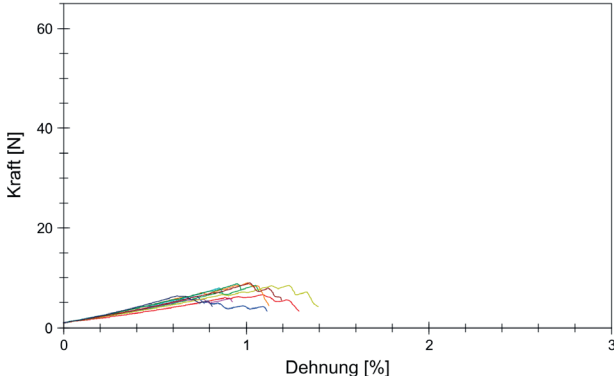


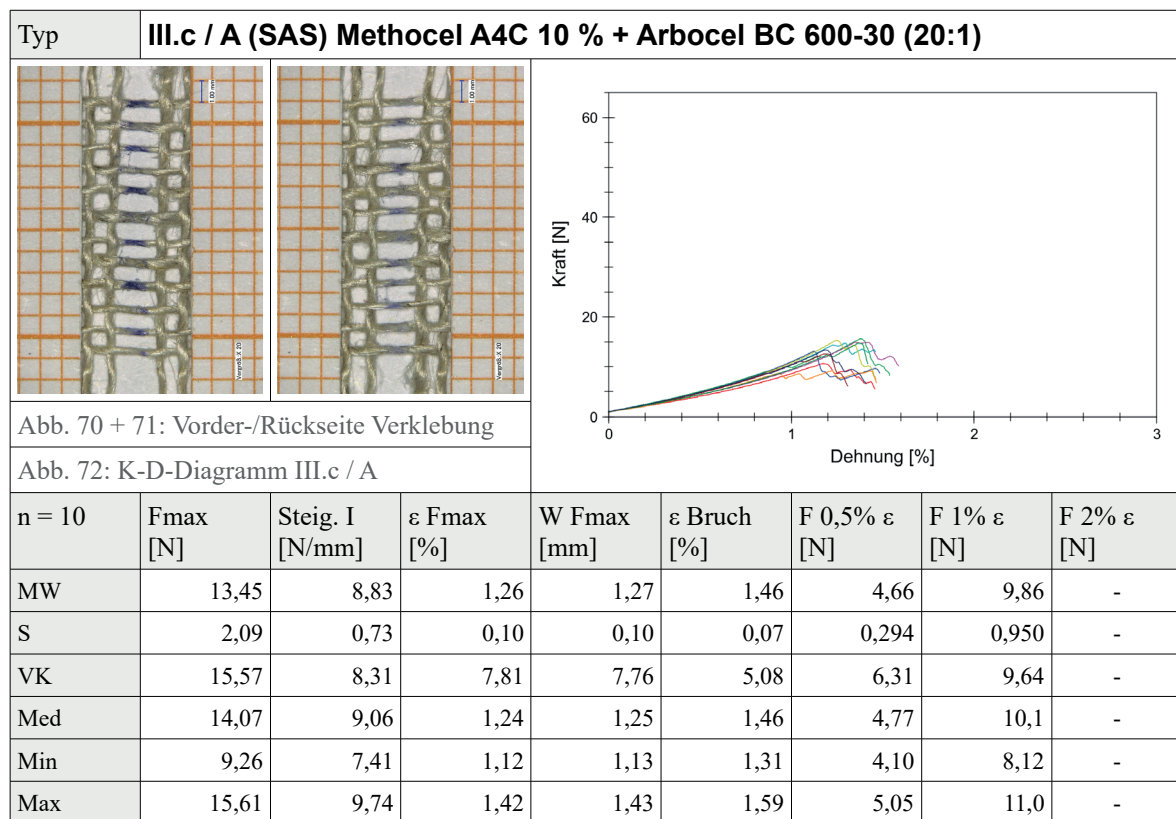
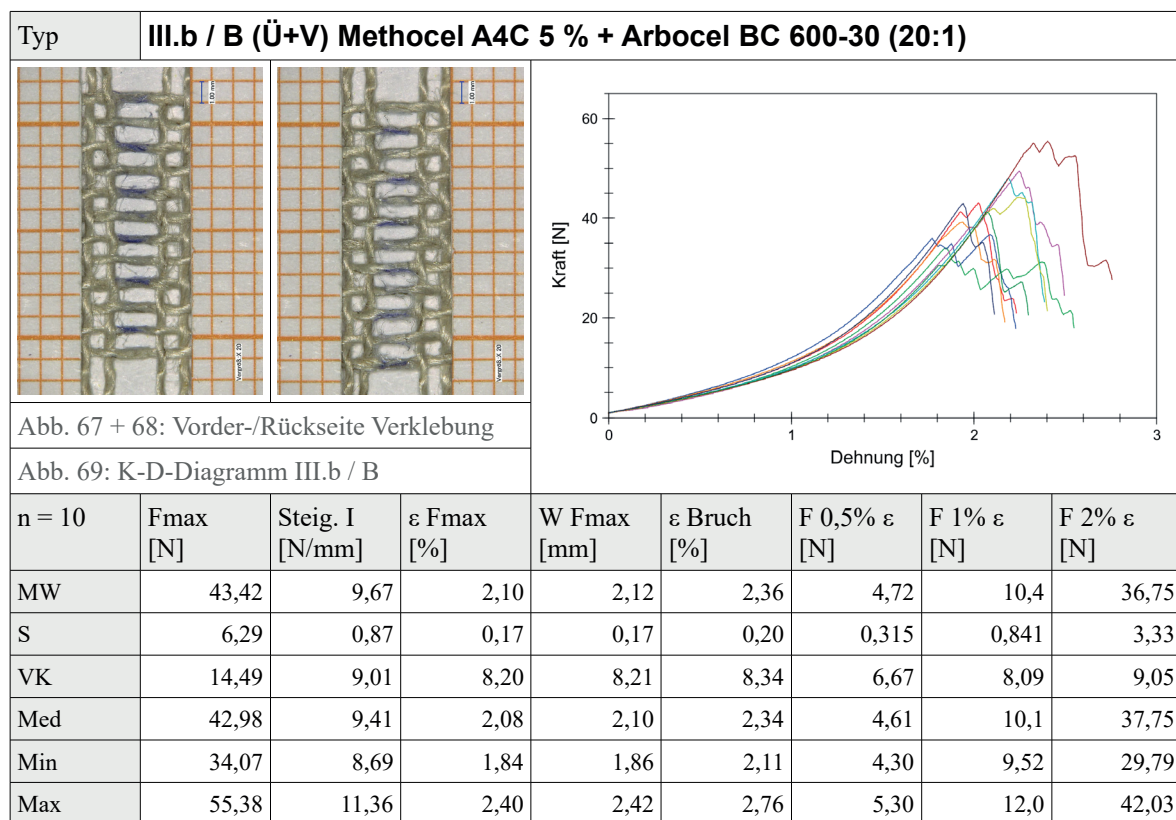
Typ	II.d [Lineco + Methocel A4C 5 % (9:1)] + MCC 50 µm (20:1)							
								
Abb. 49 + 50: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 51: K-D-Diagramm II.d								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	21,54	10,61	1,50	1,51	1,67	5,16	11,4	-
S	3,20	0,88	0,16	0,16	0,12	0,293	0,845	-
VK	14,87	8,32	10,36	10,35	7,11	5,68	7,44	-
Med	21,25	10,93	1,51	1,52	1,66	5,25	11,7	-
Min	16,51	9,04	1,25	1,25	1,54	4,64	9,86	-
Max	27,46	11,60	1,77	1,78	1,85	5,50	12,3	-

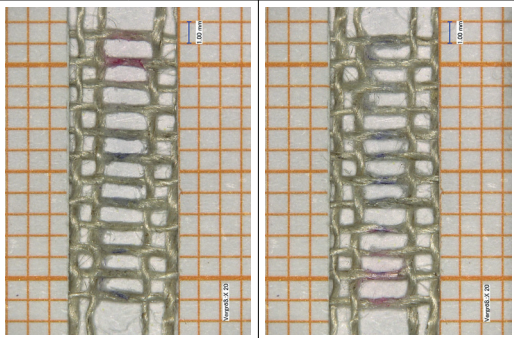
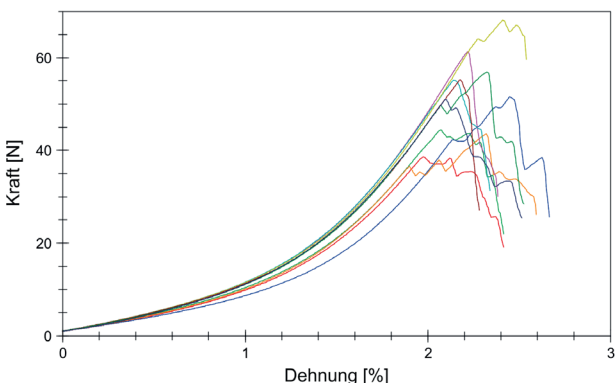
Typ	III.a / A (SAS, Gewebe 1. Sironi) Methocel A4C 10 %							
								
Abb. 52 + 53: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 54: K-D-Diagramm III.a / A (Sironi)								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	12,24	8,71	1,20	1,21	1,40	4,52	9,51	-
S	1,94	1,17	0,16	0,17	0,15	0,371	1,11	-
VK	15,84	13,49	13,61	13,67	11,07	8,21	11,63	-
Med	12,63	9,31	1,19	1,20	1,38	4,59	10,0	-
Min	8,75	6,94	0,94	0,94	1,16	3,78	7,76	-
Max	14,92	9,83	1,49	1,50	1,71	4,94	10,6	-

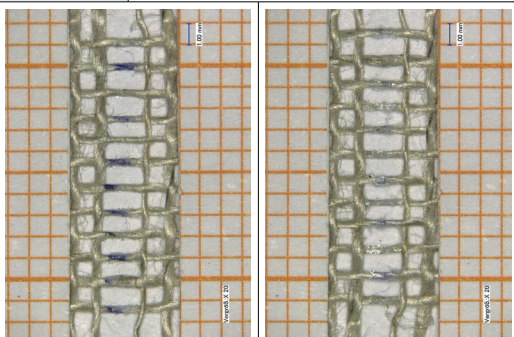
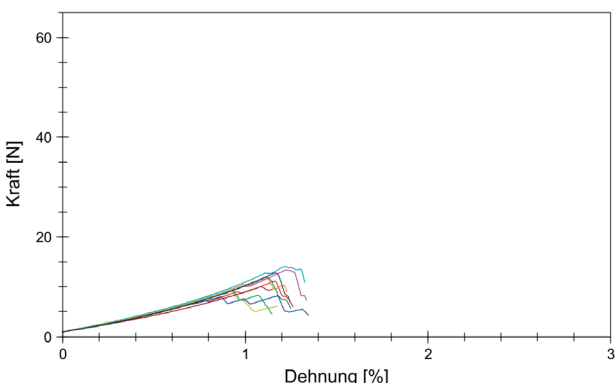


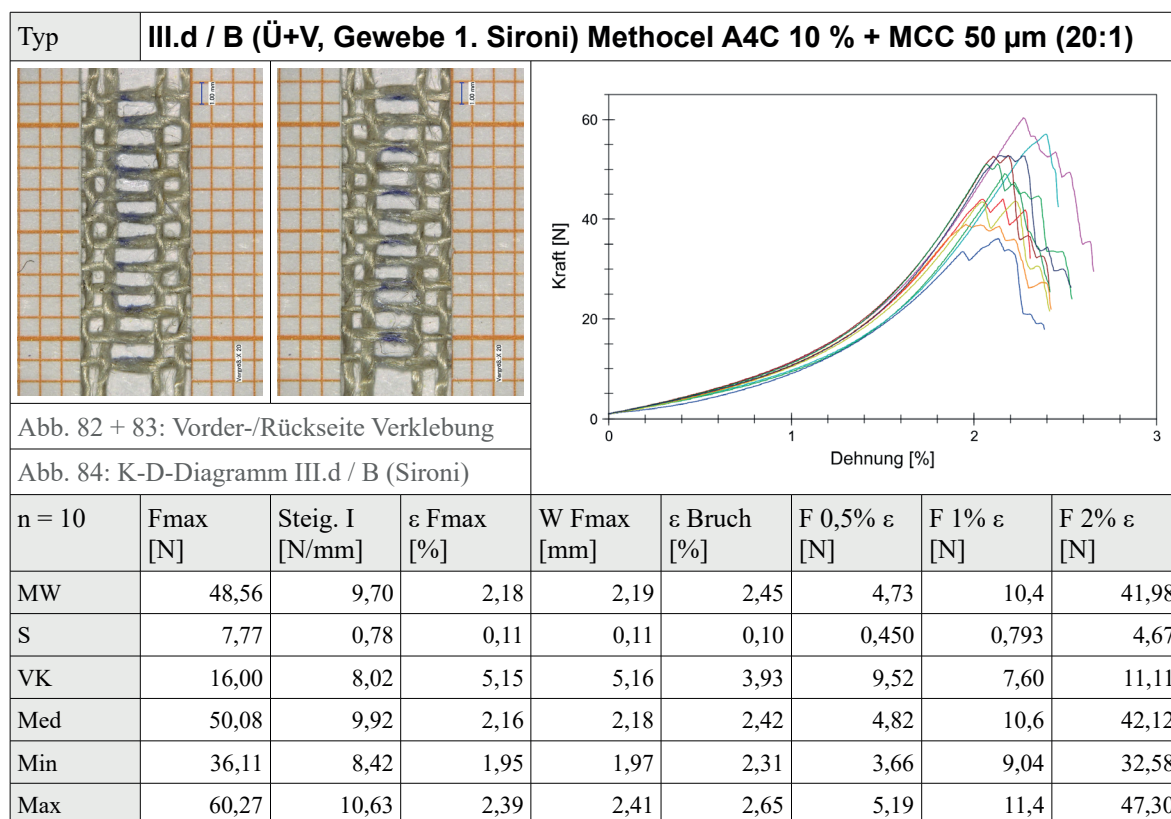
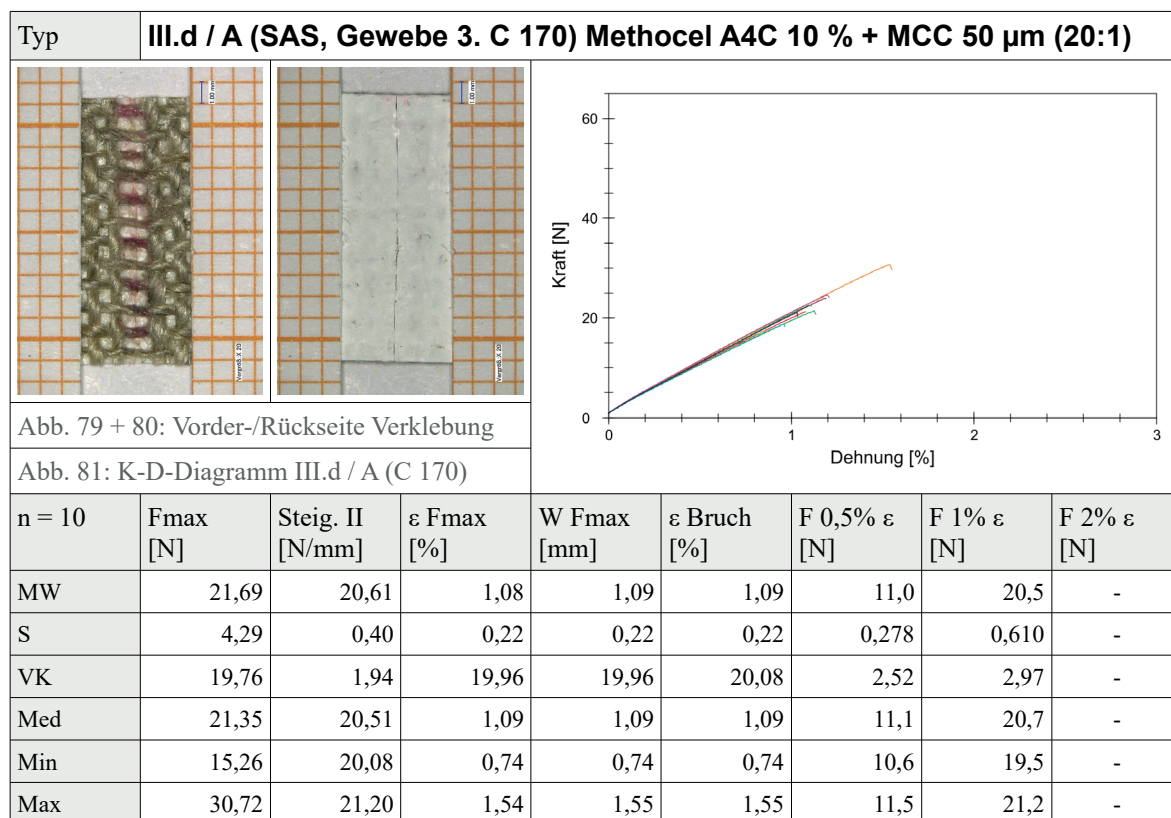
Typ	III.a / B (Ü+V, Gewebe 1. Sironi) Methocel A4C 10 %							
								
Abb. 61 + 62: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 63: K-D-Diagramm III.a / B (Sironi)								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	48,32	10,05	2,12	2,14	2,38	4,83	10,8	42,72
S	4,83	0,63	0,16	0,16	0,11	0,215	0,590	5,52
VK	10,00	6,22	7,41	7,42	4,75	4,45	5,48	12,92
Med	48,30	10,00	2,11	2,13	2,41	4,84	10,8	42,44
Min	40,95	9,03	1,87	1,88	2,15	4,44	9,80	29,37
Max	54,91	10,99	2,40	2,42	2,50	5,15	11,6	49,01

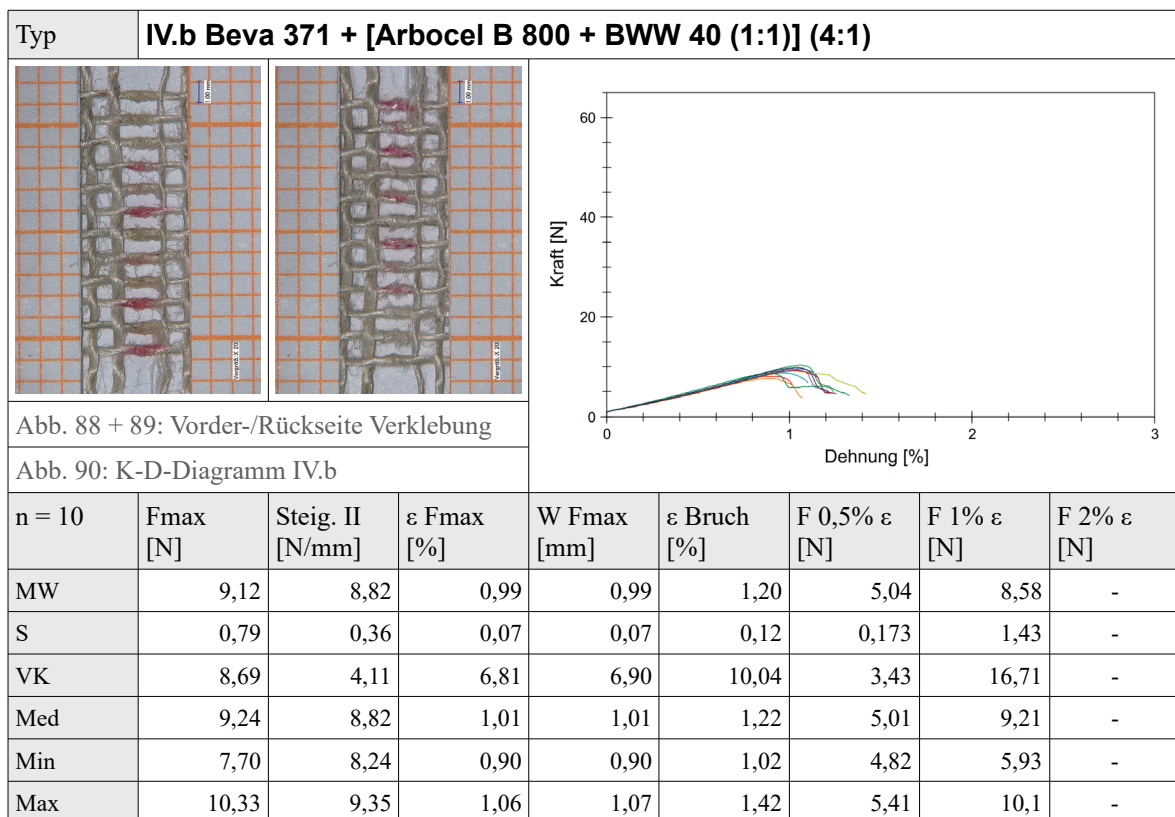
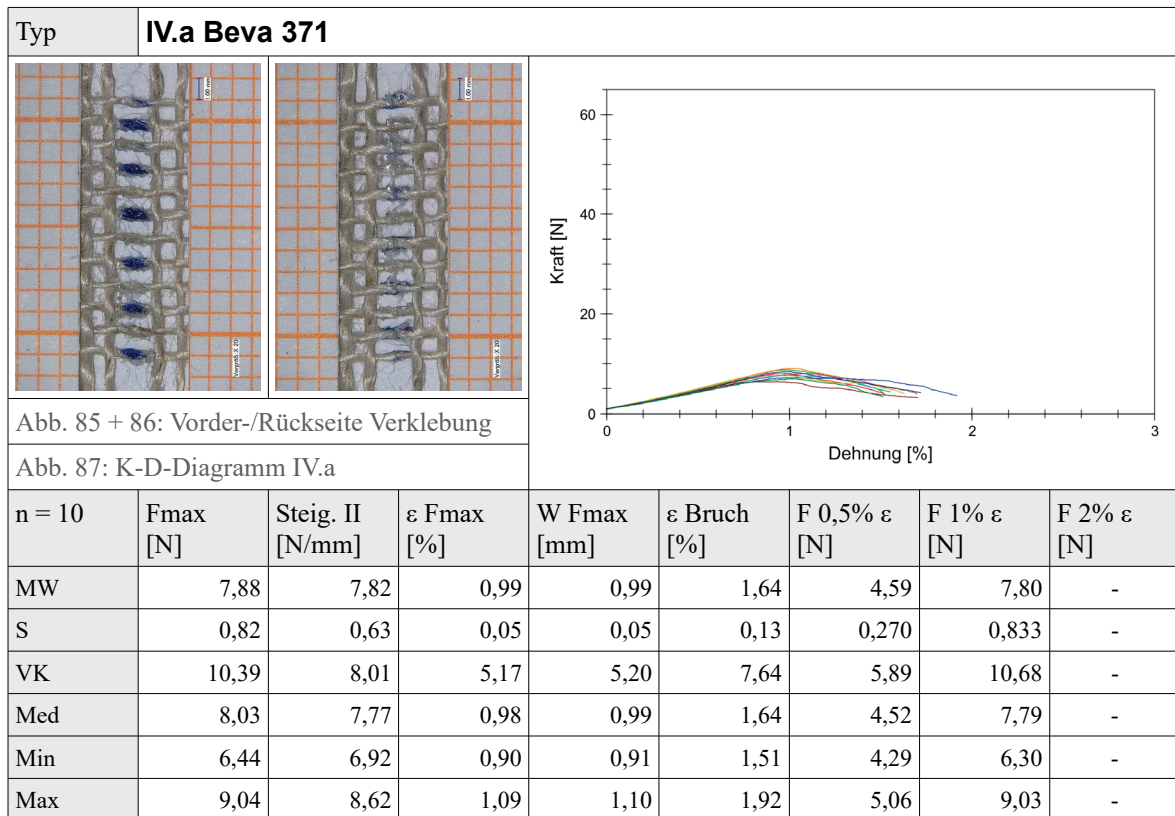
Typ	III.b / A (SAS) Methocel A4C 5 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)							
								
Abb. 64 + 65: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 66: K-D-Diagramm III.b / A								
n = 10	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	7,68	7,32	0,95	0,95	1,08	4,36	7,14	-
S	1,26	0,89	0,18	0,18	0,19	0,458	1,83	-
VK	16,34	12,18	18,82	18,83	17,22	10,51	25,60	-
Med	8,21	7,31	0,98	0,99	1,09	4,34	7,51	-
Min	5,85	5,65	0,62	0,63	0,81	3,50	4,12	-
Max	8,98	8,96	1,23	1,24	1,39	5,10	8,90	-

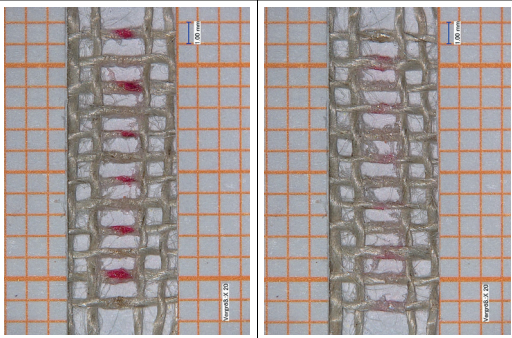
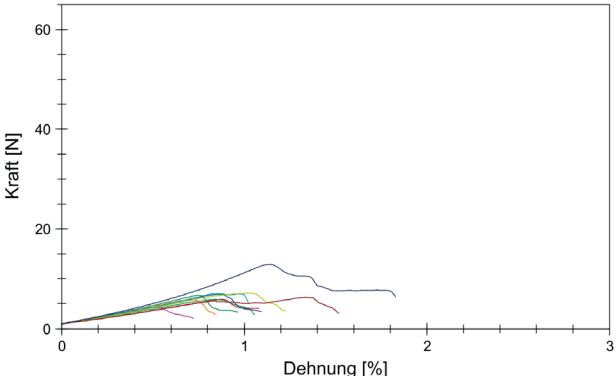


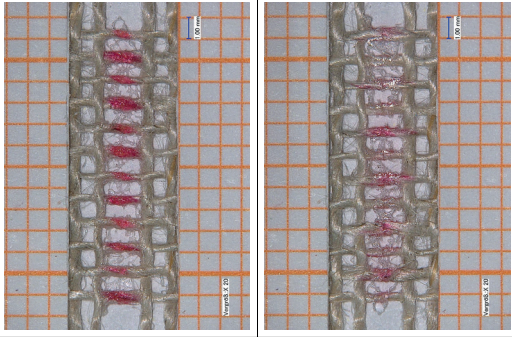
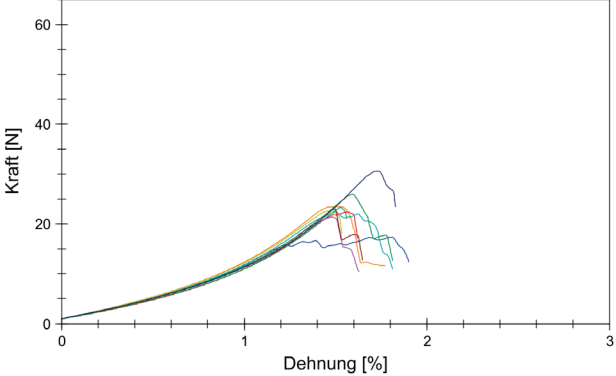
Typ	III.c / B (Ü+V) Methocel A4C 10 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)							
								
Abb. 73 + 74: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 75: K-D-Diagramm III.c / B								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	52,63	10,02	2,22	2,23	2,47	4,80	10,7	43,17
S	8,80	1,00	0,15	0,15	0,12	0,338	0,943	5,21
VK	16,73	9,97	6,95	6,93	4,84	7,05	8,80	12,06
Med	53,33	10,47	2,20	2,22	2,46	4,89	11,1	45,97
Min	38,68	7,82	1,97	1,99	2,28	4,15	8,67	35,20
Max	68,16	10,96	2,45	2,46	2,67	5,16	11,6	48,32

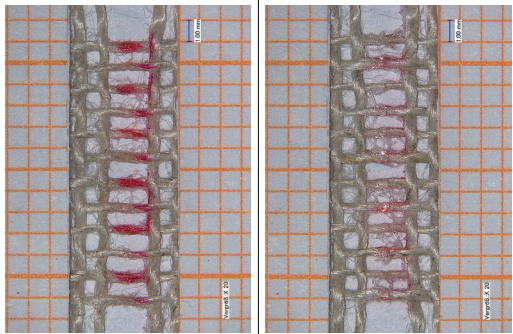
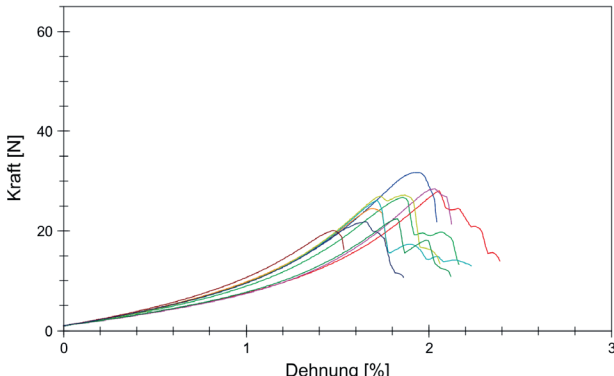
Typ	III.d / A (SAS, Gewebe 1. Sironi) Methocel A4C 10 % + MCC 50 µm (20:1)							
								
Abb. 76 + 77: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 78: K-D-Diagramm III.d / A (Sironi)								
n = 10	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	11,19	9,00	1,11	1,12	1,25	4,71	9,18	-
S	1,94	0,73	0,11	0,11	0,07	0,200	1,47	-
VK	17,37	8,13	9,70	9,69	5,97	4,25	16,02	-
Med	11,54	9,00	1,14	1,15	1,25	4,71	9,57	-
Min	8,22	7,94	0,92	0,93	1,15	4,28	6,89	-
Max	14,04	10,31	1,23	1,24	1,35	5,00	11,0	-

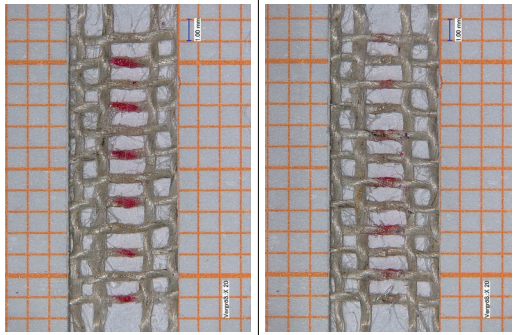
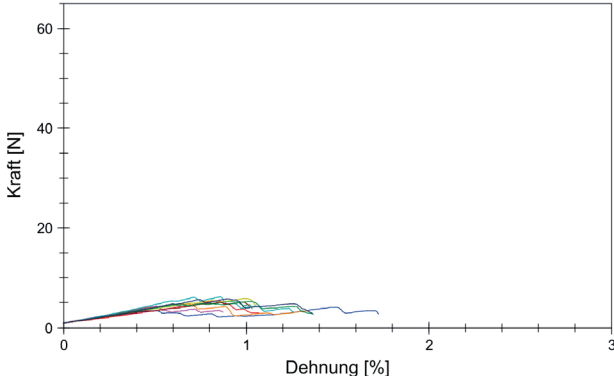


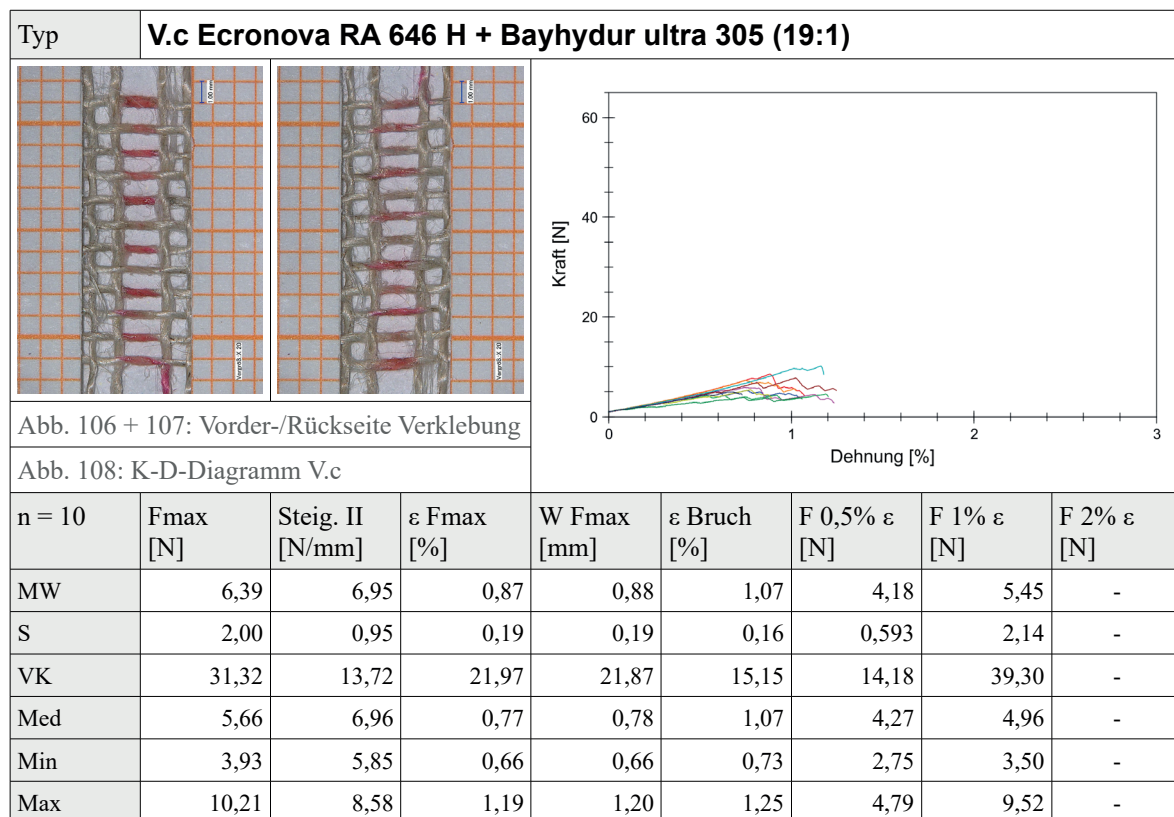
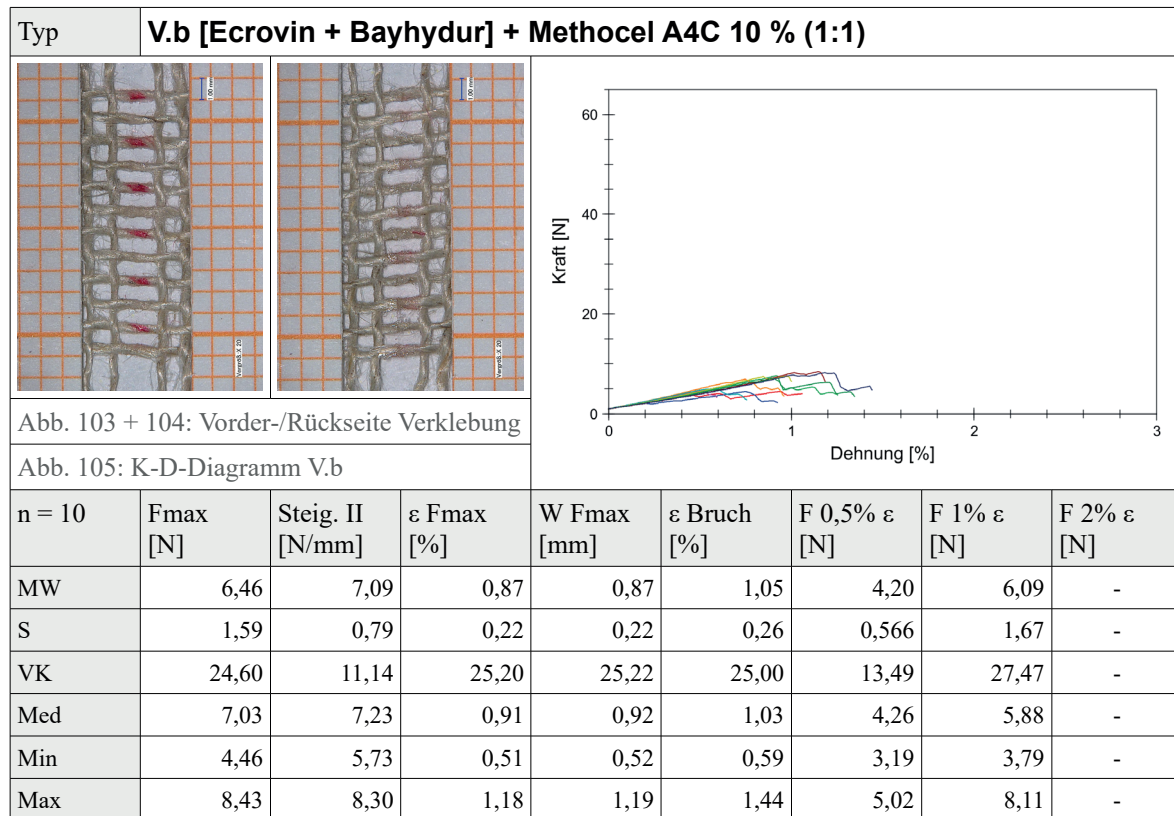


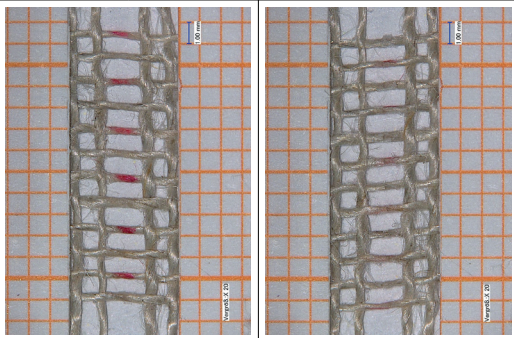
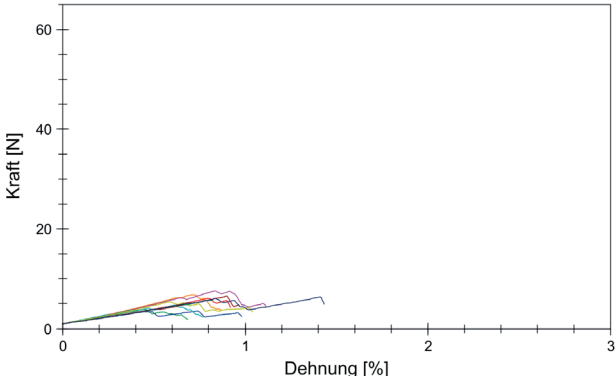
Typ	IV.c Kremer Polyamidschweißpulver							
								
Abb. 91 + 92: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 93: K-D-Diagramm IV.c								
n = 10	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ϵ Fmax [%]	W Fmax [mm]	ϵ Bruch [%]	F 0,5% ϵ [N]	F 1% ϵ [N]	F 2% ϵ [N]
MW	6,89	7,16	0,89	0,90	1,14	4,23	6,09	-
S	2,27	1,40	0,23	0,23	0,32	0,424	2,59	-
VK	32,97	19,55	25,70	25,69	28,52	10,04	42,55	-
Med	6,52	7,03	0,85	0,86	1,07	4,24	5,03	-
Min	4,29	5,75	0,52	0,53	0,72	3,63	4,02	-
Max	12,88	10,59	1,34	1,35	1,83	5,04	11,2	-

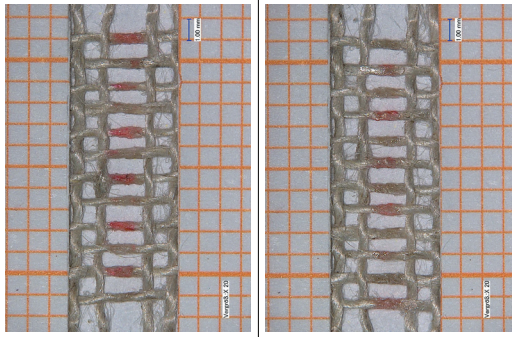
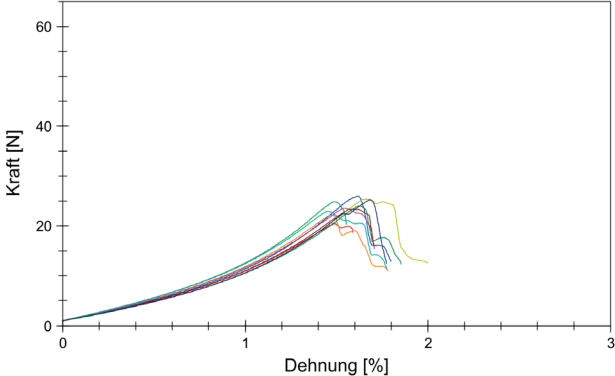
Typ	IV.d Lascaux 5065							
								
Abb. 94 + 95: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 96: K-D-Diagramm IV.d								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ϵ Fmax [%]	W Fmax [mm]	ϵ Bruch [%]	F 0,5% ϵ [N]	F 1% ϵ [N]	F 2% ϵ [N]
MW	23,25	10,88	1,57	1,58	1,71	5,13	11,6	-
S	3,36	0,47	0,11	0,11	0,13	0,183	0,462	-
VK	14,45	4,32	7,08	7,10	7,46	3,57	3,98	-
Med	22,83	10,83	1,53	1,54	1,71	5,12	11,5	-
Min	17,37	10,26	1,46	1,48	1,53	4,81	11,0	-
Max	30,60	11,67	1,81	1,82	1,90	5,40	12,4	-

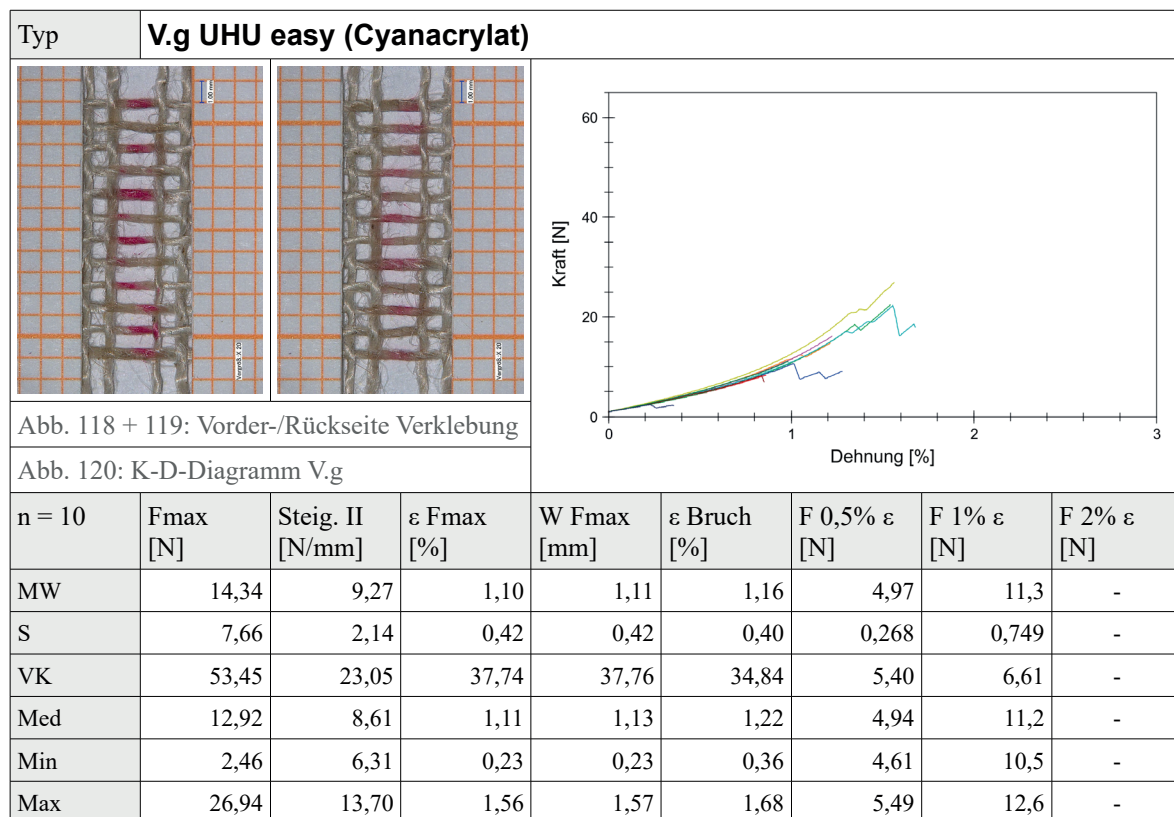
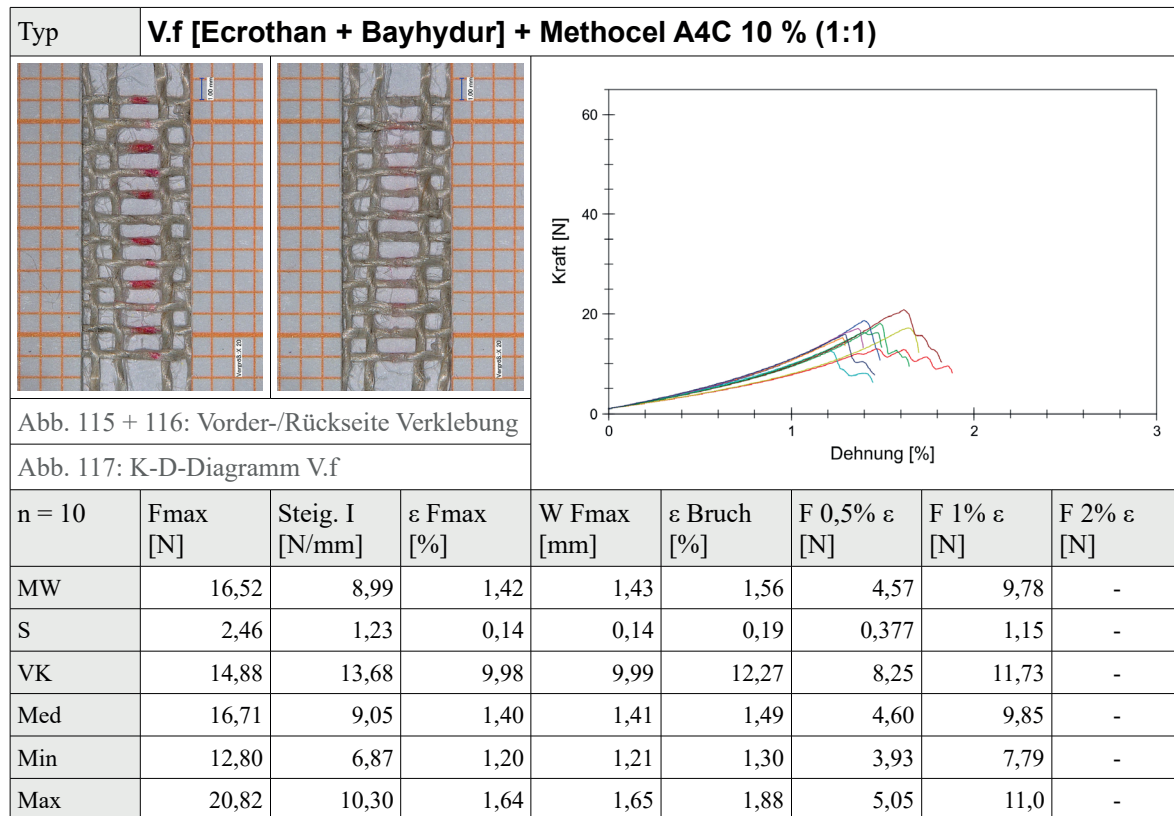
Typ	IV.e Lascaux 5350							
								
Abb. 97 + 98: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 99: K-D-Diagramm IV.e								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	25,70	8,27	1,81	1,83	2,03	4,23	9,07	21,64
S	3,52	1,17	0,18	0,18	0,25	0,352	1,11	6,13
VK	13,71	14,20	9,95	10,03	12,18	8,33	12,20	28,30
Med	26,41	8,78	1,84	1,86	2,09	4,36	9,57	19,09
Min	20,07	6,59	1,48	1,48	1,53	3,69	7,47	14,32
Max	31,71	9,98	2,06	2,08	2,39	4,75	10,7	29,07

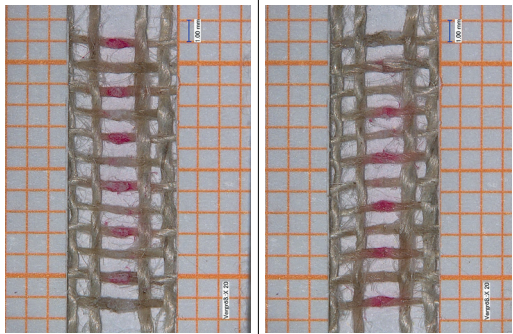
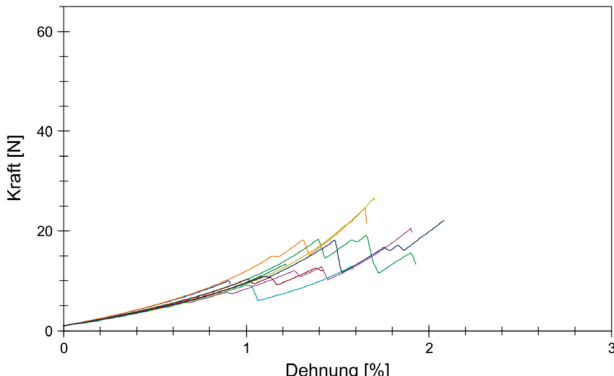
Typ	V.a Ecrovin LV 340 eco + Bayhydur ultra 305 (19:1)							
								
Abb. 100 + 101: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 102: K-D-Diagramm V.a								
n = 10	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	5,22	6,23	0,92	0,93	1,21	3,92	4,10	-
S	0,69	0,78	0,26	0,26	0,25	0,404	1,17	-
VK	13,13	12,58	27,97	27,93	20,57	10,31	28,48	-
Med	5,31	6,27	0,90	0,91	1,17	4,01	4,08	-
Min	4,07	5,13	0,51	0,51	0,87	3,40	2,32	-
Max	6,23	7,66	1,49	1,50	1,72	4,63	5,86	-

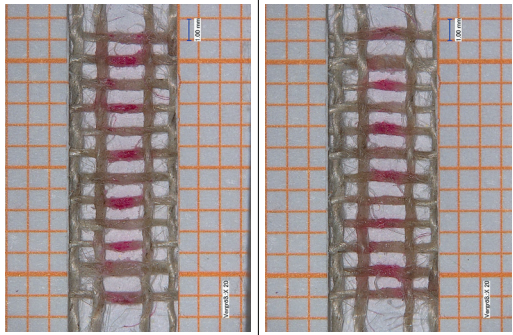
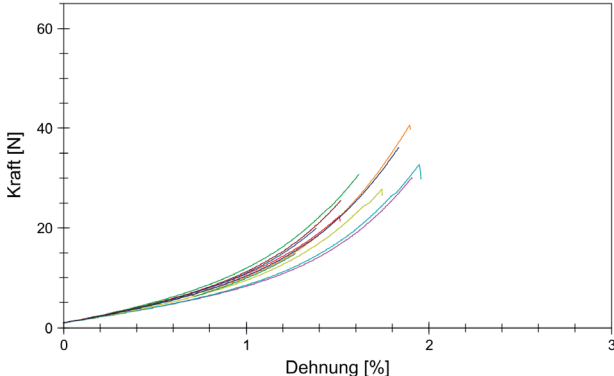


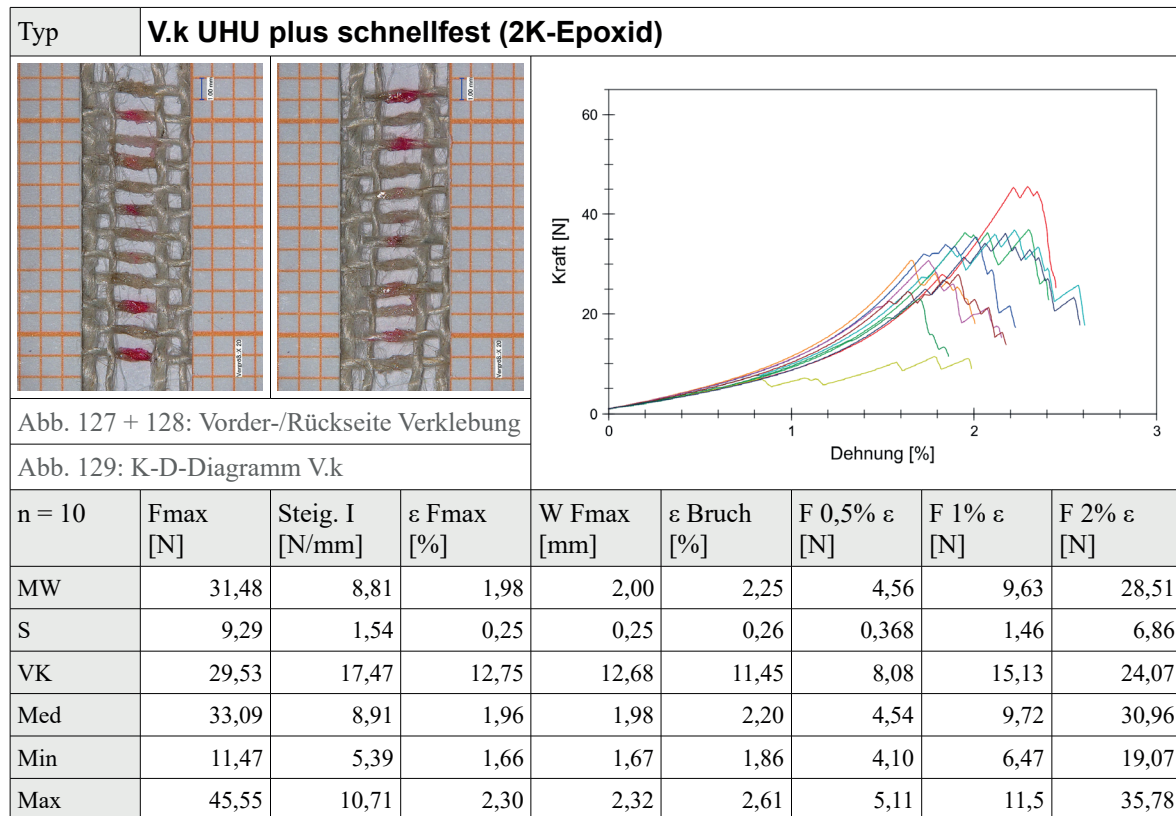
Typ	V.d [Ecronova + Bayhydur] + Methocel A4C 10 % (1:1)							
								
Abb. 109 + 110: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 111: K-D-Diagramm V.d								
n = 10	Fmax [N]	Steig. II [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	5,66	6,75	0,79	0,79	0,96	4,01	4,30	-
S	1,30	1,01	0,26	0,26	0,21	0,657	0,280	-
VK	23,05	14,98	32,81	32,80	21,85	16,40	6,51	-
Med	5,88	6,50	0,77	0,77	0,94	3,85	4,18	-
Min	3,58	5,59	0,45	0,46	0,68	3,08	4,11	-
Max	7,60	8,49	1,41	1,42	1,43	5,02	4,62	-

Typ	V.e Ecrothan 4075 + Bayhydur ultra 305 (19:1)							
								
Abb. 112 + 113: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 114: K-D-Diagramm V.e								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	23,79	10,61	1,56	1,58	1,75	5,16	11,4	-
S	1,67	0,77	0,09	0,09	0,13	0,311	0,752	-
VK	7,03	7,23	5,70	5,62	7,21	6,02	6,61	-
Med	23,82	10,47	1,56	1,58	1,78	5,09	11,2	-
Min	20,43	9,74	1,45	1,46	1,55	4,81	10,6	-
Max	25,94	11,82	1,69	1,70	2,00	5,63	12,6	-



Typ	V.h UHU easy + Methocel A4C in Pulverform (9:1)							
								
Abb. 121 + 122: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 123: K-D-Diagramm V.h								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	17,29	8,72	1,51	1,53	1,55	4,58	9,81	-
S	6,04	1,00	0,37	0,37	0,39	0,332	0,997	-
VK	34,97	11,42	24,25	24,24	24,91	7,24	10,16	-
Med	16,27	8,42	1,61	1,63	1,62	4,45	9,64	-
Min	10,02	7,47	0,91	0,91	0,91	4,22	8,40	-
Max	26,66	10,58	2,08	2,10	2,08	5,18	12,0	-

Typ	V.j UHU easy + Arbocel BWB 40 (10:1)							
								
Abb. 124 + 125: Vorder-/Rückseite Verklebung								
Abb. 126: K-D-Diagramm V.j								
n = 10	Fmax [N]	Steig. I [N/mm]	ε Fmax [%]	W Fmax [mm]	ε Bruch [%]	F 0,5% ε [N]	F 1% ε [N]	F 2% ε [N]
MW	28,08	9,43	1,66	1,68	1,66	4,65	10,2	-
S	7,71	1,21	0,24	0,24	0,24	0,354	1,14	-
VK	27,46	12,81	14,33	14,29	14,40	7,60	11,23	-
Med	28,90	9,56	1,68	1,69	1,68	4,74	10,3	-
Min	14,86	7,44	1,27	1,28	1,27	4,08	8,32	-
Max	40,62	11,29	1,95	1,97	1,96	5,15	11,9	-



A.1.6 Einspannlänge (Exkurs)

Probekörper		
Gewebe	1.	Pattina L 13 (puro lino), T. E. Sironi, unbeschichtet (Sironi)
	2.	Claessens Canvas 070, unbeschichtet (C 070)
	3.	Claessens Canvas 170, acrylgründiert (C 170)
	4.	Claessens Canvas 70, ölgründiert (C 70)
Probekörpertyp	A.	Referenzproben (Schuss, je n = 10)
	B.	Verklebt (Schuss, je n = 10)
Einspannlängen	I.	LE 12,5 mm
	II.	LE 25 mm
	III.	LE 50 mm
	IV.	LE 100 mm
Verklebungstechnik		Stoß-auf-Stoß (SAS) mit Lineco + Methocel A4C 5 % (9:1)
Probengeometrie		Gewebestreifen (L: LE + 100 mm; B: 12 Fäden)
Prüfbedingungen		
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.
Prüfgerät		Zwick Universalprüfmaschine, Typ Z2.5(RetroLine)
Prüfsoftware		TestXpert II V3.7
Kraftaufnehmer		100 N / 2 kN
Einspannlänge		12,5 / 25 / 50 / 100 mm
Vorkraft und -geschwindigkeit		1 N mit 5 mm/min
Prüfgeschwindigkeit		20 mm/min
Brucherkennung		Kraftabschaltsschwelle 50 % Fmax
Dehnungsermittlung		Via Längenänderung (Traversenweg)
Steigungsermittlung		Sekante im Bereich 0,1-1 % Dehnung

Auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Versuchsstatistik wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung ausgewählter Auswertungen:

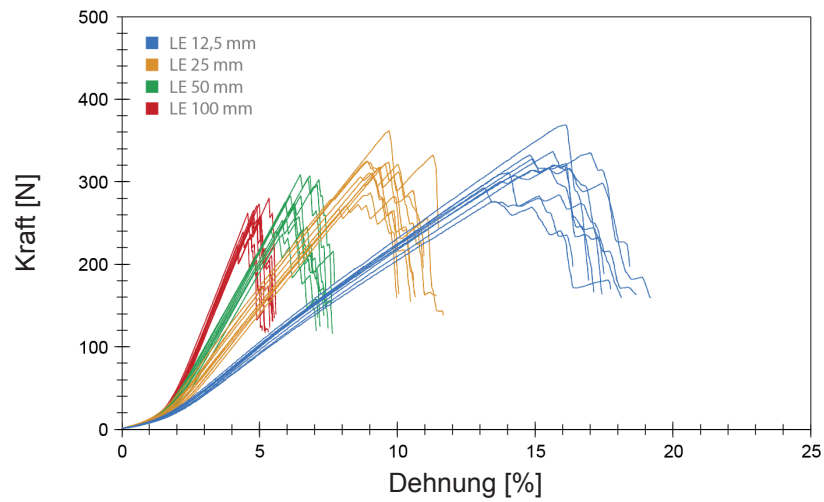


Abb. 01: K-D-Diagramm der Schussproben unterschiedlicher Einspannlängen des Typs **1. Sironi**.

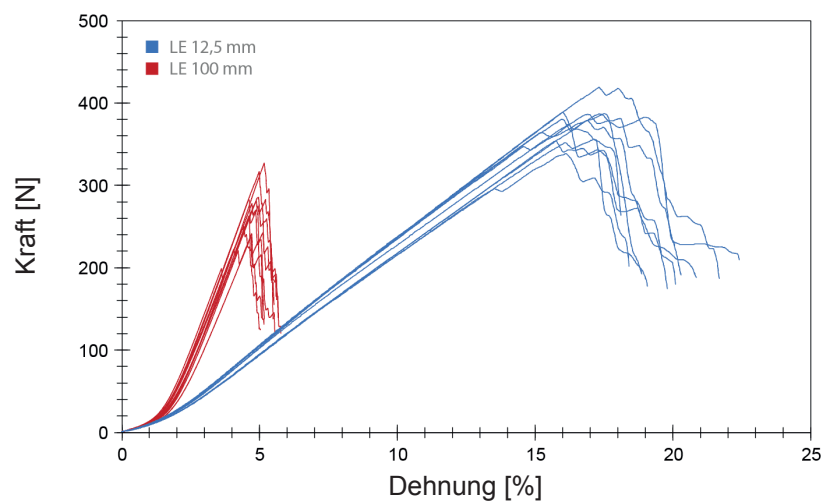


Abb. 02: K-D-Diagramm der Schussproben unterschiedlicher Einspannlängen des Typs **2. C 070**.

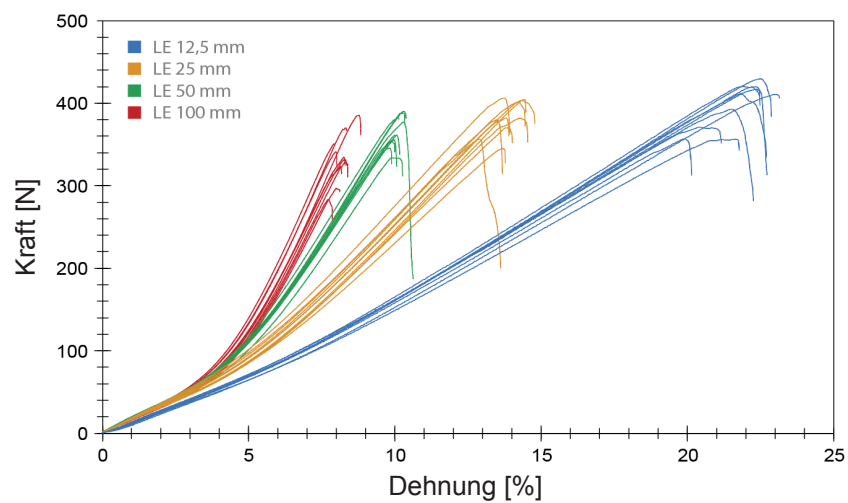


Abb. 03: K-D-Diagramm der Schussproben unterschiedlicher Einspannlängen des Typs **3. C 170**.

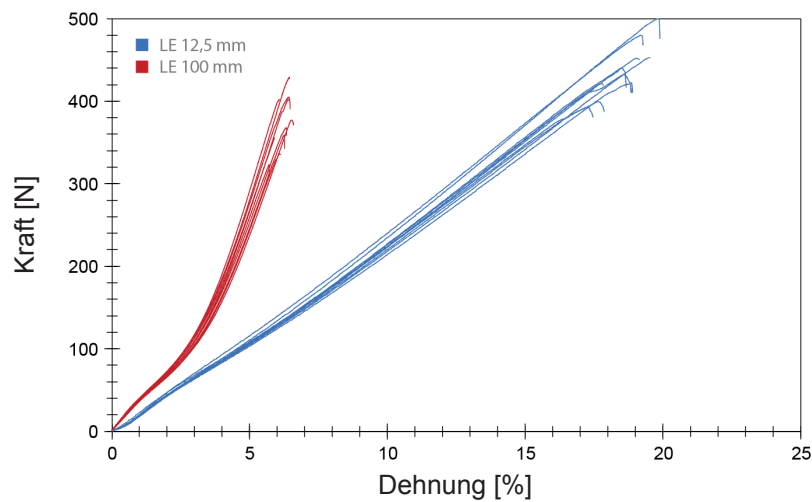


Abb. 04: K-D-Diagramm der Schussproben unterschiedlicher Einspannlängen des Typs 4. C 70.

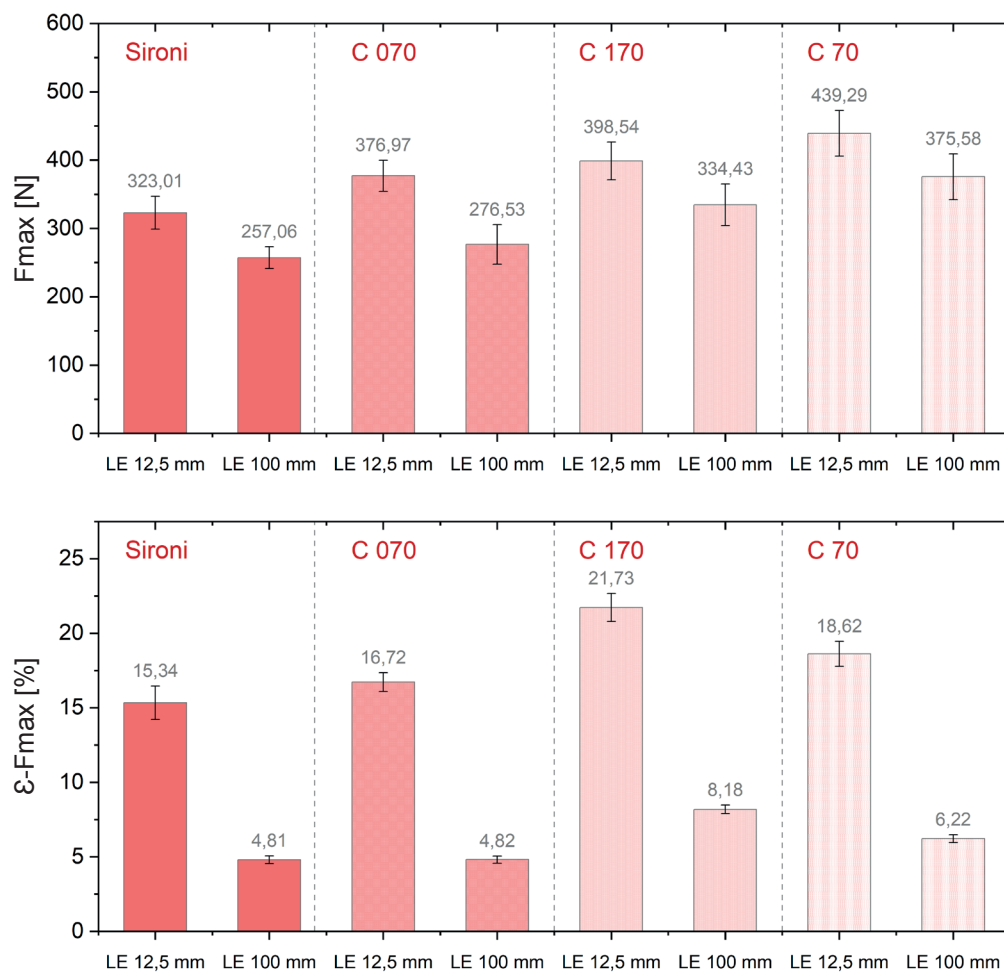


Abb. 05 und 06: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der Schussproben der Typen 1-4 mit 12,5 mm sowie 100 mm Einspannlänge.

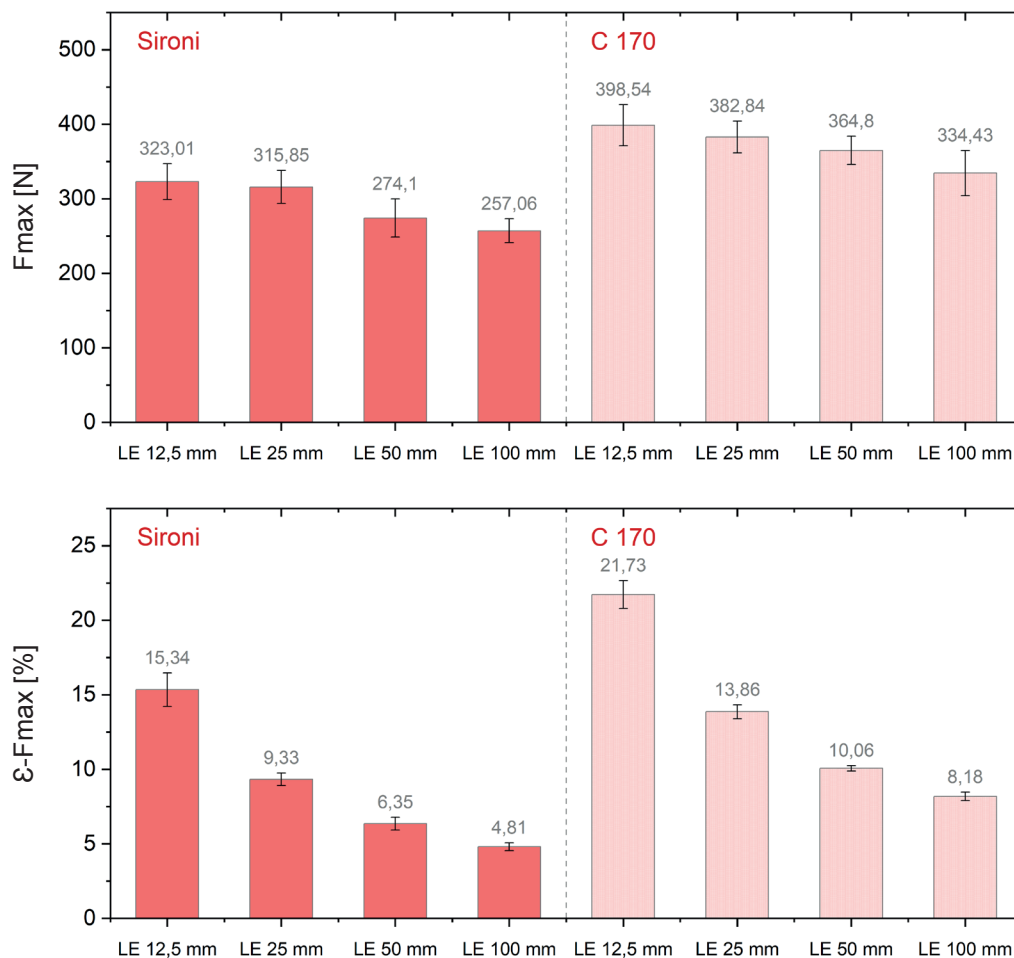


Abb. 07 und 08: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der Schussproben der Typen 1 und 3 mit unterschiedlichen Einspannlängen.

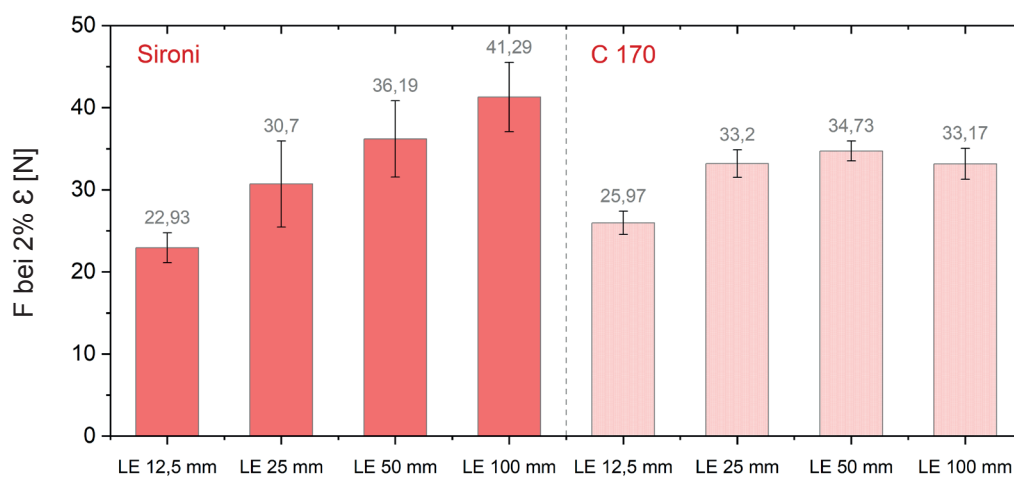


Abb. 09: Durchschnittliche Kraft bei 2 % Dehnung der Schussproben der Typen 1 und 3 mit unterschiedlichen Einspannlängen.

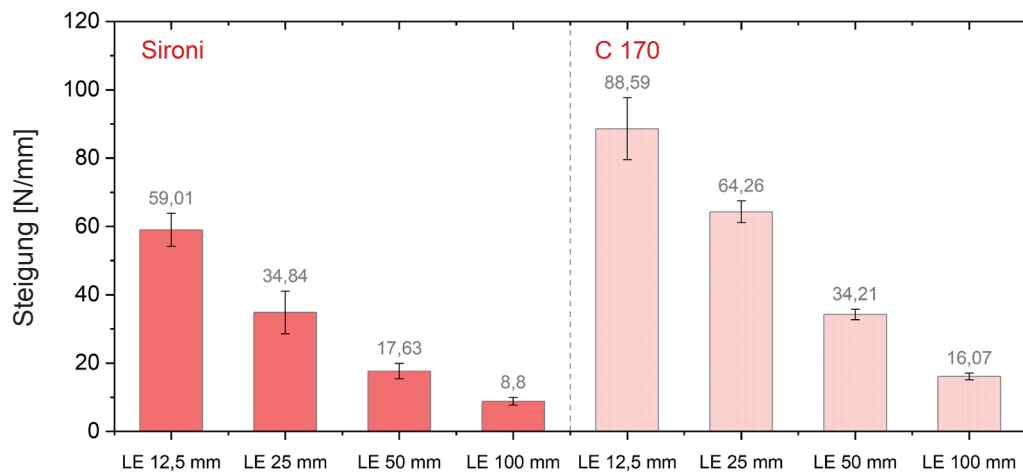


Abb. 10: Durchschnittliche Steigung im Bereich 0,1-1 % Dehnung der Schussproben der Typen 1 und 3 mit unterschiedlichen Einspannlängen.

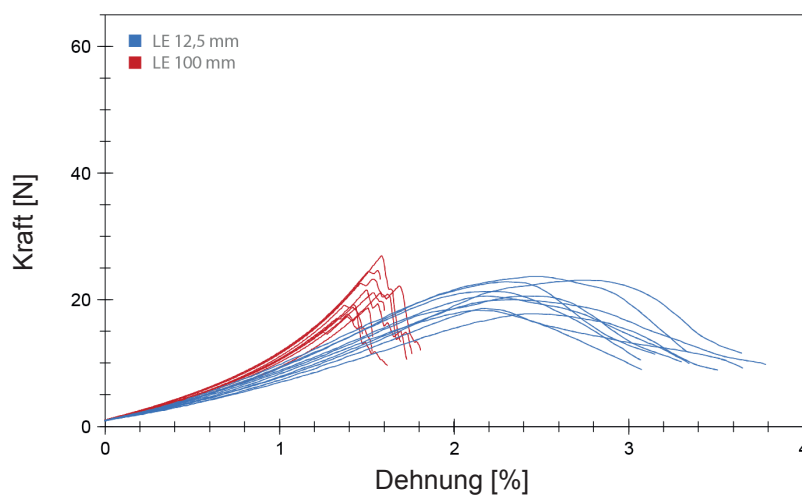


Abb. 11: K-D-Diagramm verklebter (SAS) Schussproben des Typs 1. **Sironi**.

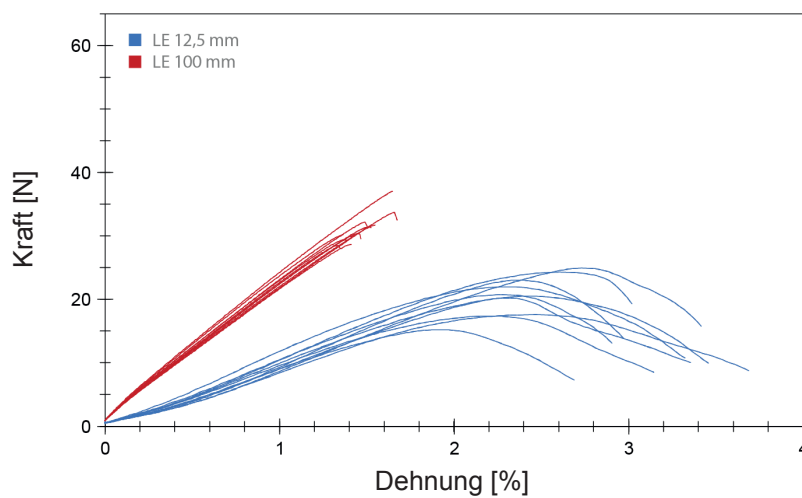


Abb. 12: K-D-Diagramm verklebter (SAS) Schussproben des Typs 3. **C 170**.

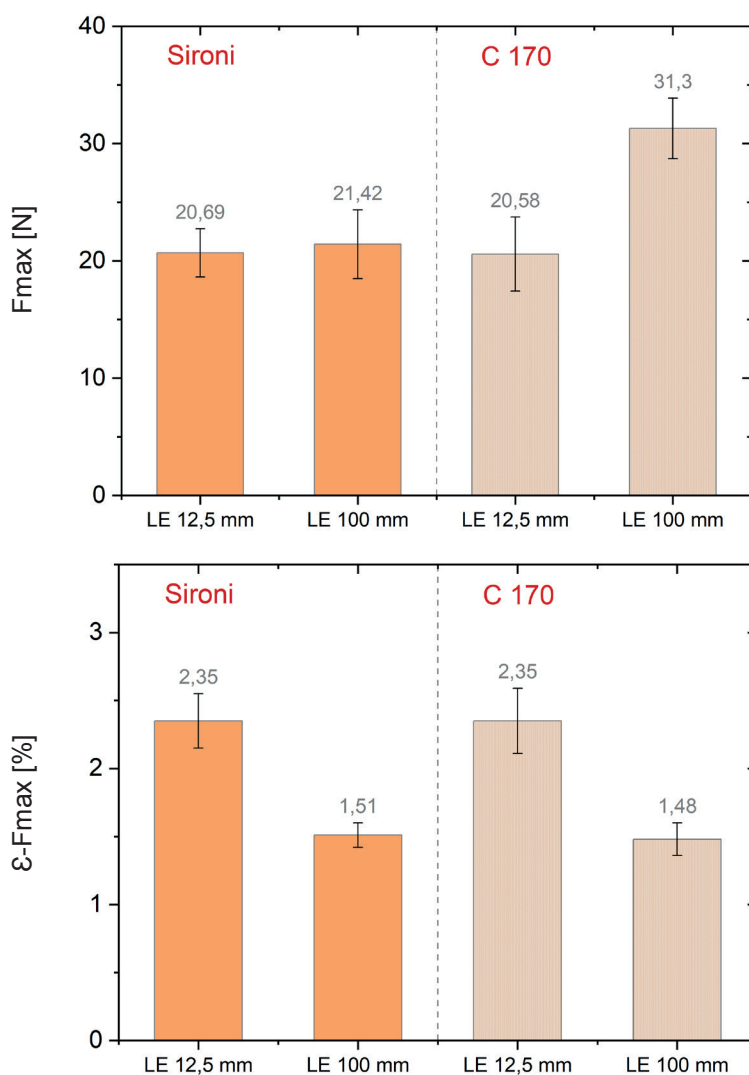


Abb. 13 und 14: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung verklebter (SAS) Schussproben der Typen 1 und 3.

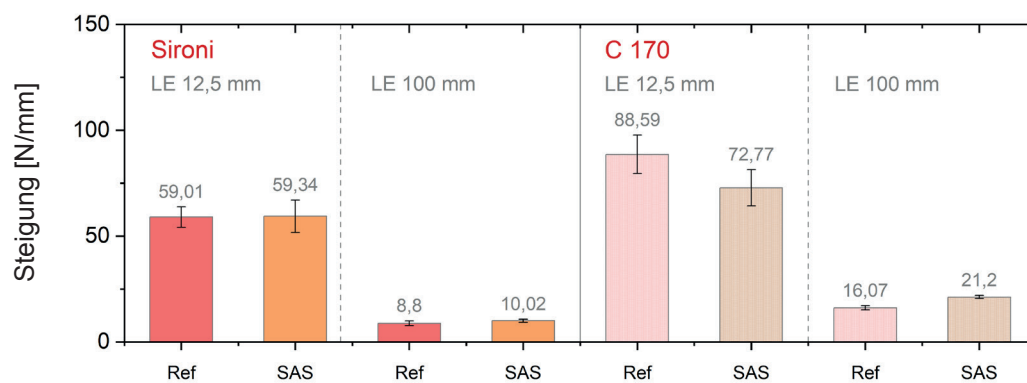


Abb. 15: Steigung intakter und verklebter (SAS) Schussproben der Typen 1 und 3 mit 12,5 mm und 100 mm Einspannlänge im Bereich 0,1-1 % Dehnung.

A.1.7 Ratenabhängigkeit (Vorversuch)

Probekörper		
Gewebe	1.	Pattina L 13 (puro lino), T. E. Sironi, unbeschichtet (Sironi)
	2.	Claessens Canvas 070, unbeschichtet (C 070)
	3.	Claessens Canvas 170, acrylgründiert (C 170)
	4.	Claessens 70, ölgründiert (C 70)
Probekörpertyp	A.	Referenzproben (Schuss, je n = 10)
	B.	Verklebt (Schuss, je n = 10)
Zuggeschwindigkeiten	I.	5 mm/min
	II.	10 mm/min
	III.	20 mm/min
	IV.	50 mm/min
	V.	100 mm/min
Verklebungstechnik		Stoß-auf-Stoß (SAS) mit Lineco + Methocel A4C 5 % (9:1)
Probengeometrie		Gewebestreifen (L: 200 mm; B: 12 Fäden)
Prüfbedingungen		
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.
Prüfgerät		Zwick Universalprüfmaschine, Typ Z2.5(RetroLine)
Prüfsoftware		TestXpert II V3.7
Kraftaufnehmer		100 N / 2 kN
Einspannlänge		100 mm
Vorkraft und -geschwindigkeit		1 N mit 5 mm/min
Prüfgeschwindigkeit		20 mm/min
Brucherkennung		Kraftabschaltswelle 50 % F _{max}
Dehnungsermittlung		Via Längenänderung (Traversenweg)
Steigungsermittlung		Sekante im Bereich 0,1-1 % Dehnung

Auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Versuchsstatistik wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung ausgewählter Auswertungen:

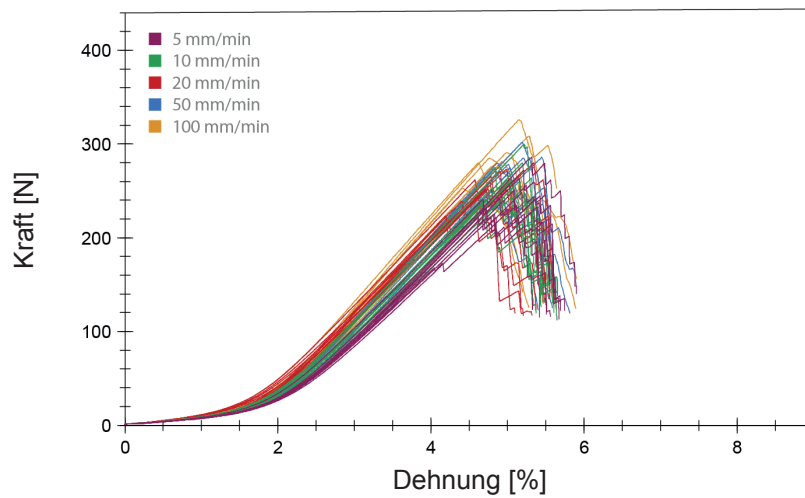


Abb. 01: K-D-Diagramm in unterschiedlicher Rate geprüfter Schussproben des Typs **1. Sironi**.

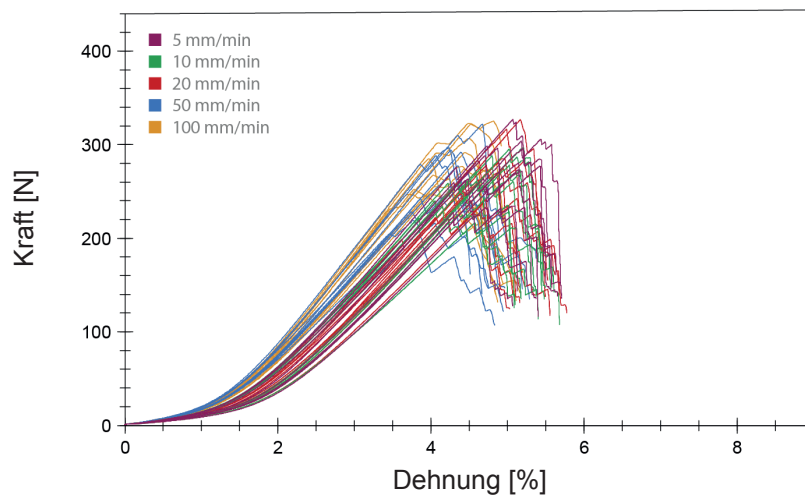


Abb. 02: K-D-Diagramm in unterschiedlicher Rate geprüfter Schussproben des Typs **2. C 070**.

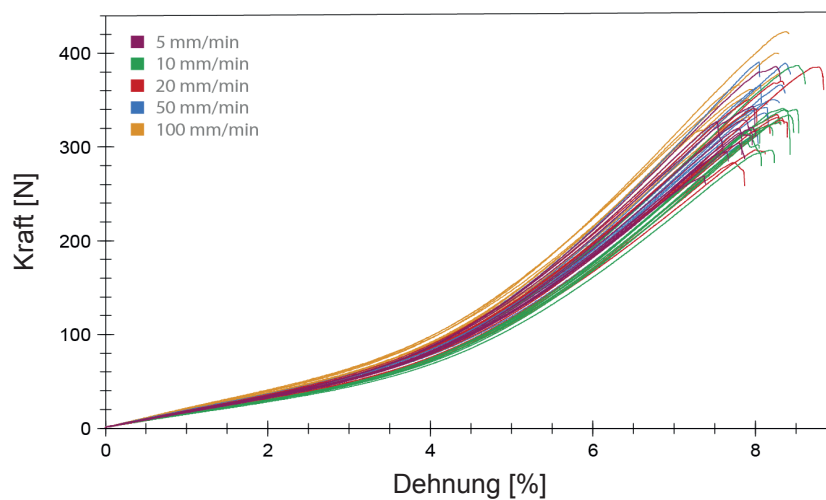


Abb. 03: K-D-Diagramm in unterschiedlicher Rate geprüfter Schussproben des Typs **3. C 170**.

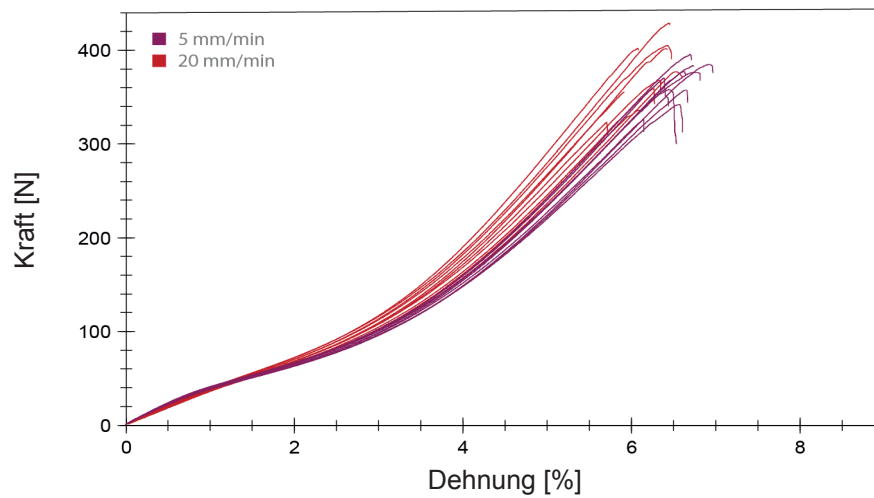


Abb. 04: K-D-Diagramm in unterschiedlicher Rate geprüfter Schussproben des Typs 4. C 70.

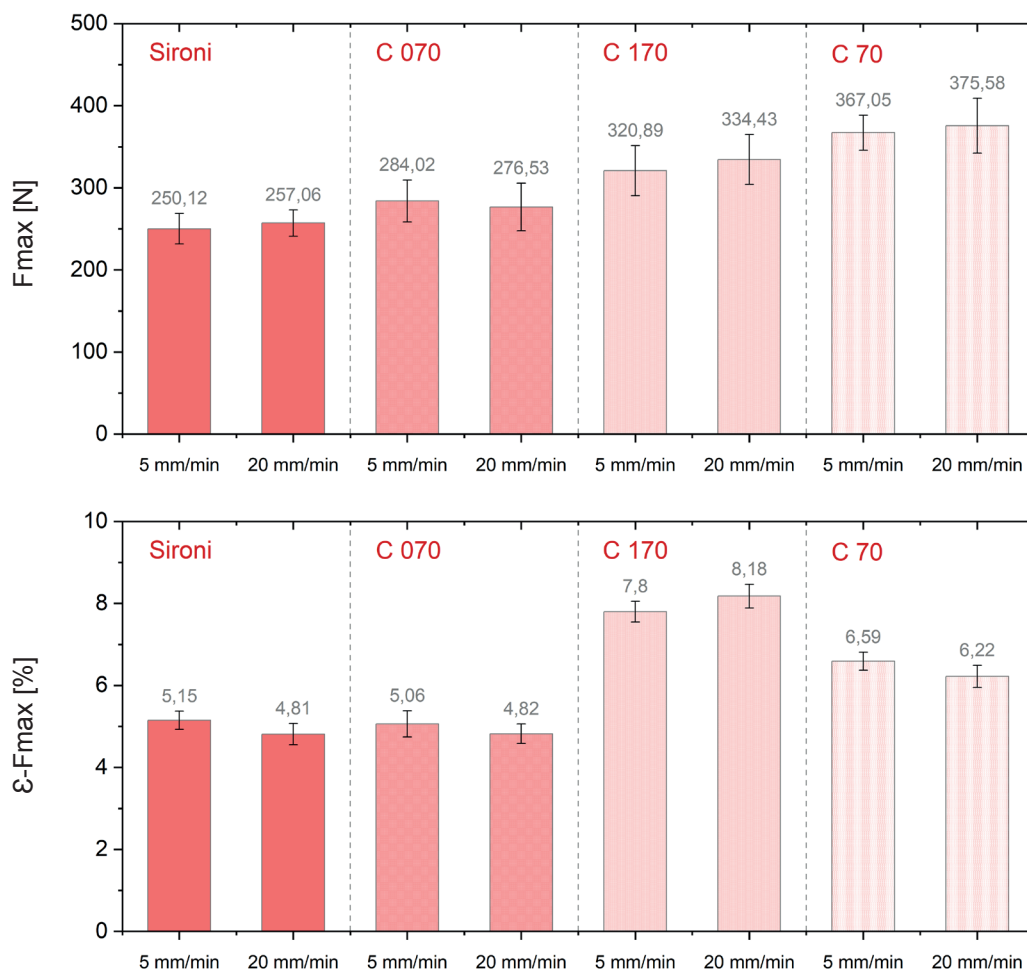


Abb. 05 und 06: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der Schussproben der Typen 1-4 bei 5 mm/min sowie 20 mm/min Prüfgeschwindigkeit.

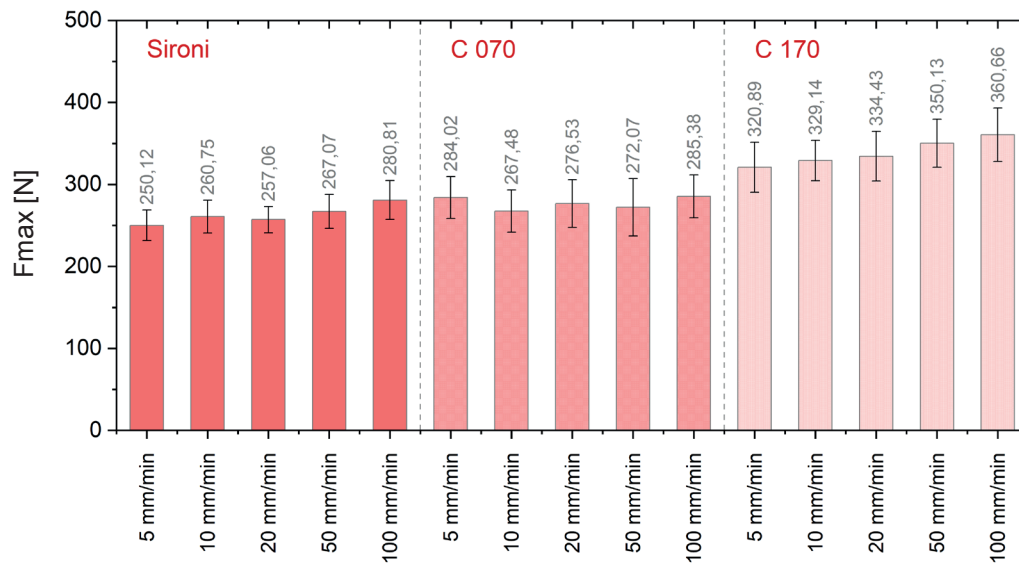


Abb. 07: Durchschnittliche Höchstzugkraft der Schussproben der Typen 1-3 mit den Prüfgeschwindigkeiten 5, 10, 20, 50 und 100 mm/min.

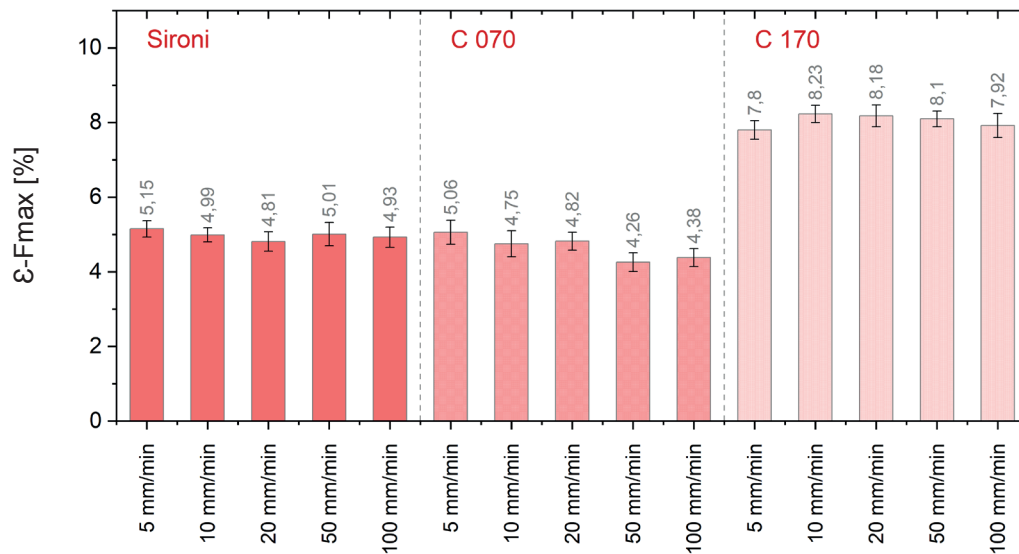
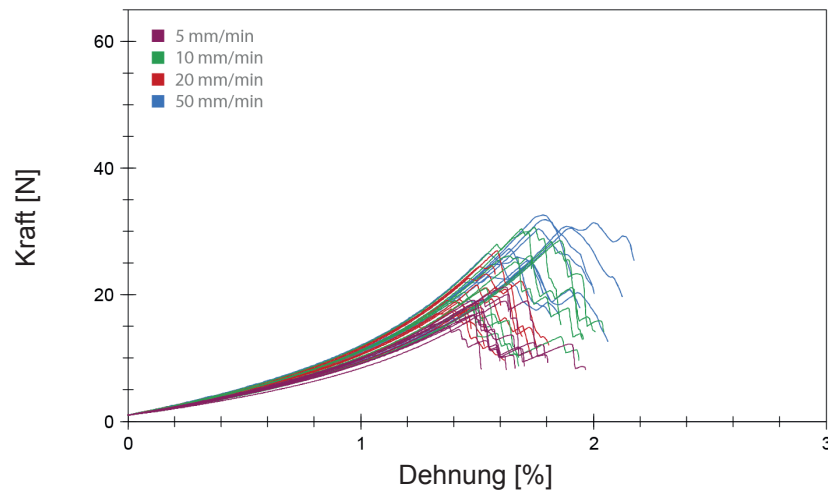
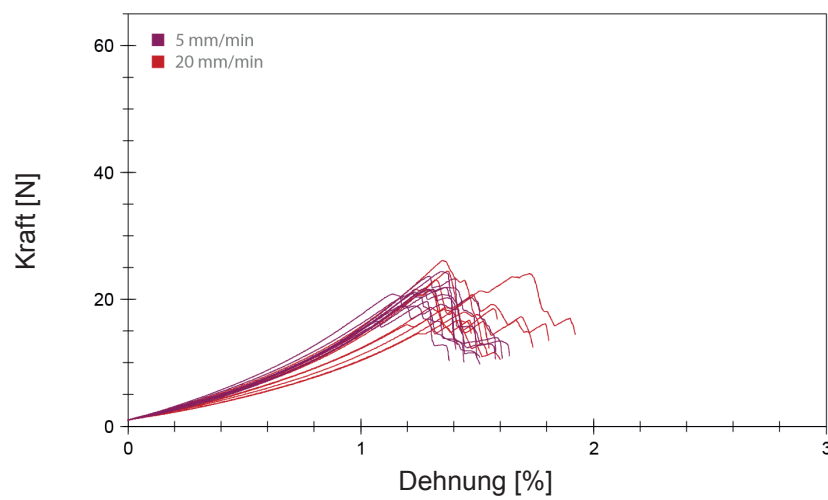
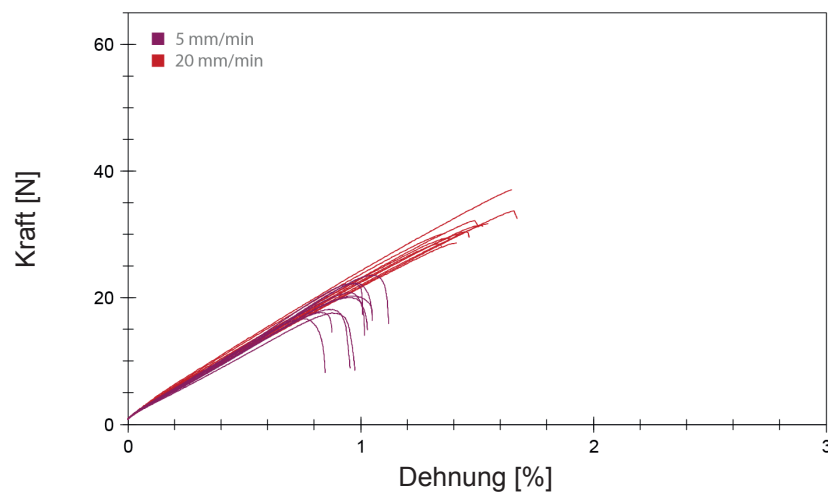


Abb. 08: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung der Schussproben der Typen 1-3 mit den Prüfgeschwindigkeiten 5, 10, 20, 50 und 100 mm/min.

Abb. 09: K-D-Diagramm verklebter (SAS) Schussproben des Typs **1. Sironi**.Abb. 10: K-D-Diagramm verklebter (SAS) Schussproben des Typs **2. C 070**.Abb. 11: K-D-Diagramm verklebter (SAS) Schussproben des Typs **3. C 170**.

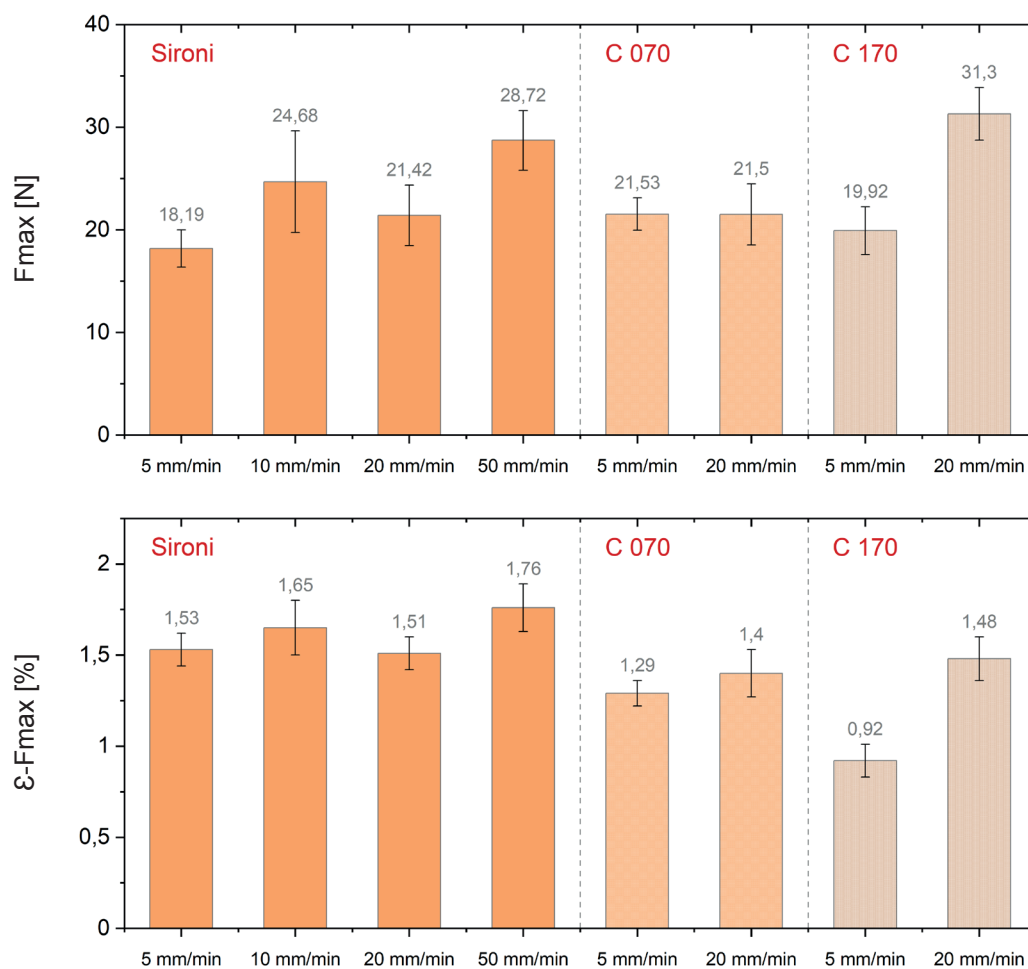


Abb. 12 und 13: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung verklebter (SAS) Schussproben der Typen 1-3 bei Prüfung mit unterschiedlicher Dehnrates.

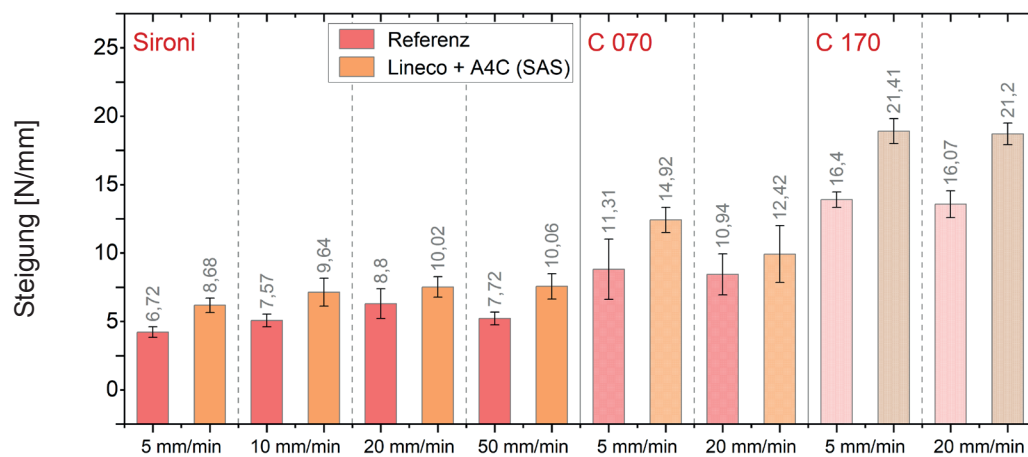


Abb. 14: Durchschnittliche Steigung intakter und verklebter (SAS) Schussproben der Typen 1-3 bei Prüfung mit unterschiedlicher Rate im Bereich 0,1-1 % Dehnung.

A.1.8 Zyklische Belastung (Vorversuch)

Teil A) Verhalten bei zyklischer Belastung

Probekörper		
Gewebe	1.	Pattina L 13 (puro lino), T. E. Sironi, unbeschichtet (Sironi)
	2.	Claessens Canvas 070, unbeschichtet (C 070)
	3.	Claessens Canvas 170, acrylgründiert (C 170)
	4.	Claessens Canvas 70, ölgründiert (C 70)
Probekörpertyp	A.	Referenzproben (Schuss, je n = 10)
	B.	Verklebt (Schuss, je n = 10)
Zyklische Zugbelastung (20x)	I.	1 N bis 2,5 N (~ 80-200 N/m)
	II.	1 N bis 6,25 N (~ 80-500 N/m)
	III.	1 N bis 20 N (~ 80-1600 N/m)
Verklebungstechnik		Stoß-auf-Stoß (SAS) mit Lineco + Methocel A4C 5% (9:1)
Probengeometrie		Gewebestreifen (L:200 mm; B: 12 Fäden)
Prüfbedingungen		
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.
Prüfgerät		Zwick Universalprüfmaschine, Typ Z2.5(RetroLine)
Prüfsoftware		TestXpert II V3.7
Kraftaufnehmer		100 N
Einspannlänge		100 mm
Vorkraft und -geschwindigkeit		1 N mit 5 mm/min
Prüfgeschwindigkeit		5 mm/min
Dehnungsermittlung		Via Längenänderung (Traversenweg)

Auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Versuchsstatistik wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung ausgewählter Auswertungen:

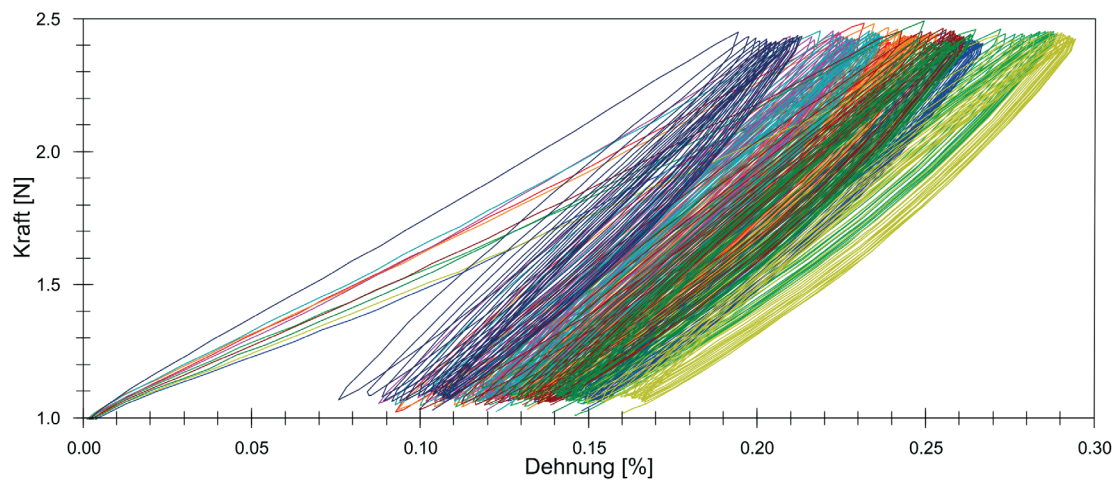
1. Pattina L 13, T. E. Sironi (unbeschichtet)

Abb. 01: Kraft-Dehnungs-Schleifen der intakten Schussproben des Typs 1. Sironi bei zyklischer Belastung (~ 80-200 N/m).

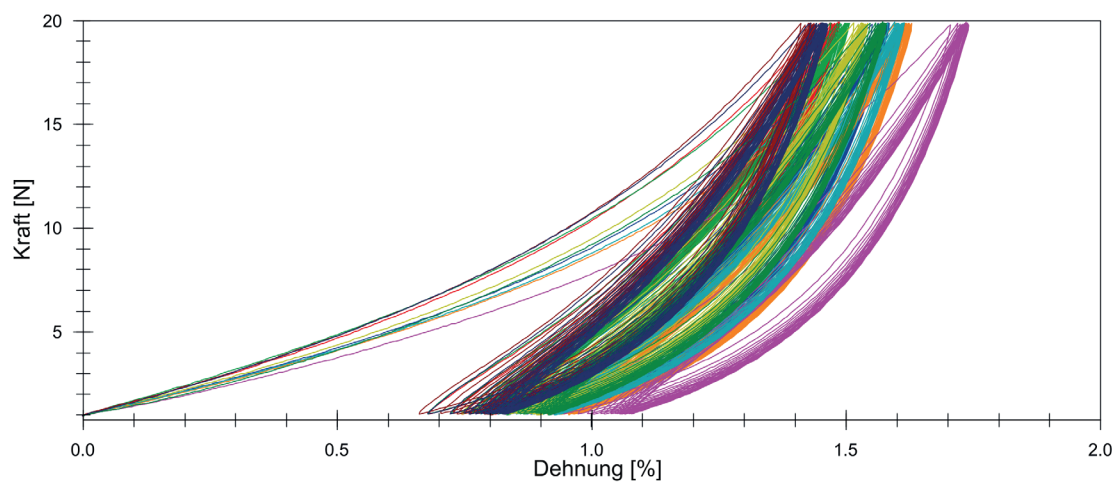


Abb. 02: K-D-Schleifen der intakten Schussproben des Typs 1. Sironi bei zyklischer Belastung (~ 80-1600 N/m).

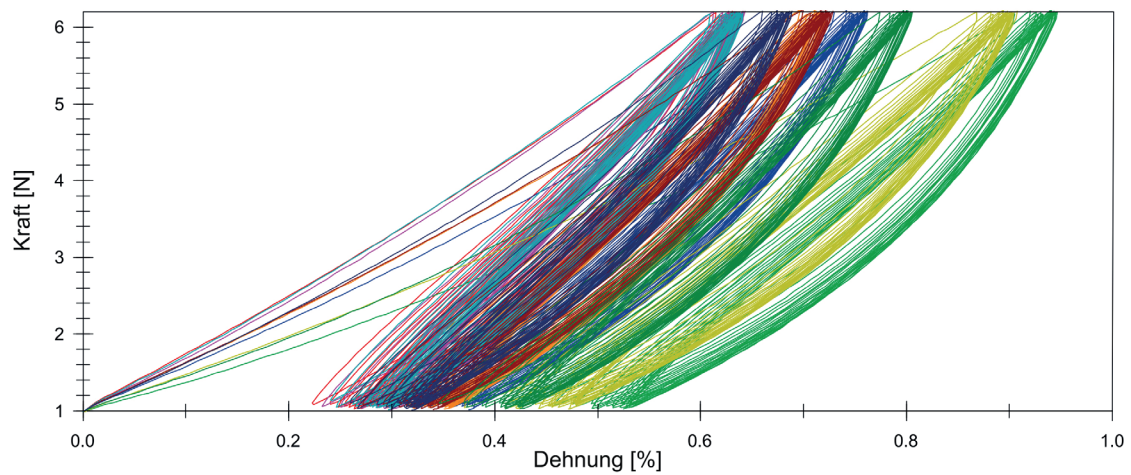


Abb. 03: K-D-Schleifen der **intakten** Schussproben des Typs 1. Sironi bei zyklischer Belastung ($\sim 80\text{-}500\text{ N/m}$).

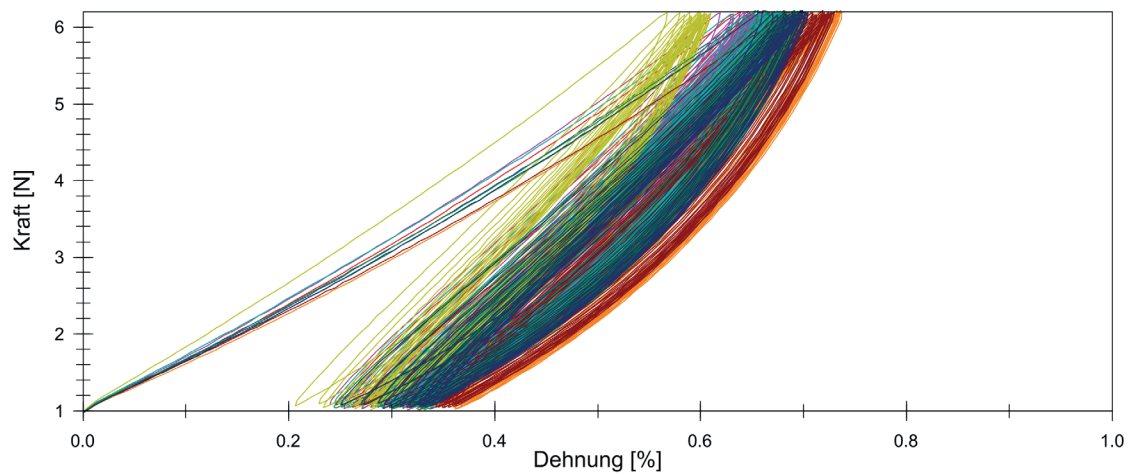


Abb. 04: K-D-Schleifen der **verklebten** (SAS) Schussproben des Typs 1. Sironi bei zyklischer Belastung ($\sim 80\text{-}500\text{ N/m}$).

2. Claessens Canvas 070 (unbeschichtet)

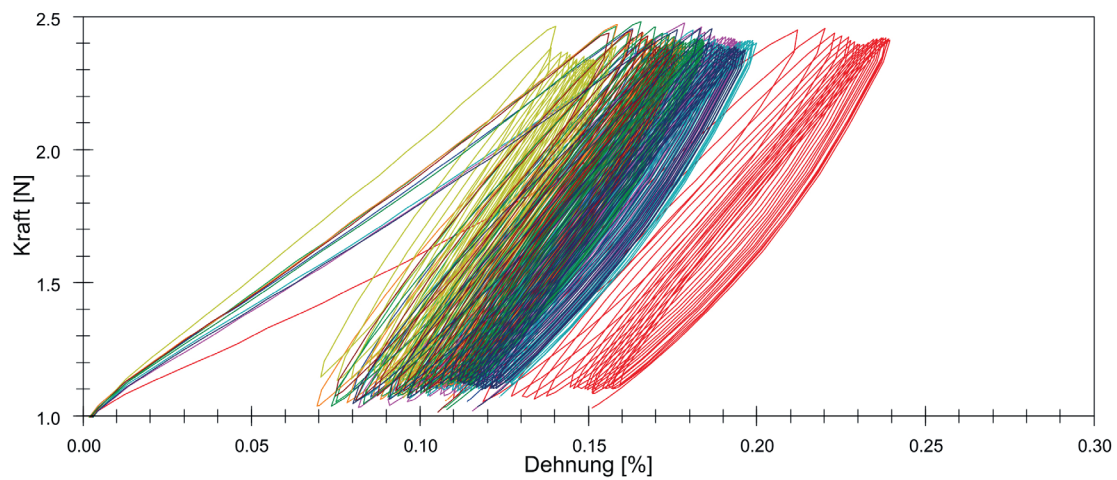


Abb. 05: K-D-Schleifen der intakten Schussproben des Typs 2. C 070 bei zyklischer Belastung (~ 80-200 N/m).

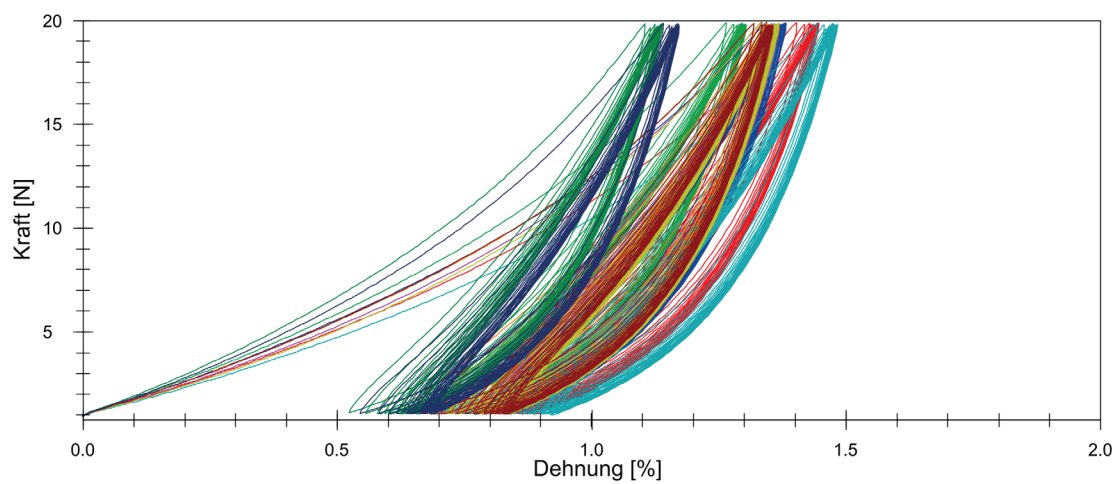


Abb. 06: K-D-Schleifen der intakten Schussproben des Typs 2. C 070 bei zyklischer Belastung (~ 80-1600 N/m).

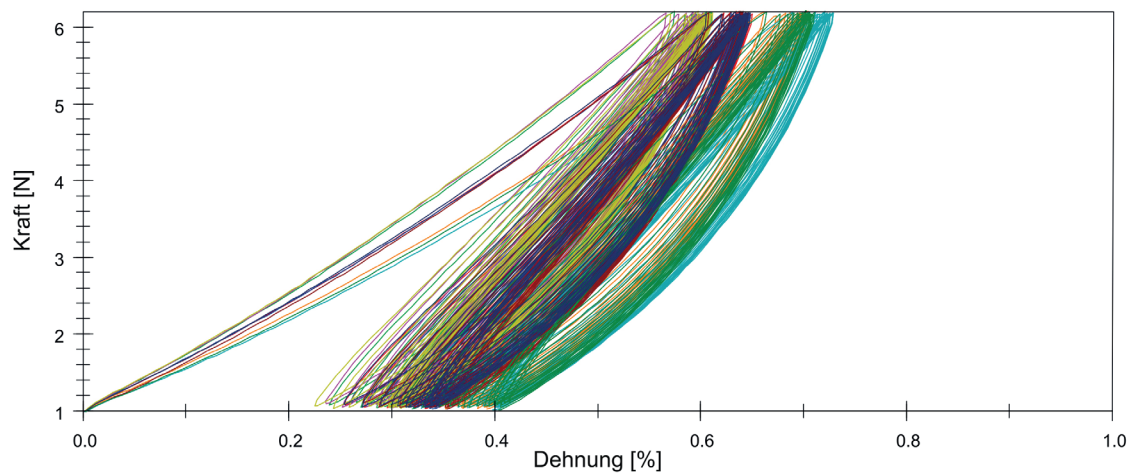


Abb. 07: K-D-Schleifen der **intakten** Schussproben des Typs 2. C 070 bei zyklischer Belastung ($\sim 80\text{-}500\text{ N/m}$).

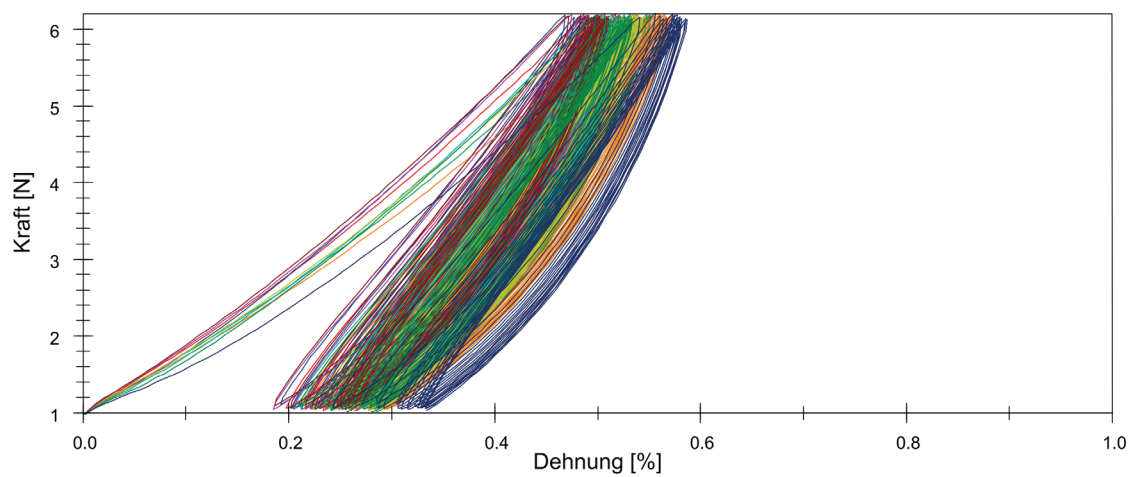


Abb. 08: K-D-Schleifen der **verklebten** (SAS) Schussproben des Typs 2. C 070 bei zyklischer Belastung ($\sim 80\text{-}500\text{ N/m}$).

3. Claessens Canvas C 170 (acrylgrundiert)

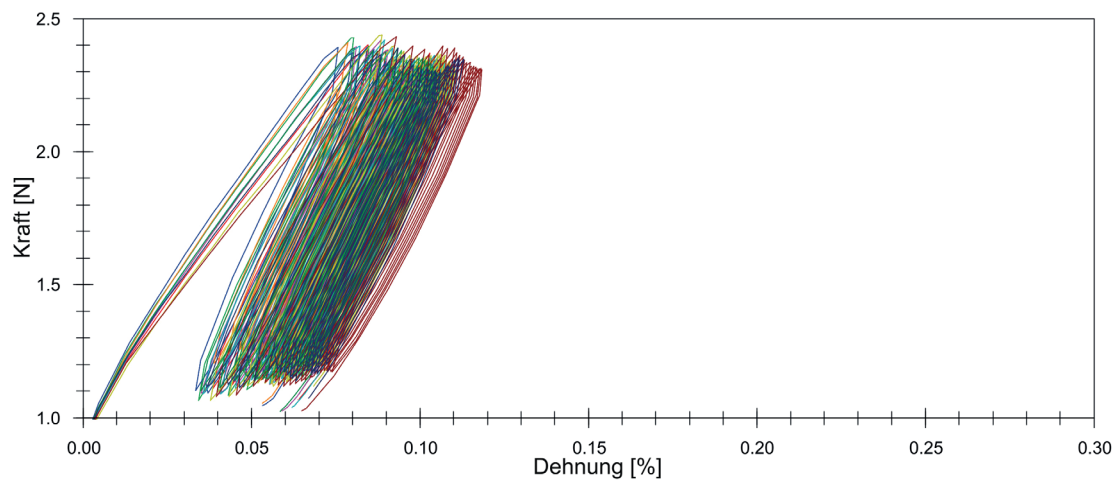


Abb. 09: K-D-Schleifen der intakten Schussproben des Typs 3. C 170 bei zyklischer Belastung (~ 80-200 N/m).

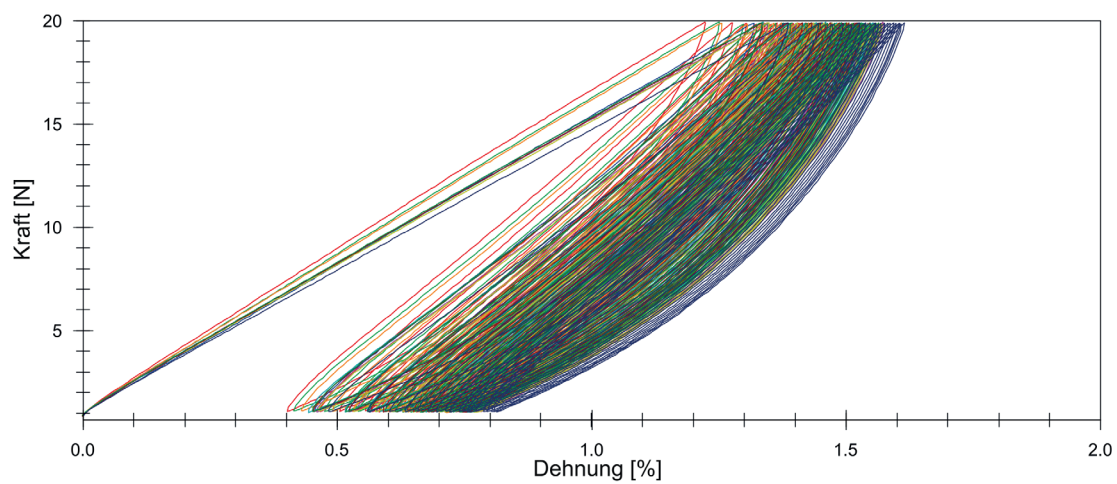


Abb. 10: K-D-Schleifen der intakten Schussproben des Typs 3. C 170 bei zyklischer Belastung (~ 80-1600 N/m).

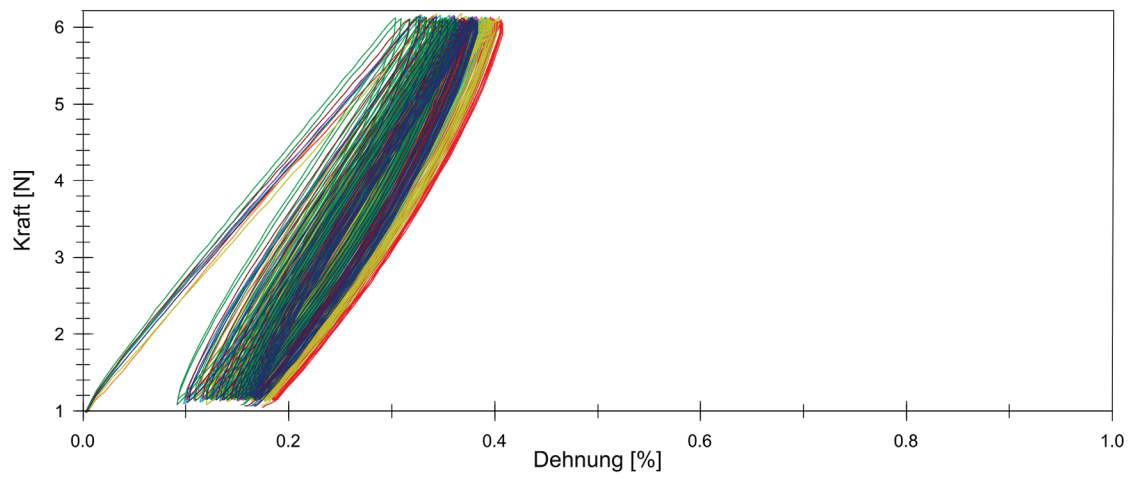


Abb. 11: K-D-Schleifen der **intakten** Schussproben des Typs 3. C 170 bei zyklischer Belastung ($\sim 80\text{-}500\text{ N/m}$).

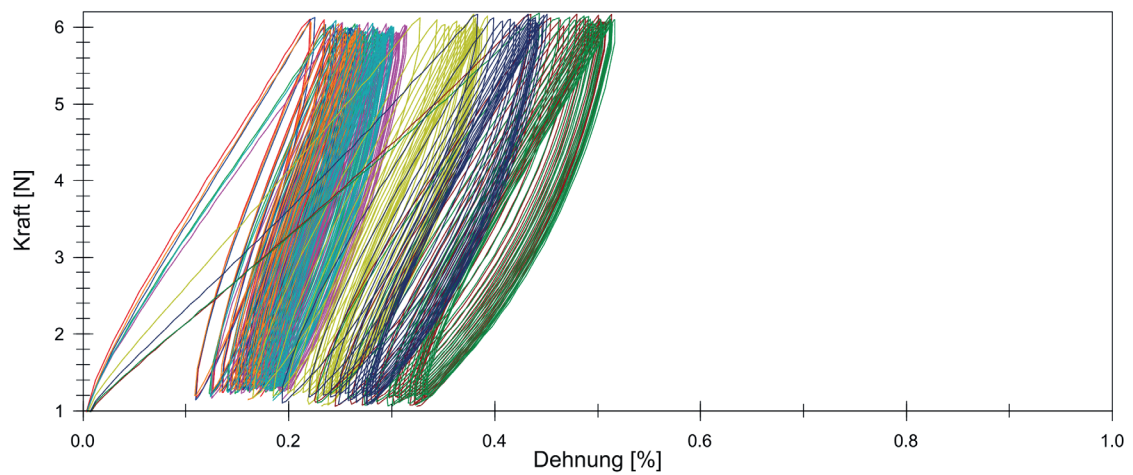


Abb. 12: K-D-Schleifen der **verklebten** (SAS) Schussproben des Typs 3. C 170 bei zyklischer Belastung ($\sim 80\text{-}500\text{ N/m}$).

4. Claessens Canvas C 70 (ölgrundiert)

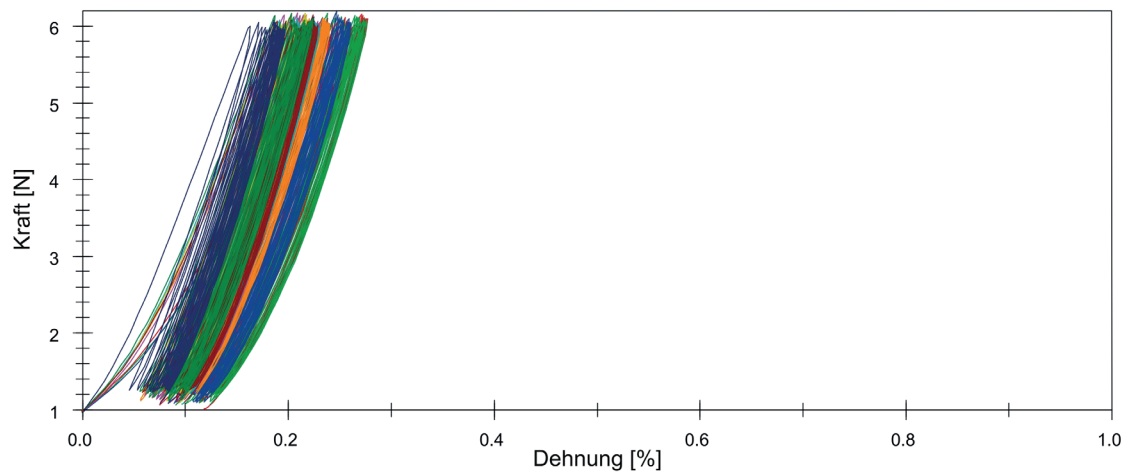


Abb. 13: K-D-Schleifen der intakten Schussproben des Typs 4. C 70 bei zyklischer Belastung ($\sim 80\text{-}500 \text{ N/m}$).

Teil B) Höchstzugkraft nach zyklischer Belastung

Probekörper		
Gewebe	1.	Pattina L 13 (puro lino), T. E. Sironi, unbeschichtet (Sironi)
	2.	Claessens Canvas 070, unbeschichtet (C 070)
	3.	Claessens Canvas 170, acrylgründiert (C 170)
	4.	Claessens Canvas 70, ölgründiert (C 70)
Probekörpertyp	A.	Referenzproben (Schuss, je n = 10)
	B.	Verklebt (Schuss, je n = 10)
Vergleichsbetrachtung	I.	Ohne Vorbelastung
	II.	Nach zyklischer Vorbelastung 1 N bis 6,25 N (~ 80-500 N/m); 24 Std. Ruhezeit nach Belastung (flache Lagerung)
Verklebungstechnik		Stoß-auf-Stoß (SAS) mit Lineco + Methocel A4C 5 % (9:1)
Probengeometrie		Gewebestreifen (L:200 mm; B: 12 Fäden)
Prüfbedingungen		
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.
Prüfgerät		Zwick Universalprüfmaschine, Typ Z2.5(RetroLine)
Prüfsoftware		TestXpert II V3.7
Kraftaufnehmer		100 N / 2 kN
Einspannlänge		100 mm
Vorkraft und -geschwindigkeit		1 N mit 5 mm/min
Prüfgeschwindigkeit		20 mm/min
Brucherkennung		Kraftabschaltsschwelle 50% Fmax
Dehnungsermittlung		Via Längenänderung (Traversenweg)
Steigungsermittlung		Sekante im Bereich 0,1-1 % Dehnung

Auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Versuchsstatistik wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung ausgewählter Auswertungen:

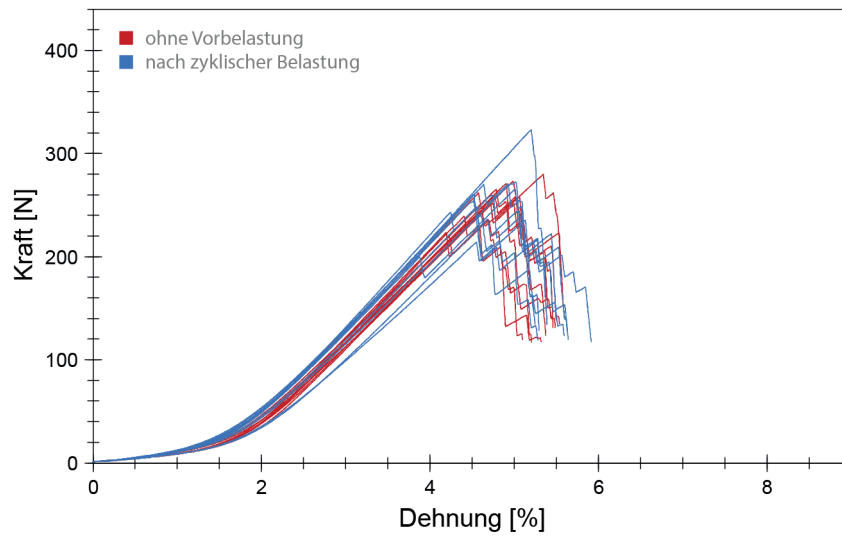


Abb. 14: K-D-Diagramm der **intakten** Schussproben des Typs **1. Sironi**.

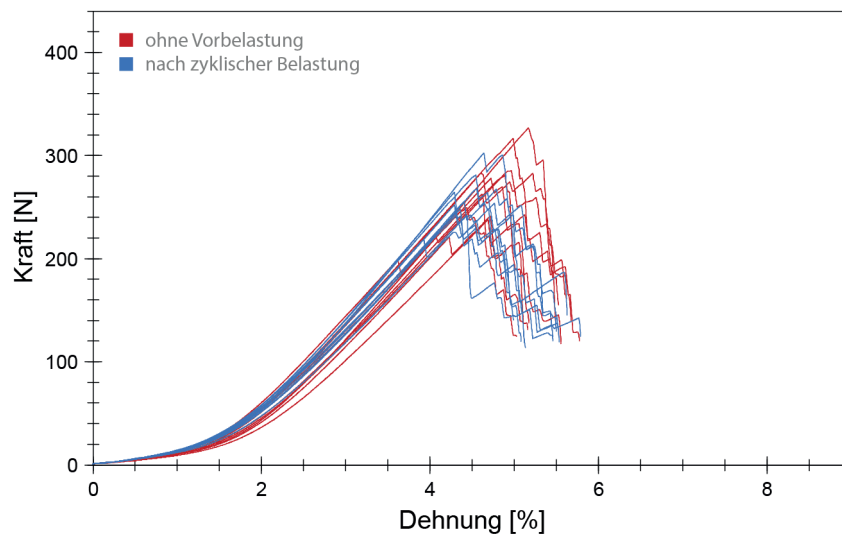
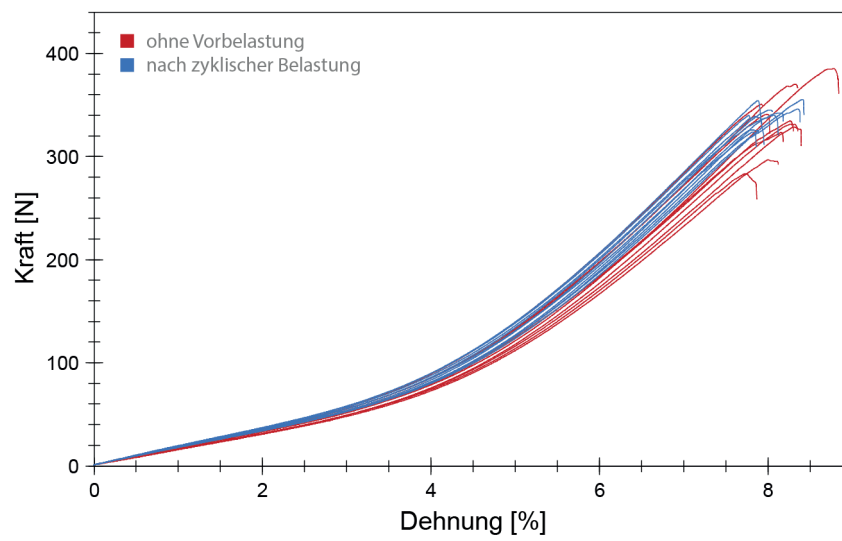
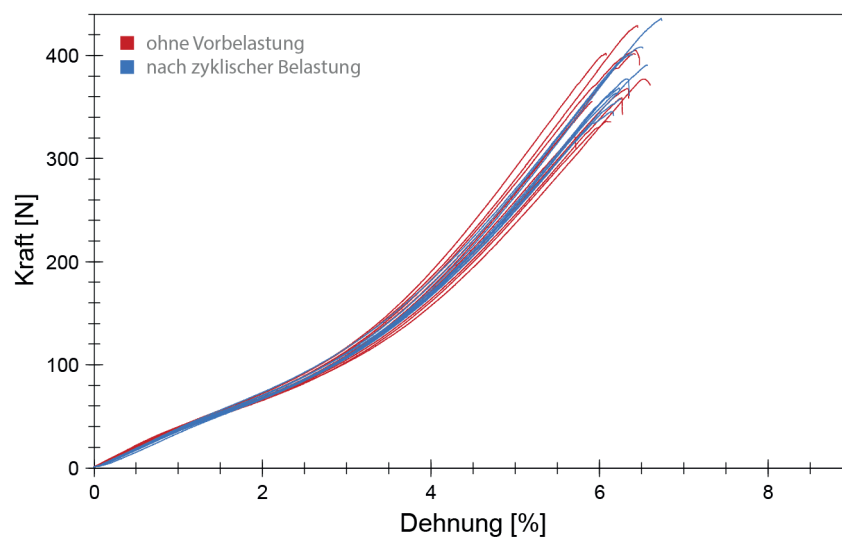


Abb. 15: K-D-Diagramm der **intakten** Schussproben des Typs **2. C 070**.

Abb. 16: K-D-Diagramm der **intakten** Schussproben des Typs 3. C 170.Abb. 17: K-D-Diagramm der **intakten** Schussproben des Typs 4. C 70.

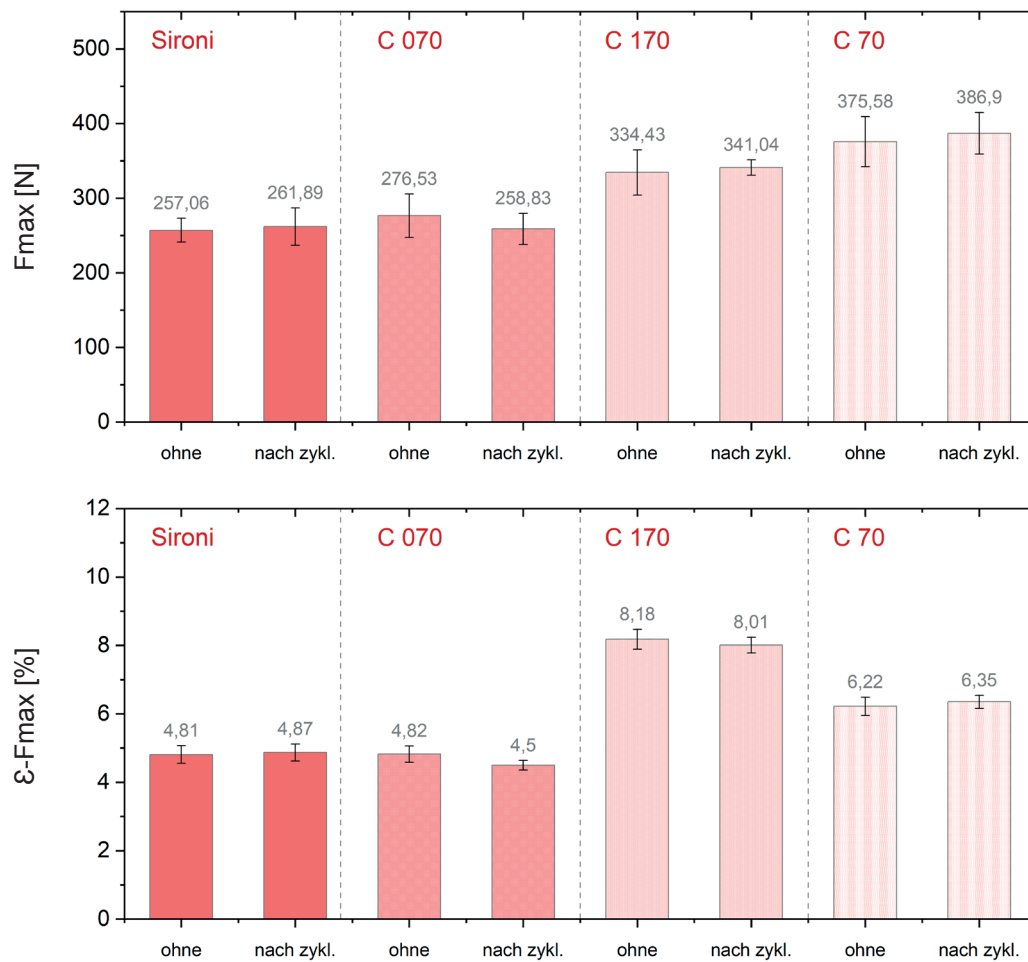


Abb. 18 und 19: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der intakten Schussproben der Typen 1-4 ohne und nach zyklischer Vorbelastung.

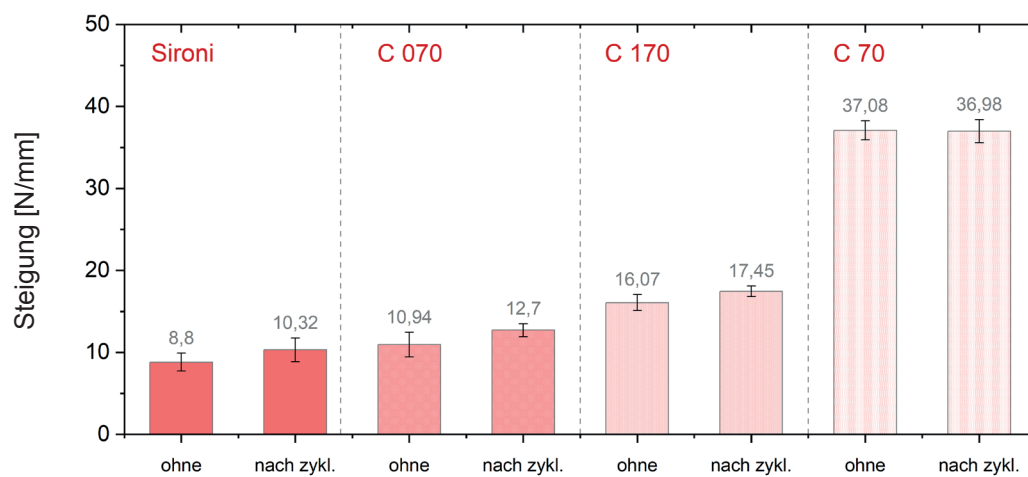
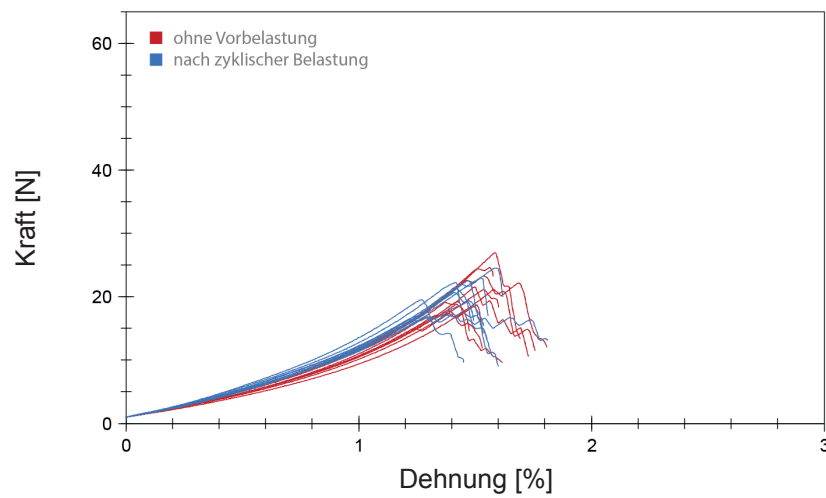
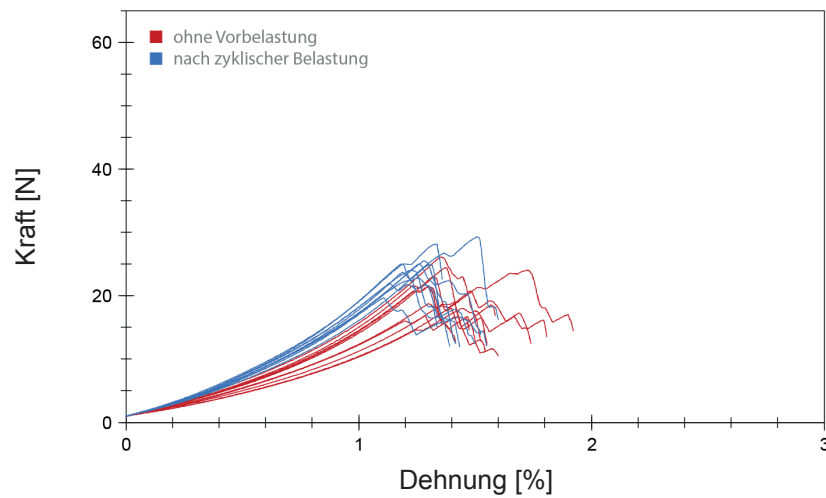
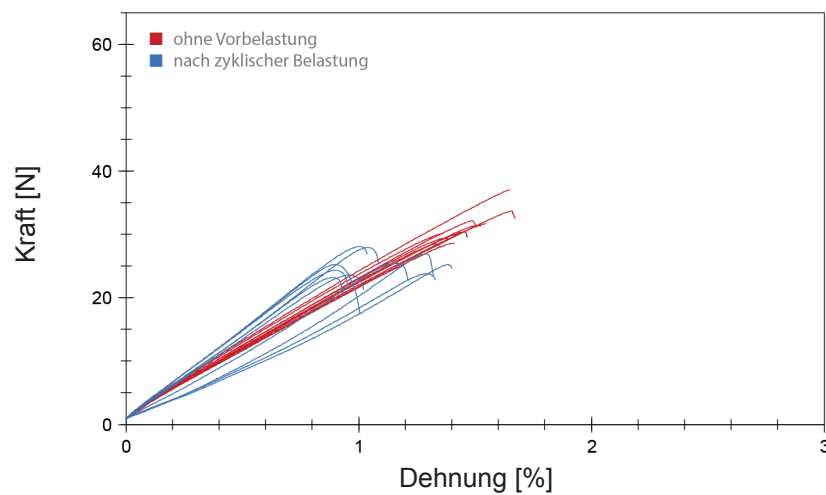


Abb. 20: Durchschnittliche Steigung der intakten Schussproben der Typen 1-4 ohne und nach zyklischer Vorbelastung im Bereich 0,1-1 % Dehnung.

Abb. 21: K-D-Diagramm **verklebter** Schussproben (SAS) des Typs **1. Sironi**.Abb. 22: K-D-Diagramm **verklebter** Schussproben (SAS) des Typs **2. C 070**.Abb. 23: K-D-Diagramm **verklebter** Schussproben (SAS) des Typs **3. C 170**.

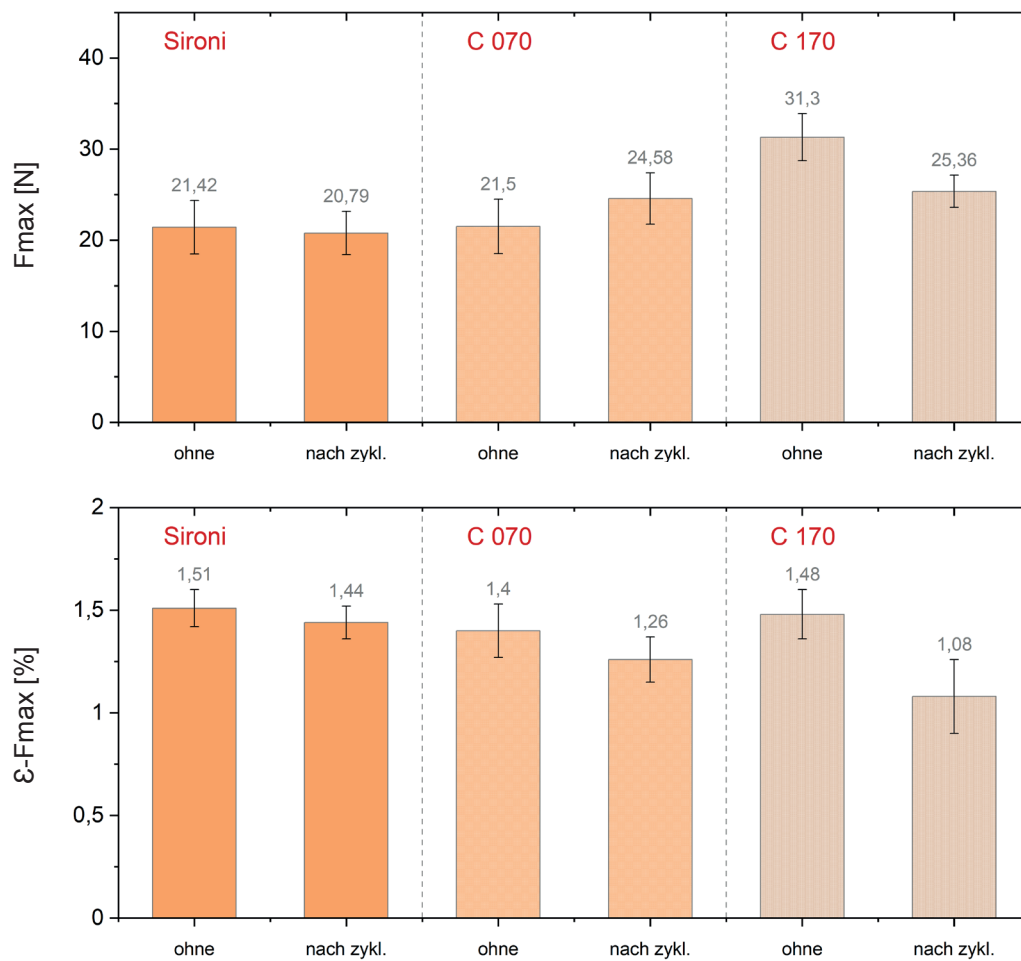


Abb. 24 und 25: Durchschnittliche Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung verklebter Schussproben (SAS) der Typen 1-3 ohne und nach zyklischer Vorbelastung.

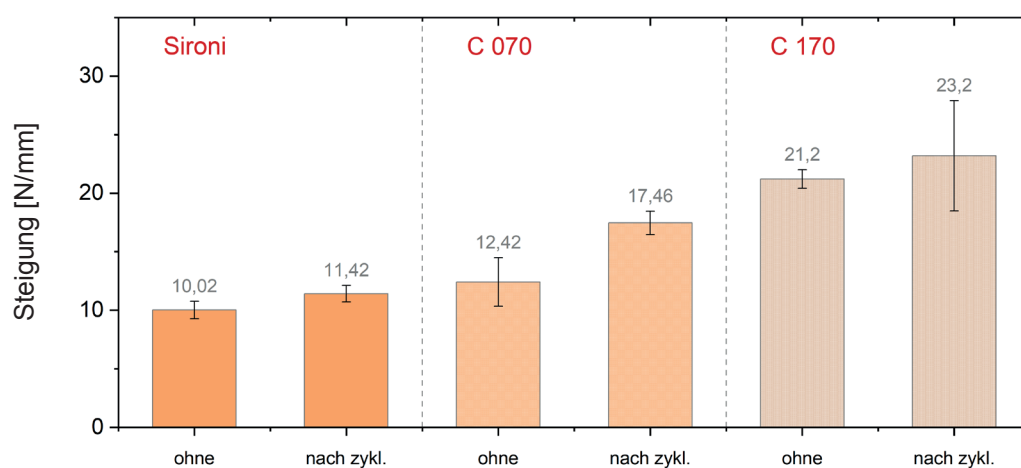
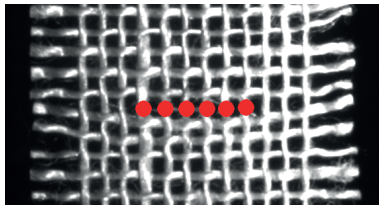
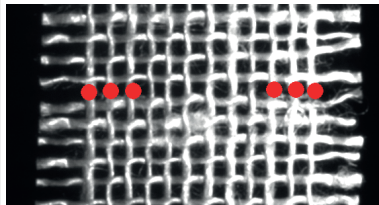
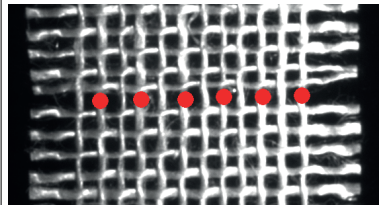
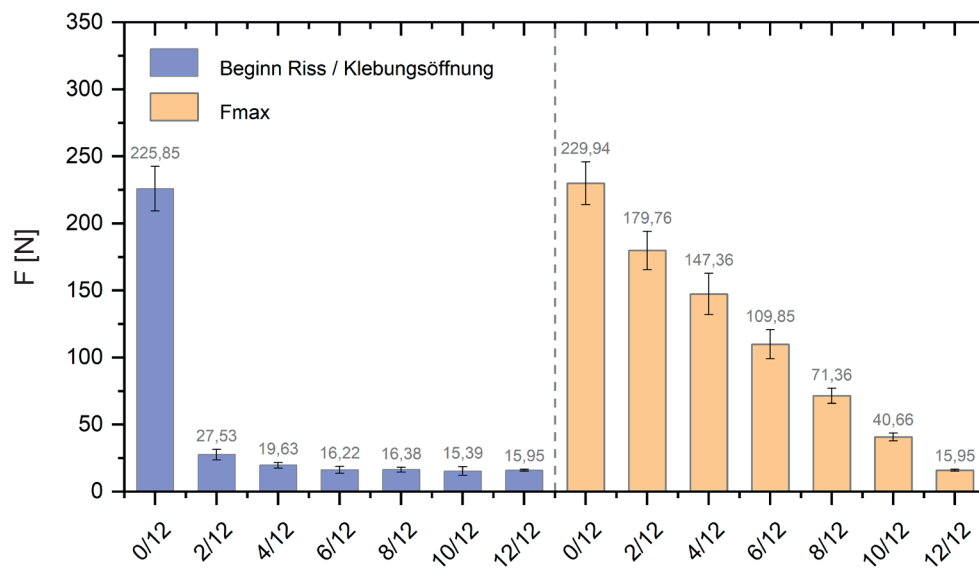
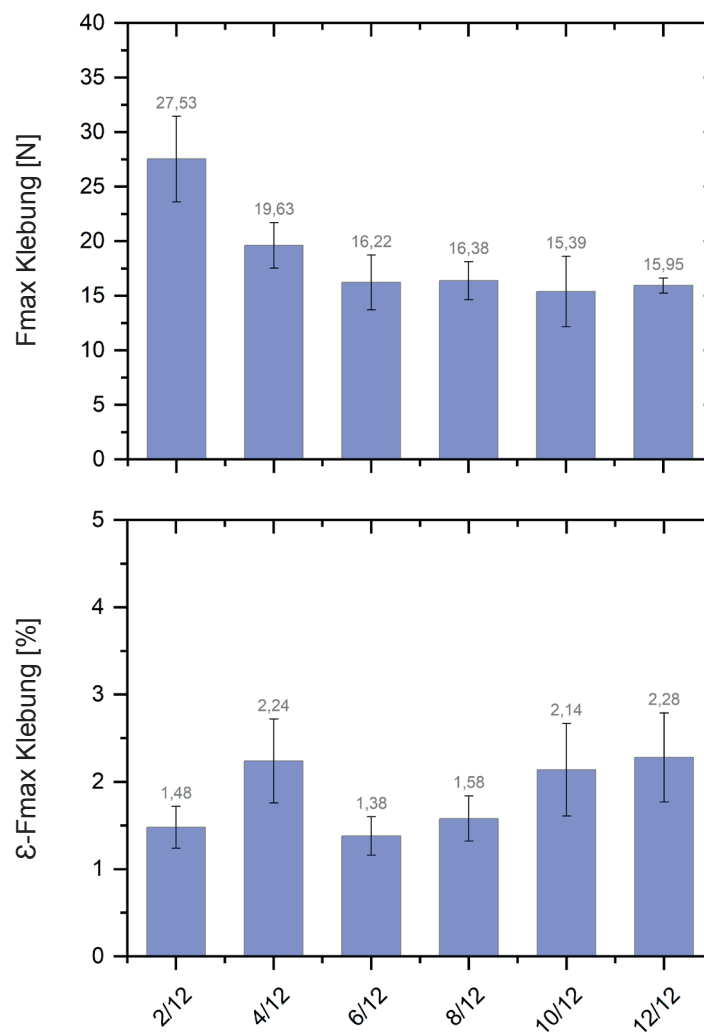


Abb. 26: Durchschnittliche Steigung verklebter (SAS) Schussproben der Typen 1-3 ohne und nach zyklischer Vorbelastung im Bereich 0,1-1 % Dehnung.

A.1.9 Mischbetrachtung intakte und verklebte Fäden (Exkurs)

Probekörper			
Gewebe		Pattina L 13 (puro lino), Tessitura Enrico Sironi	
Probekörpertyp	A.	Referenz, Schuss unbeschichtet (n = 5)	
	B.	Verklebte Schussproben (je n = 5)	
Verklebungsvarianten	I.	0/12	Intakte Referenz
	IIa-e.	2-10/12	Mittig zwei bis zehn von zwölf Fäden verklebt
	IIIa-e.	2-10/12	Außen zwei bis zehn von zwölf Fäden verklebt
	IVa-e.	2-6/12	Wechselnd zwei bis sechs von zwölf Fäden verklebt
	V.	12/12	Verklebung aller zwölf Fäden auf voller Breite
Verklebungstechnik		Stoß-auf-Stoß (SAS) mit Lineco	
Probengeometrie		Gewebestreifen (L: 200 mm; B: 12 Fäden)	
Prüfbedingungen			
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.	
Prüfgerät		Uniaxialversuch an Biaxprüfstand, LTM / UdS	
Prüfsoftware	HOST Bedienoberfläche		Programmierung LabView, National Instruments
	CRIO Datenaufzeichnung		
Kraftaufnehmer		100 N / 500 N	
Einspannlänge		100 mm	
Vorkraft		0,1 N	
Prüfgeschwindigkeit		0,33 mm/sec (~ 20 mm/min)	
Dehnungsermittlung	Via digitale Bildkorrelation / DIC im Mittelbereich der Proben		
	Kamera jAi CM-200 GE, Stemmer Imaging		
	Objektiv Fujinon HF12.5SA-1 (2/3“ 12,5mm f 1.4)		
	Software VIC 2D, Correlated Solutions		
Verklebungsprinzip			
			
II. Mittig verklebt		III. Außen verklebt	
			
		IV. Wechselnd verklebt	

Auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Versuchsstatistik wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung ausgewählter Auswertungen:

Abb. 01: Kraft bei Rissbeginn / Klebungsöffnung und nachfolgende Fmax (**II. mittig**).Abb. 02 und 03: Höchstzugkraft und -dehnung bis zur Klebungsöffnung (**II. mittig**).

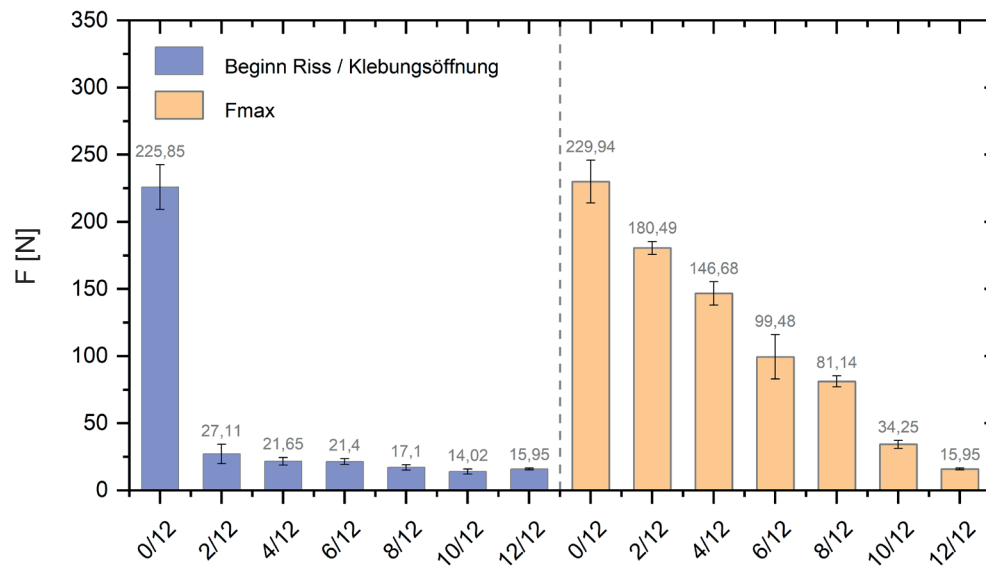


Abb. 04: Kraft bei Rissbeginn / Klebungsöffnung und nachfolgende Fmax (III. außen).

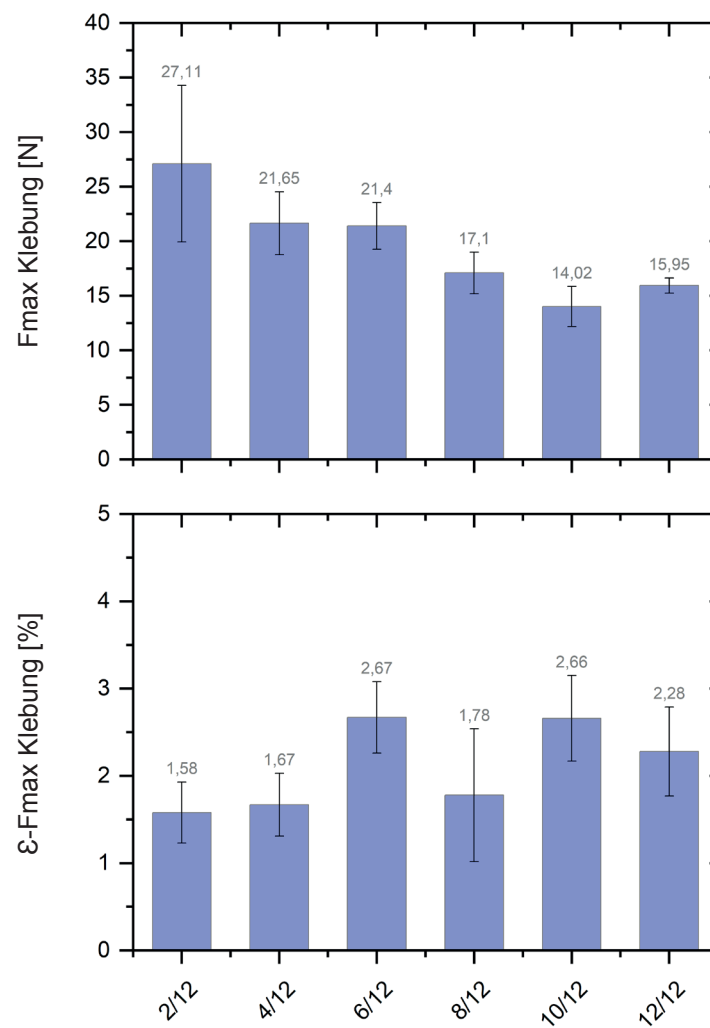


Abb. 05 und 06: Höchstzugkraft und -dehnung bis zur Klebungsöffnung (III. außen).

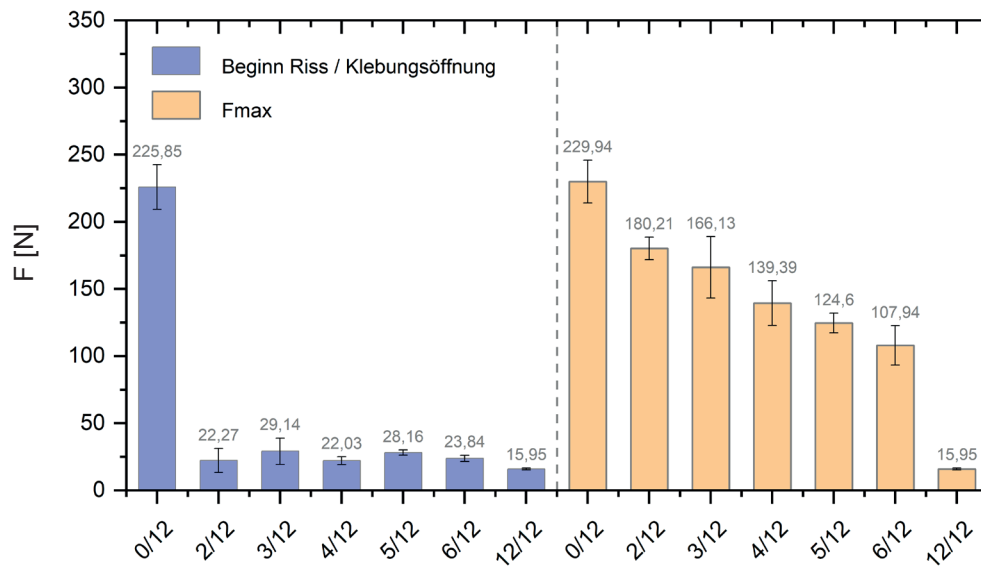


Abb. 07: Kraft bei Rissbeginn / Klebungsöffnung und nachfolgende Fmax (IV. wechselnd).

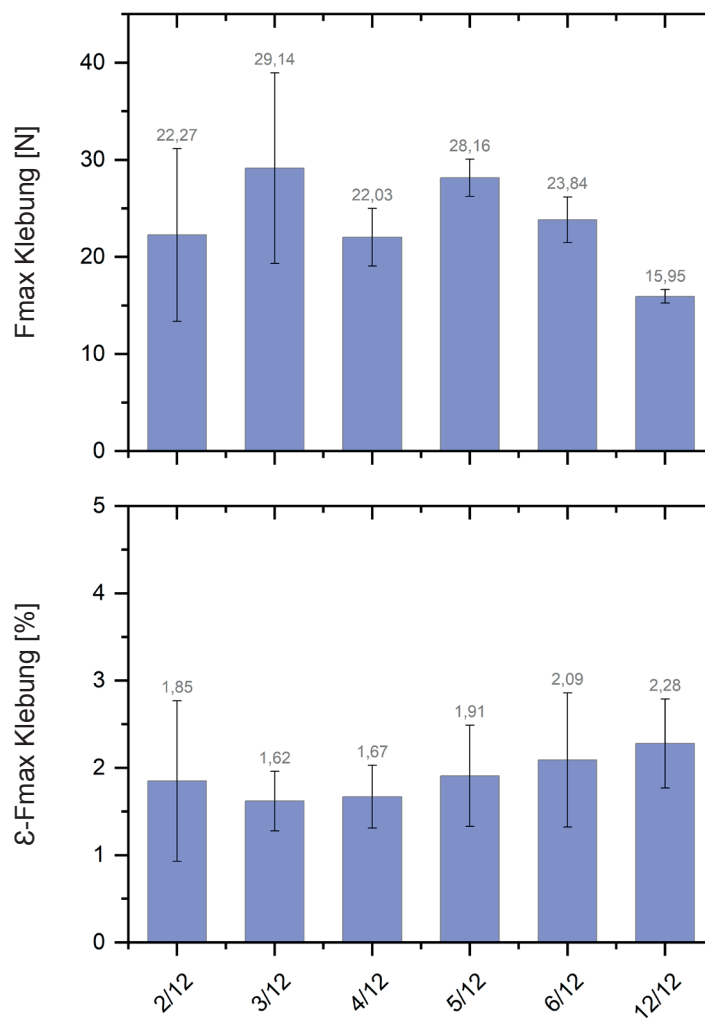


Abb. 08 und 09: Höchstzugkraft und -dehnung bis zur Klebungsöffnung (IV. wechselnd).

A.2 Biaxiale Kurzzeitversuche

A.2.1 Reproduktion erster Zugversuche

Probekörper		
Gewebe		Pattina L 13 (puro lino), Tessitura Enrico Sironi
Probekörpertyp		Unbeschichtete Referenz und verklebte Proben (Schuss)
Klebstoffauswahl	1.	Lineco
	2.	Mowilith DHS S1
	3.	Störleim + Weizenstärkekleister nativ
	4.	Störleim + Arbocel BWW 40
Verklebungstechniken	a.	Stoß-auf-Stoß (SAS)
	b.	Stoß-auf-Stoß mit Fadenbrücken (SAS+B)
	c.	Einfach überlappend (Ü)
	d.	Überlappend mit vermengten Fadenenden (Ü+V)
Probengeometrie		Gewebekreuzproben (L: je 200 mm; B: 12 Fäden)
Prüfbedingungen		
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.
Prüfgerät		Biaxiale Zugprüfmaschine, LTM / UdS
Prüfsoftware	HOST Bedienoberfläche	Programmierung LabView, National Instruments
	CRIO Datenaufzeichnung	
Kraftaufnehmer		100 N / 500 N
Einspannlänge		100 mm je Achse
Vorkraft		0,1 N je Achse
Prüfgeschwindigkeit		0,33 mm/sec (~ 20 mm/min), äquibiaxial
Spannungsberechnung		Nominalspannung: Fmax bezogen auf durchschnittliche, vereinfacht approximierte Querschnittsfläche (B: 12,5 mm; D: 0,48 mm)
Dehnungsermittlung	Via digitale Bildkorrelation / DIC im biaxialen Mittelbereich der Proben	
	Kamera jAi CM-200 GE, Stemmer Imaging	
	Objektiv Fujinon HF12.5SA-1 (2/3“ 12,5mm f 1.4)	
	Software VIC 2D, Correlated Solutions	
	Als Standard gewählte Einstellungen: Subset 49, Step 10, Lagrange eyy / exx (ggf. incremental correlation)	

Ergebnisübersicht	
dL K / S	Wegzunahme [mm] im Versuch ab Vorkraft (bis Fmax in Schussrichtung) von Kett-/Schussrichtung
F K	Kraft [N] in Kettrichtung bei Fmax in Schussrichtung
Fmax S	Höchstzugkraft [N] der Schussrichtung
ε K	Dehnung [%] in Kettrichtung bei Fmax in Schussrichtung
ε Fmax S	Höchstzugkraftdehnung [%] der Schussrichtung
σ K	Spannung [N/mm ²] in Kettrichtung bei Fmax in Schussrichtung
σ Fmax S	Zugfestigkeit [N/mm ²] der Schussrichtung
F ~ 1 % ε S	Kraft [N] bei ca. 1 % via DIC ermittelter Dehnung in Schussrichtung
Versuchsstatistik	
MW	Arithmetischer Mittelwert
S	Standardabweichung
VK	Variationskoeffizient *
Med	Median
Min	Minimum
Max	Maximum
* Hinweis:	Der Variationskoeffizient wurde nur für ausschließlich positive Merkmalswerte bestimmt (vgl. HARTUNG 1995, S. 47).

Probentypen im Versuch

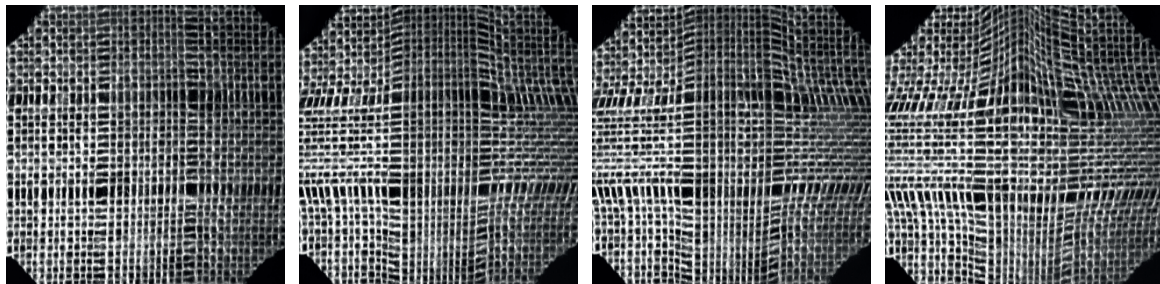


Abb. 01-04: **Intakte Referenz** im Versuch (Schuss vertikal).

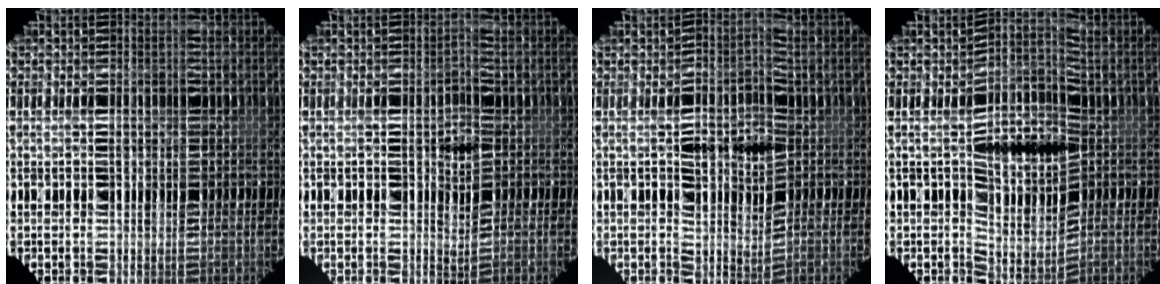


Abb. 05-08: **Stoß-auf-Stoß-Verklebung** (SAS, Schuss vertikal).

Probentypen im Versuch

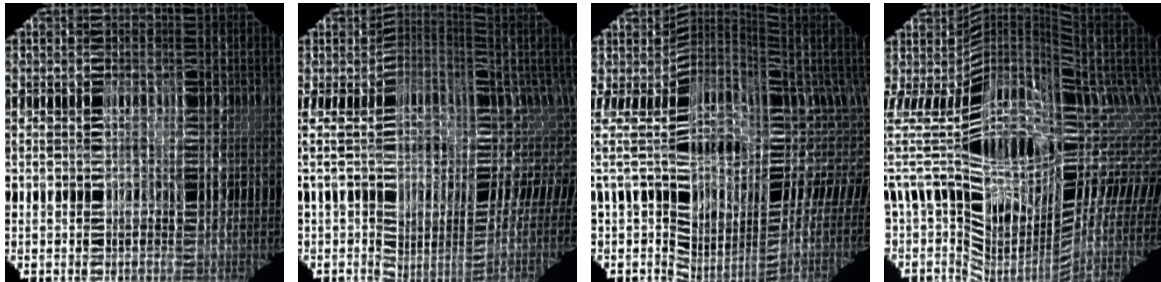


Abb. 09-12: SAS-Verklebung mit **Fadenbrücken** (SAS+B, Schuss vertikal).

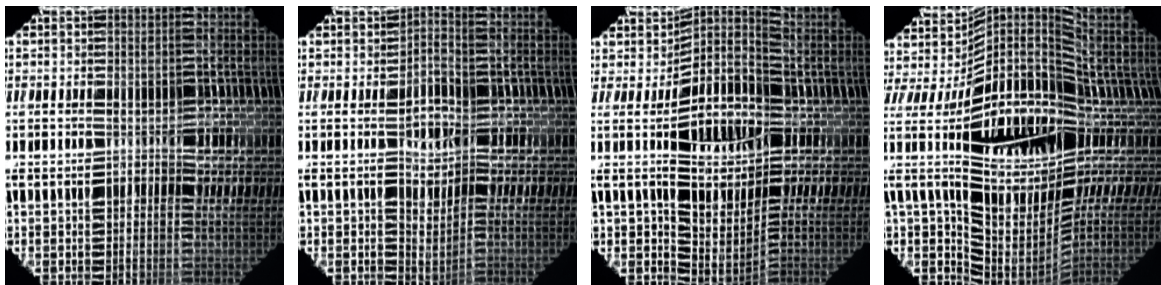


Abb. 13-16: **Überlappende** Verklebung (Ü, Schuss vertikal).

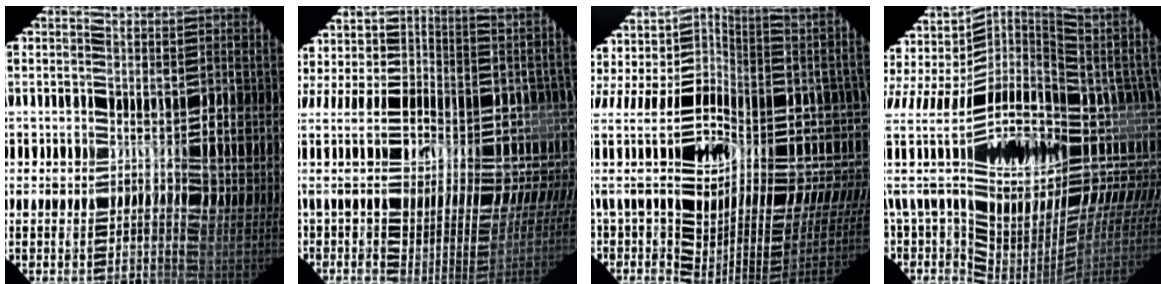


Abb. 17-20: **Überlappend-vermengte** Verklebung (Ü+V, Schuss vertikal).

Referenz / intakte Nullprobe Gewebe

Versuchsstatistik								
Typ	Sironi, unbeschichtet							
n = 30	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	6,13	73,96	244,74	1,16	3,14	12,33	40,79	21,42
S	0,32	18,29	24,78	0,56	0,31	3,05	4,13	10,03
VK	5,28	24,73	10,12	48,52	9,95	24,73	10,12	46,82
Med	6,14	76,25	243,92	1,17	3,06	12,71	40,65	21,19
Min	5,39	31,43	203,79	0,13	2,61	5,24	33,96	4,97
Max	6,74	103,15	288,29	2,05	3,85	17,19	48,05	40,47

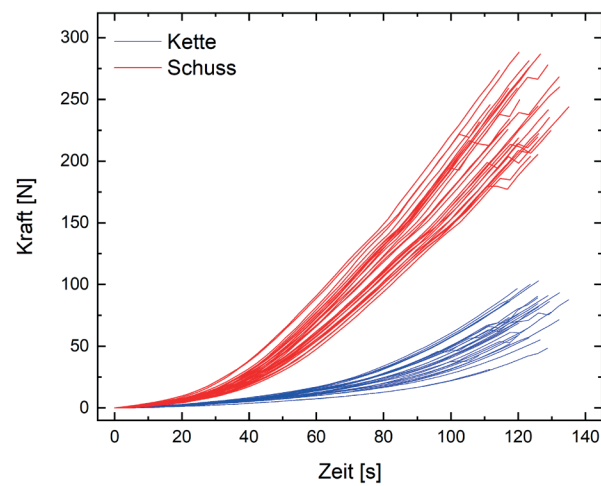


Abb. 21: Kraft-Zeit-Diagramm der Referenzproben.

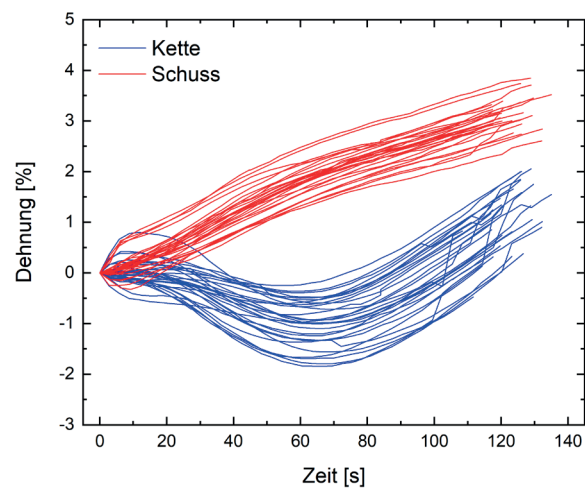


Abb. 22: Dehnungs-Zeit-Diagramm der Referenzproben.

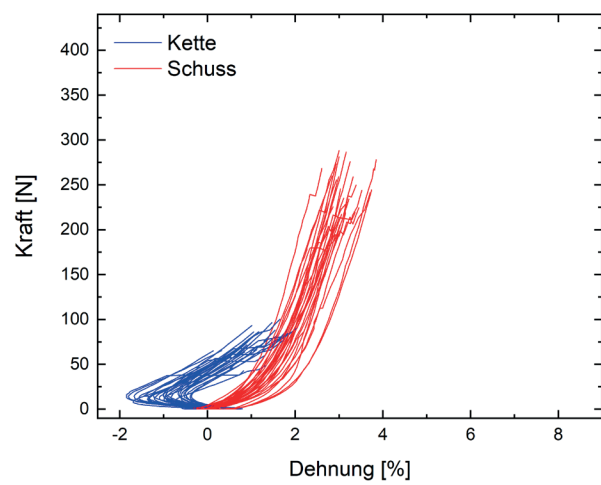


Abb. 23: Kraft-Dehnungs-Diagramm der Referenzproben.

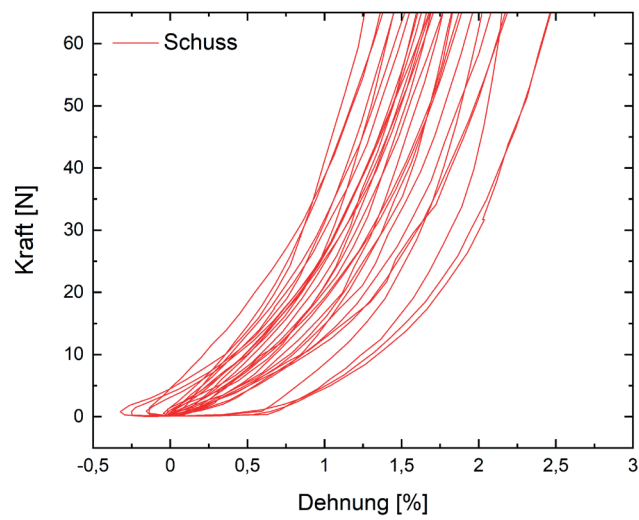
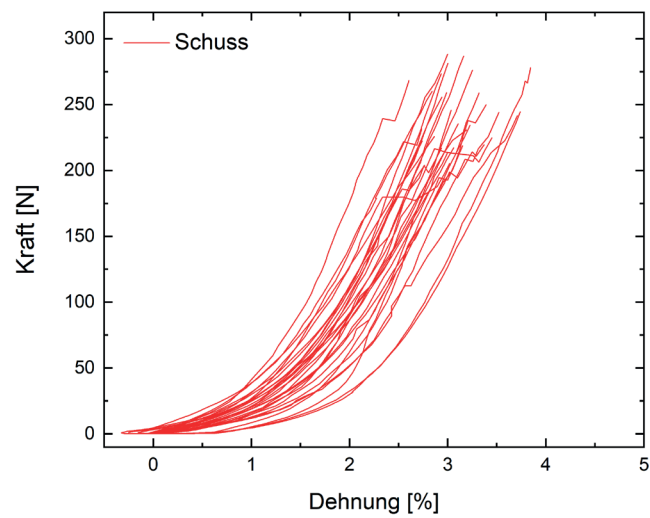


Abb. 24 und 25: K-D-Diagramme der Schussrichtung in unterschiedlicher Skalierung. Die zweite Skalierung dient dem direkten Vergleich der verklebten Schussproben mit der Referenz.

1. Lineco

Versuchsstatistik								
Typ	a. SAS							
n = 25	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	1,71	5,06	19,35	-0,55	1,64	0,84	3,23	13,26
S	0,2	1,81	2,86	0,42	0,49	0,3	0,48	3,88
VK	11,88	35,69	14,8	-	30,15	35,69	14,8	29,23
Med	1,8	5	18,41	-0,48	1,49	0,83	3,07	13,15
Min	1,35	1,81	14,28	-1,31	0,9	0,3	2,38	6,84
Max	2,1	8,52	25,42	0,12	2,8	1,42	4,24	22,07
Typ	b. SAS+B							
n = 25	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	2,42	9,07	43,65	-0,28	1,79	1,51	7,27	32,31
S	0,39	3,99	5,55	0,54	0,44	0,67	0,92	6,75
VK	16,05	44	12,7	-	24,46	44	12,7	20,88
Med	2,25	7,82	43,43	-0,18	1,75	1,3	7,24	31,5
Min	1,65	2,69	29,85	-1,33	0,91	0,45	4,97	16,39
Max	3,15	15,42	55,03	0,95	2,7	2,57	9,17	44,02
Typ	c. Ü							
n = 10	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	2,43	8,85	37	-0,6	2,04	1,47	6,17	13,52
S	0,31	3,37	10,93	0,27	0,45	0,56	1,82	3,63
VK	12,63	38,07	29,54	-	21,95	38,07	29,54	26,85
Med	2,55	10,21	38,87	-0,65	2,16	1,7	6,48	13,14
Min	1,95	3,41	20,96	-1,07	1,25	0,57	3,49	8
Max	2,7	12,96	53,51	-0,24	2,45	2,16	8,92	20,5
Typ	d. Ü+V							
n = 10	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	3,38	15,9	84,9	-0,91	3,27	2,5	14,15	15,66
S	0,37	7,09	21,7	0,52	0,57	1,37	3,62	6,29
VK	10,88	44,6	25,56	-	17,54	54,92	25,56	40,15
Med	3,45	13,2	79,02	-0,81	3,48	2,2	13,17	13,96
Min	2,7	9,05	43,06	-1,8	2,1	0,43	7,18	6,19
Max	3,9	28,32	114,46	-0,33	3,89	4,72	19,08	24,84

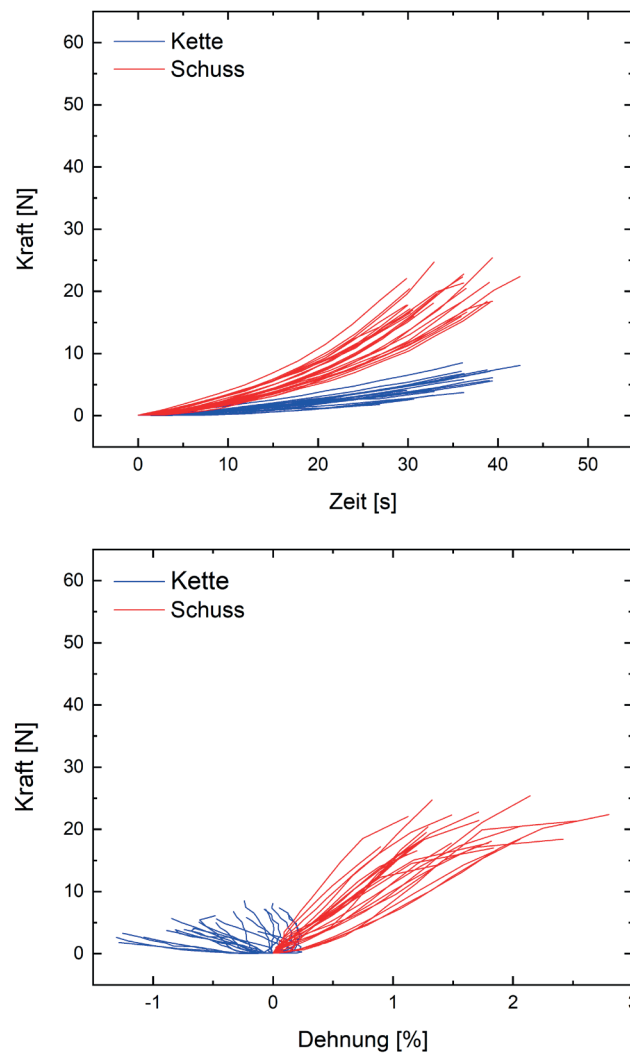


Abb. 26 und 27: Kraft-Zeit- sowie Kraft-Dehnungs-Diagramm von Typ 1a. Lineco (SAS).

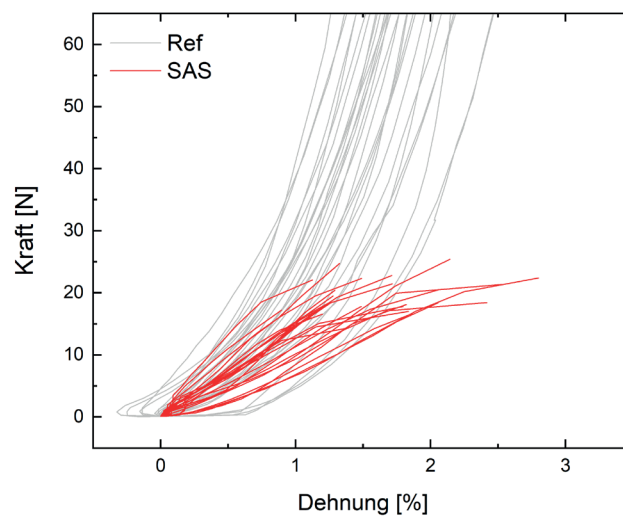


Abb. 28: K-D-Diagramm Typ 1a. Lineco (SAS), Schussrichtung im Vergleich zur Referenz.

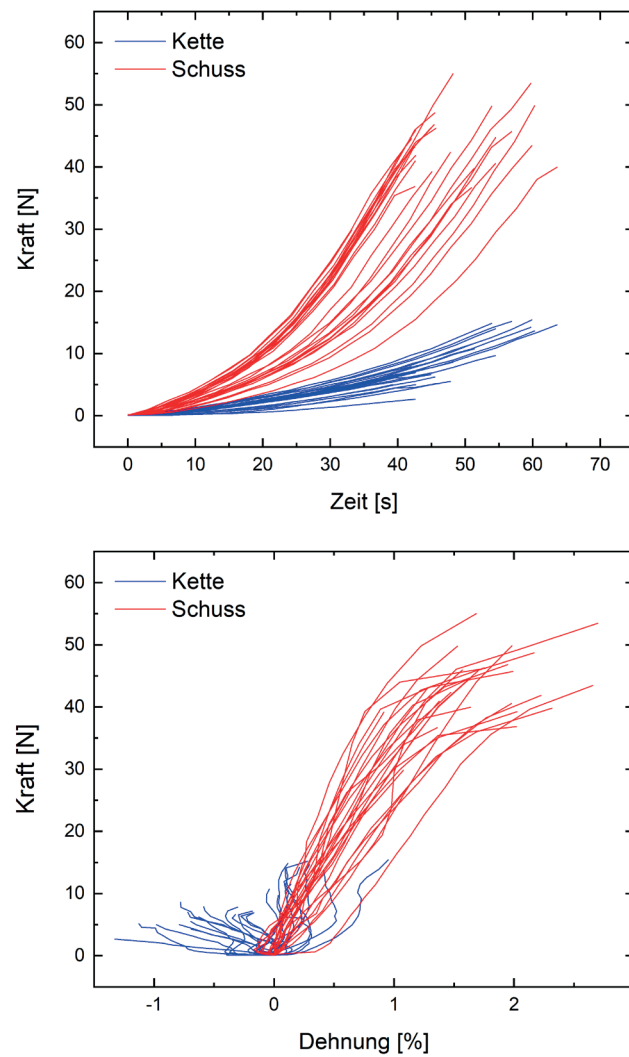


Abb. 29 und 30: K-Z- sowie K-D-Diagramm von Typ **1b. Lineco (SAS+B)**.

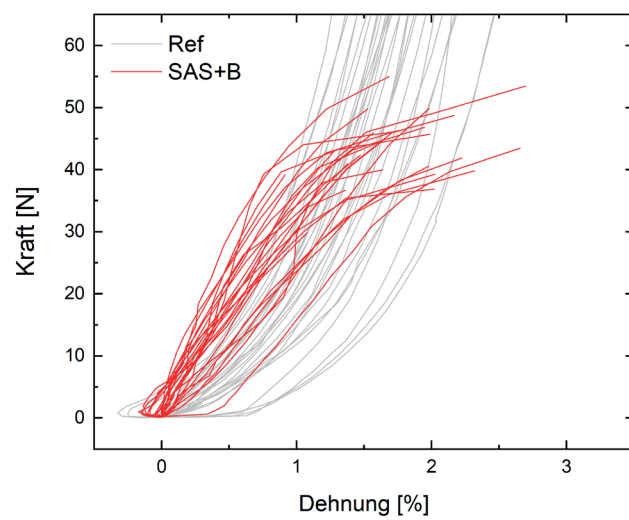
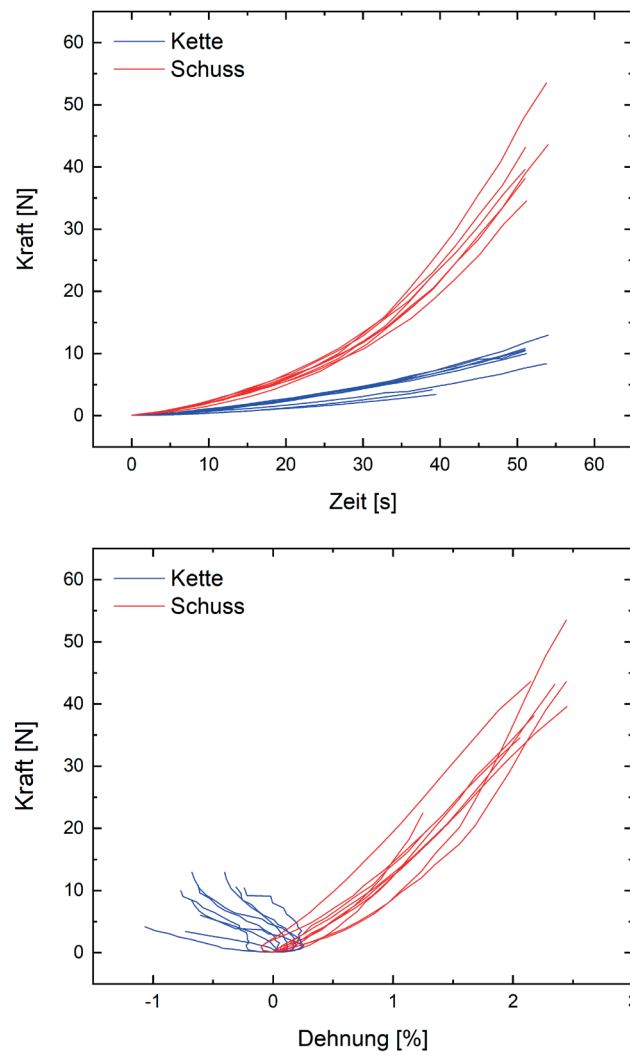
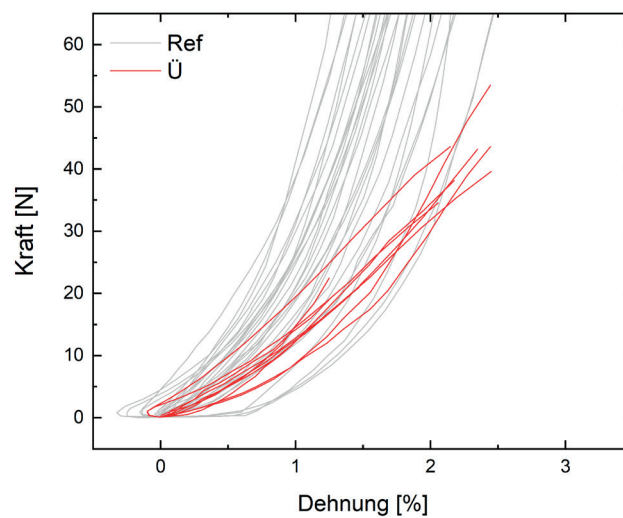


Abb. 31: K-D-Diagramm Typ **1b. Lineco (SAS+B)**, Schussrichtung im Vergleich zur Referenz.

Abb. 32 und 33: K-Z- sowie K-D-Diagramm von Typ 1c. Lineco (\ddot{U}).Abb. 34: K-D-Diagramm Typ 1c. Lineco (\ddot{U}), Schussrichtung im Vergleich zur Referenz.

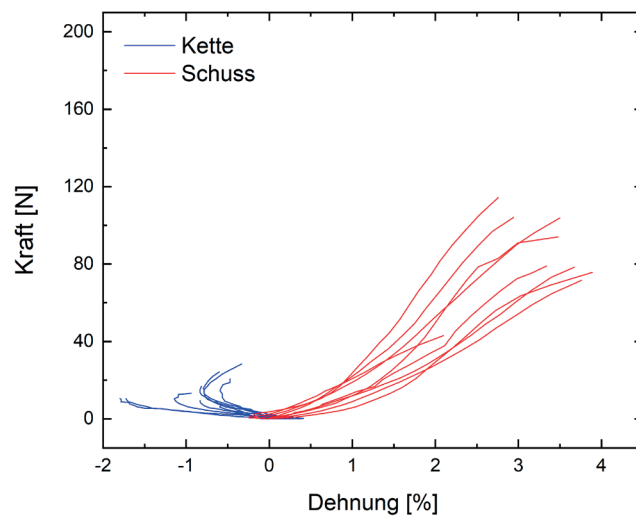
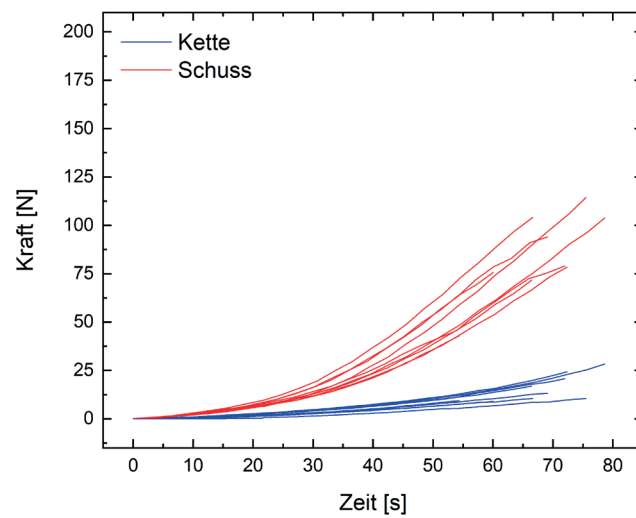


Abb. 35 und 36: K-Z- sowie K-D-Diagramm von Typ 1d. Lineco ($\ddot{U}+V$).

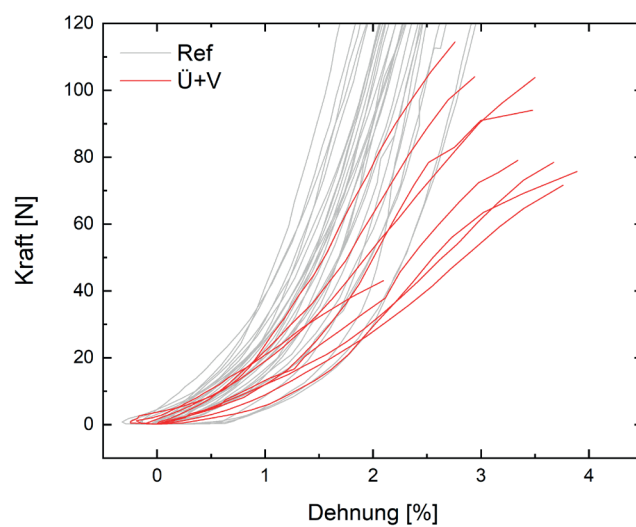


Abb. 37: K-D-Diagramm Typ 1d. Lineco ($\ddot{U}+V$), Schussrichtung im Vergleich zur Referenz.

2. Mowilith DHS S1

Versuchsstatistik								
Typ	a. SAS							
n = 10	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	1,81	5,61	20,1	-0,45	1,73	1,16	3,35	11,63
S	0,23	2,09	2,47	0,51	0,27	0,9	0,41	2,65
VK	12,69	37,34	12,31	-	15,3	77,09	12,31	22,8
Med	1,8	5,91	20,41	-0,18	1,8	0,99	3,4	12,77
Min	1,5	3,09	17,24	-1,4	1,17	0,51	2,87	6,27
Max	2,25	8,95	24,95	0,08	2,08	3,4	4,16	14,64

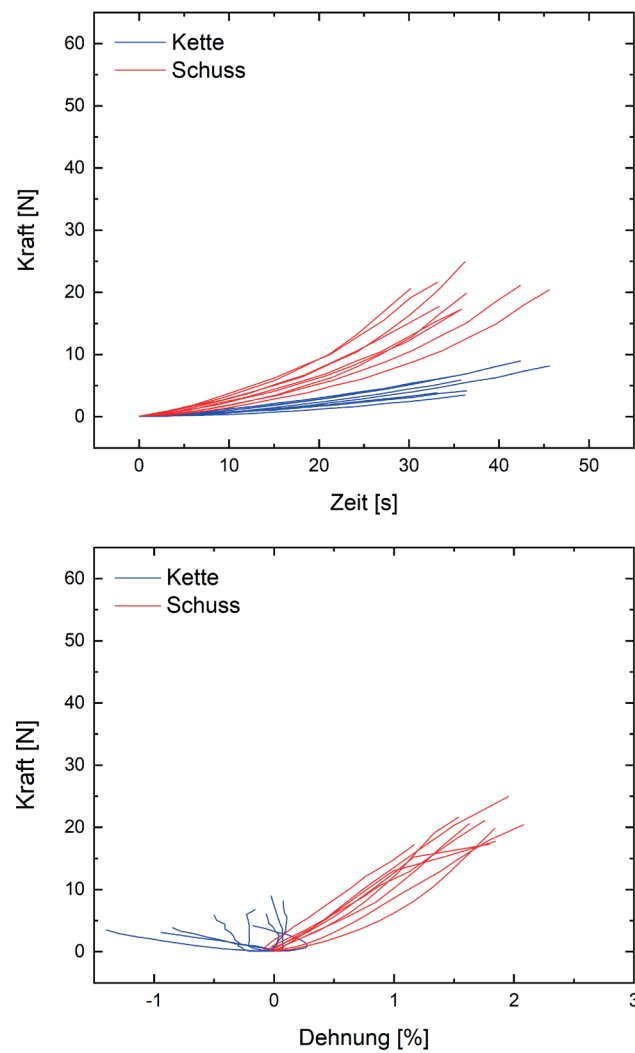


Abb. 38 und 39: K-Z- sowie K-D-Diagramm von Typ 2a. Mowilith (SAS).

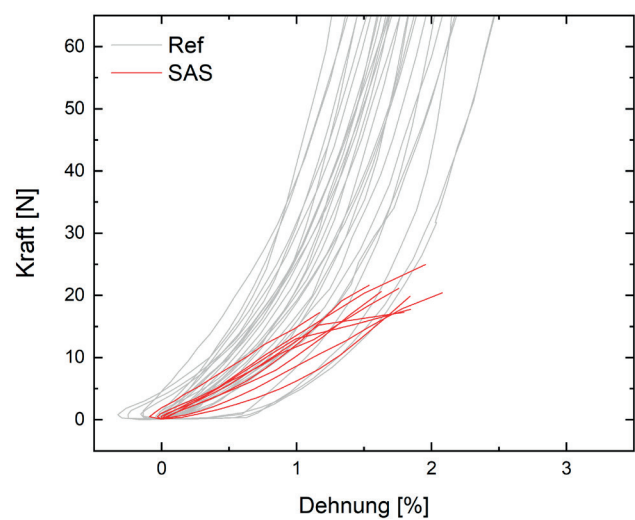


Abb. 40: K-D-Diagramm Typ 2a. Mowilith (SAS), Schussrichtung im Vergleich zur Referenz.

3. Störleim + Weizenstärkekleister nativ

Versuchsstatistik								
Typ	a. SAS							
n = 15	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	1,21	2,83	9,29	0	0,72	0,46	1,55	9,71
S	0,25	0,97	2,63	0,17	0,21	0,19	0,44	3,13
VK	20,67	34,28	28,26	-	29,16	40,38	28,26	32,22
Med	1,2	2,64	9,14	-0,03	0,69	0,44	1,52	9,16
Min	0,75	1,52	5,13	-0,23	0,35	0,06	0,86	6,48
Max	1,5	4,44	14,25	0,34	1,12	0,74	2,38	14,25
Typ	b. SAS+B							
n = 15	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	2,32	6,88	32,32	0,38	5,19	1,15	5,39	16,92
S	0,23	1,41	5,99	0,33	1,46	0,24	1	6,32
VK	10,04	20,53	18,55	-	28,22	20,53	18,55	37,35
Med	2,4	6,92	32,53	0,37	5,46	1,15	5,42	15,86
Min	1,8	4,4	22,66	-0,29	1,94	0,73	3,78	7,7
Max	2,7	9,61	43,64	0,95	6,85	1,6	7,27	31,6
Typ	c. \ddot{U}							
n = 10	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	1,38	3,42	10,87	-0,37	1,59	0,57	1,81	7,17
S	0,39	2,47	6,17	0,08	0,5	0,41	1,03	3,87
VK	28,14	72,2	56,72	-	31,56	72,2	56,72	54,02
Med	1,2	1,94	9,61	-0,35	1,68	0,32	1,6	7,51
Min	1,05	1,28	4,92	-0,5	0,88	0,21	0,82	2,12
Max	1,8	6,71	18,88	-0,28	2,1	1,12	3,15	11,52
Typ	c. \ddot{U} +V							
n = 10	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	2,67	8,13	52,25	-0,8	2	1,36	8,71	18,63
S	0,13	2,33	7,73	0,28	0,32	0,39	1,29	6,36
VK	4,7	28,61	14,8	-	15,79	28,61	14,8	34,12
Med	2,7	6,83	51,39	-0,95	1,92	1,14	8,56	18,53
Min	2,55	6,36	43,29	-1,04	1,58	1,06	7,22	11,42
Max	2,85	11,64	64,49	-0,45	2,43	1,94	10,75	27,69

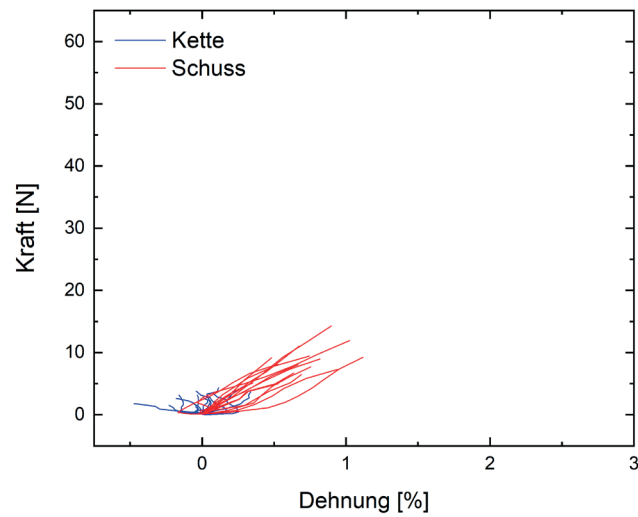
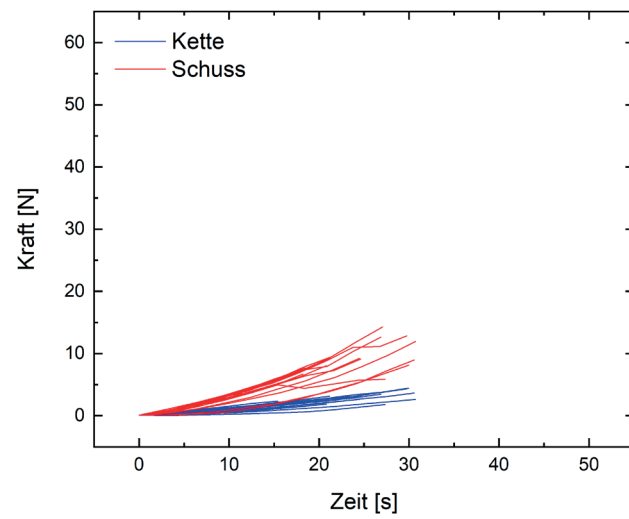


Abb. 41 und 42: K-Z- sowie K-D-Diagramm von Typ **3a. SL + WS nativ (SAS)**.

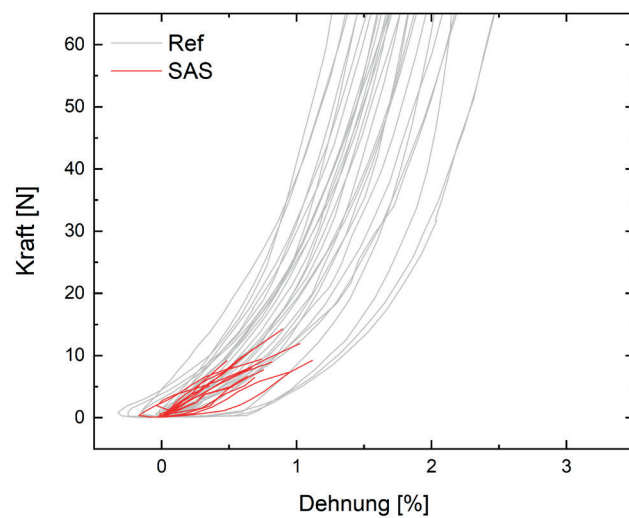


Abb. 43: K-D-Diagramm Typ **3a. SL + WS nativ (SAS)**, Schussrichtung im Vergleich zur Ref.

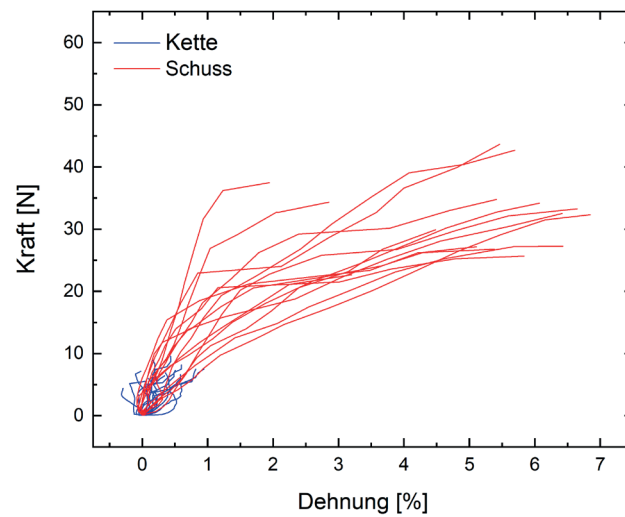
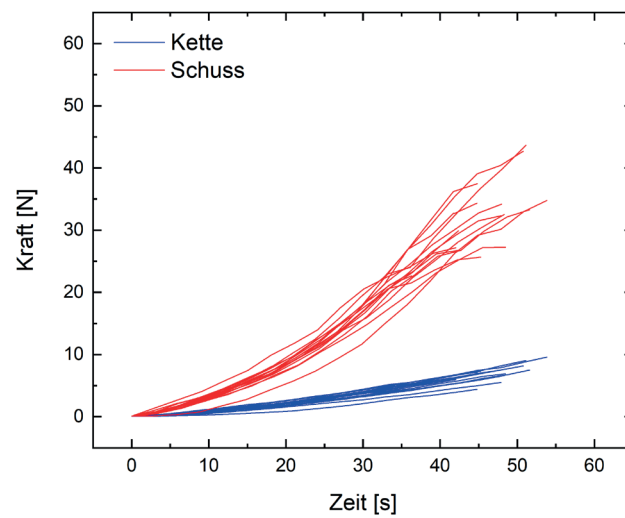


Abb. 44 und 45: K-Z- sowie K-D-Diagramm von Typ **3b. SL + WS nativ (SAS+B)**.

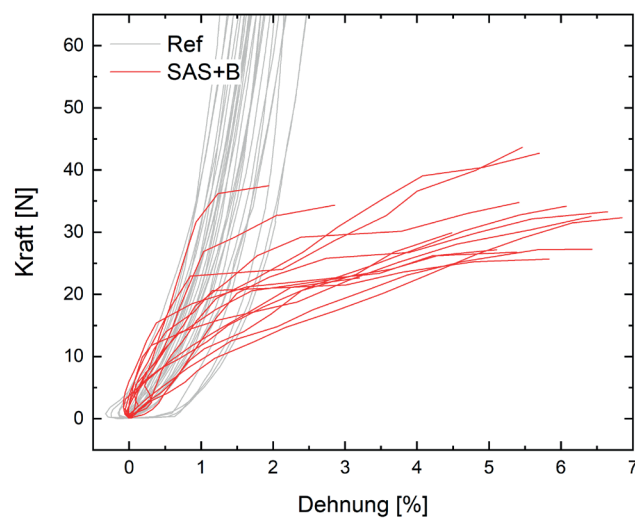


Abb. 46: K-D-Diagramm Typ **3b. SL + WS nativ (SAS+B)**, Schussrichtung im Vergleich zur Ref.

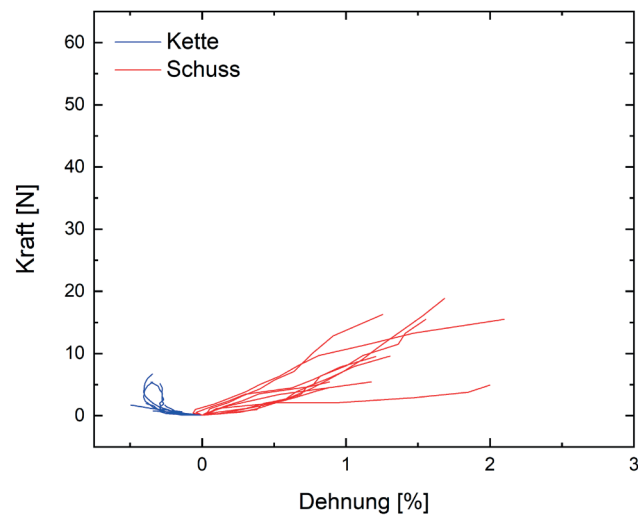
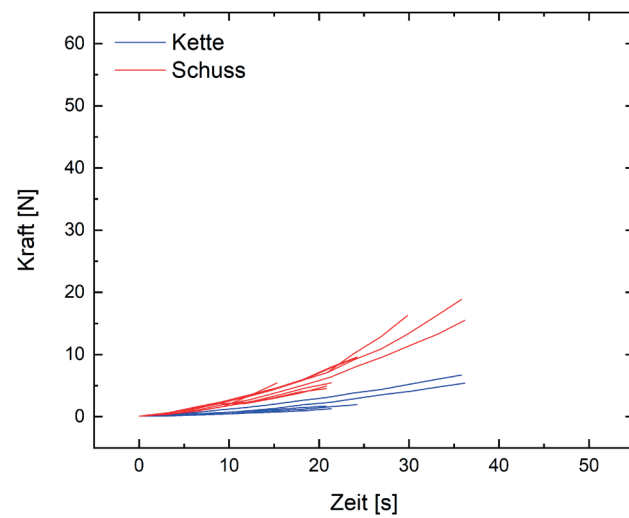


Abb. 47 und 48: K-Z- sowie K-D-Diagramm von Typ **3c. SL + WS nativ** (\ddot{U}).

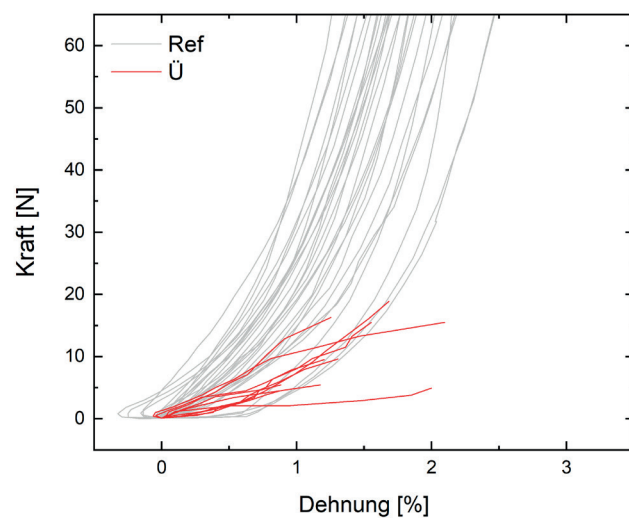


Abb. 49: K-D-Diagramm Typ **3c. SL + WS nativ** (\ddot{U}), Schussrichtung im Vergleich zur Referenz.

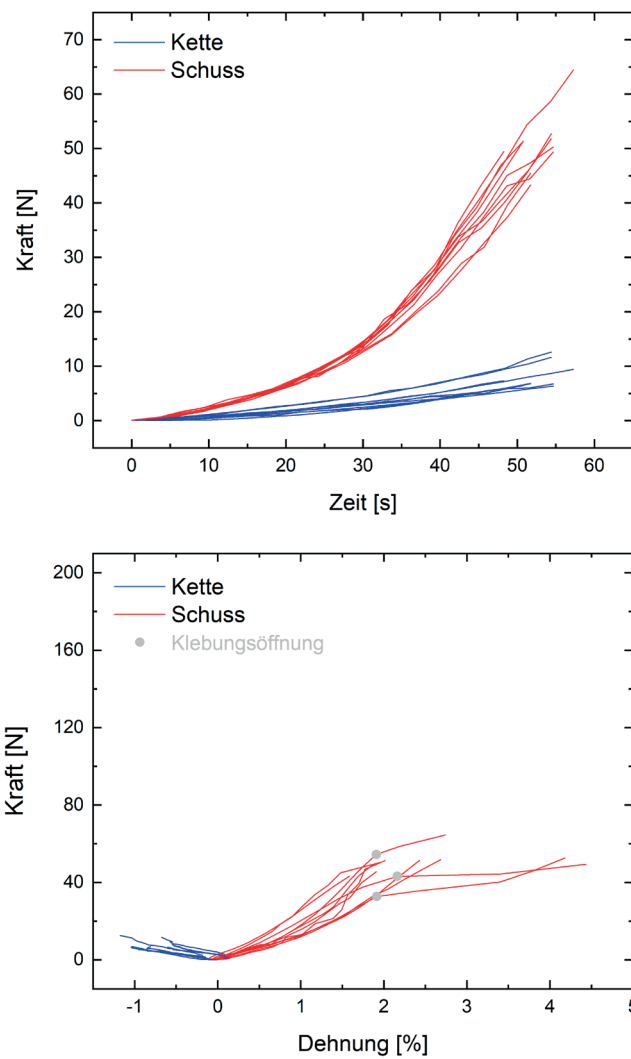


Abb. 50 und 51: K-Z- sowie K-D-Diagramm von Typ **3d. SL + WS nativ** ($\ddot{U}+V$).

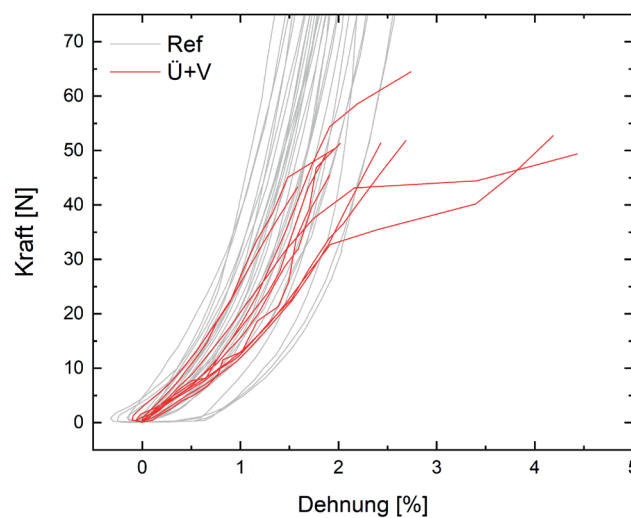
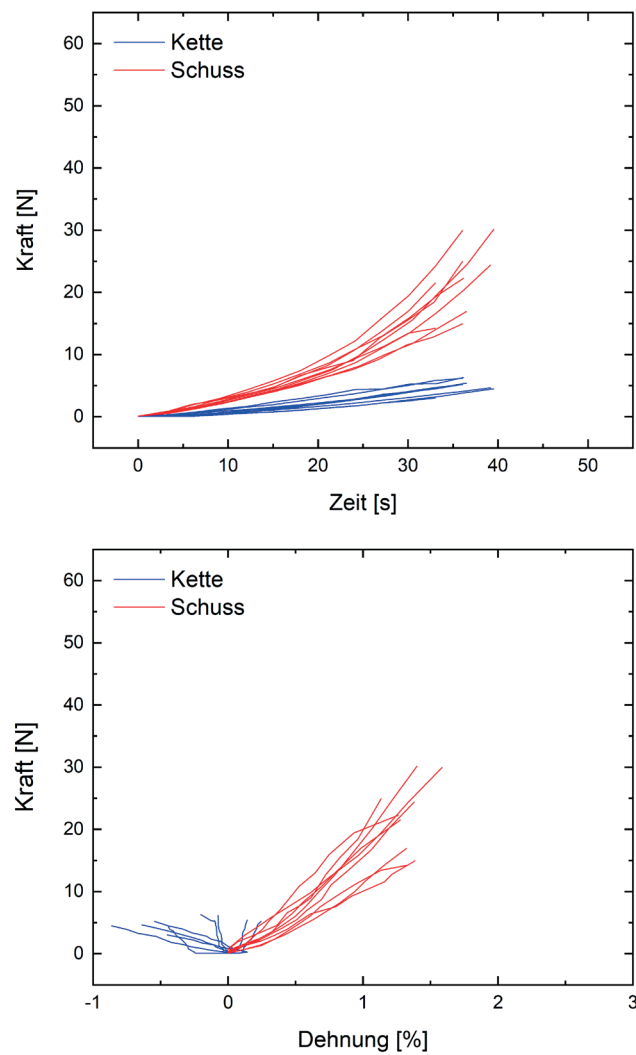
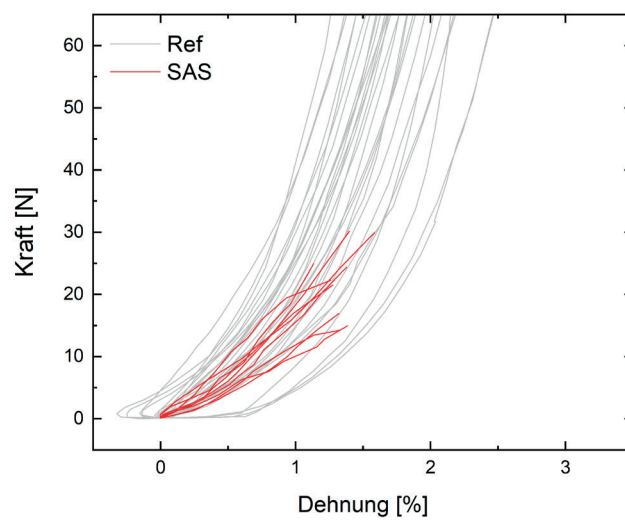


Abb. 52: K-D-Diagramm Typ **3d. SL + WS nativ** ($\ddot{U}+V$), Schussrichtung im Vergleich zur Ref.

4. Störleim + Arbocel BWB 40

Versuchsstatistik								
Typ	a. SAS							
n = 10	dL K / S [mm]	F K [N]	Fmax S [N]	ε K [%]	ε Fmax S [%]	σ K [MPa]	σ Fmax S [MPa]	F ~1 % ε S [N]
MW	1,8	5	22,15	-0,31	1,34	0,83	3,69	15,53
S	0,11	0,99	5,92	0,37	0,12	0,17	0,99	3,87
VK	5,89	19,88	26,73	-	9,15	19,88	26,73	24,89
Med	1,8	5,2	22,27	-0,44	1,33	0,87	3,71	16,73
Min	1,65	3,03	14,22	-0,86	1,13	0,5	2,37	9,26
Max	1,95	6,29	30,14	0,24	1,59	1,05	5,02	20,1

Abb. 53 und 54: K-Z- sowie K-D-Diagramm von Typ 4a. SL + **BWW 40** (SAS).Abb. 55: K-D-Diagramm Typ 4a. SL + **BWW 40** (SAS), Schussrichtung im Vergleich zur Ref.

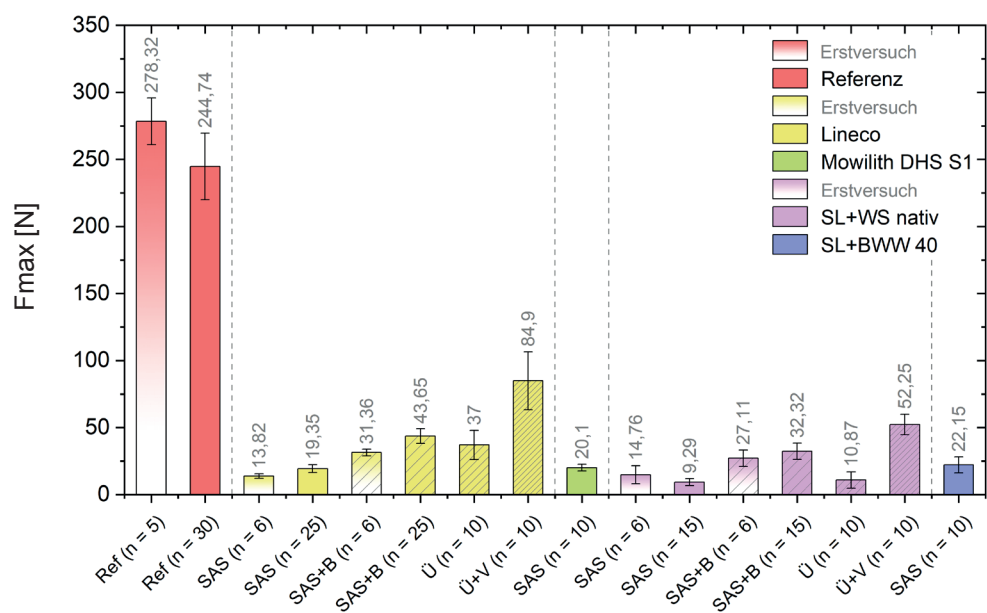


Abb. 56: Durchschnittliche Höchstzugkraft in Schussrichtung, inklusive Referenzproben; wiederholte Versuche im Vergleich zum Erstversuch.

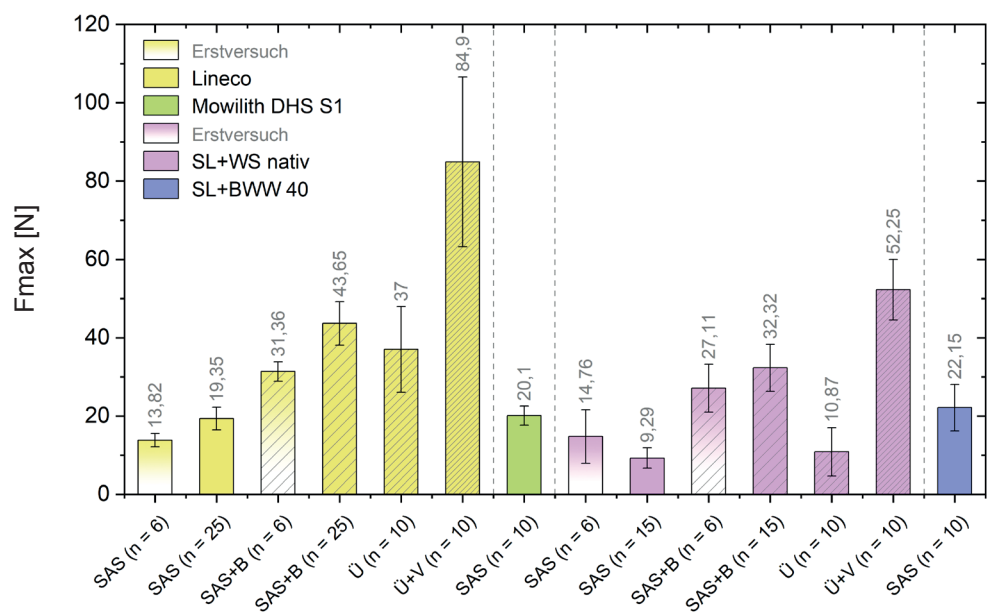


Abb. 57: Durchschnittliche Höchstzugkraft in verklebter Schussrichtung; wiederholte Versuche im Vergleich zum Erstversuch.

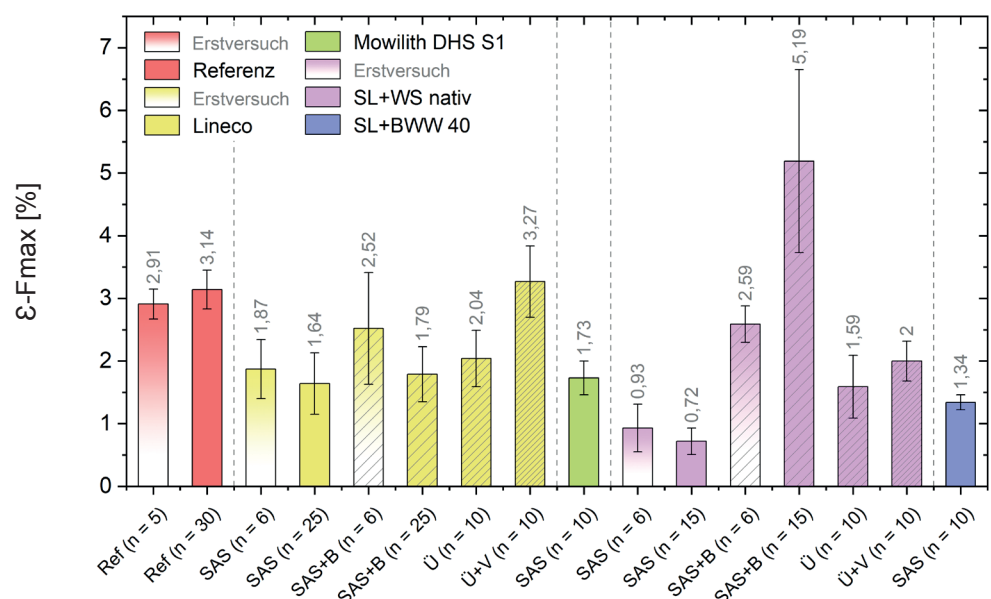


Abb. 58: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung in Schussrichtung; wiederholte Versuche im Vergleich zum Erstversuch.

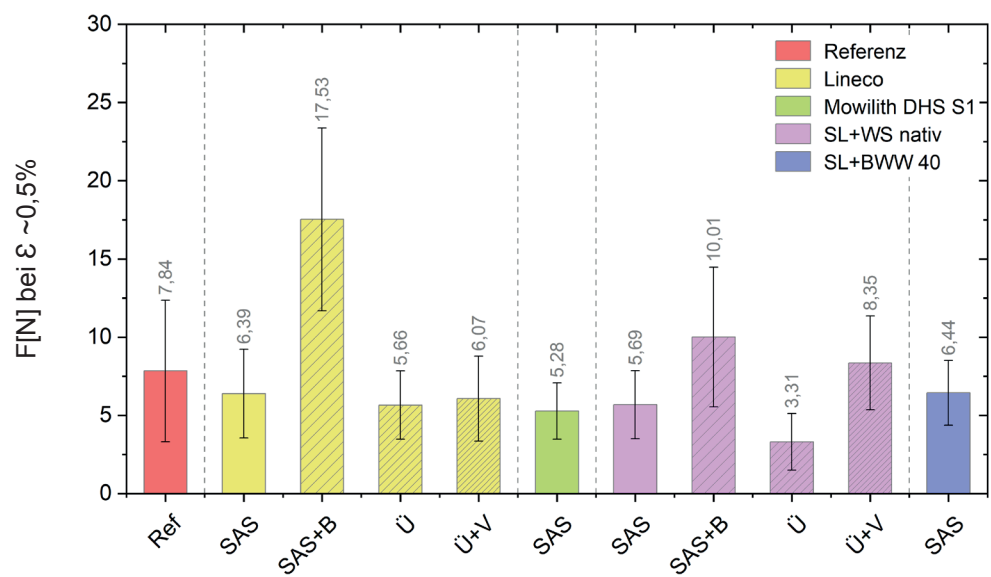


Abb. 59: Durchschnittliche Kraft in Schussrichtung bei ca. 0,5 % Dehnung (via DIC).

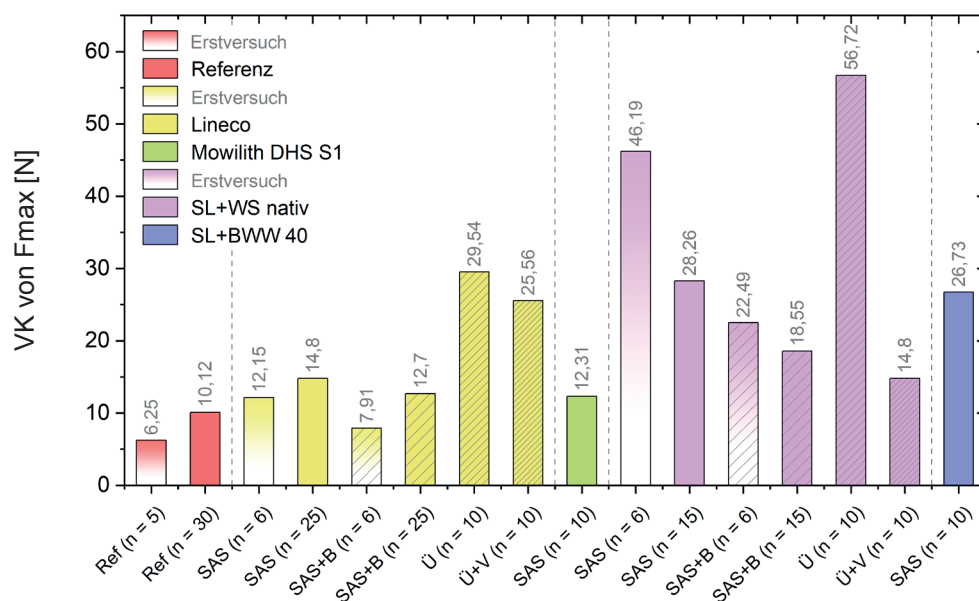


Abb. 60: Variationskoeffizienten der Höchstzugkraft in Schussrichtung; wiederholte Versuche im Vergleich zum Erstversuch.

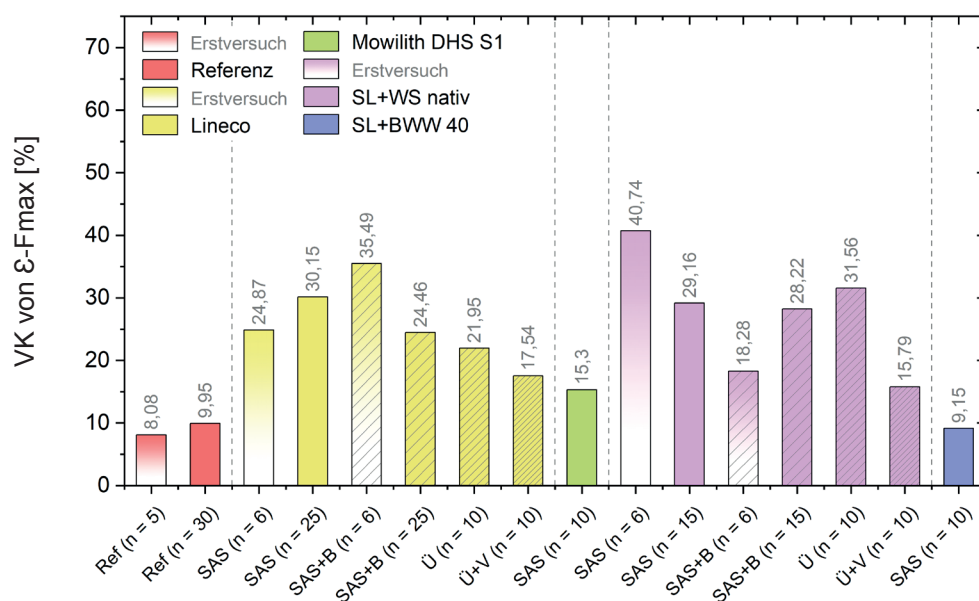
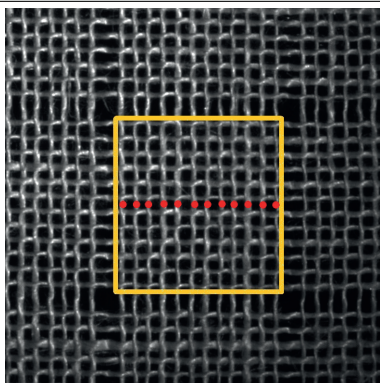
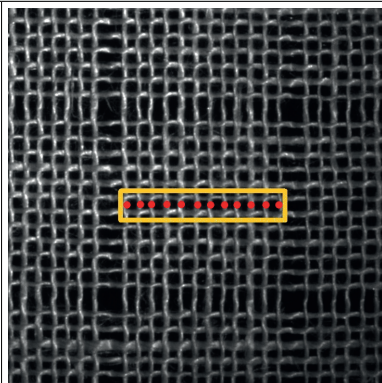
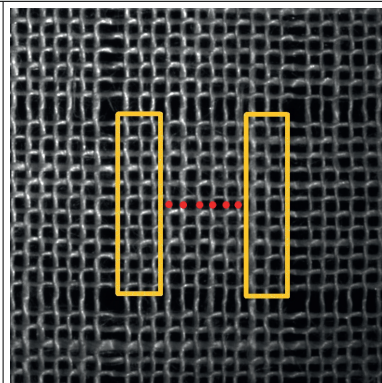


Abb. 61: Variationskoeffizienten der Höchstzugkraftdehnung in Schussrichtung; wiederholte Versuche im Vergleich zum Erstversuch.

A.2.2 Mischbetrachtung intakte und verklebte Fäden (Vorversuch)

Probekörper			
Gewebe		Pattina L 13 (puro lino), Tessitura Enrico Sironi	
Probekörpertyp	A.	Referenz, unbeschichtet (n = 10)	
	B.	In Schussrichtung verklebte Proben (je n = 10)	
Verklebungsvarianten	I.	0/12	Intakte Referenz
	II.	2/12	Mittig zwei von zwölf Fäden verklebt
	III.	4/12	Mittig vier von zwölf Fäden verklebt
	IV.	6/12	Mittig sechs von zwölf Fäden verklebt
	V.	8/12	Mittig acht von zwölf Fäden verklebt
	VI.	10/12	Mittig zehn von zwölf Fäden verklebt
	VII.	12/12	Verklebung aller zwölf Fäden auf voller Breite
Verklebungstechnik		Stoß-auf-Stoß (SAS) mit Lineco in Schussrichtung	
Probengeometrie		Gewebekreuzproben (L: je 200 mm; B: 12 Fäden)	
Prüfbedingungen			
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.	
Prüfgerät		Biaxiale Zugprüfmaschine, LTM / UdS	
Prüfsoftware	HOST Bedienoberfläche		Programmierung LabView, National Instruments
	CRIO Datenaufzeichnung		
Kraftaufnehmer		100 N / 500 N	
Einspannlänge		100 mm je Achse	
Vorkraft		0,1 N je Achse	
Prüfgeschwindigkeit		0,33 mm/sec (~ 20 mm/min), äquibiaxial	
Dehnungsermittlung	Via digitale Bildkorrelation / DIC im biaxialen Mittelbereich der Proben (a. Gesamtbereich / b. Klebestelle / c. Intakte Fäden, s.u.)		
	Kamera jAi CM-200 GE, Stemmer Imaging		
	Objektiv Fujinon HF12.5SA-1 (2/3“ 12,5mm f 1.4)		
	Software VIC 2D, Correlated Solutions		
Vergleichende Dehnungsauswertung			
			
a) Gesamtbereich		b) Klebestelle	
			
		c) intakte Fäden	

Auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Versuchsstatistik wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung ausgewählter Auswertungen:

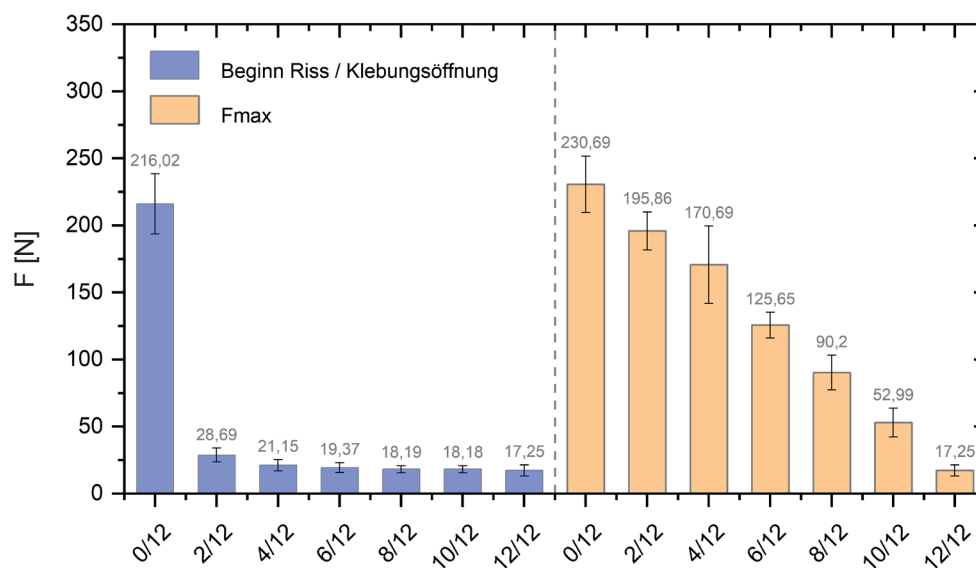


Abb. 01: Kraft bei Rissbeginn (0/12) bzw. Klebungsöffnung (2-12/12) sowie nachfolgend gemessene Höchstzugkraft in Schussrichtung.

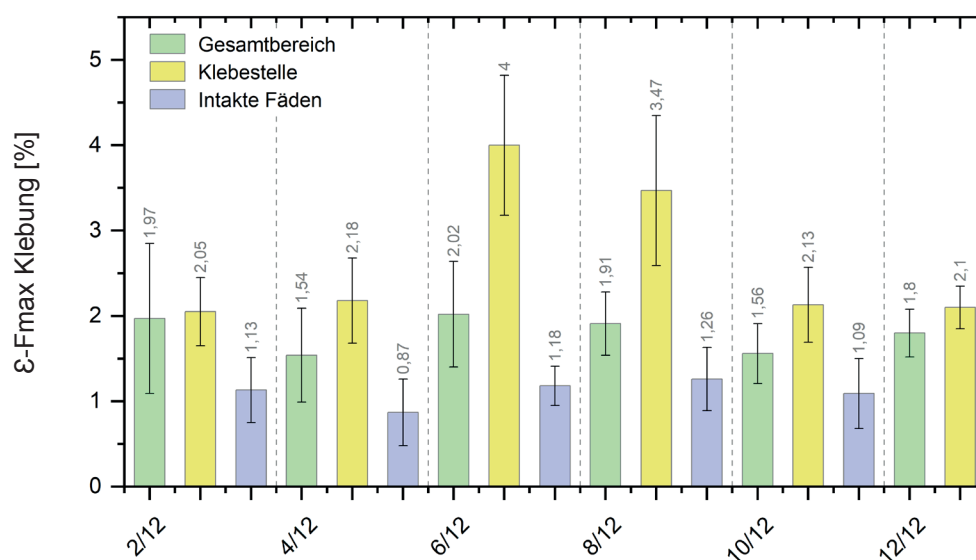


Abb. 02: Dehnungsauswertung kurz vor Klebungsöffnung im Mittelbereich im Vergleich: a) Gesamtbereich, b) Klebestelle, c) intakte Fäden.

A.2.3 Verklebungen in un- und beschichtetem Gewebe (Vorversuch)

Probekörper				
Gewebe	1.	Claessens Canvas 070, unbeschichtet (C 070)		
	2.	Claessens Canvas 170, acrylgründiert (C170)		
Probekörpertyp	A.	Unverklebte Referenz (Ref)		
	B.	Verklebte Proben (SAS)		
Varianten (je n = 5)	I.	Uniax.	C 070	Streifen / Ref
	II.	Uniax.	C 070	Streifen / SAS
	III.	Uniax.	C 070	Streifen + aufgedoppelt / Ref
	IV.	Uniax.	C 070	Streifen + aufgedoppelt / SAS
	V.	Uniax.	C 170	Streifen / Ref
	VI.	Uniax.	C 170	Streifen / SAS
	VII.	Uniax.	C 170	Streifen + aufgedoppelt / Ref
	VIII.	Uniax.	C 170	Streifen + aufgedoppelt / SAS
	IX.	Biax.	C 070	Kreuz / Ref
	X.	Biax.	C 070	Kreuz / SAS
	XI.	Biax.	C 070	Kreuz + aufgedoppelt / Ref
	XII.	Biax.	C 070	Kreuz + aufgedoppelt / SAS
	XIII.	Biax.	C 170	Kreuz / Ref
	XIV.	Biax.	C 170	Kreuz / SAS
	XV.	Biax.	C 170	Kreuz + aufgedoppelt / Ref
	XVI.	Biax.	C 170	Kreuz + aufgedoppelt / SAS
Aufdoppelung		Schussstreifen C 170 (B: 12 Fäden) + Beva 371 (25 µm)		
Verklebungstechnik		Stoß-auf-Stoß (SAS) mit Lineco in Schussrichtung		
Probengeometrie	a.	Gewebestreifen, Schuss (L: 200 mm; B: 12 Fäden)		
	b.	Gewebekreuzproben (L: je 200 mm; B: 12 Fäden)		
Prüfbedingungen				
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.		
Prüfgerät		Biaxiale Zugprüfmaschine, LTM / UdS		
Prüfsoftware	HOST Bedienoberfläche		Programmierung LabView, National Instruments	
	CRIO Datenaufzeichnung			
Kraftaufnehmer		100 N / 500 N		
Einspannlänge		55 mm je Achse		
Vorkraft		1 N (Schuss) / 3 N (Kette)		
Prüfgeschwindigkeit		0,18 mm/sec (~ 11 mm/min), uniaxial / äquibiaxial		
Dehnungsermittlung	Via digitale Bildkorrelation / DIC im Mittelbereich der Proben			
	Kamera jAi CM-200 GE, Stemmer Imaging			
	Objektiv Fujinon HF12.5SA-1 (2/3“ 12,5mm f 1.4)			
	Software VIC 2D, Correlated Solutions			

Auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Versuchsstatistik wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung ausgewählter Auswertungen:

I. + II. Uniaxiale Streifen C 070 ohne / mit Verklebung

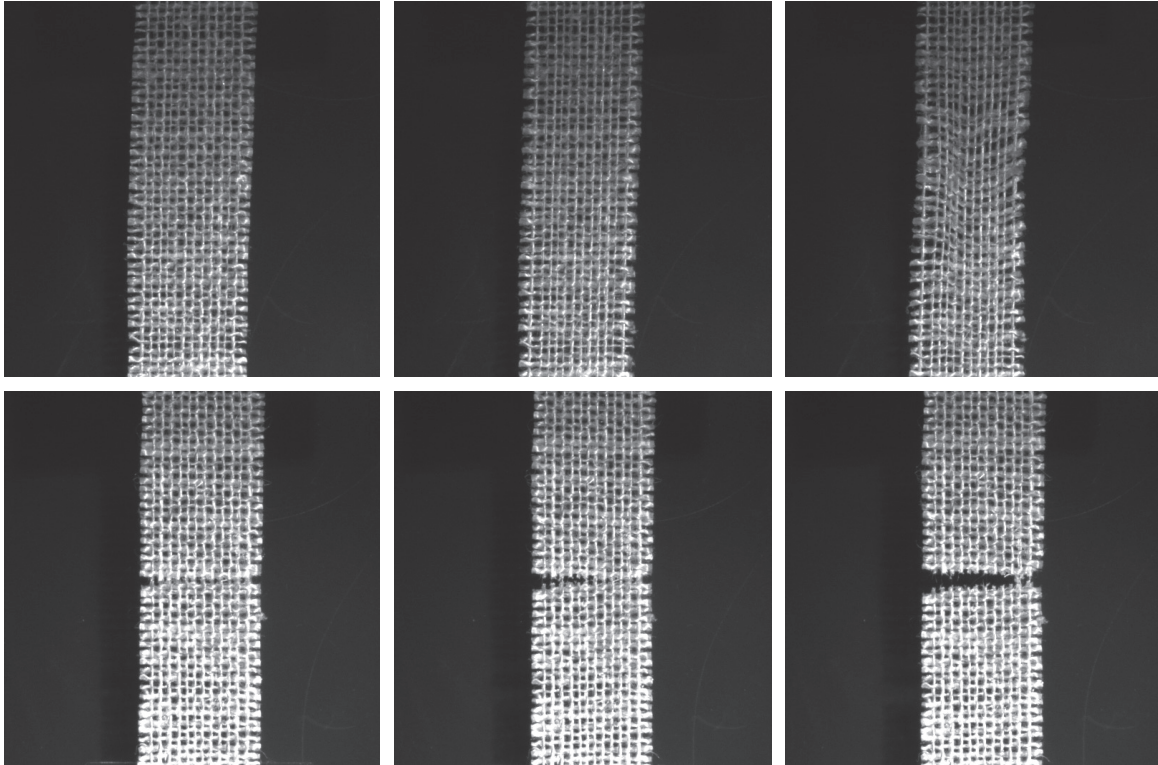


Abb. 01-03: **Typ I.** / uniax. Streifen C 070 ohne Verklebung (Ref).

Abb. 04-06: **Typ II.** / uniax. Streifen C 070 mit Verklebung (SAS).

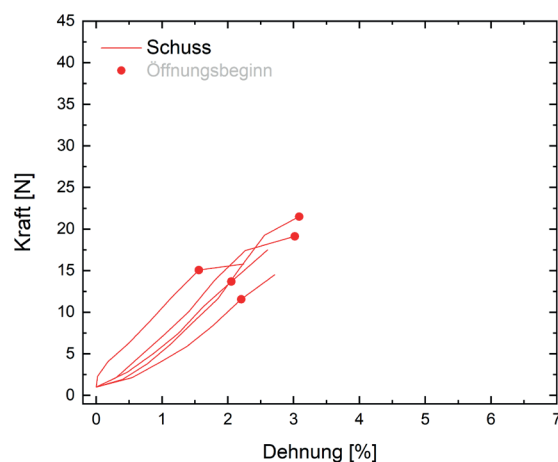
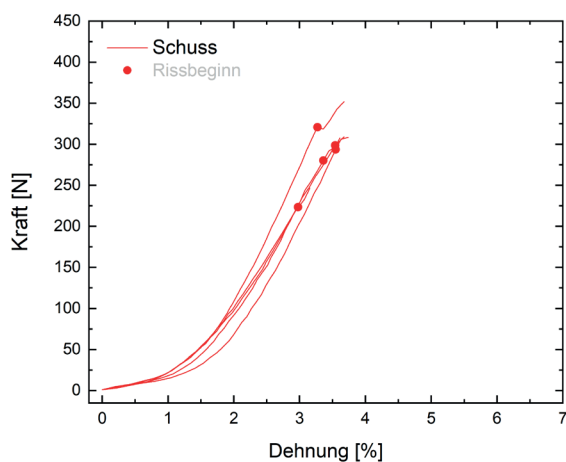


Abb. 07 und 08: Kraft-Dehnungs-Diagramme von **Typ I.** (Ref) und **Typ II.** (SAS).

III. + IV. Uniaxiale Streifen C 070 ohne / mit Verklebung (+ Aufdoppelung)

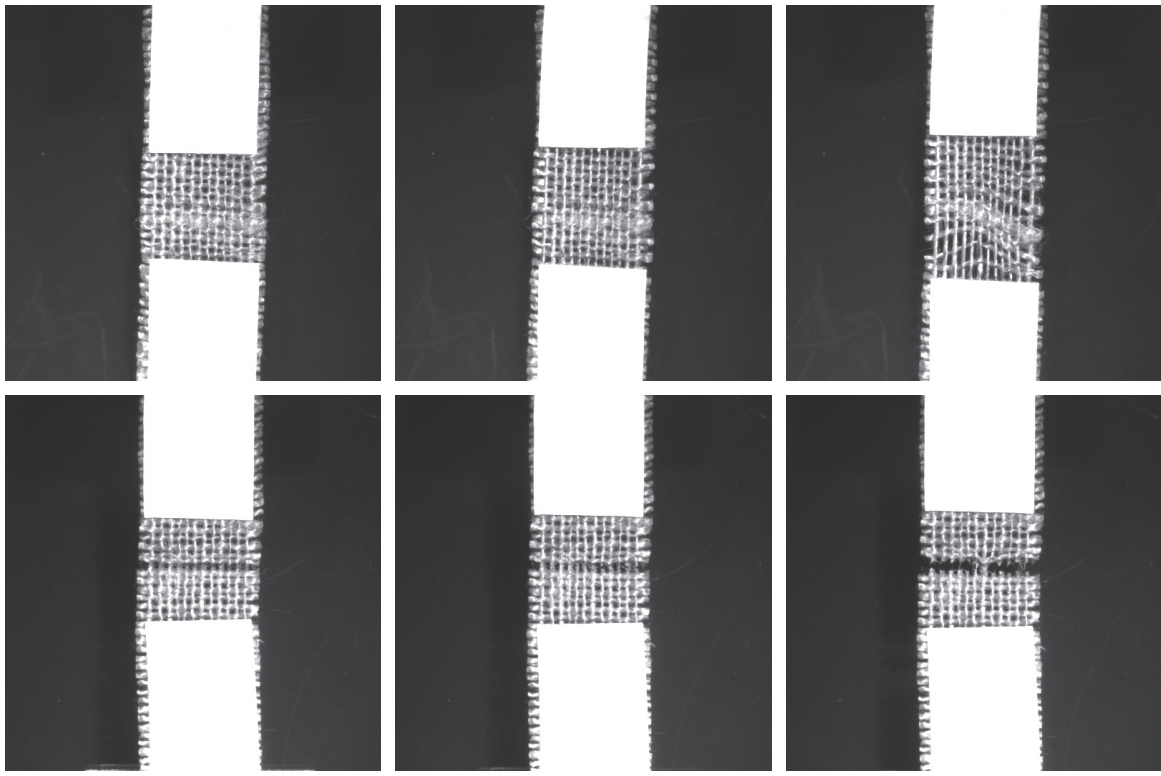


Abb. 09-11: **Typ III.** / uniax. Streifen C 070 ohne Verklebung (Ref) + Aufdoppelung.

Abb. 12-14: **Typ IV.** / uniax. Streifen C 070 mit Verklebung (SAS) + Aufdoppelung.

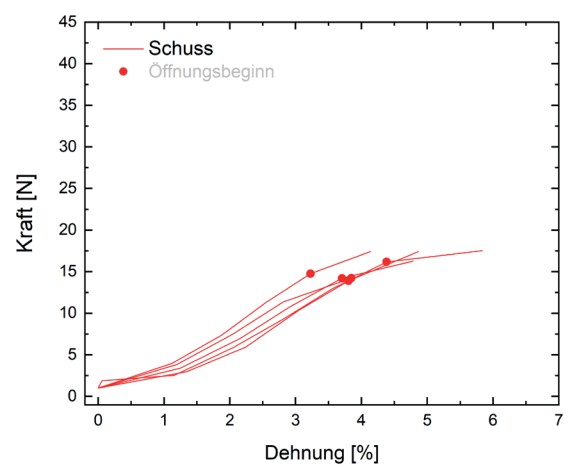
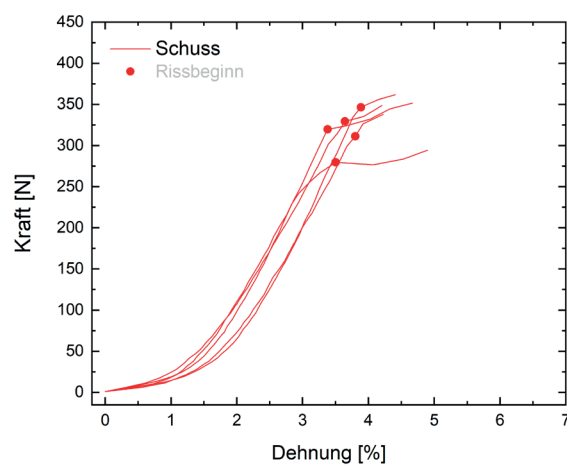


Abb. 15 und 16: K-D-Diagramme von **Typ III.** (Ref) und **Typ IV.** (SAS).

V. + VI. Uniaxiale Streifen C 170 ohne / mit Verklebung

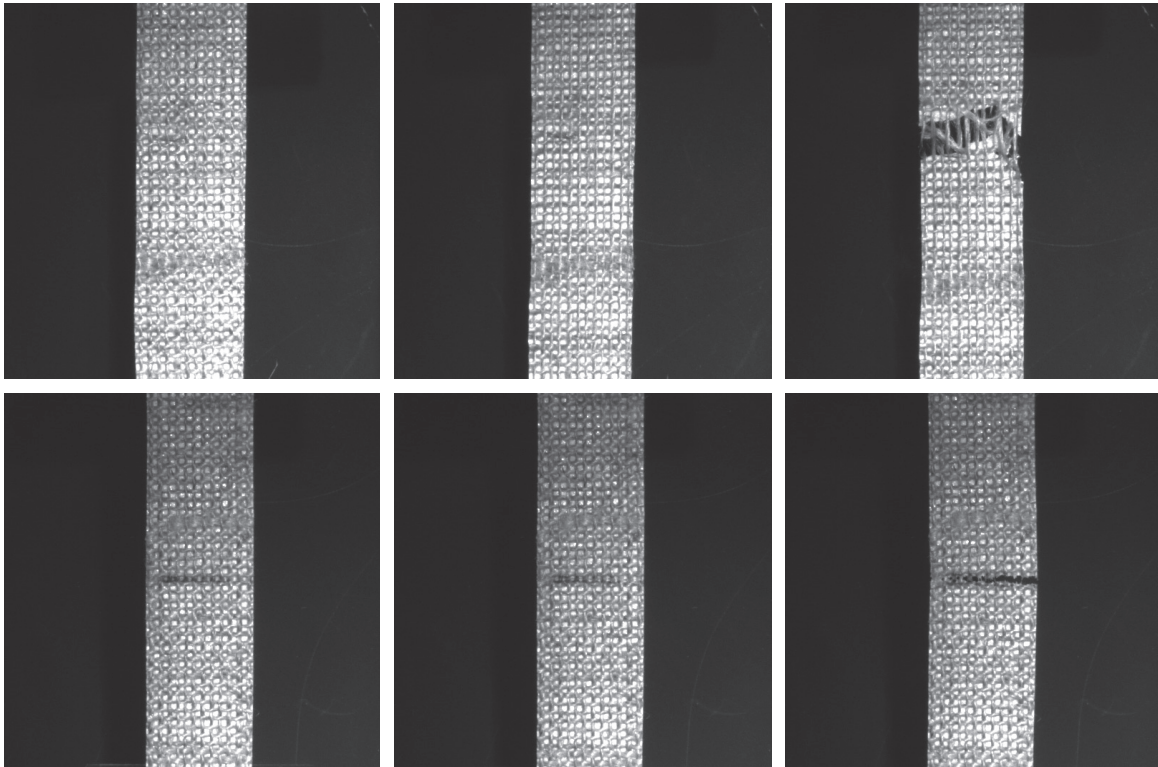


Abb. 17-19: **Typ V.** / uniax. Streifen C 170 ohne Verklebung (Ref).

Abb. 20-22: **Typ VI.** / uniax. Streifen C 170 mit Verklebung (SAS).

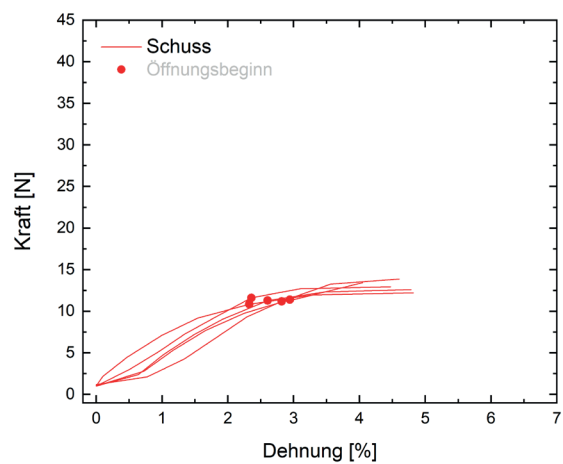
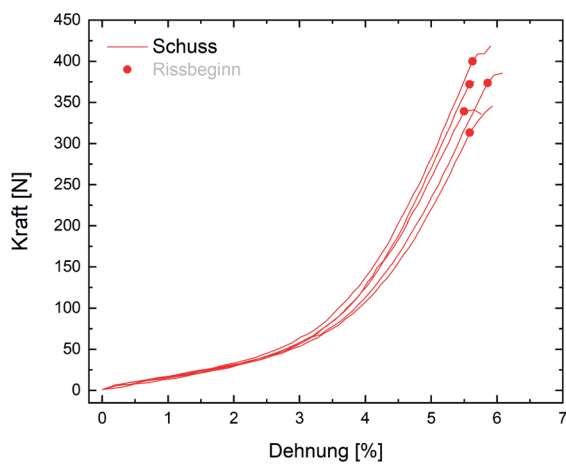


Abb. 23 und 24: K-D-Diagramme von **Typ V.** (Ref) und **Typ VI.** (SAS).

VII. + VIII. Uniaxiale Streifen C 170 ohne / mit Verklebung (+ Aufdoppelung)

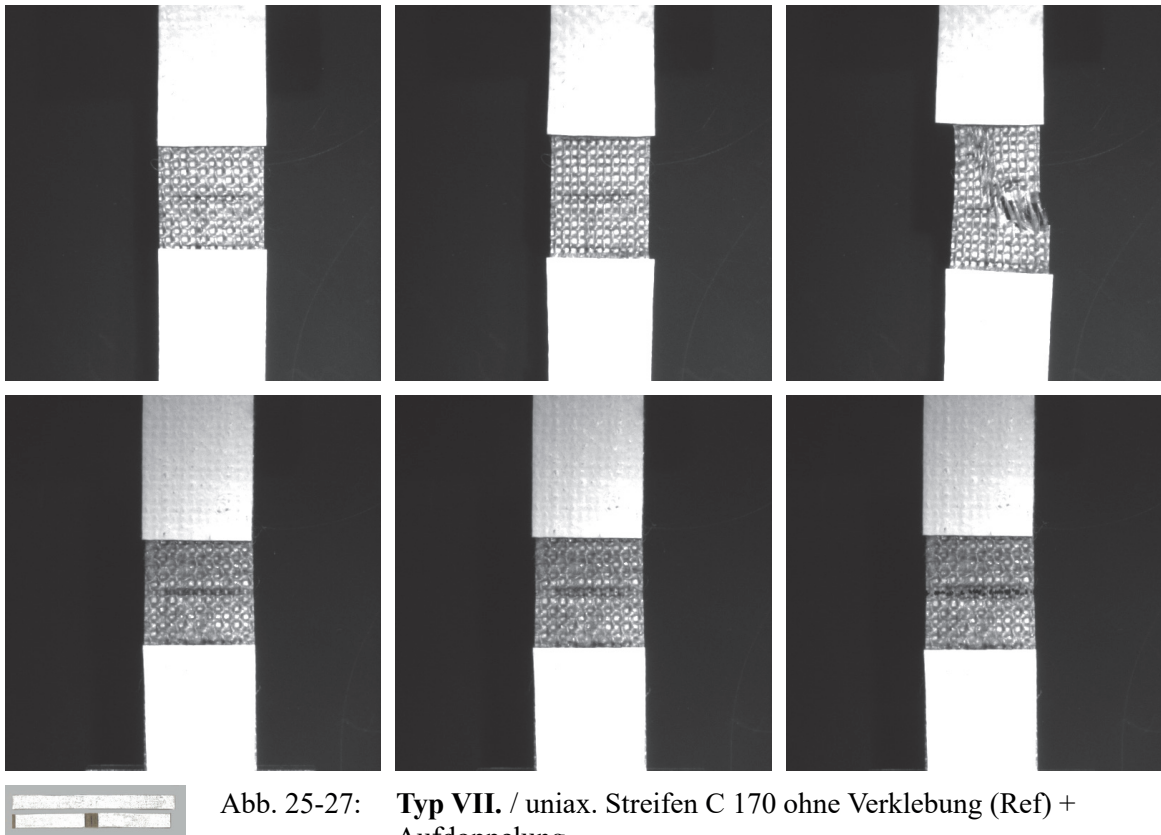


Abb. 25-27: **Typ VII.** / uniax. Streifen C 170 ohne Verklebung (Ref) + Aufdoppelung.

Abb. 28-30: **Typ VIII.** / uniax. Streifen C 170 mit Verklebung (SAS) + Aufdoppelung.

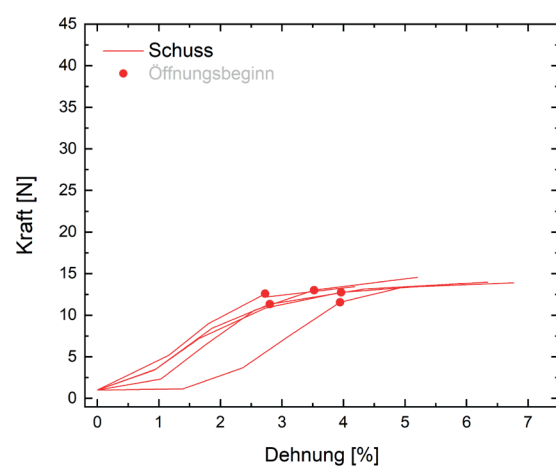
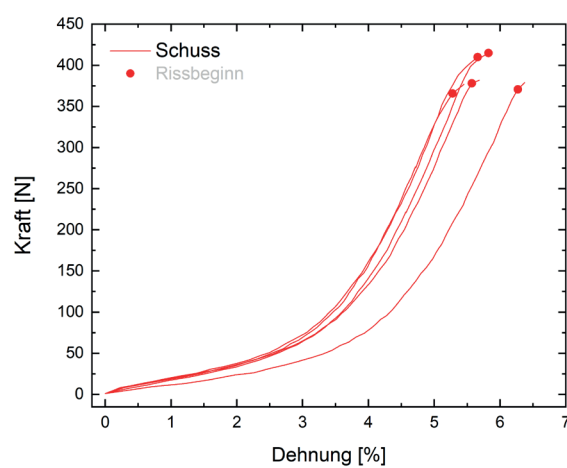


Abb. 31 und 32: K-D-Diagramme von **Typ VII.** (Ref) und **Typ VIII.** (SAS).

IX. + X. Biaxiale Kreuzproben C 070 ohne / mit Verklebung

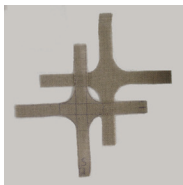
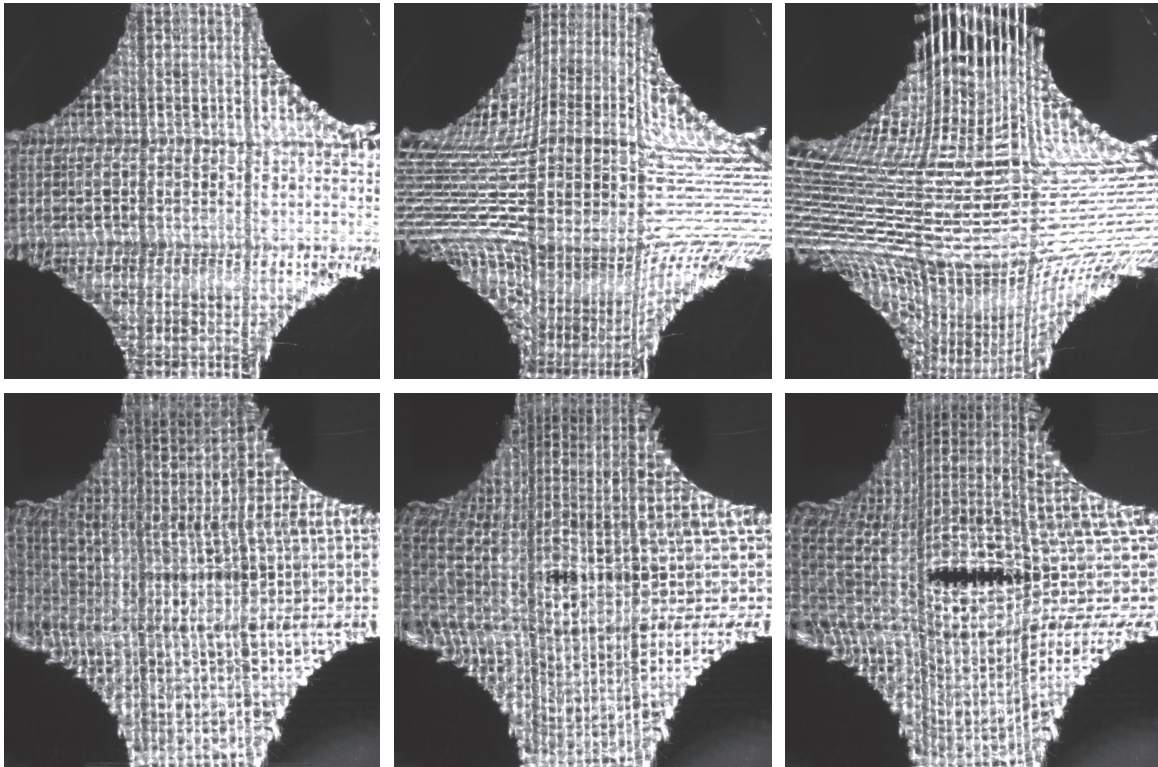


Abb. 33-35: **Typ IX.** / biax. Kreuz C 070 ohne Verklebung (Ref).

Abb. 36-38: **Typ X.** / biax. Kreuz C 070 mit Verklebung (SAS).

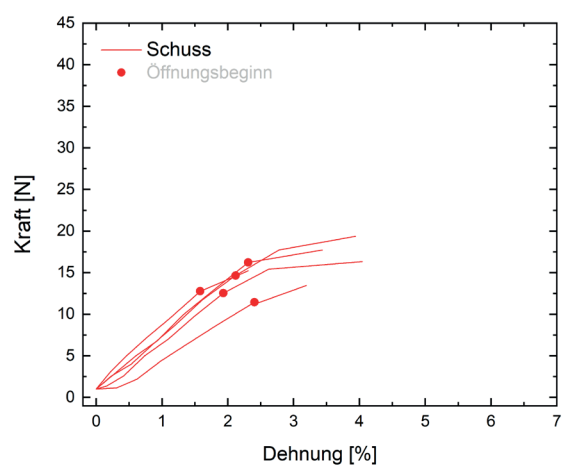
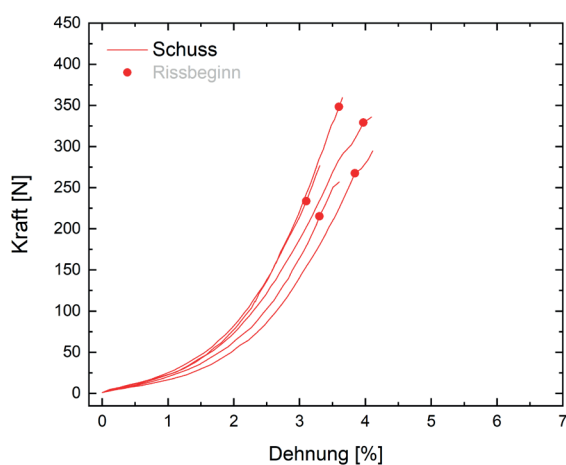


Abb. 39 und 40: K-D-Diagramme von **Typ IX.** (Ref) und **Typ X.** (SAS).

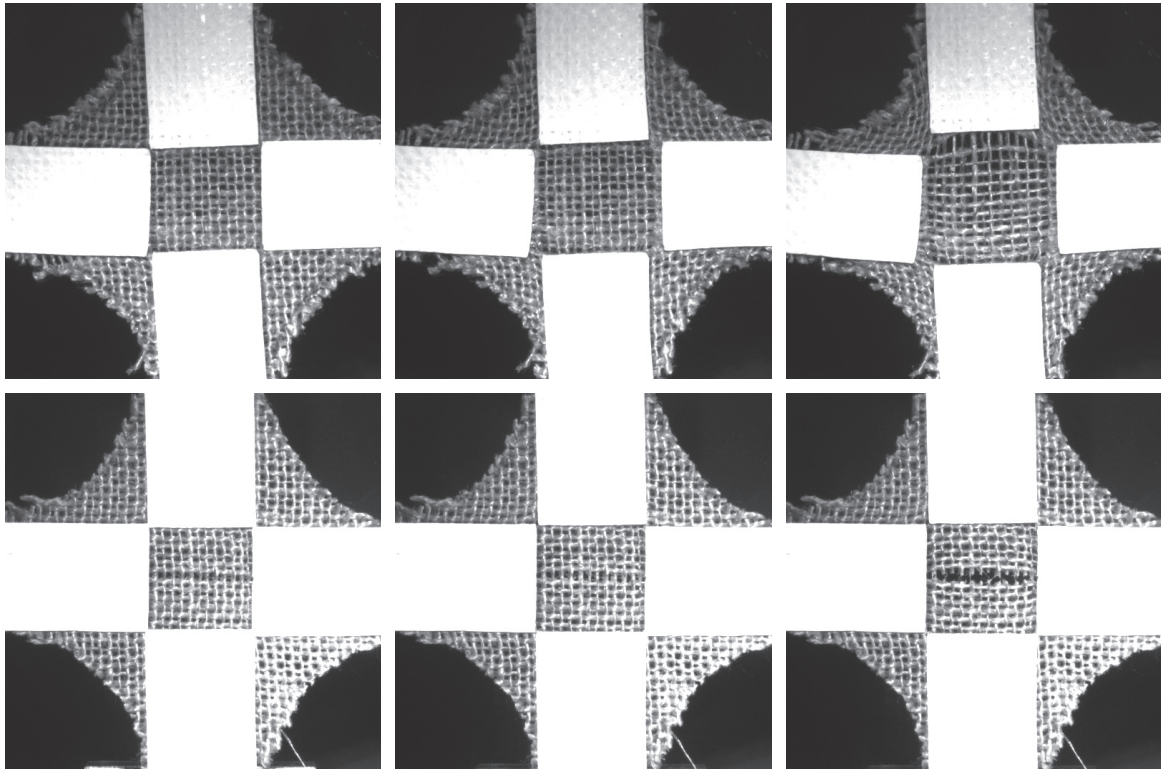
XI. + XII. Biaxiale Kreuzproben C 070 ohne / mit Verklebung (+ Aufdoppelung)

Abb. 41-43: **Typ XI.** / biax. Kreuz C 070 ohne Verklebung (Ref) + Aufdoppelung.

Abb. 44-46: **Typ XII.** / biax. Kreuz C 070 mit Verklebung (SAS) + Aufdoppelung.

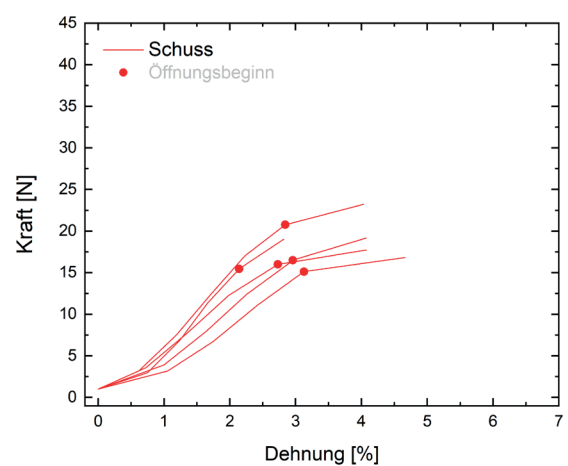
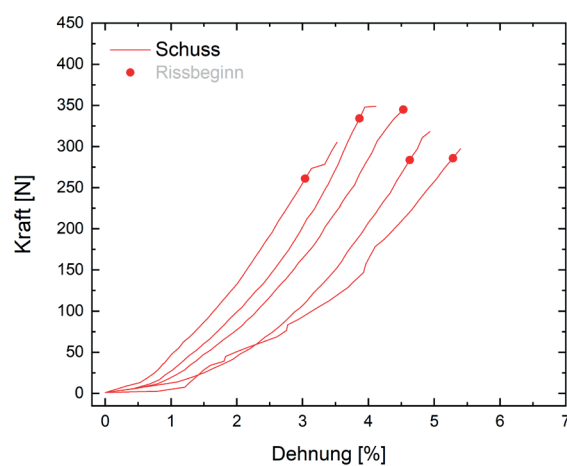


Abb. 47 und 48: K-D-Diagramme von **Typ XI.** (Ref) und **Typ XII.** (SAS).

XIII. + XIV. Biaxiale Kreuzproben C 170 ohne / mit Verklebung

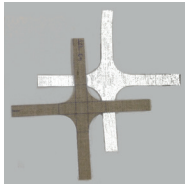
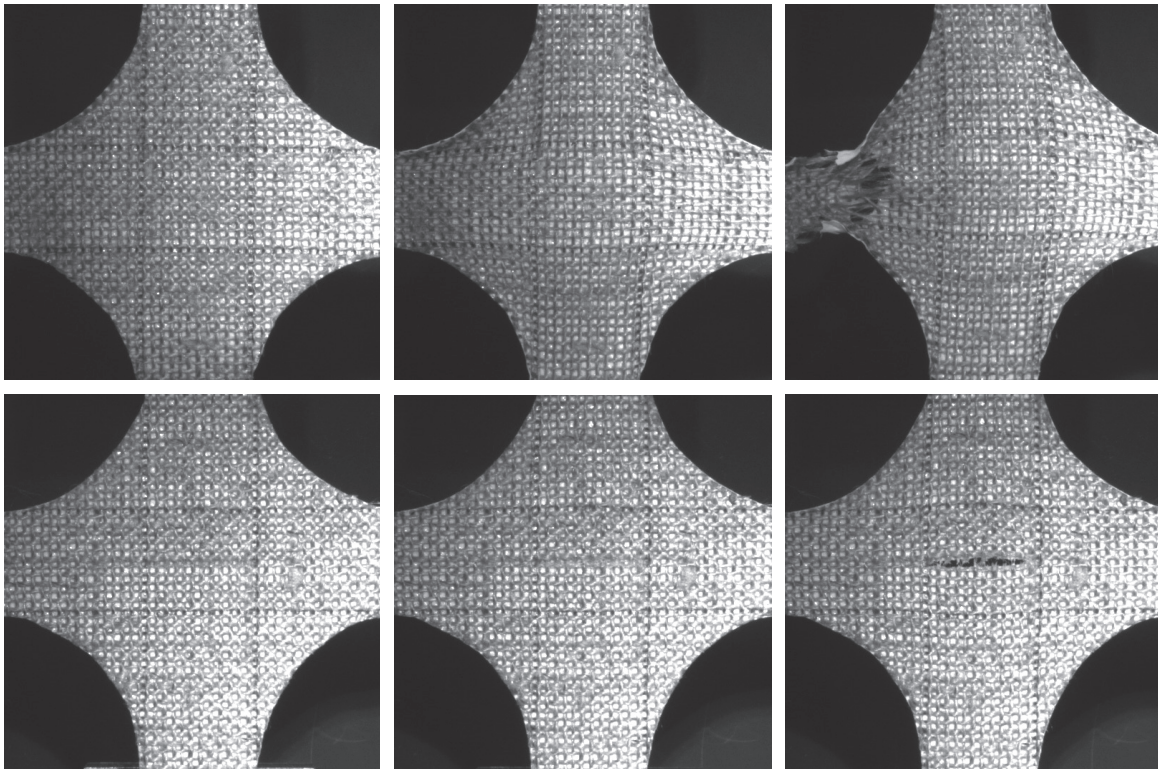


Abb. 49-51: **Typ XIII.** / biax. Kreuz C 170 ohne Verklebung (Ref).

Abb. 52-54: **Typ XIV.** / biax. Kreuz C 170 mit Verklebung (SAS).

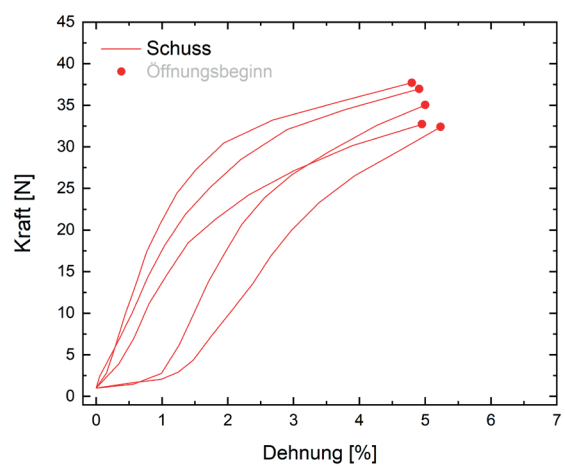
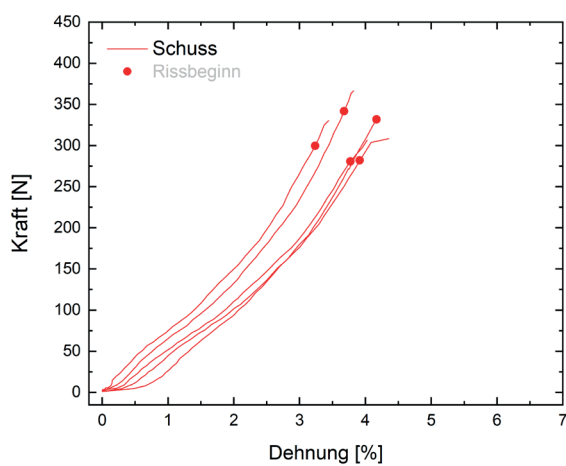
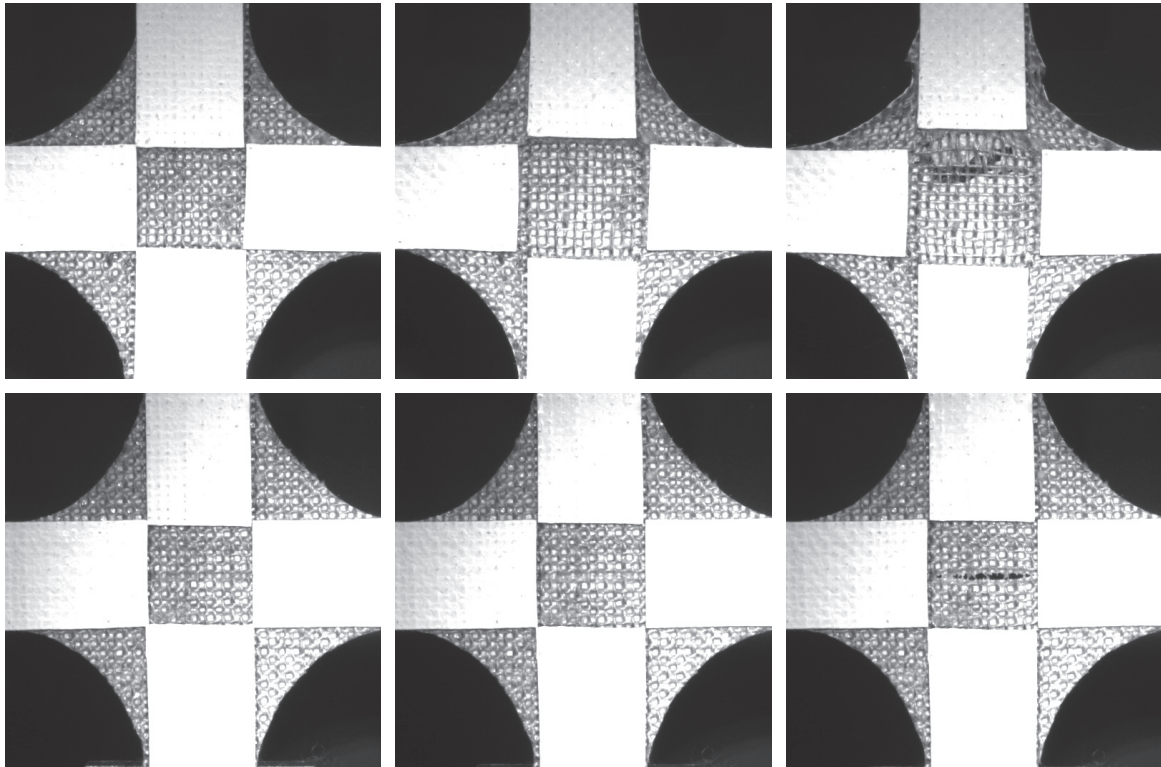
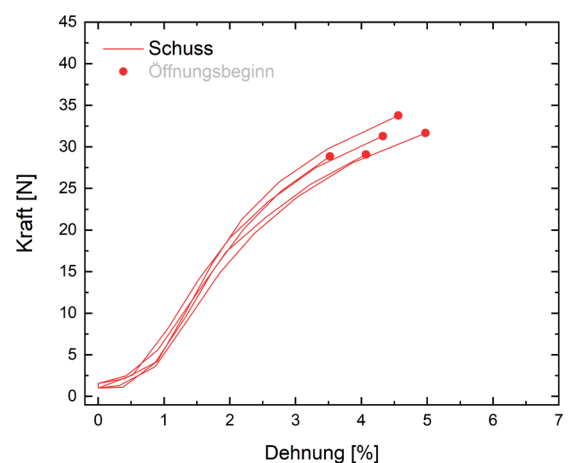
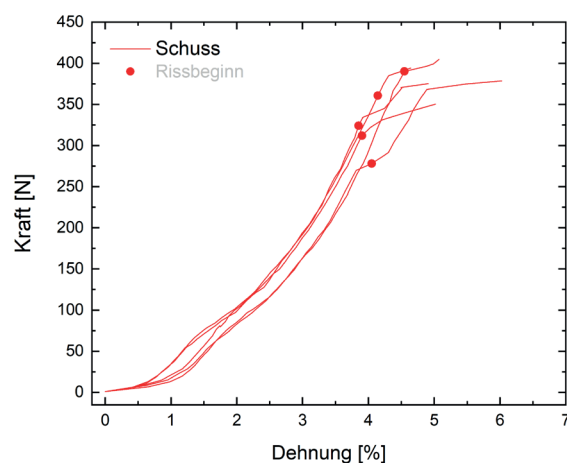


Abb. 55 und 56: K-D-Diagramme von **Typ XIII.** (Ref) und **Typ XIV.** (SAS).*

* Siehe auch nachfolgende Anmerkung zu Abb. 65-71.

XV.. + XVI. Biaxiale Kreuzproben C 170 ohne / mit Verklebung (+ Aufdoppelg.)Abb. 57-59: **Typ XV.** / biax. Kreuz C 170 ohne Verklebung (Ref) + Aufdoppelung.Abb. 60-62: **Typ XVI.** / biax. Kreuz C 170 mit Verklebung (SAS) + Aufdoppelung.Abb. 63 und 64: K-D-Diagramme von **Typ XV.** (Ref) und **Typ XVI.** (SAS).*

* Siehe auch nachfolgende Anmerkung zu Abb. 65-71.

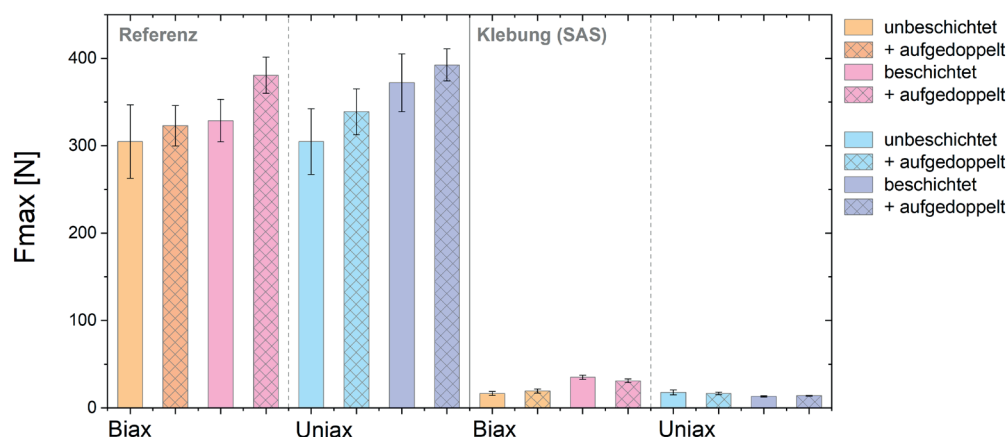


Abb. 65: Durchschnittliche Höchstzugkraft** in Schussrichtung; intakte Referenzen und verklebte Proben der uni- und biaxialen Prüfungen im Vergleich.

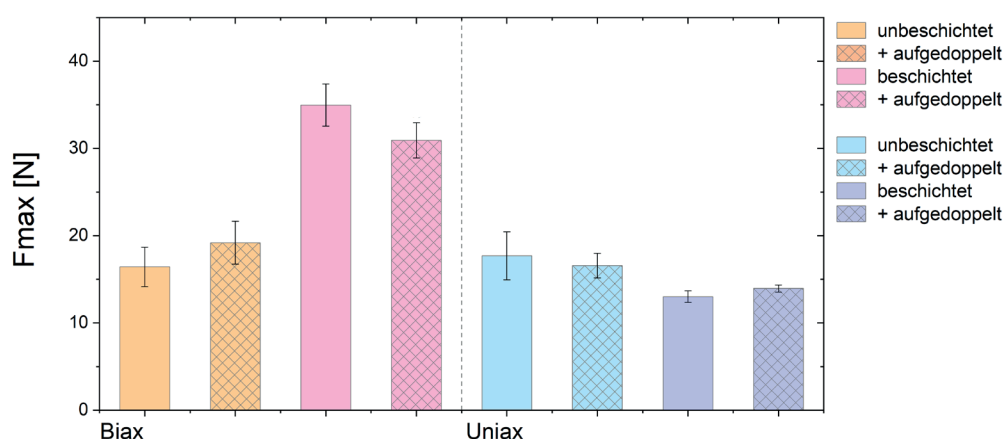


Abb. 66: Durchschnittliche Höchstzugkraft** der Verklebungen in Schussrichtung; verklebte Proben der uni- und biaxialen Prüfungen im Vergleich.

** Anmerkung zu Abb. 65-71:

Die Beurteilung der Klebungsöffnung sowie des vollständigen Klebungsversagens in den biaxial geprüften Proben mit Beschichtung muss als unpräzise ausgewiesen werden. Die hier aufgeführten Werte der Höchstzugkraft und -dehnung der Verklebungen stellen sich als verfälscht dar. Das Versagen der Klebung war mit keinem Kraftabfall und erst im Zuge des weiteren Prüfungsverlaufs mit einer verstärkten Zunahme der via DIC ermittelten Dehnung verbunden. Die Feststellung des Versagens erfolgte zu Vergleichszwecken daher zunächst rein optisch anhand der parallel zur Prüfung aufgezeichneten Bilddaten und fällt daher gleich der ersten erkennbaren Öffnung aus. Im Vergleich mit den anderen uni- und biaxial geprüften Proben wird zudem deutlich, dass auf Grund der versteifenden Beschichtung sowie Probekörpergeometrie wohl weniger eine tatsächliche Zunahme der Verklebungsfestigkeiten vorliegt, als vielmehr ein verbesserter Formerhalt bei Klebungsöffnung sowie insbesondere eine entlastende Kraftübertragung auch seitlich des evaluierten, verklebten Probenmittelbereichs innerhalb der beschichteten Gewebereiche.

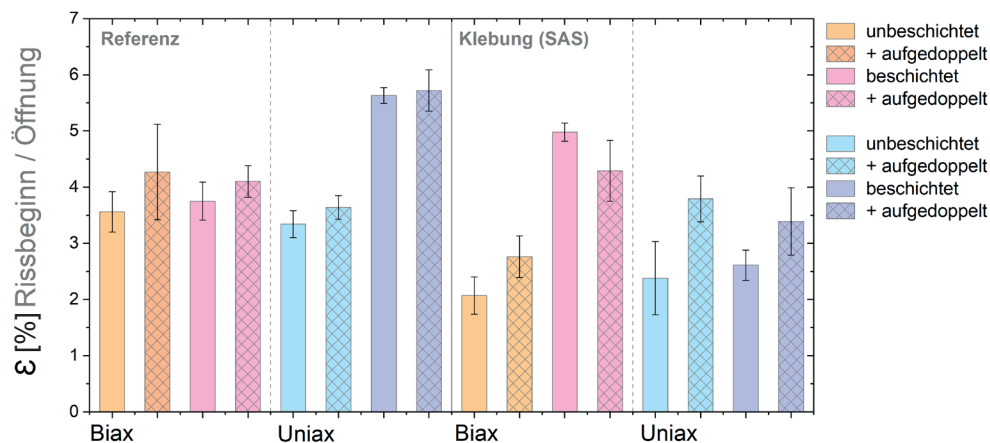


Abb. 67: Durchschnittliche Dehnung** in Schussrichtung (im Mittelbereich der uni- und biaxial geprüften Probentypen) bei beginnendem Riss (Ref) bzw. erkennbarem Klebungsversagen durch beginnende Öffnung (SAS).

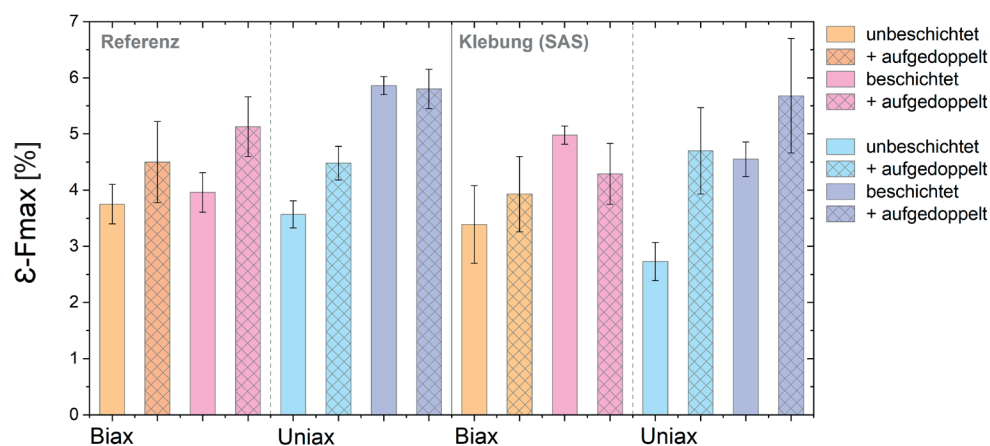


Abb. 68: Durchschnittliche Höchstzugkraftdehnung** in Schussrichtung (im Mittelbereich der uni- und biaxial geprüften Probentypen).

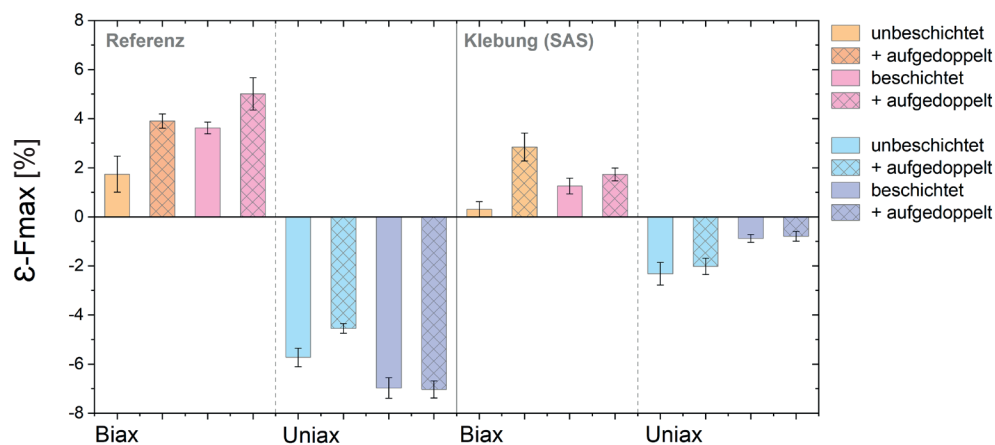


Abb. 69: Durchschnittliche Dehnung in Kettrichtung bei Höchstzugkraft** in Schussrichtung (im Mittelbereich der uni- und biaxial geprüften Probentypen).

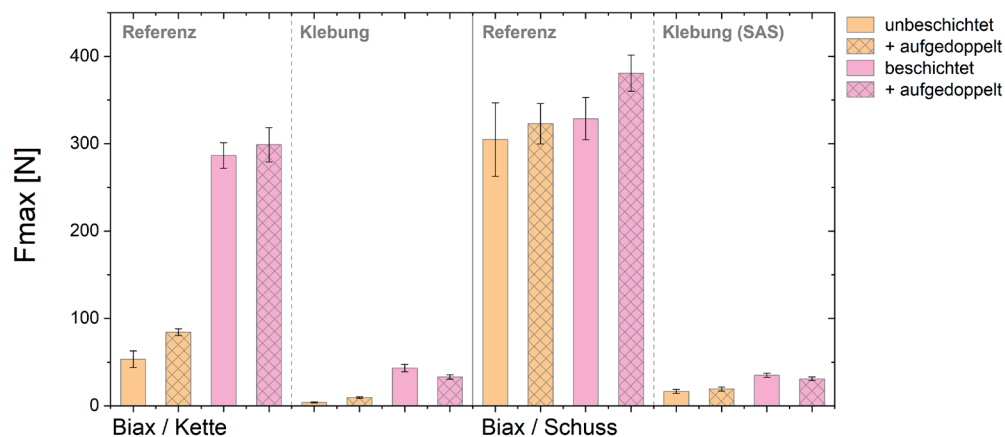


Abb. 70: Durchschnittliche Kraft bei Probenversagen in Kett- und Schussrichtung der biaxial geprüften Probentypen; da das Schusssystem in der Regel zuerst reißt / sich die Klebung im Schusssystem der Probe befindet, zeigt das Diagramm die parallel in Kettrichtung gemessene Kraft bei Höchstzugkraft** in Schussrichtung.

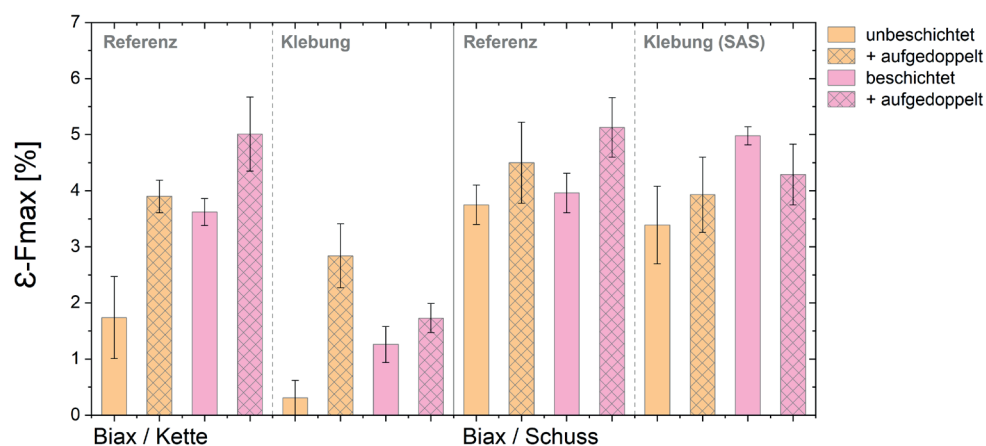


Abb. 71: Durchschnittliche Dehnung bei Probenversagen im Mittelbereich der Kett- und Schussrichtung der biaxial geprüften Probentypen; da das Schusssystem in der Regel zuerst reißt / sich die Klebung im Schusssystem der Probe befindet, zeigt das Diagramm die parallel in Kettrichtung gemessene Dehnung bei Höchstzugkraftdehnung** in Schussrichtung.

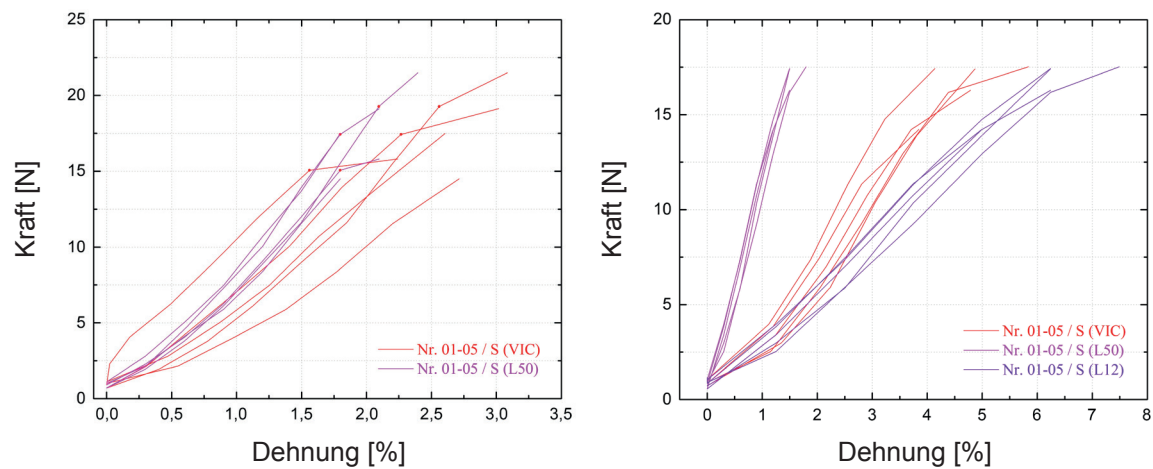


Abb. 72 und 73: Vergleich der Dehnungsauswertung via Längenänderung (L) und DIC (VIC) an **Typ II.** / uniax. Streifen C 070 mit Verklebung (SAS) und **Typ IV.** / uniax. Streifen C 070 mit Verklebung (SAS) + Aufdoppelung. L50: Einspannlänge gesamt, L12: Länge des Freibereichs nach Aufdoppelung.

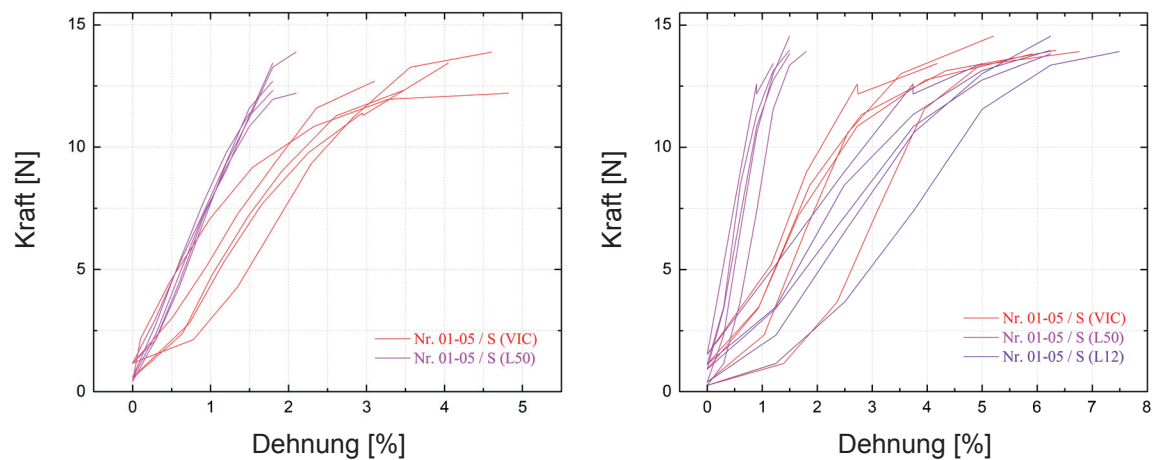
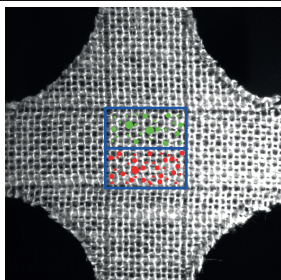
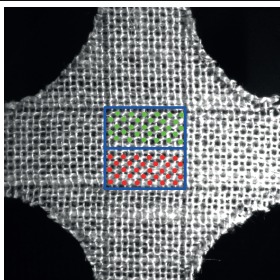
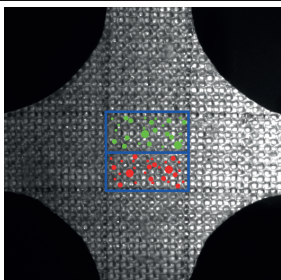
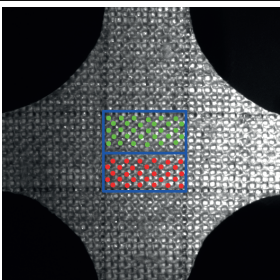
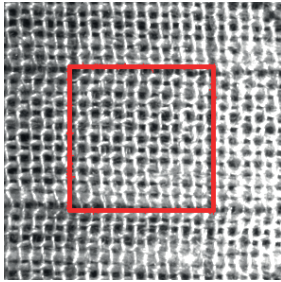
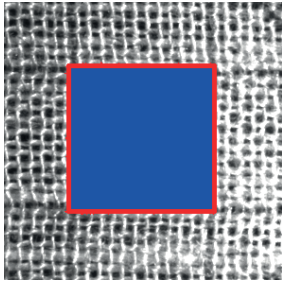
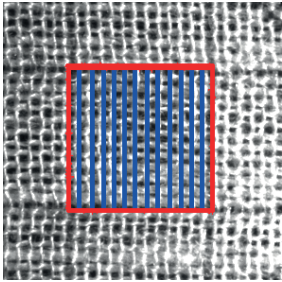
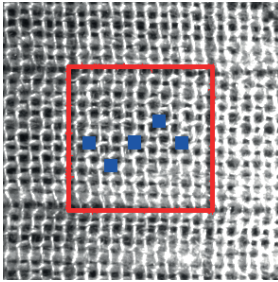


Abb. 74 und 75: Vergleich der Dehnungsauswertung via Längenänderung (L50, L12) und DIC (VIC) an **Typ VI.** / uniax. Streifen C 170 mit Verklebung (SAS) und **Typ VIII.** / uniax. Streifen C 070 mit Verklebung (SAS) + Aufdoppelung. L50: Einspannlänge gesamt, L12: Länge des Freibereichs nach Aufdoppelung.

A.2.4 Dehnungsevaluierung (Exkurs)

Probekörper			
Gewebe	1.	Claessens Canvas 070, unbeschichtet (C 070)	
	2.	Claessens Canvas 170, acrylgründiert (C170)	
Probekörpertyp		Unverklebte Referenz	
Varianten (je n = 5)	I.	C 070	Ohne (bzw. transparentes Specklemuster)
	II.		Mit Specklemuster (schwarz)
	III.	C 070	Ohne (bzw. transparente Punktmarkierung)
	IV.		Mit Punktmarkierung auf Schussrichtung (schwarz)
	V.	C 170	Ohne (bzw. transparentes Specklemuster)
	VI.		Mit Specklemuster (schwarz)
	VII.	C 170	Ohne (bzw. transparente Punktmarkierung)
	VIII.		Mit Punktmarkierung auf Schussrichtung (schwarz)
Muster-/Markierungsauftrag im Mittelfeld	A.	Speckleauftrag mit transparenter / schwarzer Sprühfarbe	
	B.	Markierung der Schussfäden auf den Bindungspunkten mit transparentem / schwarzem Filzschreiber	
Probengeometrie		Gewebekreuzproben (L: je 200 mm; B: 12 Fäden)	
Prüfbedingungen			
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.	
Prüfgerät		Biaxiale Zugprüfmaschine, LTM / UdS	
Prüfsoftware		HOST Bedienoberfläche	Programmierung LabView, National Instruments
		CRIO Datenaufzeichnung	
Kraftaufnehmer		100 N / 500 N	
Einspannlänge		55 mm je Achse	
Vorkraft		1 N (Schuss) / 3 N (Kette)	
Prüfgeschwindigkeit		0,18 mm/sec (~ 11 mm/min), äquibiaxial	
Dehnungsermittlung		Via digitale Bildkorrelation / DIC im Mittelbereich der Proben	
		Kamera jAi CM-200 GE, Stemmer Imaging	
		Objektiv Fujinon HF12.5SA-1 (2/3“ 12,5mm f 1.4)	
		Software VIC 2D, Correlated Solutions	
Probenmuster			
			
I.+II.		III.+IV.	
			
V.+VI.		VII.+VIII.	

Vergleich Dehnungsauswertung via DIC			
a.	Subset 49	Step 10	Auswertung des gesamten markierten Mittelbereichs, d.h. Betrachtung von Kett- und Schussfäden gleichzeitig (12 x 12 Fäden, Einstellungen Lagrange + incremental correlation, ϵ_{yy} / Schussachse und ϵ_{xx} / Kettachse)
b.	Subset 21	Step 6	
c.	Subset 11	Step 3	
d.	Subset 9	Step 3	Alternativ: Auswertung auf Einzelfadenverlauf der Schussrichtung, mit kreuzenden Kettfäden, jedoch ohne Leerflächen im Bindungsmuster oder freie Kettfäden.
e.	Subset 9	Step 1	Alternativ: 5 Einzelpunktauswertungen der Schussrichtung auf Bindungspunkten in Probenmitte. Bildung des Mittelwerts.

			
Mittelbereich	a-c.	d.	e.

Auf die detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Versuchsstatistik wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung ausgewählter Auswertungen:

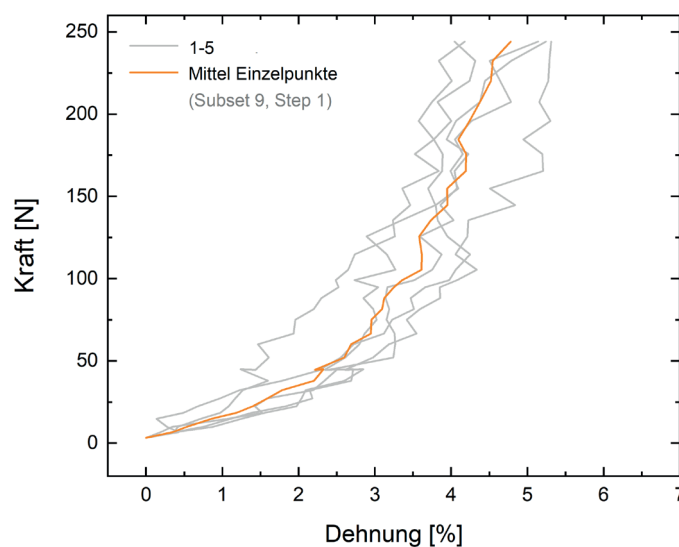


Abb. 01: Exemplarische Probe **C 070 mit Specklemuster (II.)**.
Ausschnitt der Kurven des Kraft-Dehnungs-Diagramms der Schussrichtung bei Dehnungsauswertung des **Typ e**.

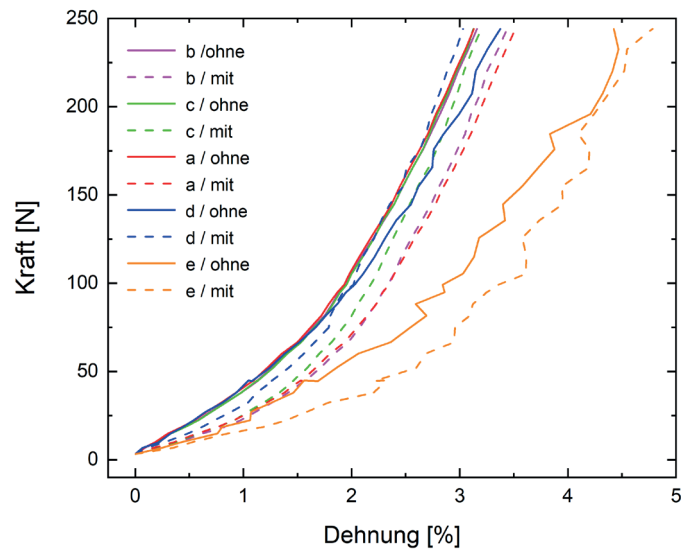


Abb. 02: Exemplarische Probe **C 070 ohne / mit Specklemuster** (I. + II.).
Ausschnitt der Kurven des Kraft-Dehnungs-Diagramms der Schussrichtung bei unterschiedlicher Dehnungsauswertung der Typen a-e.

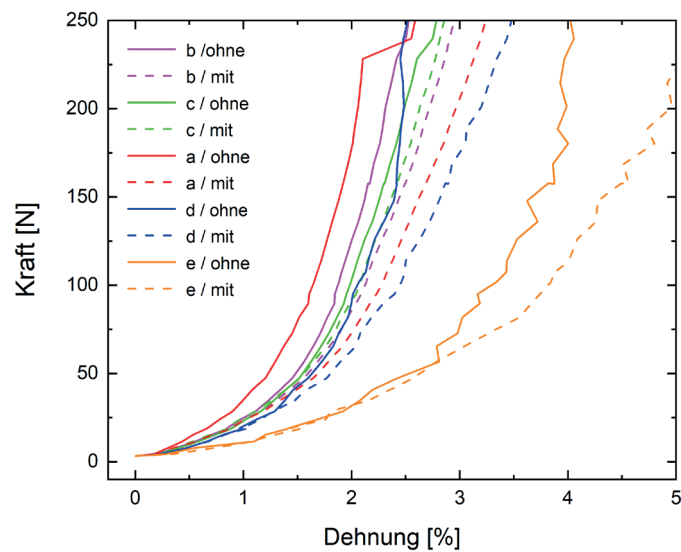


Abb. 03: Exemplarische Probe **C 070 ohne / mit Punktemarkierung** (III. + IV.).
Ausschnitt der Kurven des K-D-Diagramms der Schussrichtung bei unterschiedlicher Dehnungsauswertung der Typen a-e.

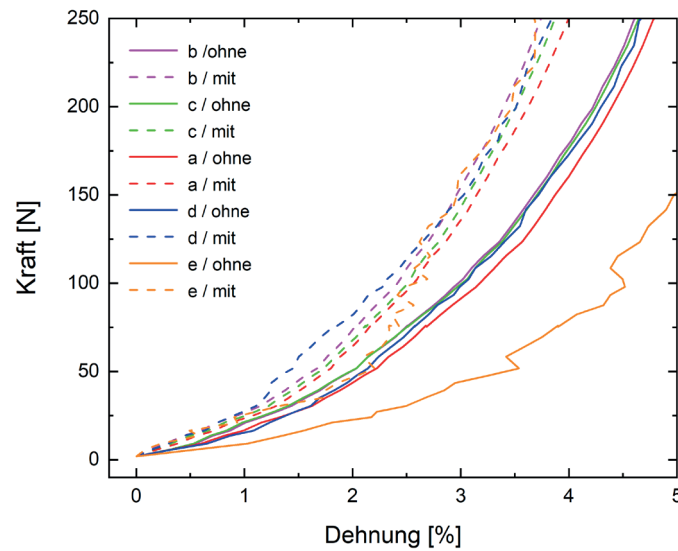


Abb. 04: Exemplarische Probe **C 170 ohne / mit Specklemuster** (V. + VI.).
Ausschnitt der Kurven des K-D-Diagramms der Schussrichtung bei unterschiedlicher Dehnungsauswertung der Typen a-e.

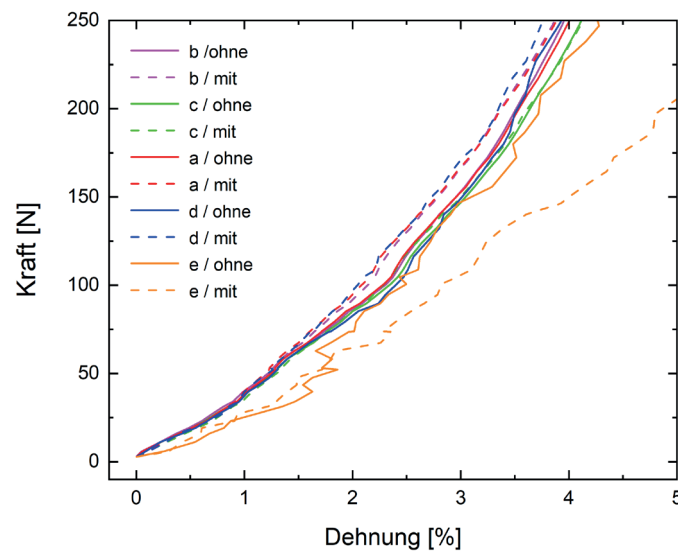


Abb. 05: Exemplarische Probe **C 170 ohne / mit Punktemarkierung** (VII. + VIII.);
Ausschnitt der Kurven des K-D-Diagramms der Schussrichtung bei unterschiedlicher Dehnungsauswertung der Typen a-e.

A.3 Biaxiale Langzeitversuche

Probekörper			
Gewebe		Claessens Canvas 170, acrylgründiert (C 170)	
Probekörpertyp	A.	Unverklebte Referenz mit Schnitt (Ref), beschichtet (n = 1)	
	B.	Verklebte Proben (SAS / SAS+B), beschichtet (n = 5)	
Klebstoffauswahl und Verklebungstechnik	1.	Lineco + Methocel A4C 5 % (9:1) / Stoß-auf-Stoß (SAS)	
	2.	Lineco + Methocel A4C 5 % (9:1) / Stoß-auf-Stoß mit Fadenbrücken (SAS+B)	
	3.	Störleim 25 % + Arbocel BWW 40 (19:1) / Stoß-auf-Stoß (SAS)	
	4.	Störleim 20 % + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1) / Stoß-auf-Stoß (SAS)	
Probengeometrie		Flächiger Gewebezuschnitt (siehe B.1), Prüffläche 200 x 200 in mm²	
Verklebung		Im durchtrennten Schussystem (B: 13 Fäden) in Probenmitte	
Prüfbedingungen			
Klima (Herstellung, Lagerung, Prüfung)		17-23 °C, 50-60 % r.F.	
Prüfaufbau		Äquibiaxiale Zugrahmen (siehe B.5)	
Konstante Last und theoretische breitenbezogene Ersatzspannung	Tag 1-3	1,2 kg Eigengewicht + schrittweise Sandzulage	
	Tag 3-48	3,7 kg (1,2 kg Eigengewicht + 2,5 kg Sand)	~ 130 N/m
	Tag 48-83	4,7 kg (1,2 kg Eigengewicht + 3,5 kg Sand)	~ 165 N/m
	Tag 83-117	5,7 kg (1,2 kg Eigengewicht + 4,5 kg Sand)	~ 200 N/m
Dehnungsermittlung	Via digitale Bildkorrelation / DIC im Mittelbereich der Proben		
	Kamera Manta G-235B, Allied Vision		
	Objektiv Fujinon HF12.5SA-1 (2/3“ 12,5mm f 1.4)		
	Software VIC 2D, Correlated Solutions		

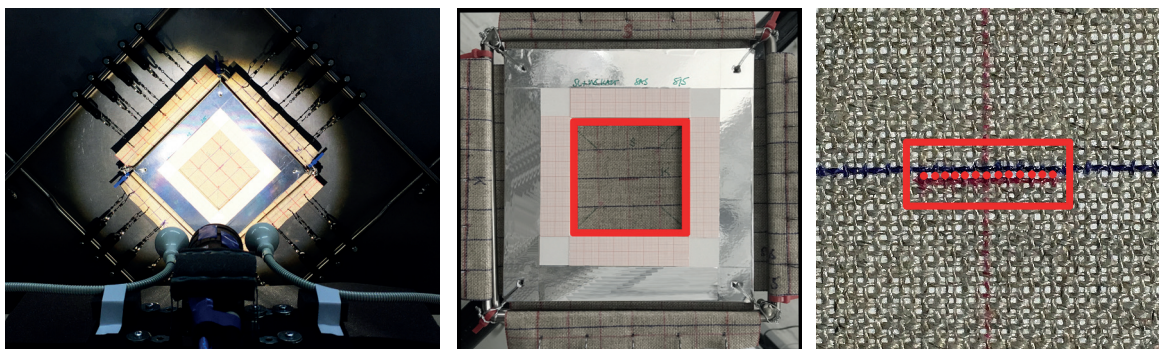


Abb. 01-03: Veranschaulichung der Fotodokumentation während der Versuchsdauer und anschließenden Dehnungsauswertung der Schuss- und Kettrichtung am um 45 ° gedrehten Bild im sichtbaren Gesamtbereich sowie im Probenzentrum mit Verklebung.

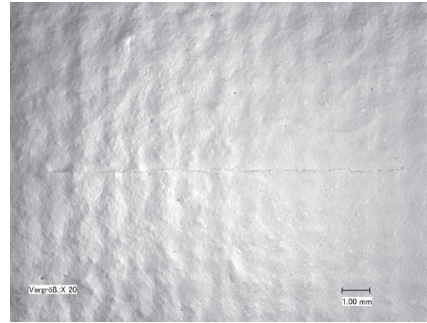
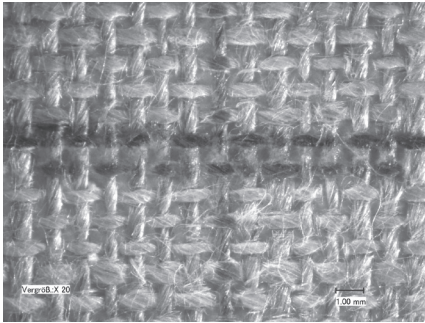
Exemplarische Detailansichten der Probentypen

Abb. 04 und 05: **Lineco + Methocel A4C (SAS).**

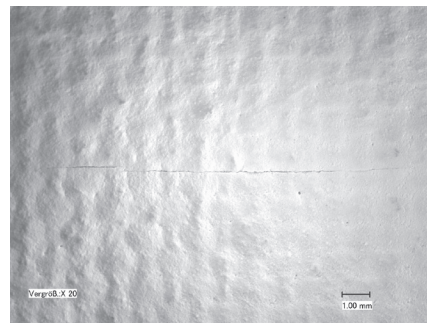
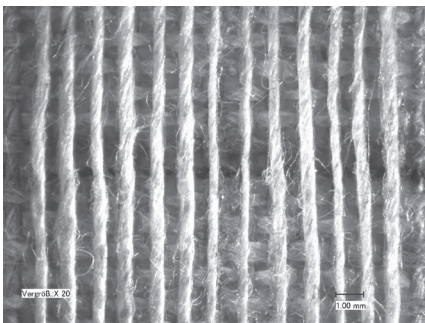


Abb. 06 und 07: **Lineco + Methocel A4C (SAS+B).**

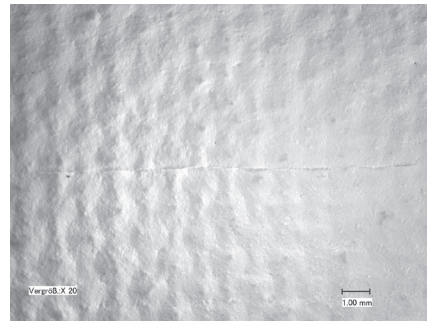
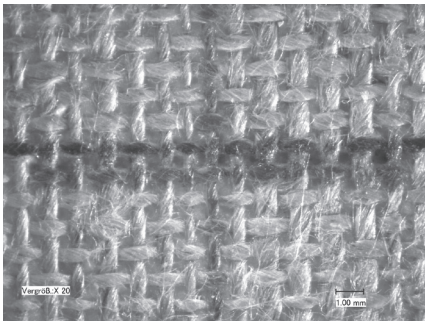


Abb. 08 und 09: **Störleim + Arbocel BWW 40.**

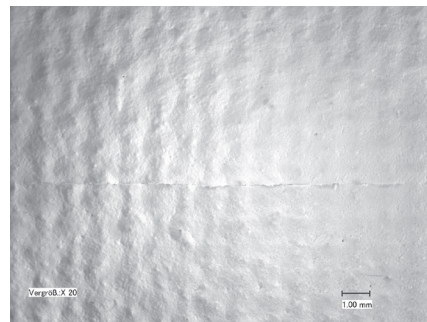
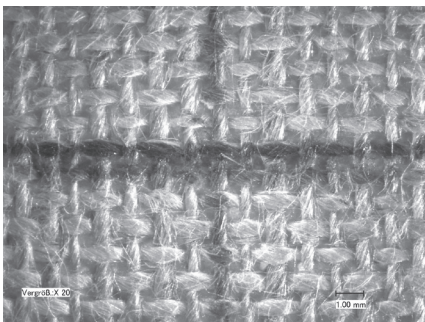


Abb. 10 und 11: **Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert.**

Auf die Listung der Ergebnisse der Dehnungsauswertung wird zur Begrenzung des Umfangs verzichtet. Weiterführende Datensätze wurden von der Verfasserin archiviert. Es folgt die Darstellung der Einzelversuche anhand der erstellten Dehnungs-Zeit-Diagramme und zusammenfassender Auswertungen:

A.3.1 Dokumentation der Einzelversuche

Dargestellt sind jeweils die Dehnungsentwicklung in Schuss- und Kettrichtung im ausgewerteten Gesamtbereich sowie im Probenzentrum mit unverklebtem Schnitt (Referenz) bzw. Verklebung (alle anderen im Proben) im Schusssystem (s. Abb. 01-03).

Referenz (unverklebter Schnitt)

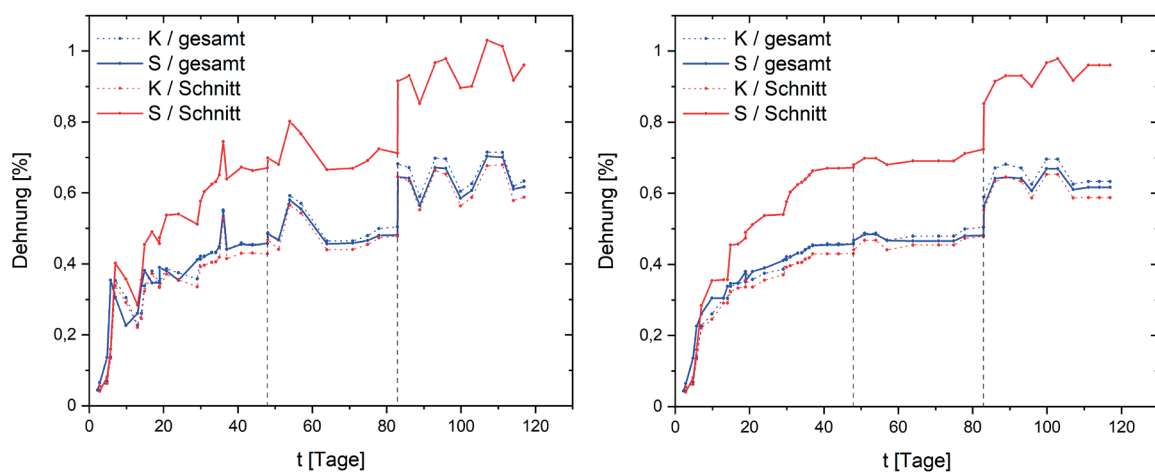


Abb. 12 und 13: D-Z-Diagramm der **Referenzprobe** in Rohversion und leicht geglättet.

1. Lineco + Methocel A4C (SAS)

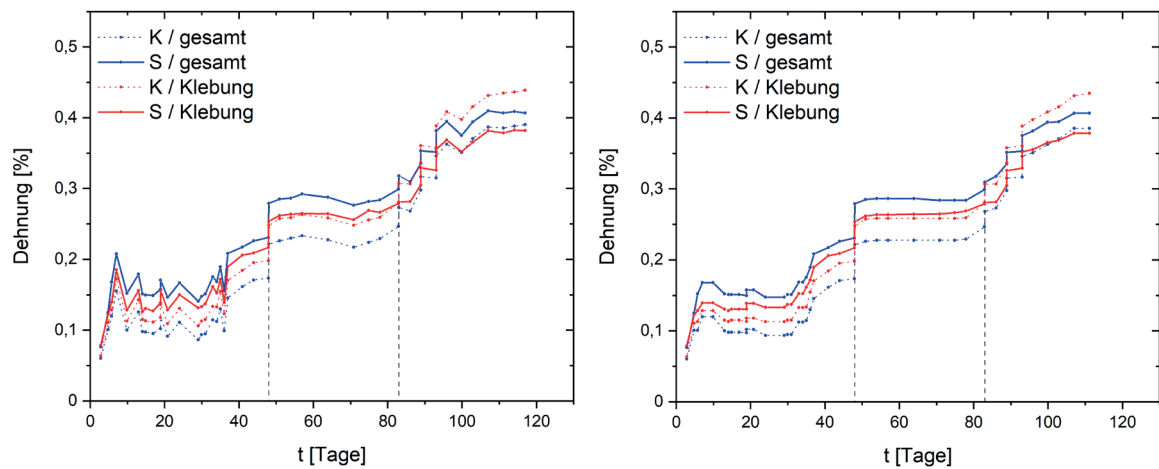


Abb. 14 und 15: D-Z-Diagramm **Probe 1/5** Lineco + Methocel A4C, SAS (roh / geglättet).

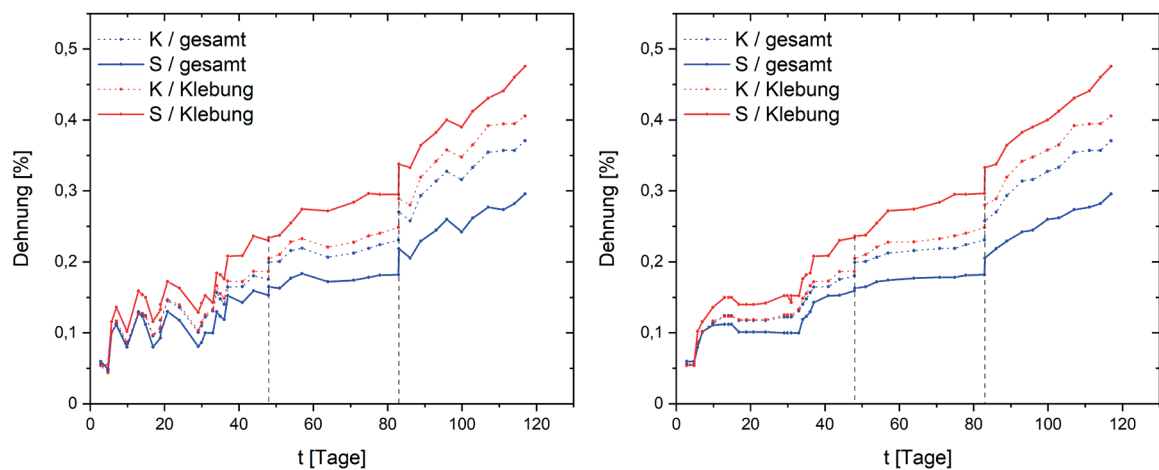


Abb. 16 und 17: D-Z-Diagramm **Probe 2/5** Lineco + Methocel A4C, SAS (roh / geglättet).

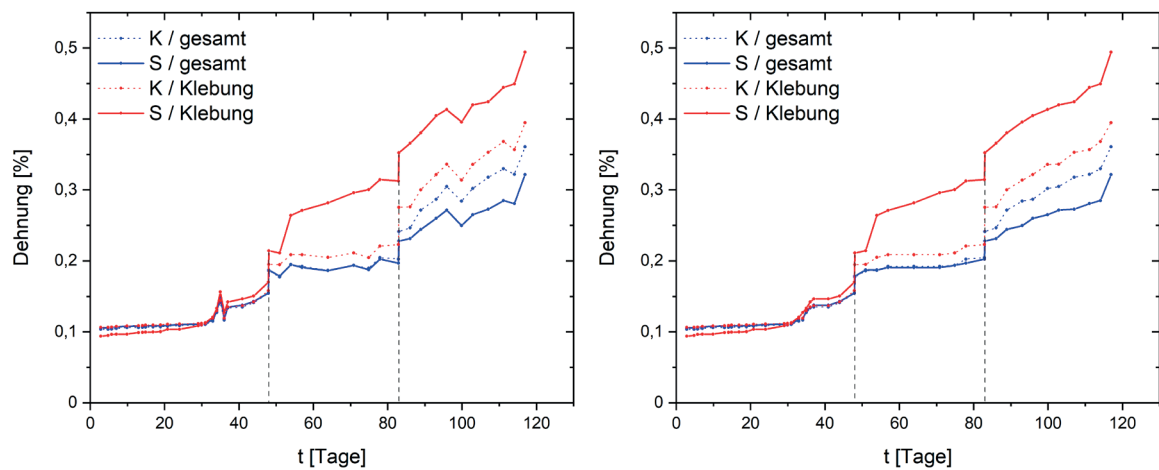
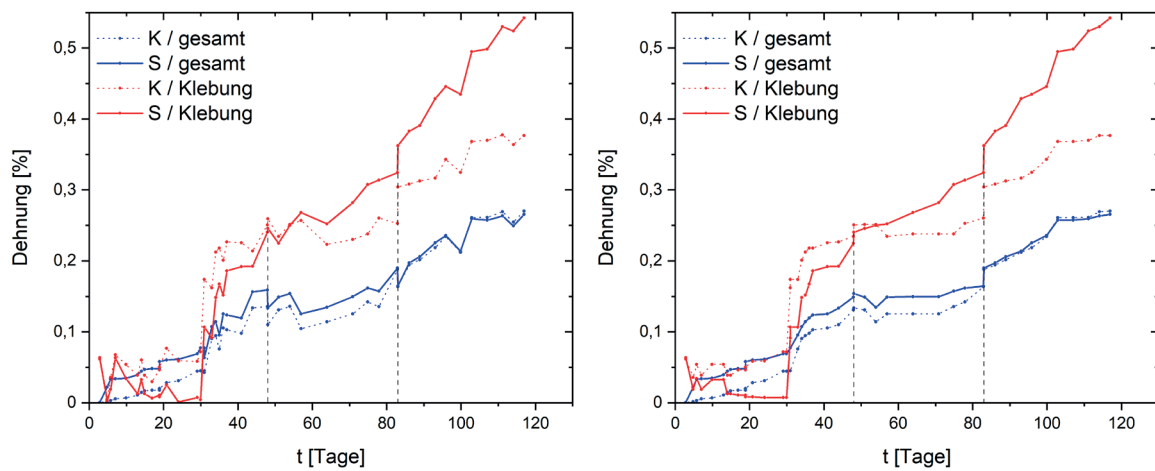
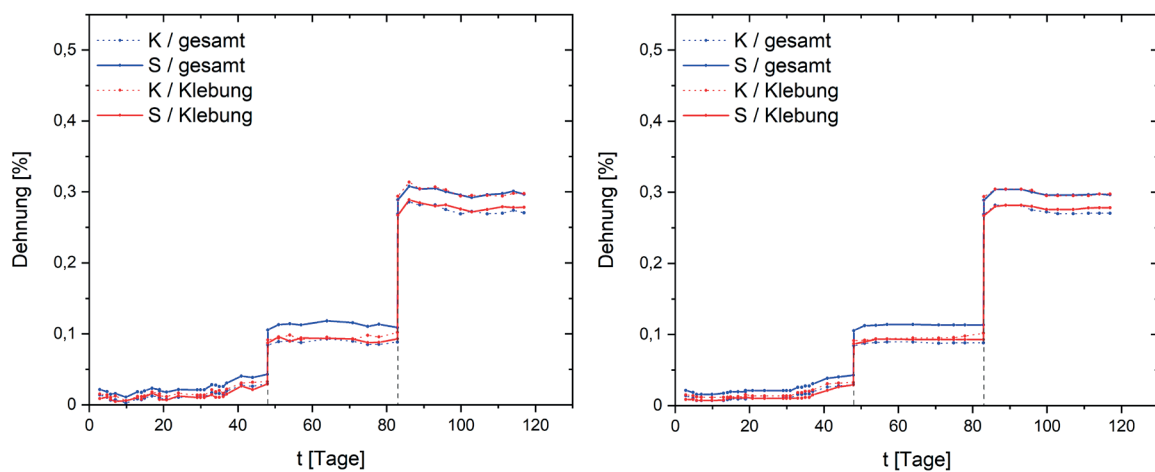


Abb. 18 und 19: D-Z-Diagramm **Probe 3/5** Lineco + Methocel A4C, SAS (roh / geglättet).

Abb. 20 und 21: D-Z-Diagramm **Probe 4/5** Lineco + Methocel A4C, SAS (roh / geglättet).Abb. 22 und 23: D-Z-Diagramm **Probe 5/5*** Lineco + Methocel A4C, SAS (roh / geglättet).

* Anmerkung zu Abb. 22 und 23:

Die Probe 5/5 von Typ 1. Lineco + Methocel A4C (SAS) wurde als einzige Probe gesondert fixiert und blieb während der gesamten Versuchsdauer vollständig unbewegt (siehe B.5). Auf Grund der Ruheposition stellen sich stark von den Proben 1-4/5 abweichende Kurvenverläufe dar.

2. Lineco + Methocel A4C (SAS+B)

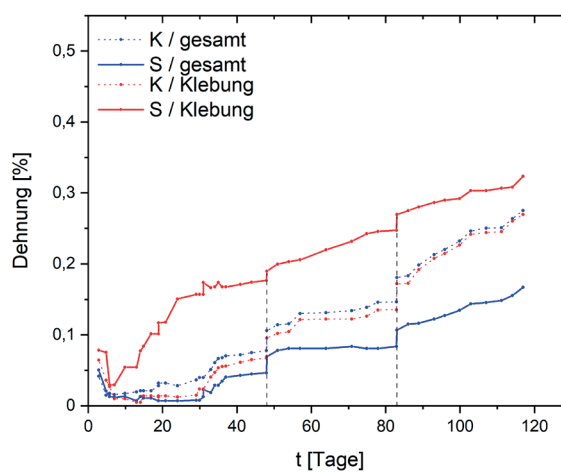
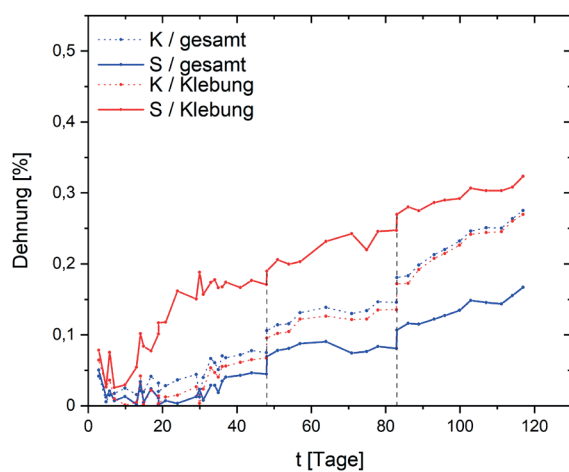


Abb. 24 und 25: D-Z-Diagramm **Probe 1/5** Lineco + Methocel A4C, SAS+B (roh / geglättet).

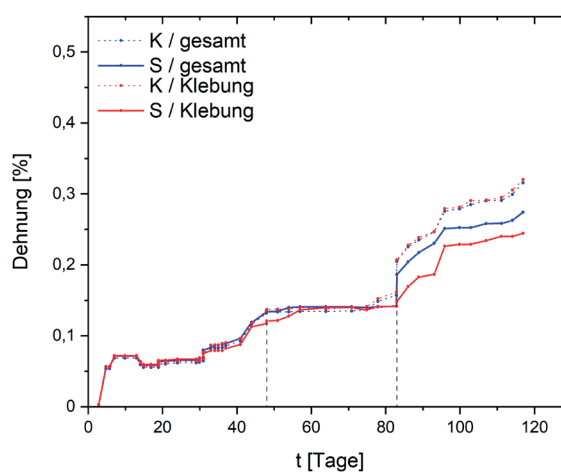
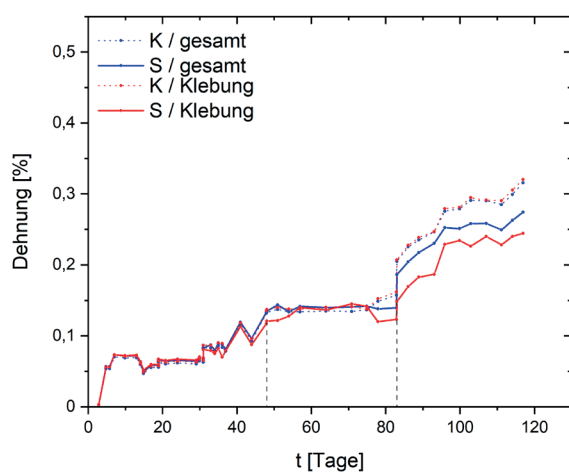


Abb. 26 und 27: D-Z-Diagramm **Probe 2/5** Lineco + Methocel A4C, SAS+B (roh / geglättet).

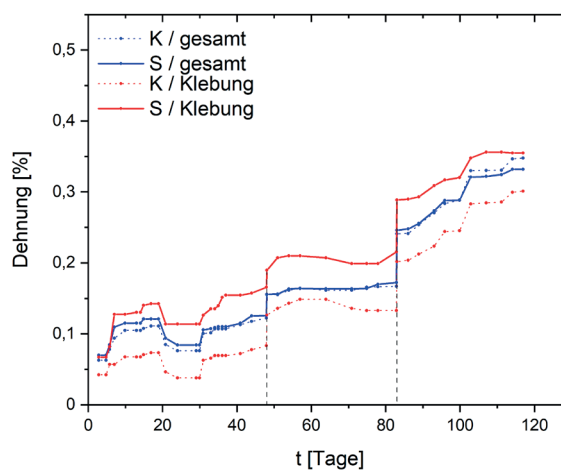
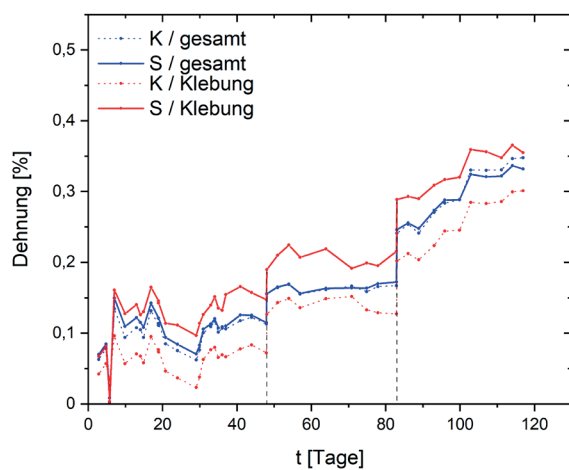
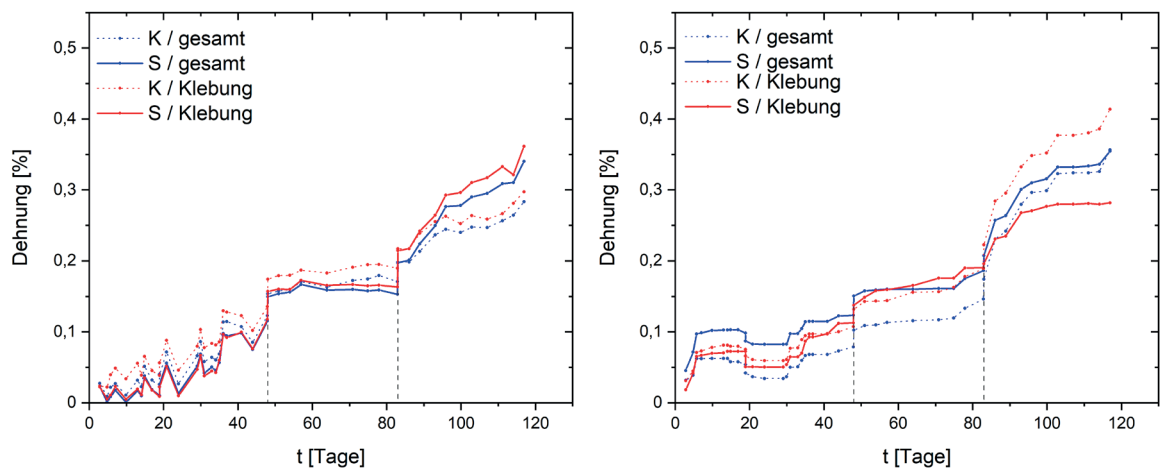
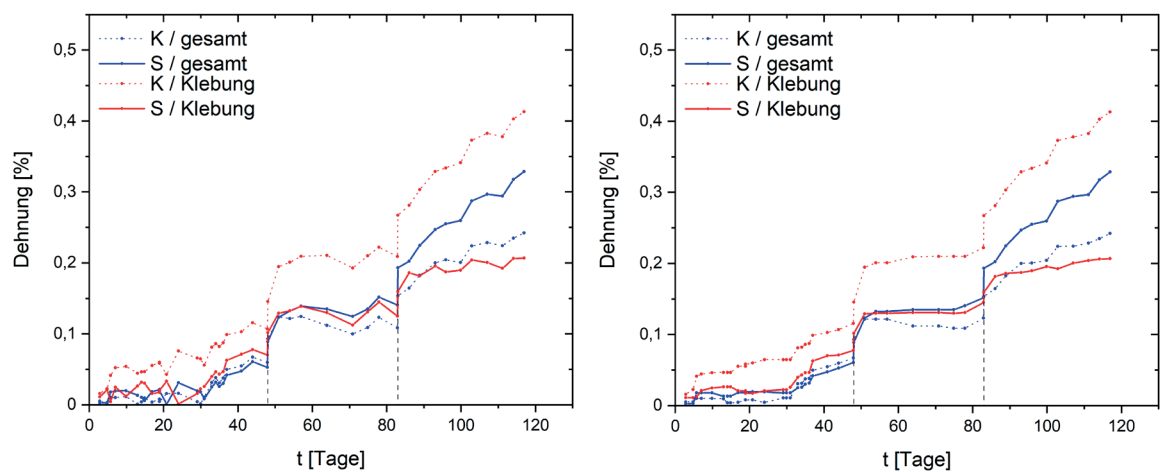


Abb. 28 und 29: D-Z-Diagramm **Probe 3/5** Lineco + Methocel A4C, SAS+B (roh / geglättet).

Abb. 30 und 31: D-Z-Diagramm **Probe 4/5** Lineco + Methocel A4C, SAS+B (roh / geglättet).Abb. 32 und 33: D-Z-Diagramm **Probe 5/5** Lineco + Methocel A4C, SAS+B (roh / geglättet).

3. Störleim + Arbocel BWW 40 (SAS)

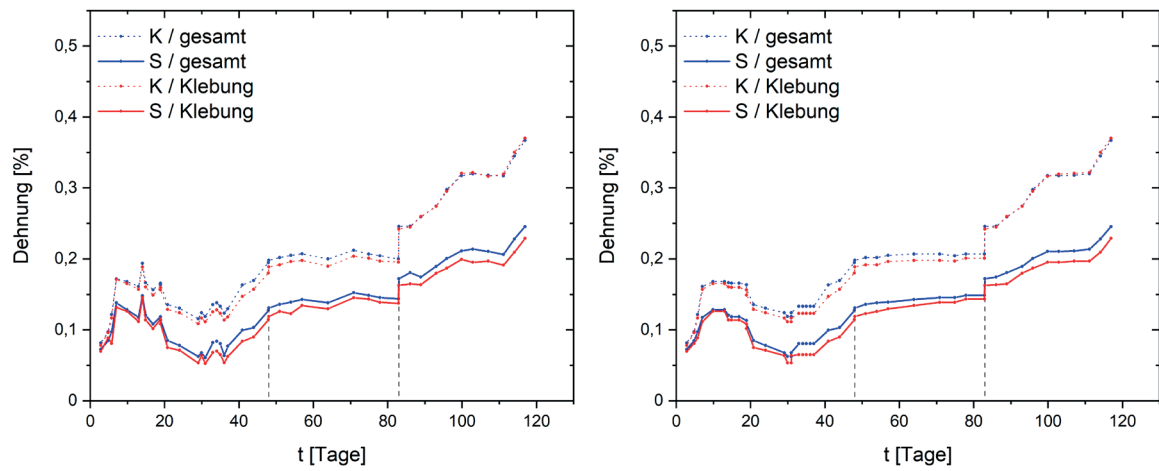


Abb. 34 und 35: D-Z-Diagramm **Probe 1/5** Störleim + Arbocel BWW 40, SAS (roh / geglättet).

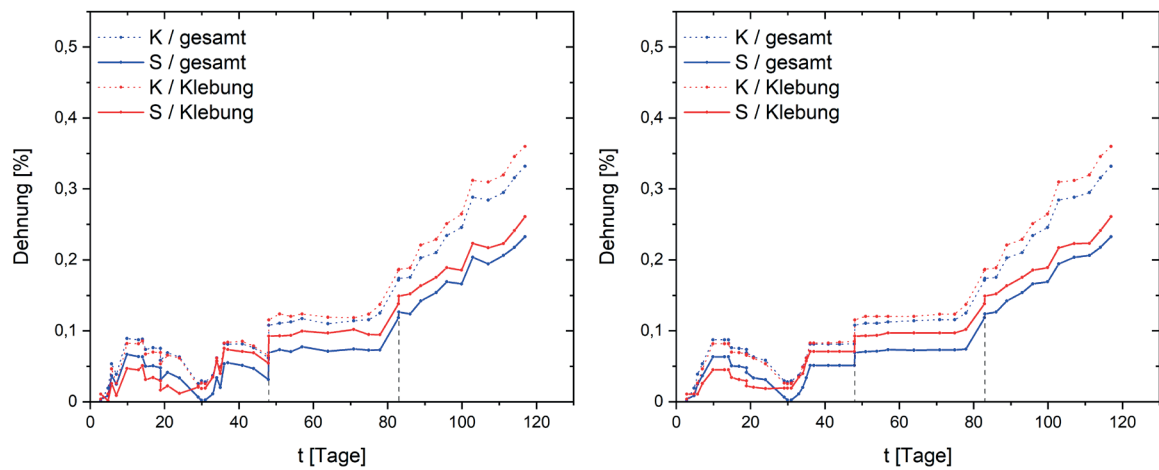


Abb. 36 und 37: D-Z-Diagramm **Probe 2/5** Störleim + Arbocel BWW 40, SAS (roh / geglättet).

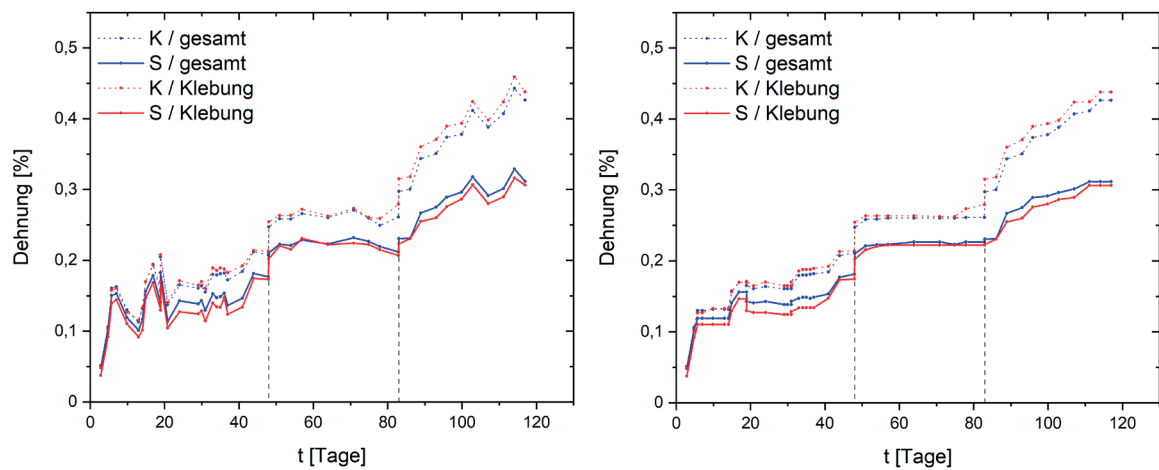
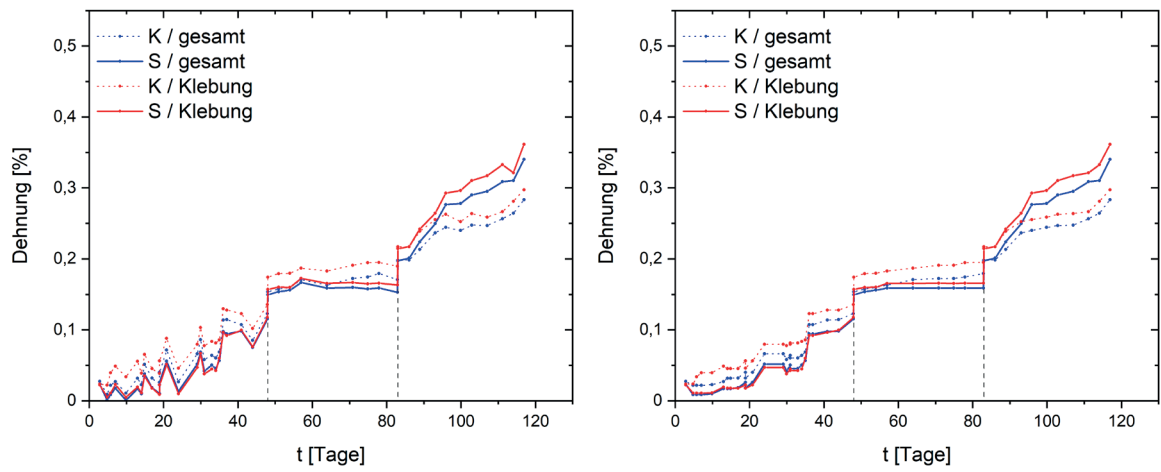
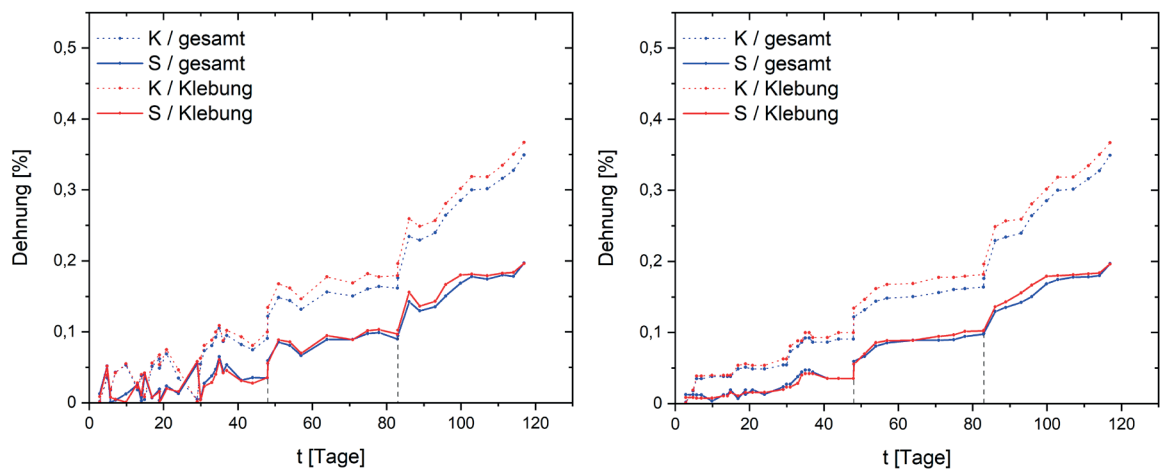


Abb. 38 und 39: D-Z-Diagramm **Probe 3/5** Störleim + Arbocel BWW 40, SAS (roh / geglättet).

Abb. 40 und 41: D-Z-Diagramm **Probe 4/5** Störleim + Arbocel BWW 40, SAS (roh / geglättet).Abb. 42 und 43: D-Z-Diagramm **Probe 5/5** Störleim + Arbocel BWW 40, SAS (roh / geglättet).

4. Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert (SAS)

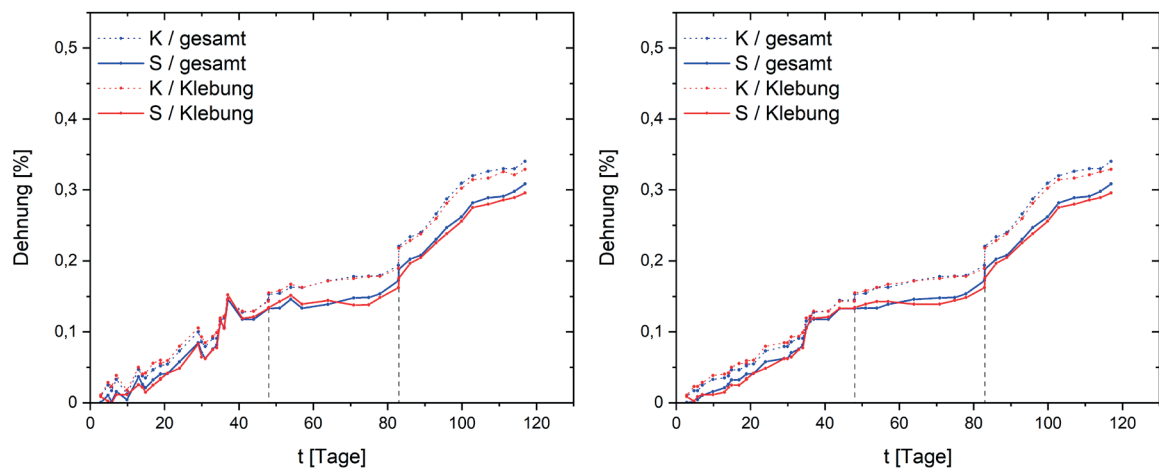


Abb. 44 und 45: D-Z-Diagramm **Probe 1/5** Störleim + WS modifiziert, SAS (roh / geglättet).

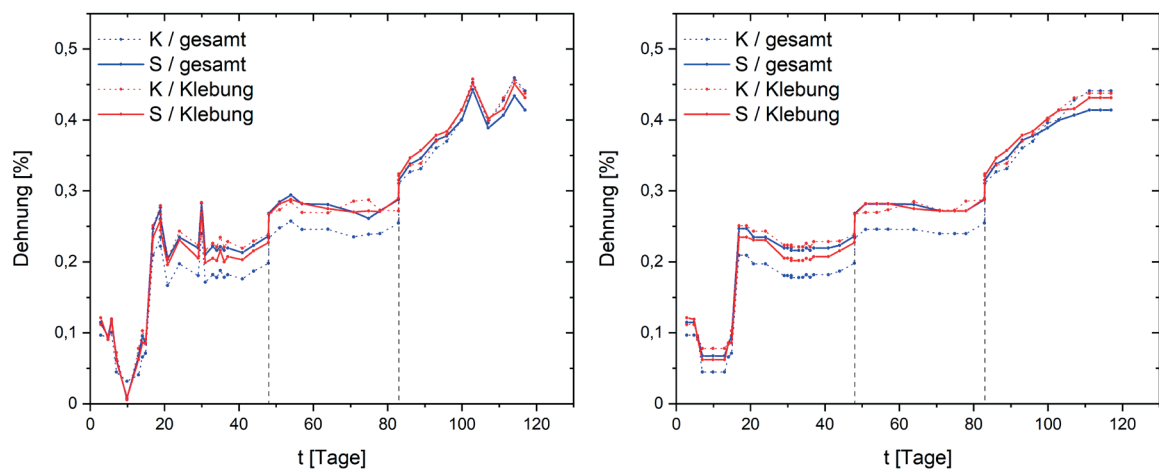


Abb. 46 und 47: D-Z-Diagramm **Probe 2/5** Störleim + WS modifiziert, SAS (roh / geglättet).

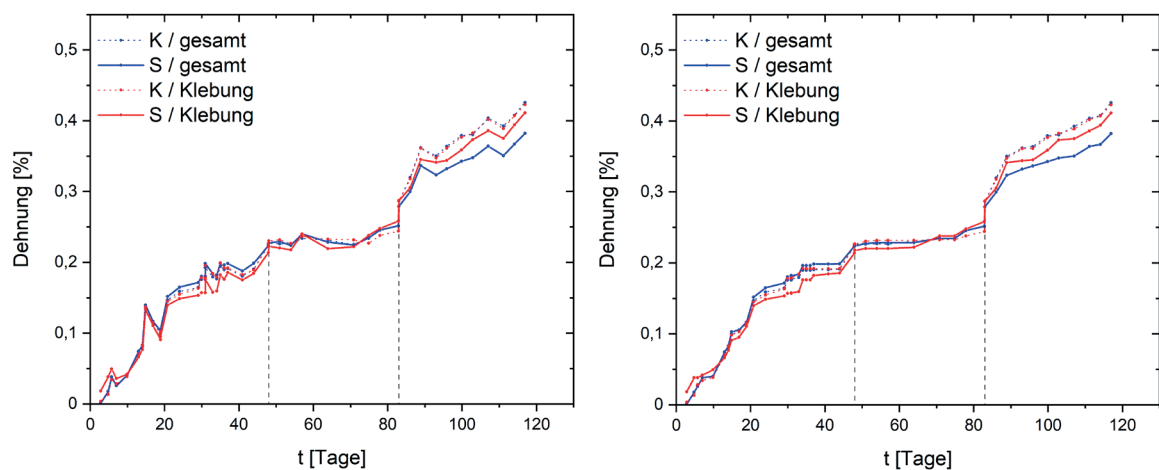


Abb. 48 und 49: D-Z-Diagramm **Probe 3/5** Störleim + WS modifiziert, SAS (roh / geglättet).

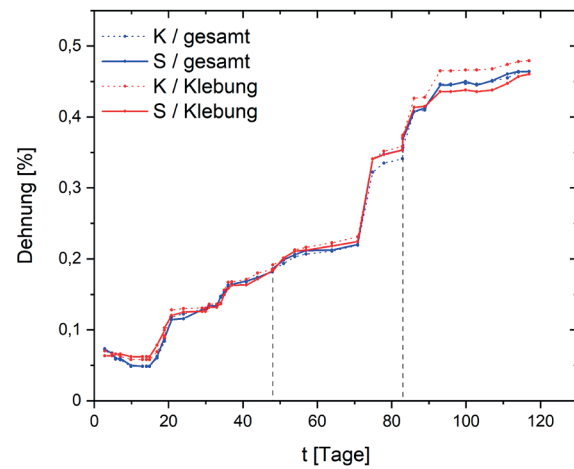
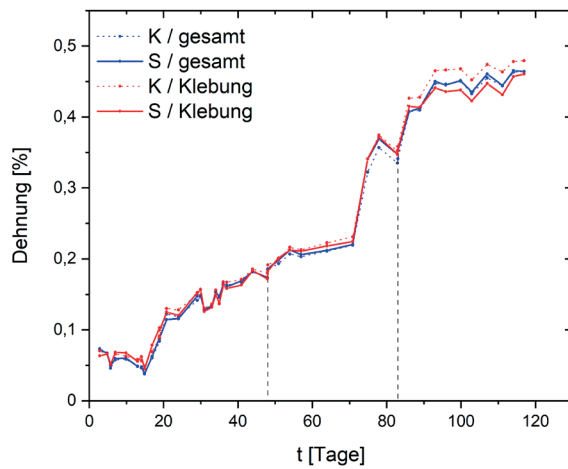


Abb. 50 und 51: D-Z-Diagramm **Probe 4/5** Störleim + WS modifiziert, SAS (roh / geglättet).

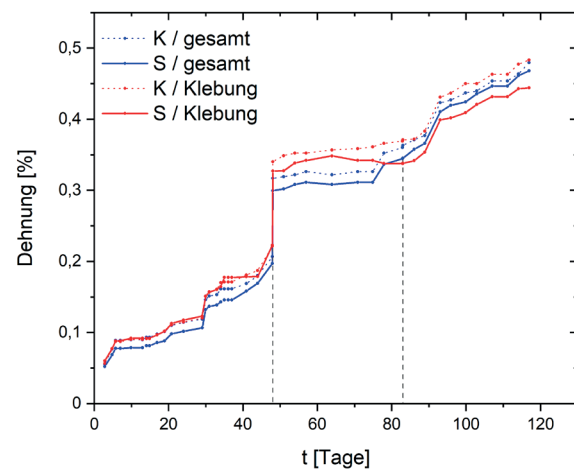
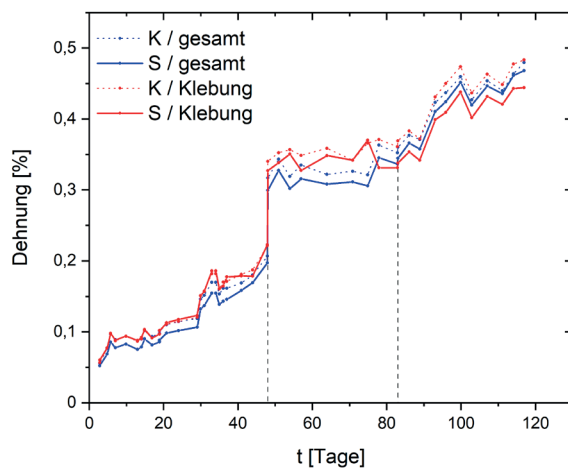


Abb. 52 und 53: D-Z-Diagramm **Probe 5/5** Störleim + WS modifiziert, SAS (roh / geglättet).

A.3.2 Einzelgruppenvergleich

Vergleich der leicht geglätteten Kurven zur Dehnungsentwicklung in Schuss- und Kettrichtung im ausgewerteten Gesamtbereich sowie im Probenzentrum mit Verklebung im Schusssystem.

1. Lineco + Methocel A4C (SAS)

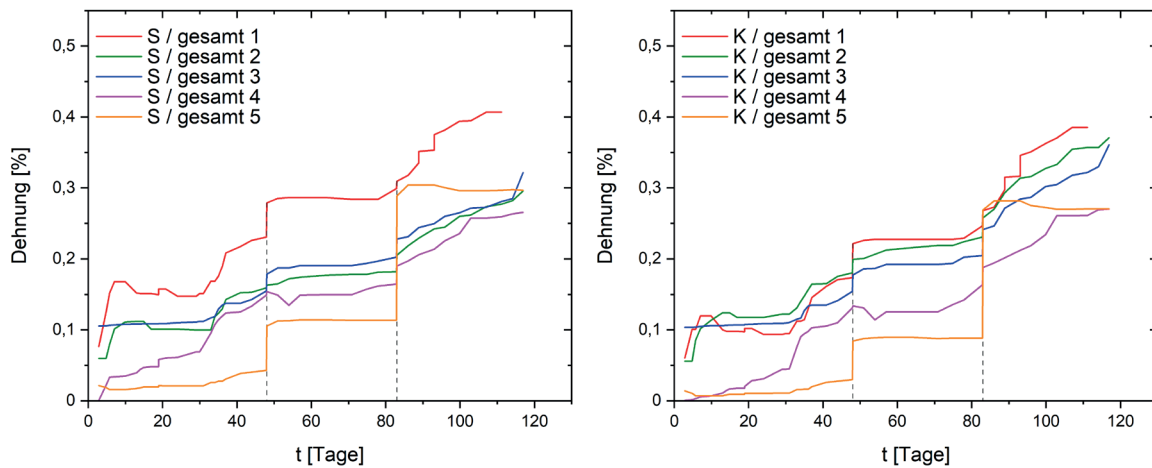


Abb. 54 und 55: D-Z-Diagramme der Proben Lineco + Methocel A4C, SAS (geglättet),
Dehnung des Gesamtbereichs in Schuss- und Kettrichtung (S/K).

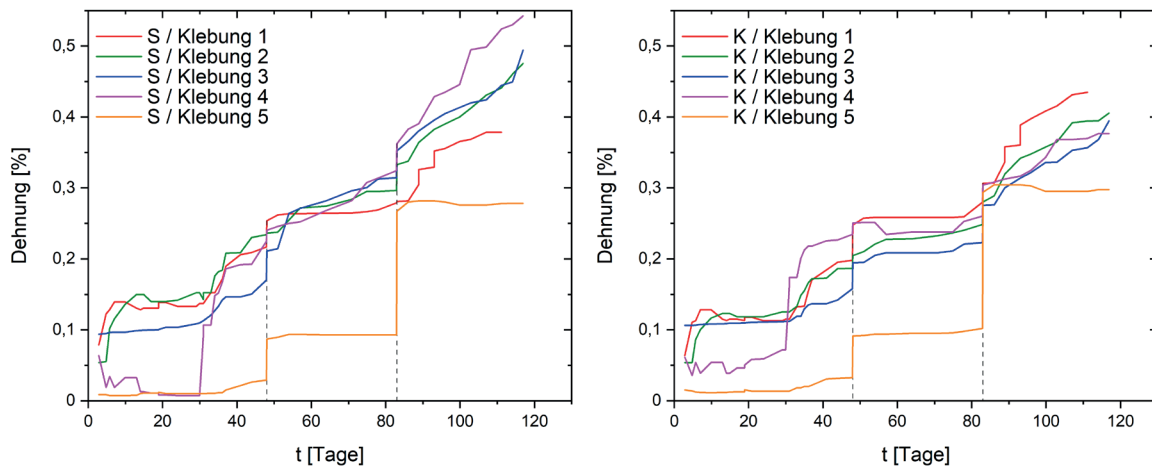


Abb. 56 und 57: D-Z-Diagramme der Proben Lineco + Methocel A4C, SAS (geglättet),
Dehnung im Bereich der Klebestelle in Schuss- und Kettrichtung (S/K).

2. Lineco + Methocel A4C (SAS+B)

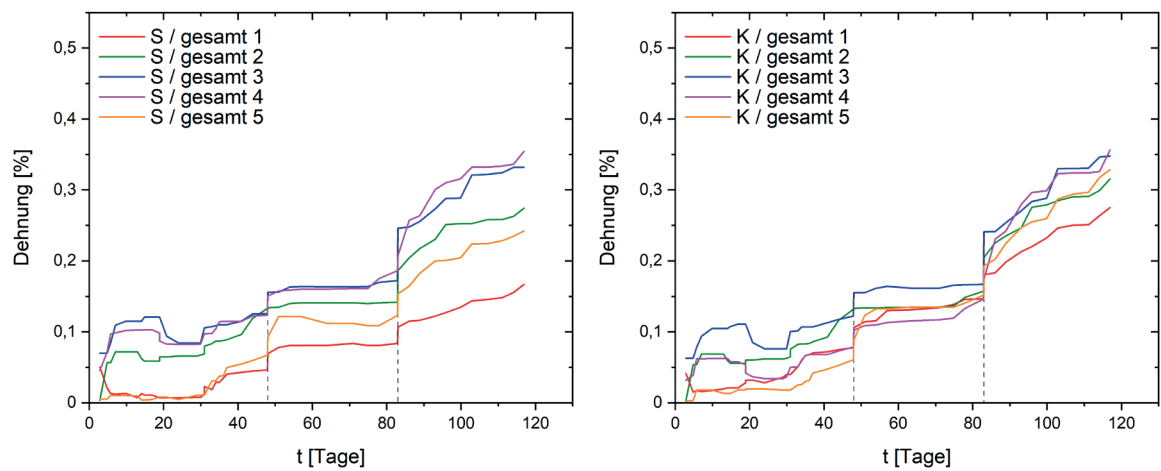


Abb. 58 und 59: D-Z-Diagramme der Proben Lineco + Methocel A4C, SAS+B (geglättet),
Dehnung des Gesamtbereichs in Schuss- und Kettrichtung (S/K).

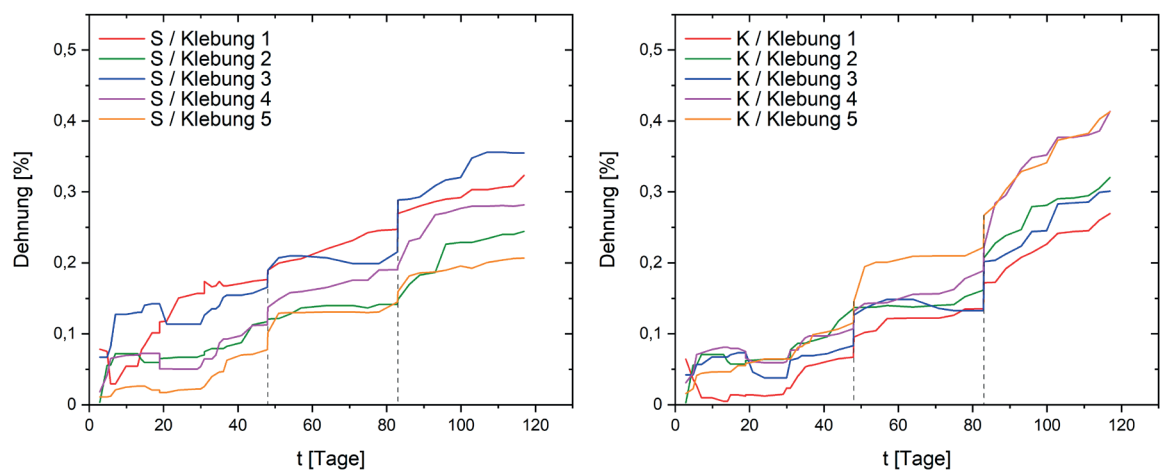


Abb. 60 und 61: D-Z-Diagramme der Proben Lineco + Methocel A4C, SAS+B (geglättet),
Dehnung im Bereich der Klebestelle in Schuss- und Kettrichtung (S/K).

3. Störleim + Arbocel BWW 40 (SAS)

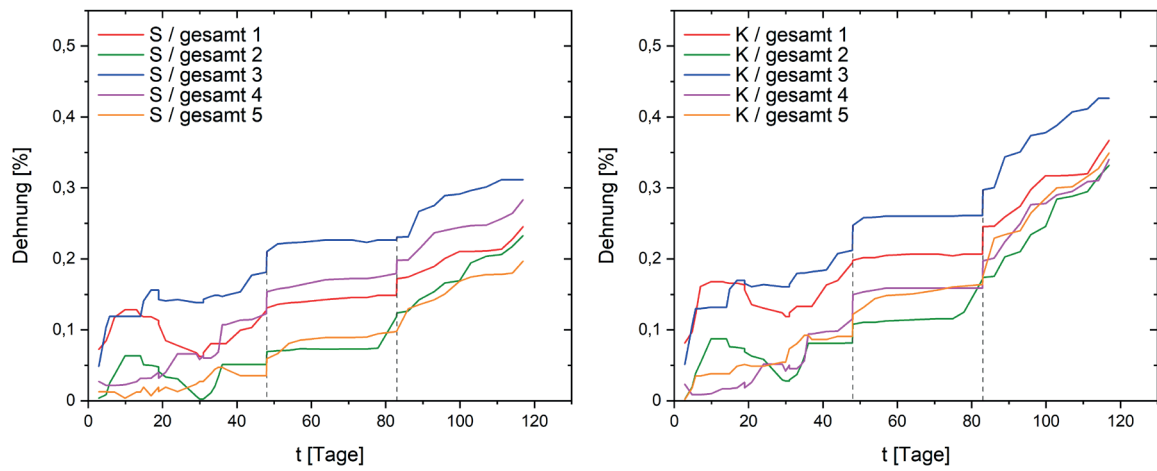


Abb. 62 und 63: D-Z-Diagramme der Proben Störleim + Arbocel BWW 40, SAS (geglättet),
Dehnung des Gesamtbereichs in Schuss- und Kettrichtung (S/K).

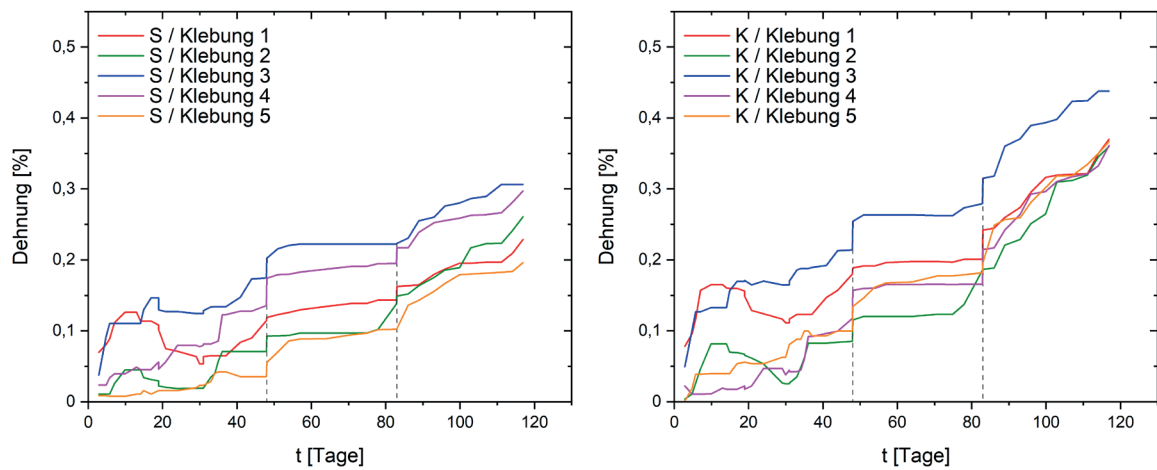
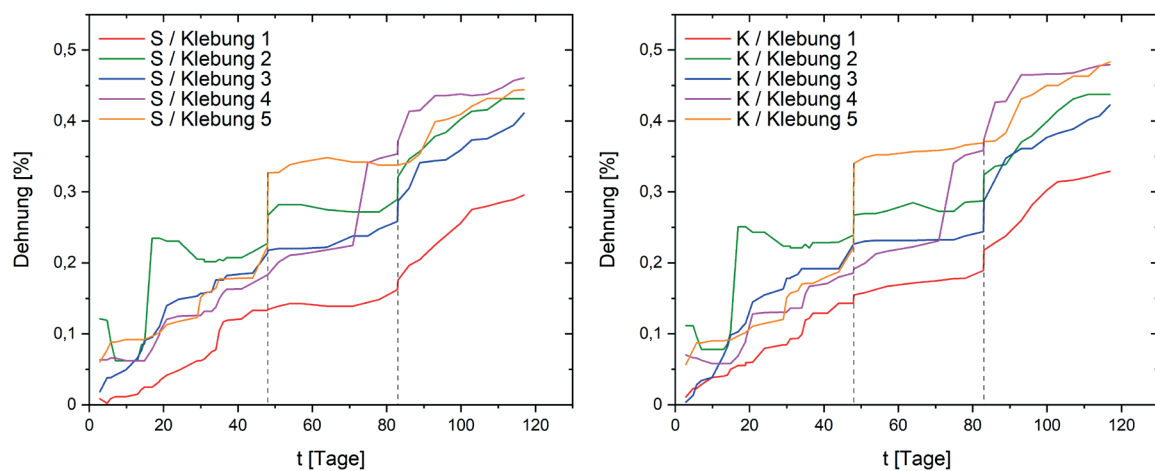
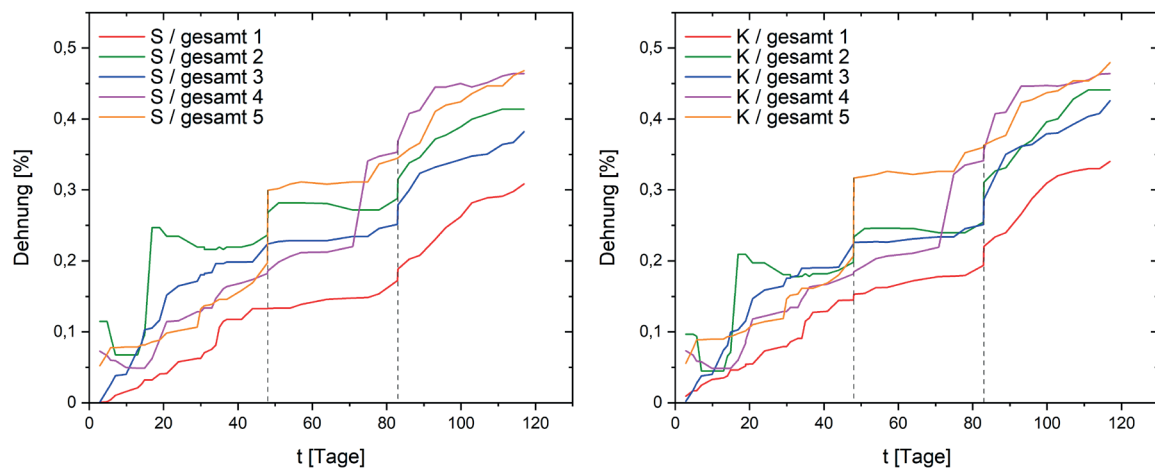


Abb. 64 und 65: D-Z-Diagramme der Proben Störleim + Arbocel BWW 40, SAS (geglättet),
Dehnung im Bereich der Klebestelle in Schuss- und Kettrichtung (S/K).

4. Störleim + Weizenstärkekleister modifiziert (SAS)



A.3.3 Gesamtvergleich

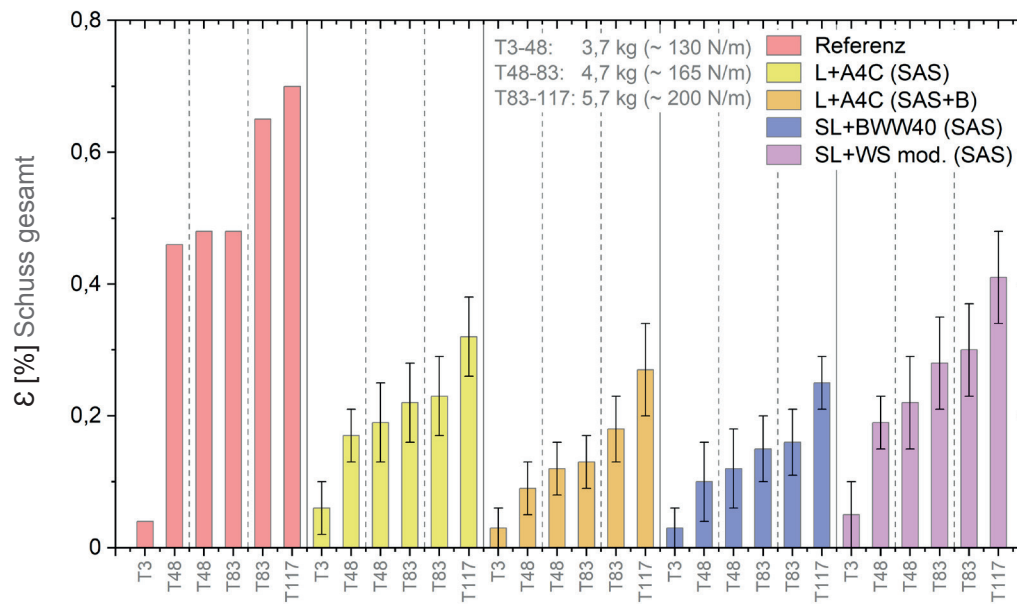


Abb. 70: Entwicklung der Dehnung im **Gesamtbereich in Schussrichtung**.**

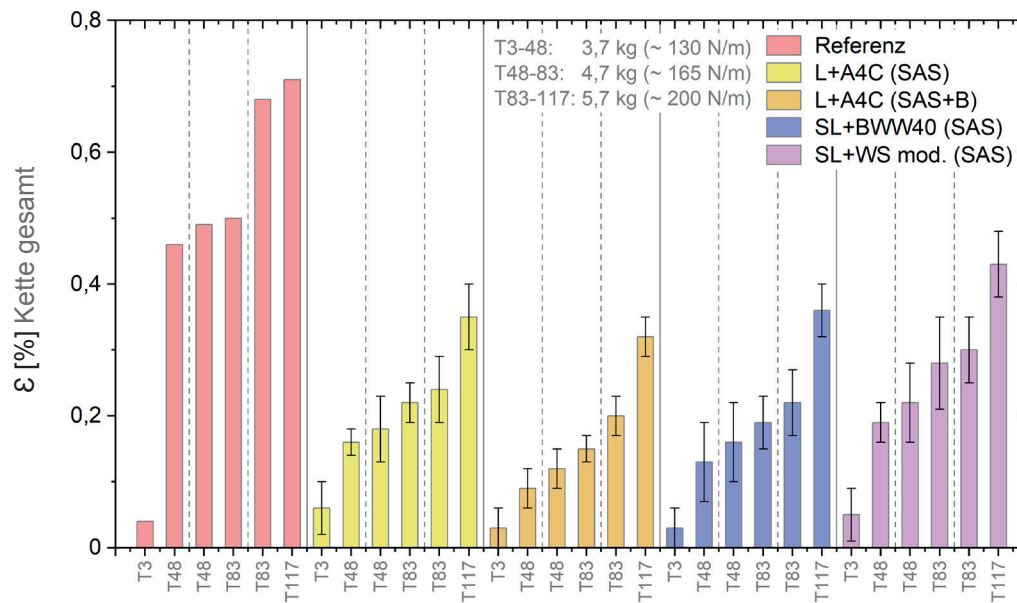


Abb. 71: Entwicklung der Dehnung im **Gesamtbereich in Kettrichtung**.**

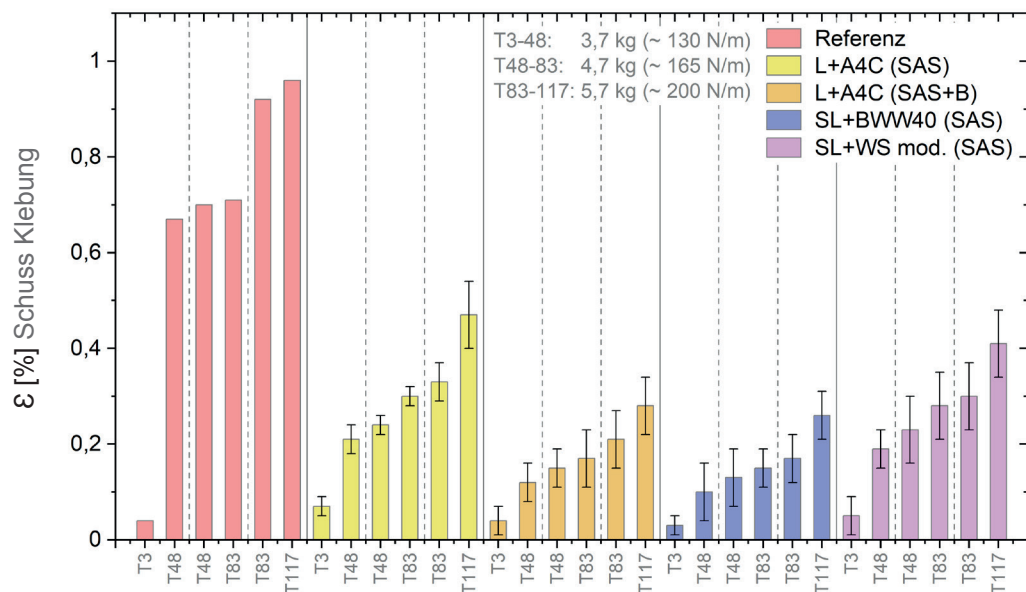


Abb. 72: Entwicklung der Dehnung im Bereich der **Klebestelle in Schussrichtung**. **

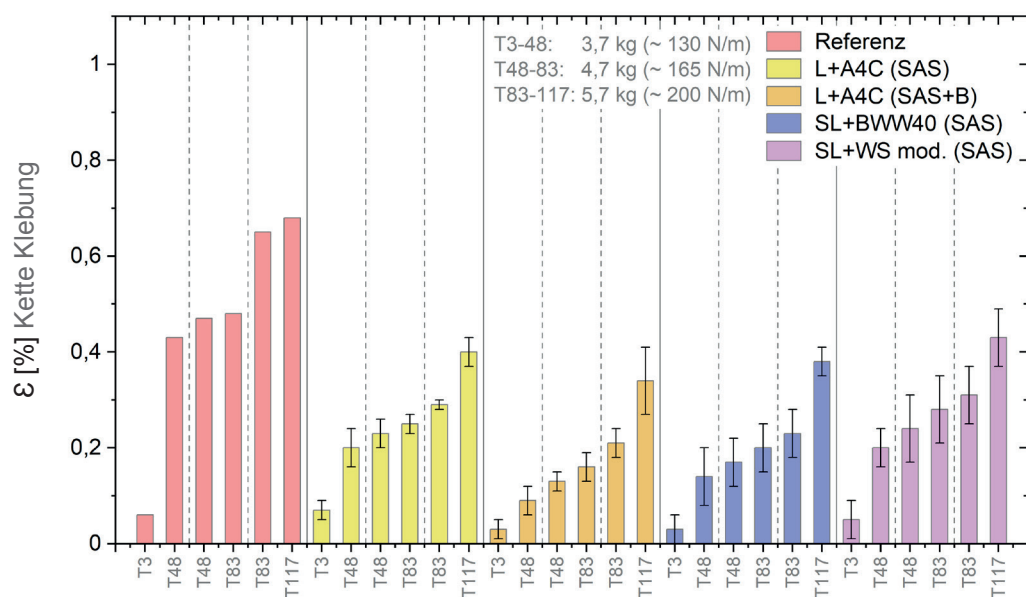


Abb. 73: Entwicklung der Dehnung im Bereich der **Klebestelle in Ketttrichtung**. **

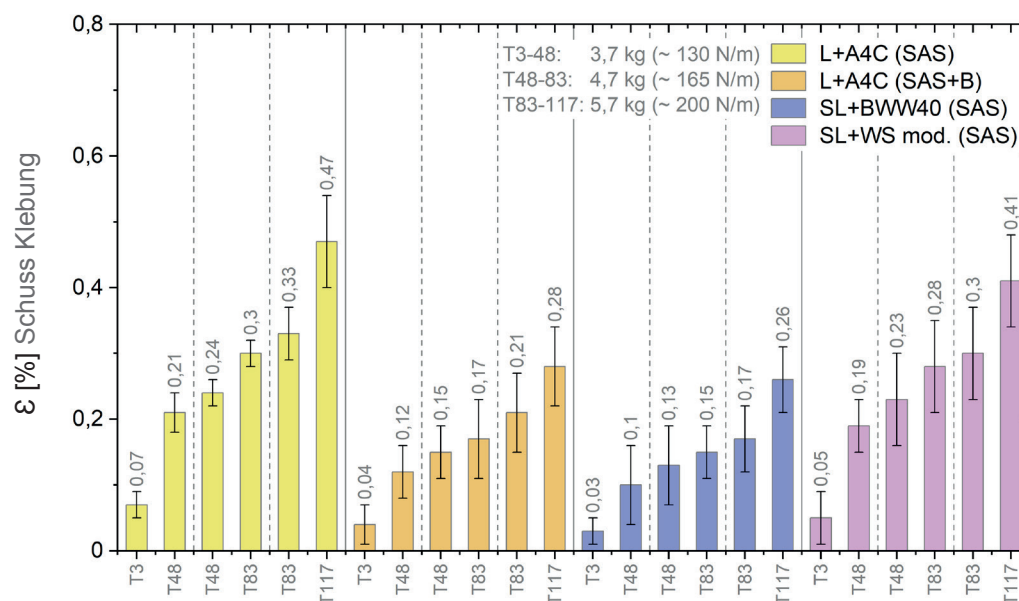


Abb. 74: Entwicklung der Dehnung der verklebten Proben im Bereich der Klebestelle in Schussrichtung. Zum direkten quantitativen Vergleich sind die mittleren Dehnungen der Probentypen in Zahlenwerten mit angegeben. **


** Anmerkung zu Abb. 70-74:


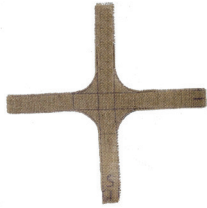
Der Gesamtvergleich unter Bildung der Mittelwerte erfolgte exklusive der Probe 5/5 von Typ 1. Lineco + Methocel A4C (SAS) aufgrund der abweichenden Prüfungsführung.

B Probenprotokolle

B.1 Probenherstellung

Für die Kurzzeitversuche wurde sich bei der Herstellung der uniaxialen Gewebestreifen und biaxialen Gewebekreuzproben aus den un- und beschichteten Testgeweben an vorausgehenden Versuchsreihen orientiert (FLOCK 2014, S. 298-303 / A.6.3, A.6.4).

Zuschnitt / uniaxial		
<p>Gewebestreifen</p> 	Allg.	<p>Sofern nicht explizit anders für die Prüfung von Kettfadenproben angegeben, wurden alle Gewebestreifen in Ausrichtung des senkrechten Schussfadens als zu prüfendes Fadensystem zugeschnitten:</p> <p>Vor dem Zuschnitt erfolgte die Markierung zur Unterteilung des Gewebes durch Nachzeichnen durchlaufender Kettfäden im Abstand von 50 mm mittels wasserfestem Filzschreiber. Diese Markierungen dienen sowohl dem späteren Zuschnitt auf eine Probenlänge von 200 mm, als auch der Kennzeichnung der oberen und unteren Einspannkante (Einspannlänge 100 mm in der Prüfung), sowie der Festlegung der Probenmitte für die vorhergehende Verklebung. Zur Probenherstellung wurden nur Gewebebereiche im Mindestabstand von 200 mm von der Webkante genutzt. Der Zuschnitt erfolgte immer fadengerade aus planen, knickfreien Bereichen des rohen Gewebes (ohne vorheriges Waschen, Bügeln o.ä.).</p>
	Mod. A	<p>Im Falle der unbeschichteten Gewebestreifen wurden die Streifen zunächst auf eine Breite von 22 bzw. 34 Schussfäden zugeschnitten und im Anschluss links und rechts um je 5 Schussfäden ausgeriffelt, um eine effektive Probenbreite von 12 bzw. 24 Schussfäden zu erhalten. Diese Vorgehensweise gewährleistet zum einen den tatsächlich durchlaufenden Fadenverlauf ohne versehentlich angeschnittene Seitenfäden, zum anderen erleichtert dies das Handling der Proben, da die Schussfäden weniger gefährdet sind aus dem Webverbund mit den orthogonal verlaufenden Kettfäden seitlich herauszurutschen (s. nachfolgende Abb. 01).</p> <p>Im Falle der beschichteten Gewebestreifen erfolgte der Zuschnitt mit größter Vorsicht fadengerade, ohne ein nachträgliches Ausriffeln, direkt auf die finale Probenbreite von 12 bzw. 24 Schussfäden. Durch die Beschichtung sind alle Fäden sicher eingefasst und es besteht keine Gefahr des Herauslösens (Abb. 01).</p>
	Mod. B	Für die Versuche mit abweichenden Einspannlängen (A.1.6) wurden die genannten Markierungen des Kettfadensystems variiert.
	Mod. C	Für die Mischbetrachtung intakter und verklebter Fäden im unbeschichteten Gewebe (A.1.9) sowie für die vergleichende Betrachtung beschichteter uniaxialer und biaxialer Proben (A.2.3) wurde die Anzahl der ausgeriffelten Fäden auf je 2 Schussfäden links und rechts reduziert. Die reduzierte Länge der seitlich überstehenden Kettfäden hat keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

Zuschnitt / biaxial		
 	Gewebekreuzproben (Kurzzeitversuche)	
	Allg.	<p>Zur Herstellung der Gewebekreuzproben wurden zunächst quadratische Stücke von 200 mm x 200 mm Größe fadengerade aus den Geweben herausgeschnitten. Der Zuschnitt erfolgte immer aus planem, knickfreien Bereichen des rohen Gewebes (ohne Wäsche, Bügeln o.ä.), mit Mindestabstand von 200 mm zur Webkante.</p> <p>Entsprechend der Entnahme aus dem Gewebe wurden sofort nach Zuschnitt Kett- und Schussrichtung auf den Rändern mittels wasserfestem Filzschreiber markiert. Anschließend erfolgte die Markierung der Mitten der vier Seitenlängen sowie das Abzählen und Markieren von 12 Fäden Breite (je 6 Fäden links und rechts der Mitte).</p>
	Mod. D	<p>Für die ersten Versuche an unbeschichtetem Gewebe (Typ Sironi, A.2.1 und A.2.2) wurden zusätzlich weitere 5 Fäden links und rechts abgezählt und markiert, um die Schenkel der Proben wie an den uniaxialen Gewebestreifen nachträglich seitlich auszuriffeln. Der jeweils erste, links und rechts an die spätere Schenkelbreite von 12 Fäden angrenzende Faden wurde daraufhin gezogen. Die jeweils äußersten der 5 zusätzlich abgezählten Fäden wurden anschließend bei 65 mm Länge ausgehend vom Rand mittels Filzschreiber markiert, um eine 70 mm lange Mitte zu markieren.</p> <p>Mittels durchsichtiger, kreisrunder Kunststoff-Schablone ($r = 19 \text{ mm}$) wurden nun die Eckrundungen in gleichbleibendem Abstand zum (des durch das Ziehen der Fäden entstandenen) Mittelquadrats von 12×12 Fäden in Probenmitte angetragen, angrenzend an die äußeren Schenkelbreitenmarkierungen. Ausgehend von diesen Markierungen wurden dann die Kreuzprobenschenkel fadengerade bis zum Rundungsbeginn sowie ab dort der äußeren Rundungsmarkierung folgend zugeschnitten. Nach dem Zuschnitt wurden die vier Schenkel (bis hin zum verbleibenden Mittelbereich bei Rundungsbeginn) um die verbleibenden 4 Extra-Fäden auf die finale Breite von 12 Fäden seitlich ausgeriffelt. Die ausgeriffelten Extra-Fäden wurden anschließend am Übergang zum Rundungsbereich abgeschnitten. Der so entstandene, abgerundete Mittelbereich hat so in beiden Achsen eine Länge von 70 mm, mit je 65 mm langen angrenzenden Schenkeln (Abb. 02 und 03). Die spätere Einspannlänge wird 100 mm betragen und das durch die gezogenen Fäden entstandene Mittelquadrat zur Dehnungsauswertung genutzt werden.</p>
	Mod. E	<p>Für die weitere Betrachtungen an un- und beschichtetem Gewebe (Typen C 070 und C 170, A.2.3 und A.2.4) wurden die Schenkel der unbeschichteten Proben lediglich 2 Fäden weit ausgeriffelt und auf das zuvor genannte Ziehen der je direkt links und rechts neben der 12 Fäden Prüfbreite liegenden Extra-Fäden verzichtet. Stattdessen wurden diese Fäden vor dem Zuschnitt auf voller Länge durchlaufend mittels wasserfestem Filzschreiber markiert, um das Mittelquadrat visuell zu erzeugen. Anschließend wurden die Fäden bei 75 mm Länge ausgehend vom Rand mittels Filzschreiber markiert, um eine 50 mm lange Mitte zu markieren. Der abgerundete Mittelbereich hat somit in beiden Achsen eine Länge von 50 mm, mit je 75 mm langen angrenzenden Schenkeln (Abb. 04 und 05). Die spätere Einspannlänge wird 55 mm betragen und das eingezeichnete Mittelquadrat zur Dehnungsauswertung genutzt werden.</p>

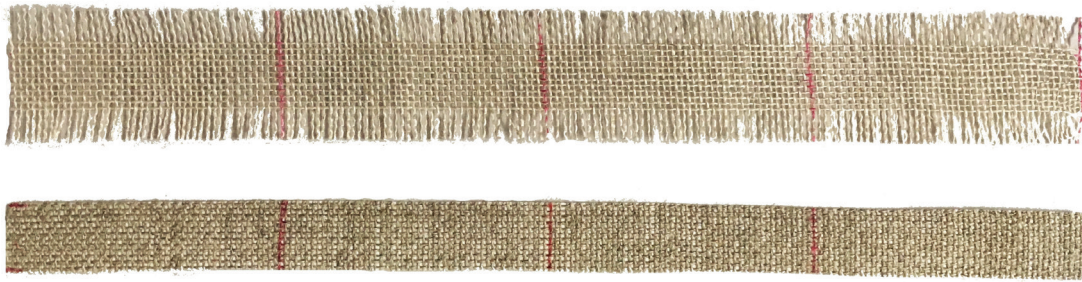


Abb. 01: Unbeschichteter und beschichteter uniaxialer Probekörper.



Abb. 02 und 03: Mittelbereich des biaxialen Probekörpers Mod. D (unbeschichtet).

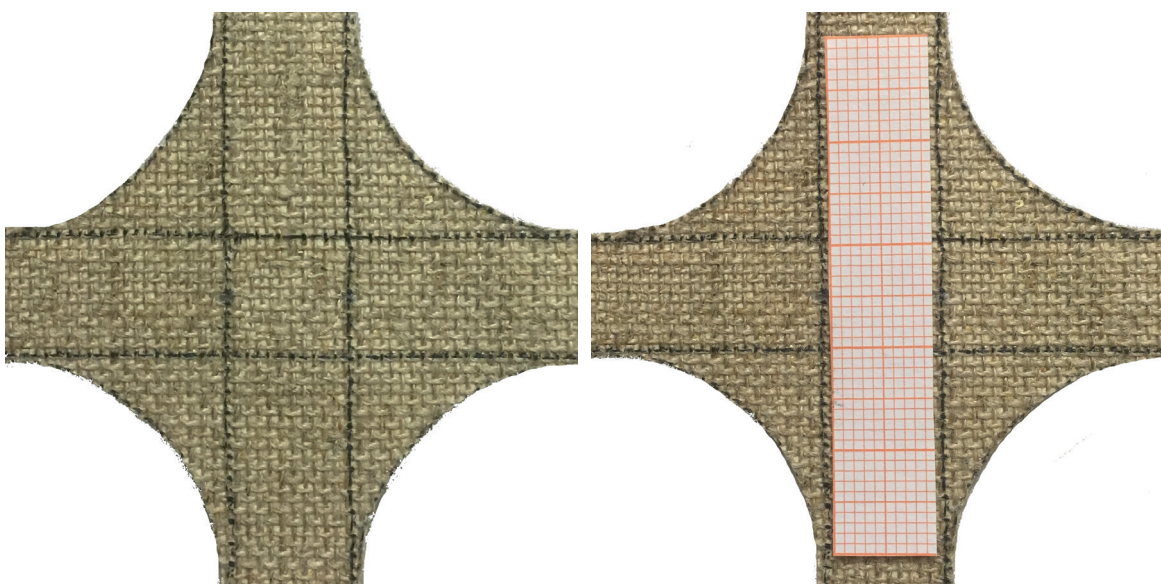


Abb. 04 und 05: Mittelbereich des biaxialen Probekörpers Mod. E (beschichtet).

Für die biaxialen Langzeitversuche wurden flächige Gewebeproben vorbereitet:

Zuschnitt / biaxial	
<p>Flächige Gewebe (Langzeitversuche)</p> 	<p>Zur Herstellung der flächigen Gewebeproben wurden zunächst quadratische Stücke von 260 mm x 260 mm Größe fadengerade aus dem beschichteten Gewebe C 170 geschnitten. Der Zuschnitt erfolgte immer aus planem, knickfreien Bereichen mit Mindestabstand von 200 mm zur Webkante. Das beschichtete Gewebe wurde verwendet wie geliefert und erfuhr keine weitere Vorbehandlung (Bügeln o.ä.). Entsprechend der Entnahme aus dem Gewebe wurden sofort nach Zuschnitt Kett- und Schussrichtung auf den Rändern mittels wasserfestem Filzschreiber markiert. Anschließend erfolgte die Markierung der Mitten der vier Seitenlängen sowie das Abzählen und Markieren von jedem 20. Faden links und rechts der Mitte. Die markierten Fäden wurden anschließend mit wasserfestem Filzschreiber in beiden Fadensystemen nachgezeichnet (Schuss rot, Kette blau). Ausgehend von dem entstandenen Gitter wurden dann die vier Eckbereiche fadengerade herausgeschnitten, sodass eine kompakte Kreuzform mit einer Schenkelbreite von ca. 160 mm bzw. 160 Fäden resultierte (Abb. 06).</p> <p>Im nächsten Schritt wurden die Markierungslinien für die spätere Aufspannung fadengerade gezogen (hier umgekehrt: Schuss blau, Kette rot), jeweils in 125 mm Abstand ausgehend von der exakten Probenmitte bzw. mit insgesamt 250 mm Abstand der gegenüberliegenden Seiten zueinander (Abb. 07).</p> <p>Auf diesen Linien wurden ausgehend von den Schenkelmitten in 30 mm Abstand je 5 Markierungspunkte vorbereitend gesetzt, durch welche bei Aufspannung die Haken gestochen werden (Abb. 08).</p> <p>Zwecks Markierung der späteren Klebestelle und besseren Übersicht bei der späteren fadengeraden Aufspannung sowie Platzierung des Inlays wurden im Mittelbereich weitere Hilfslinien gezogen. Aus Symmetriegründen wurden in diesem Aufbau abweichend 13 Schussfäden (je 6 links und rechts des Mittelfadens) zur Verklebung vorgesehen (Abb. 09).</p> <p>Erst nach der Verklebung wurde auf der grundierten Vorderseite der Proben ergänzend ein zusätzliches Hilfsgitter mit Bleistift aufgezeichnet, um den Schnittbereich definiert zu kennzeichnen und optional vermessen zu können (Abb. 10). Im Abstand von 20 mm zum Schnitt wurden dazu drei weitere Markierungspunkte mit wasserfestem Filzschreiber gesetzt, mittig sowie je 5 mm links und rechts der Mitte bezüglich der Verklebung (Abb. 11).</p>

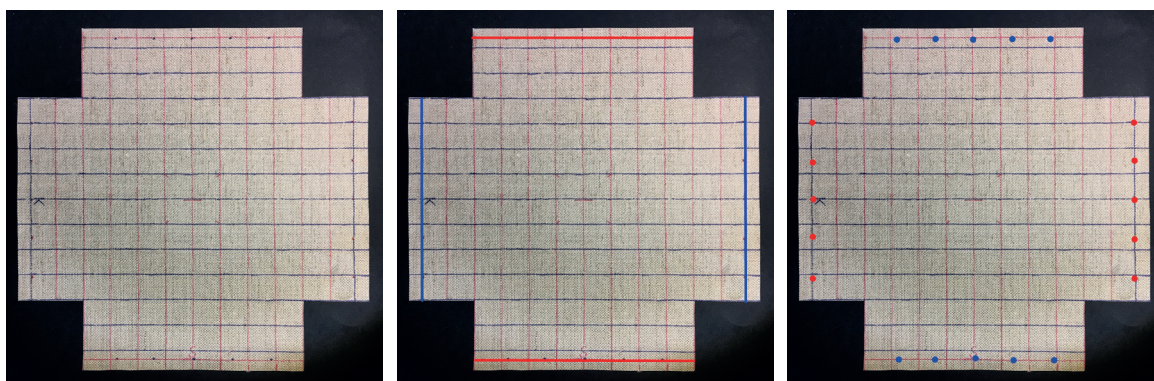


Abb. 06-08: Grundform mit Gitterlinien, angetragene Aufspannungslinien sowie -punkte.

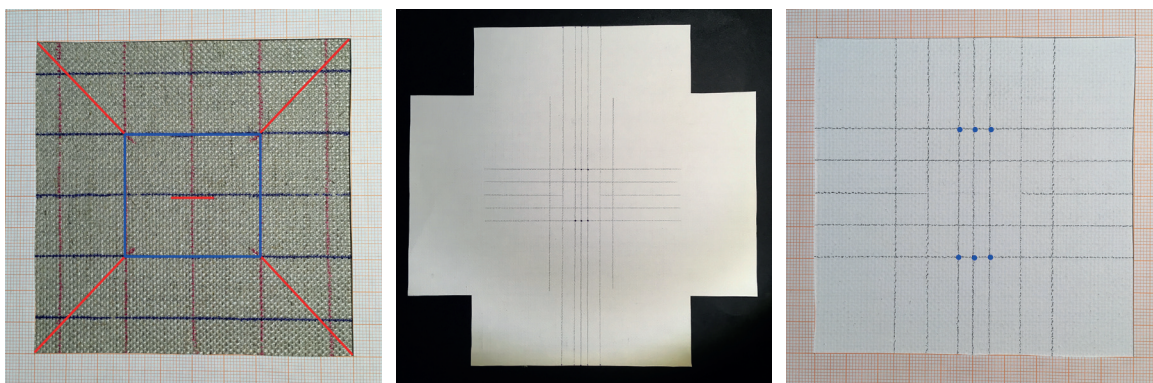


Abb. 09-11: Aufzeichnen zusätzlicher Hilfslinien und -punkte im Bereich der Verklebung.

Aufdoppelung	
Material	Zur Aufdoppelung der uni- und biaxialen Proben (A.2.3) wurden Streifen des beschichteten Gewebes C 170 (Schussrichtung, 12 Fäden Breite) mittels Beva 371 (25 μm Film) auf die Proben gesiegelt. Die Aufdoppelung erfolgte vor optionaler späterer Einzelfadenverklebung der Probekörper.
Durchführung	<p>Der 25 μm dicke Beva-Film wurde zunächst flächig auf ein größeres Stück des beschichteten Gewebes C 170 (auf die textile Rückseite) mittels kleinem Reisebügels aufgesiegelt. Der Anpressdruck betrug ca. 10 g/cm^2 bei einer Siegeltemperatur von ca. 73 $^{\circ}\text{C}$ (gemessen zwischen Heizfläche und Textil). Hierbei ist zu beachten, dass die Temperatur mit > 68 $^{\circ}\text{C}$ ausreichend hoch für eine erfolgreiche thermoplastische Reaktivierung gewählt ist, jedoch möglichst < 75 $^{\circ}\text{C}$ beträgt, um eine zu starke Klebstoffmigration in die Fasern zu vermeiden. Entsprechend ist auch eine zügige Reaktivierung ohne längere Hitze- oder Druckeinwirkung angestrebt. Nach dem Aufsiegeln wurden die beschichteten Gewebe nochmals flächig mit ca. 3,5 g/cm^2 bei der Abkühlung beschwert.</p> <p>Nach Abkühlung wurden Streifen in Schussrichtung mit 12 Fäden Breite aus dem vorbereiteten Aufdoppelungsmaterial herausgeschnitten. Diese Streifen wurden dann auf die (textilen Rückseiten) der bereits zugeschnittenen, un- und beschichteten sowie uni- und biaxialen Probekörper (entsprechend der Ausrichtung der Gesamt- bzw. Schenkellängen) angesiegelt (Abb. 12-15). Das Ansiegeln erfolgte dabei in zwei Stücken, um je einen Mittelbereich von ca. 12,5 mm Abstand bzw. 12 Fäden Breite auszusparen. Auch hier betrug der Anpressdruck ca. 10 g/cm^2 bei einer Siegeltemperatur von ca. 73 $^{\circ}\text{C}$. Die so aufgedoppelten Proben wurden abermals flächig mit ca. 3,5 g/cm^2 bei Abkühlung beschwert.</p>

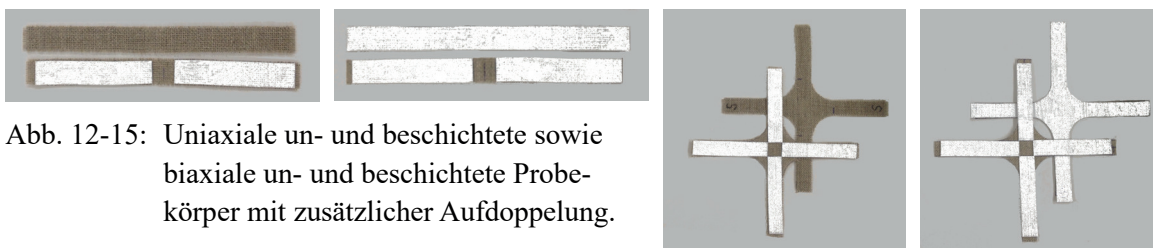


Abb. 12-15: Uniaxiale un- und beschichtete sowie biaxiale un- und beschichtete Probekörper mit zusätzlicher Aufdoppelung.

Verklebungsvorbereitung	
Allg.	Alle uni- und biaxialen Probekörper wurden vorbereitend zur Verklebung auf Schneidematten positioniert. Die Fixierung der Proben erfolgte mittels zwei Streifen doppelseitigen Klebebands in 50 mm Abstand. Mittig der Klebestreifen wurde mit Tesafilm ein Streifen Millimeterpapier befestigt, sodass im zu verklebenden Mittelbereich der Proben eine optionale Überlappung definiert werden konnte (Abb. 16).
Mod. F	Vor dem Zertrennen der Verklebungsstelle mittels Skalpell wurde im Falle einer gewünschten überlappenden oder überlappend-vermengten Verklebung zunächst der mittige Kettfaden im Verklebungsbereich gezogen. Das Zertrennen der Schussfäden erfolgte erst unmittelbar vor der Verklebung und nach Aufsetzen von Verklebungsgewichten ober- und unterhalb der Klebestelle (vgl. Abb. 16). Die Proben wurden genau mittig (gemäß ihrer Markierung fadengerade entlang der Kette) mittels scharfer Skalpellklinge auf voller Breite von 12 Schussfäden glatt zertrennt. Daraufhin wurden die Proben optional entsprechend der gewünschten Überlappung von 1 mm repositioniert. Das Ziehen des Kettfadens sowie eine Repositionierung entfielen im Falle der Stoß-auf-Stoß-Verklebungen. Diese Vorgehensweise trifft auf die Versuche A.1.1, A.1.2, A.2.1 und A.2.3 zu.
Mod. G	Im Falle der uni- und biaxialen Mischbetrachtungen intakter und verklebter Fäden (A.1.9 und A.2.2) wurden lediglich einzelne Schussfäden mittig, seitlich außen oder abwechselnd in Probenmitte ohne Entfernung eines Kettfadens zertrennt und verklebt.
Mod. H	Bei den uniaxialen Versuchen A.1.3, A.1.4, A.1.5, A.1.6, A.1.7 und A.1.8 wurde auch im Falle einer Stoß-auf-Stoß-Verklebung der mittige Kettfaden gezogen, um so uneinheitliche Biegungswinkel der Verklebung sowie ein Festkleben der orthogonal verlaufenden Kettfäden zu vermeiden. Im Falle der überlappenden Verklebungen wurden aus selbigem Grund zwei Kettfäden gezogen; auf diese Weise wurde zudem die Webstruktur erhalten (einfache Bindung ohne vom Schuss eingefassten doppelten Kettfaden im Verklebungsbereich).
Mod. J	Abweichend von allen anderen Verklebungen wurde im Falle der Proben für die biaxiale Langzeitbetrachtung (A.3) aus Symmetriegründen ein Zerschneiden von 13 statt 12 Schussfäden vorgenommen. Der Schnitt erfolgte direkt zwischen den Bindungspunkten und ohne Entfernung von Kettfäden.

Probendokumentation	
Ausgewählte Proben	Einige der un- und verklebten Proben wurden vor sowie nach der Prüfung zusätzlich mikro- und makroskopisch fotodokumentiert. Im Falle der Vergleichsbetrachtung der un- und beschichteten uniaxialen Proben (A.1.3) sowie der erweiterten Klebstoffauswahl (A.1.5) wurde für jeden Klebstoff das visuelle Erscheinungsbild der Vorder- und Rückseiten der Proben festgehalten. Auch die Proben der biaxialen Langzeitversuche (B.3) wurden detailliert mittels Videomikroskop dokumentiert (Abb. 17).

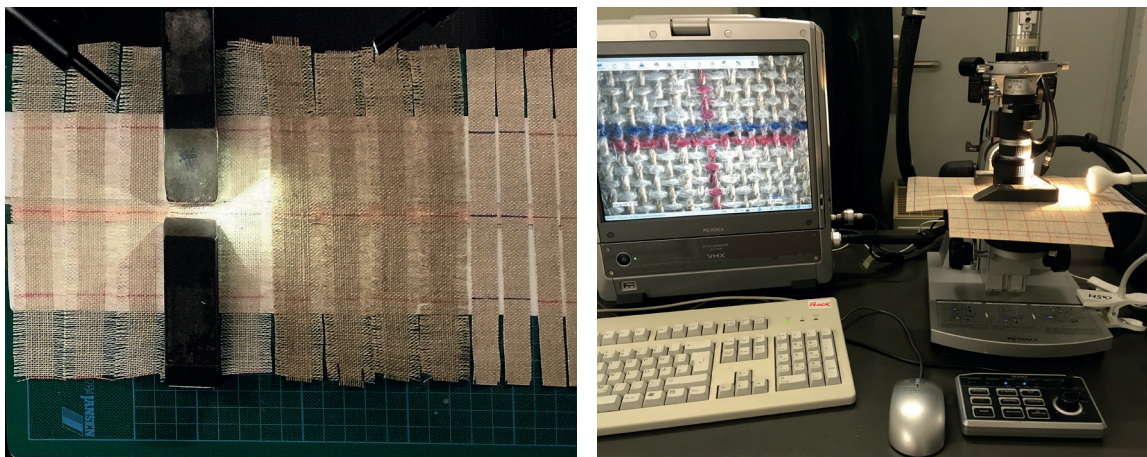


Abb. 16: Zur Verklebung vorbereitete Gewebeproben unterschiedlichen Typs. Die Verklebung erfolgt in Streiflichtsituation unter dem Stereomikroskop (s. auch B.2).

Abb. 17: Arbeitsfoto zur Probendokumentation mittels Videomikroskop.

Probenlagerung	
Sämtliche Proben	Die verklebten Proben wurden nach Verklebung bis zur vollständigen Trocknung und Aushärtung in fixierter Position belassen. Anschließend wurden die Streifen vorsichtig, das heißt ohne Ausübung von Zug oder Biegung auf die Klebestellen, von den Schneidematten gelöst. Die Proben wurden flach auf säurefreien, inerten Kartons und Platten in Dunkelheit und unter kontrolliertem Klima mindestens vier bzw. maximal acht Wochen bis zur Prüfung gelagert.

Probenübersicht			
Uniaxial	A.1.1	Reproduktion erster Zugversuche	Mod. A, F
	A.1.2	Vorversuch Beschichtung	Mod. A, F
	A.1.3	Beschichtete Proben	Mod. A, H
	A.1.4	Fadenbrücken	Mod. A, H
	A.1.5	Erweiterte Klebstoffauswahl	Mod. A, H
	A.1.6	Exkurs Einspannlänge	Mod. A, B, H
	A.1.7	Exkurs Ratenabhängigkeit	Mod. A, H
	A.1.8	Exkurs zyklische Belastung	Mod. A, H
	A.1.9	Exkurs Mischbetrachtung	Mod. C, G
Biaxial	A.2.1	Reproduktion erster Zugversuche	Mod. D, F
	A.2.2	Mischbetrachtung	Mod. D, G
	A.2.3	Beschichtete Proben	Mod. C, E, F (+ Aufdoppelung)
	A.2.4	Exkurs Dehnungsevaluierung	Mod. E, F
	A.3	Langzeitversuche	Mod. J

B.2 Verklebungsdurchführung

Die Klebstoffdosierung und Verklebung der uni- und biaxialen Proben orientierte sich an vorausgehenden Versuchsreihen (FLOCK 2014, S. 308-321, 326-342 / A.7.1). Die spezielle Volumenermittlung der Tropfengrößen für das genutzte Mikrodosiergerät kann dort nachvollzogen werden und wird hier daher nicht erneut aufgeführt. Sämtliche Verklebungen erfolgten durch die Verfasserin mit Feininstrumenten unter dem Mikroskop.

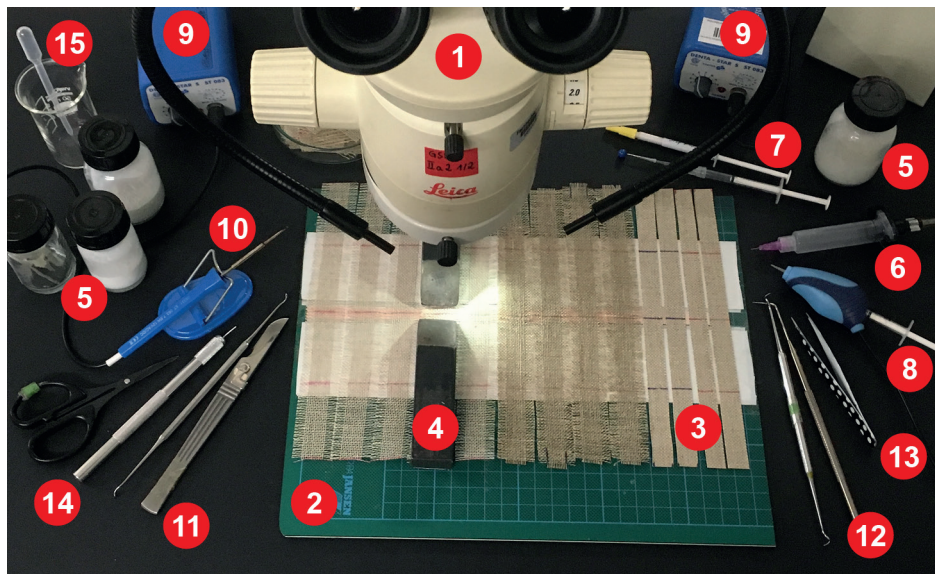


Abb. 01: Typische Arbeitsplatzsituation bei Probekörperverklebung.

Werkzeuge, Materialien und Geräte			
1	Stereomikroskop	9	Trafo (Heiznadel / Consolidation Pen Winnie)
2	Schneidematte mit Fixierung und Maßstab	10	Heiznadel mit diagonaler Spitze
3	Unterschiedliche Probekörper	11	Skalpell (Durchtrennung der Probekörper)
4	Diagonal angeschrägte Verklebungsgewichte	12	Weston-Sonden / Feinwerkzeug
5	Klebstoffauswahl	13	Pinzette (ohne Zahnung, glatt)
6	Dosierkartusche / Mikrodosiergerät	14	Reibahlenhalter mit Polystyrol-Stäbchen (Tropfentransfer von Pipette u.a. zu Faden)
7	Feinspritzen + versch. Verschlusskappen		
8	Consolidation Pen Winnie mit Feinspritze	15	Wasser (Zwischenreinigung der Werkzeuge)

Details zu Applikation und Dosierung sind nachfolgend für alle verwendeten Klebstoffe gelistet. Die prinzipielle Vorgehensweise für alle Verklebungstechniken wird zudem exemplarisch dargestellt. Zusätzliche Details sind den einzelnen Versuchskapiteln zu entnehmen.

Klebungskonfiguration		
Applikation	I	Feinpipette Transferpette S mit Pipettenspitzen Standard nano-cap
	II	BELO Dosiergerät mit Vieweg Dosiernadeln (ø 0,15 mm)
	III	Feinspritze (0,5-1 ml) mit Low-Binding-Pipettenspitzen
	IV	III + Consolidation Pen Winnie zur Klebstoffe Erwärmung (max. 35 °C)
	V	Sonderfall Schmelzklebstoffe (siehe auch B.2.6)
Dosierung	A	0,6 µl pro Faden (je nach Klebstoff und Verklebungstechnik als 2 x 0,3 µl oder einmalig 0,6 µl appliziert) mit allen Klebstoffen und Verklebungstechniken.
	B	Individuell je einzelner Fadenverklebung an Klebstoff, Verklebungstechnik und Einzelfadengeometrie angepasste Klebstoffdosierung von min. 0,3 µl bis max. 0,9 µl (in der Regel jedoch > 0,5 µl).
	C	Im Falle der Schmelzklebstoffe vergleichbare Volumenabschätzung via Mikroskop. Vor und nach Verklebung Einwaage der Proben.

Klebstoff	Applikation	Dosierung
Störleim 20 % in H ₂ O	IV	B
Störleim 25 % in H ₂ O	IV	B
Störleim 20 % + Weizenstärkekleister nativ 13 % (1:1)	II, IV	A, B
Störleim 20% + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1)	II, IV	A, B
Störleim 20 % + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	III	B
Störleim 25 % + Arbocel BW 40 (20:1)	II, IV	A, B
Störleim 15 % + Arbocel BW 40 (20:1)	IV	B
Störleim 20 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)	IV	B
Gelatine Gelita Imager 20% in H ₂ O	IV	B
Gelatine Gelita Imager 20 % + Weizenstärkekleister modifiziert 13 % (1:1)	IV	B
Gelatine Gelita Imager 20 % + Arbocel BW 40 (20:1)	IV	B
Mowilith DHS S1	II	A
Mowilith DHS S1 + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)	II	A, B
Lineco	II	A
Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)	II	A, B
Lineco + Methocel A4C 10 % in H ₂ O (1:1)	II	B
[Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)] + Arbocel BW 40 (20:1)	II	B
[Lineco + Methocel A4C 5 % in H ₂ O (9:1)] + MCC 50 µm (20:1)	II	B
Methocel A4C 10 % in H ₂ O	III	B
Methocel A4C 5 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)	III	B
Methocel A4C 10 % + Arbocel BC 600-30 (20:1)	III	B
Methocel A4C 10% + MCC 50 µm (20:1)	III	B

Klebstoff		Applikation	Dosierung
	Beva 371	V	C
	Beva 371 + [Arbocel B 800 + BWW 40 (1:1)] (4:1)	V	C
	Kremer Polyamidschweißpulver	V	C
	Lascaux 5065	V	C
	Lascaux 5350	V	C
	Ecrovin LV 340 eco + Bayhydur ultra 305 (19:1)	II	B
	[Ecrovin LV 340 eco + Bayhydur ultra 305 (19:1)] + Methocel A4C 10 % (1:1)	II	B
	Ecronova RA 646 H + Bayhydur ultra 305 (19:1)	II	B
	[Ecronova RA 646 H + Bayhydur ultra 305 (19:1)] + Methocel A4C 10 % (1:1)	II	B
	Ecrothan 4075 + Bayhydur ultra 305 (19:1)	II	B
	[Ecrothan 4075 + Bayhydur ultra 305 (19:1)] + Methocel A4C 10 % (1:1)	II	B
	UHU easy (Cyanacrylat)	I	B
	UHU easy + Methocel A4C in Pulverform (9:1)	III	B
	UHU easy + Arbocel BWW 40 (10:1)	III	B
	UHU plus schnellfest (2K-Epoxid)	I	B

Für alle Verklebungen wurde eine Bearbeitungsseite als Vorderseite festgelegt, es erfolgte keine Nachbearbeitung der Rückseite. Die ausschließlich einseitige Rissbearbeitung (im Regelfall von der unbeschichteten, textilen Gemälderückseite) entspricht der häufigsten Praxis im Anwendungsfall der Einzelfadenverklebungstechnik am Objekt. Die so erzielten Ergebnisse sowie das optische Erscheinungsbild der Klebstoffe wurden exemplarisch unter A.1.3 und A.1.5 dokumentiert.

Probenübersicht			
Uniaxial	A.1.1	Reproduktion erster Zugversuche	A II
	A.1.2	Vorversuch Beschichtung	A II
	A.1.3	Beschichtete Proben	B II
	A.1.4	Fadenbrücken	B II
	A.1.5	Erweiterte Klebstoffauswahl	B I / B II / B III / B IV / C V
	A.1.6	Exkurs Einspannlänge	B II
	A.1.7	Exkurs Ratenabhängigkeit	B II
	A.1.8	Exkurs zyklische Belastung	B II
	A.1.9	Exkurs Mischbetrachtung	A II
Biaxial	A.2.1	Reproduktion erster Zugversuche	A II
	A.2.2	Mischbetrachtung	A II
	A.2.3	Beschichtete Proben	B II
	A.2.4	Exkurs Dehnungsevaluierung	-
	A.3	Langzeitversuche	B II / B IV

B.2.1 Stoß-auf-Stoß-Verklebung (SAS)

Die Stoß-auf-Stoß-Verklebungen aller un- und beschichteten, uni- sowie biaxialen Proben wurden analog durchgeführt. Je nach Versuchsreihe wurde vor dem Schnitt der mittige Kettfaden nicht entfernt oder dieser alternativ zuvor gezogen (siehe auch B.2.5).

Exemplarische Verklebung

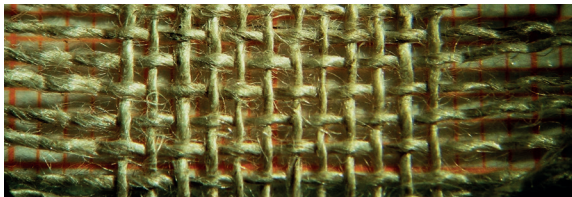
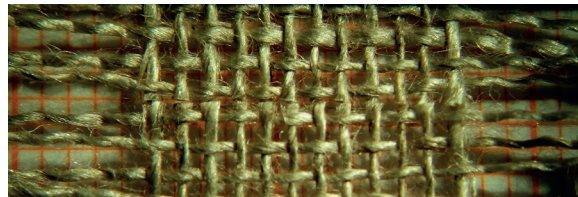
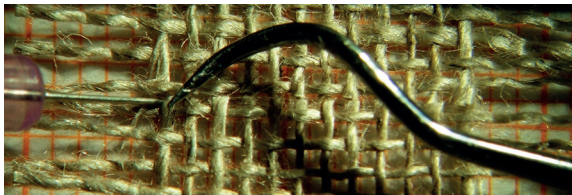


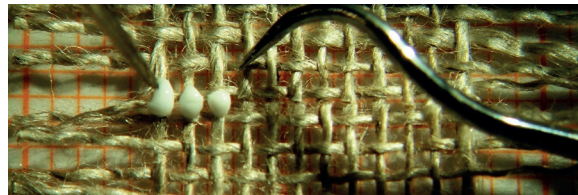
Abb. 02: Vorbereitende Positionierung der Probe.



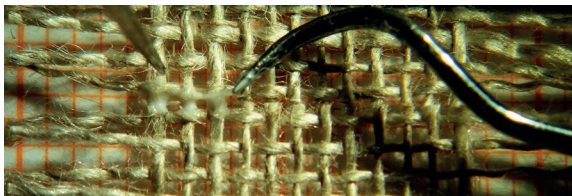
2b. Zerschneiden der Schussfäden mit Skalpell.
Alternativ zuvor auch Ziehen des Kettfadens.



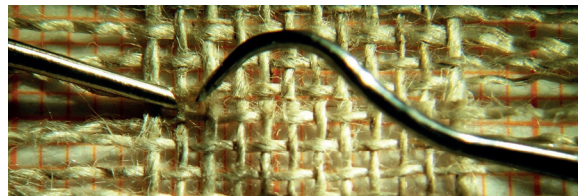
2c. Feindosierte, kontrollierte Klebstoffangabe.



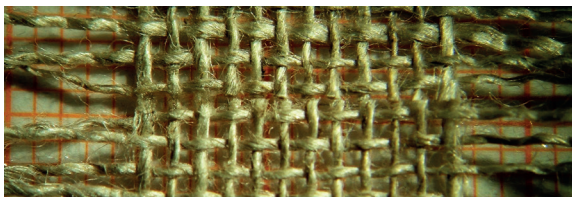
2d. Parallele Bearbeitung von max. 3 Fäden.



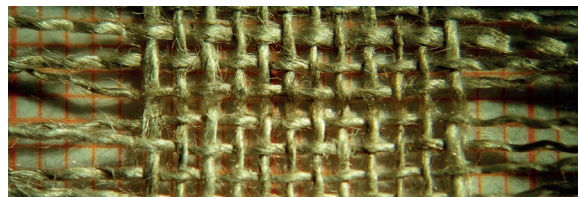
2e. Klebstoffeinarbeitung mittels Feinsonden.



2f. Kurze Modellierung mit Heiznadel (< 80 °C).



2g. Abschluss der ersten 3 verklebten Fäden.



2h. Vollständig verklebte Probe.

B.2.2 Stoß-auf-Stoß-Verklebung mit Fadenbrücken (SAS+B)

Die Applikation von Fadenbrücken zur zusätzlichen Unterstützung der Stoß-auf-Stoß-Verklebungen gestaltete sich für alle Proben analog. Je nach Versuchsreihe wurden mitunter unterschiedliche Fadenbrückenlängen betrachtet (siehe auch A.1.4).

Exemplarische Verklebung

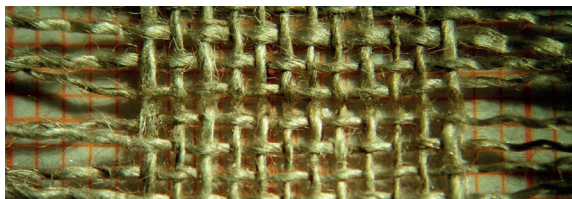
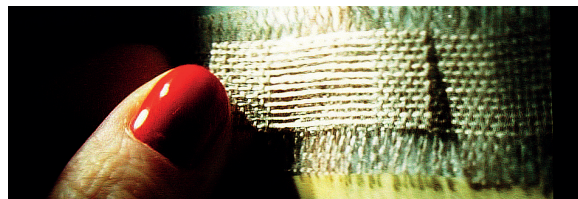
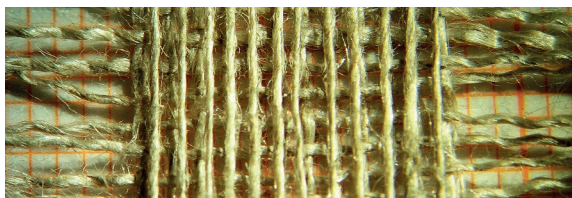


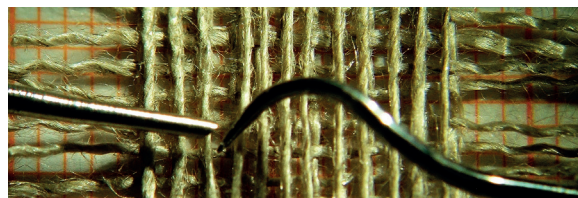
Abb. 03: Positionierung der verklebten Probe.



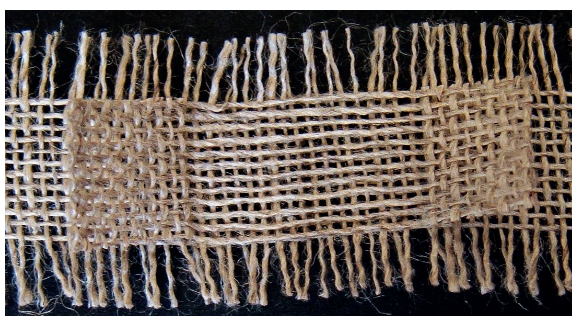
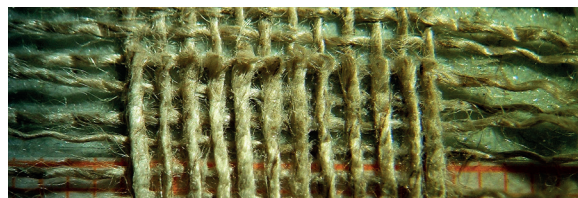
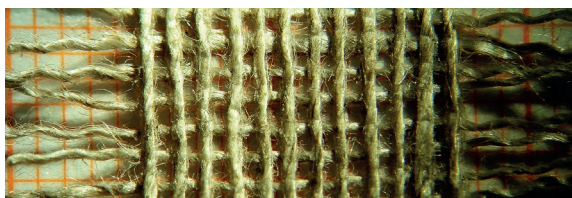
3b. Auflage der vorbereiteten Fadenbrücken in gewünschter Länge (in der Regel 20 mm).



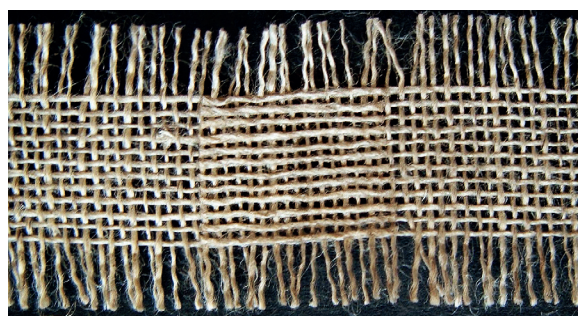
3c. Fadengerade Ausrichtung der Fadenbrücken.



3d. Aufsiegeln mittels Heiznadel ($< 80\text{ }^{\circ}\text{C}$) ober- und unterhalb der Verklebung.



3e+f. Vollständig applizierte Fadenbrücken.



3g+h. Abschneiden des Überstands und ggf. nochmals nachträgliches Ansiegeln der Enden.

B.2.3 Überlappende Verklebung (Ü)

Die überlappenden Verklebungen aller uni- sowie biaxialen Proben wurden analog durchgeführt. In allen Fällen wurde ein mittlerer Kettfaden zur Erzielung der Überlappung gezogen.

Exemplarische Verklebung

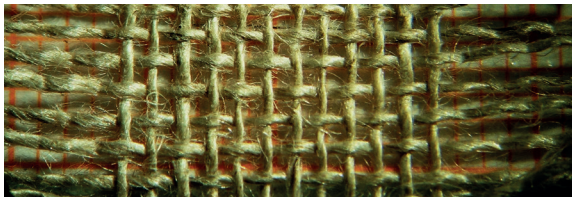
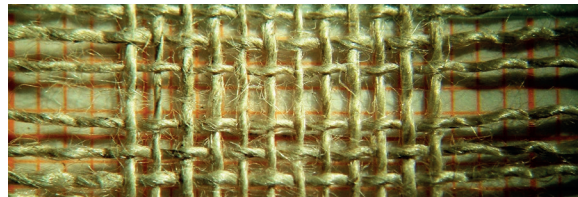
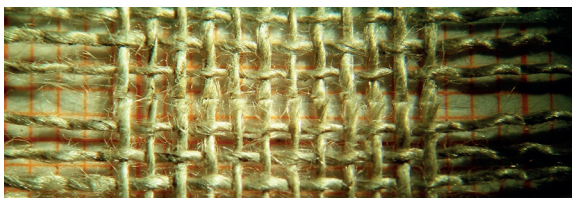


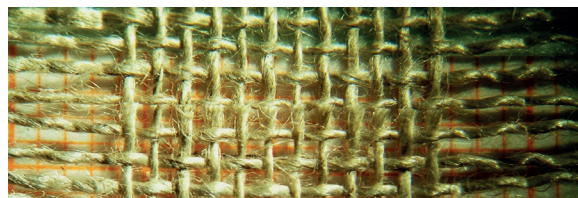
Abb. 04: Vorbereitende Positionierung der Probe.



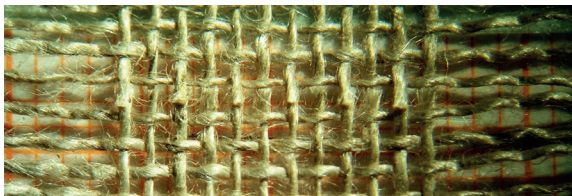
4b. Ziehen des mittleren Kettfadens. Alternativ Ziehen von zwei Kettfäden.



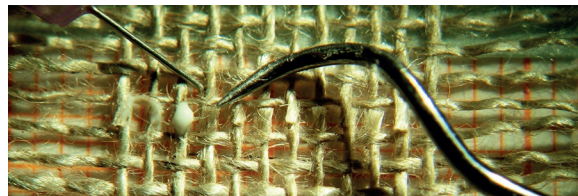
4c. Zerschneiden der Schussfäden mit Skalpell.



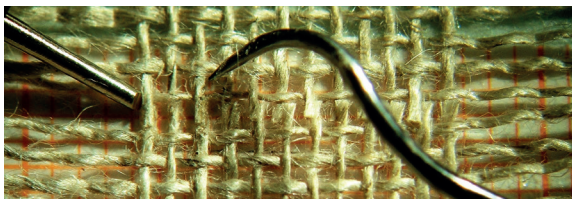
4d. Repositionierung mit 1 mm Überlappung.



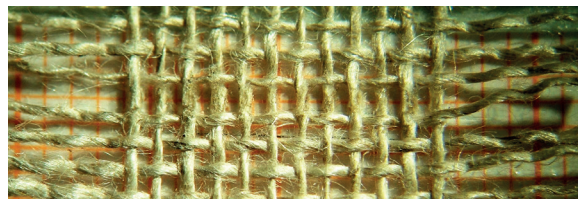
4e. Alternierende Sortierung der Fadenenden.



4f. Wie zuvor, Klebstoffangabe und -einarbeitung.



4g. Kurze Modellierung mit Heiznadel (< 80 °C).



4h. Vollständig verklebte Probe.

B.2.4 Überlappende Verklebung mit vermengten Fadenenden (Ü+V)

Die überlappend-vermengten Verklebungen wurden an allen uni- sowie biaxialen Proben analog durchgeführt. Zur Erzielung der Überlappung wurde ein mittlerer Kettfaden gezogen. Alternativ wurden auch zwei mittige Kettfäden entfernt (siehe auch B.1).

Exemplarische Verklebung

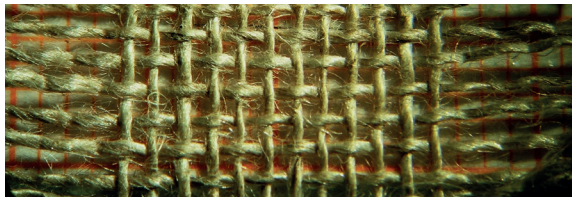
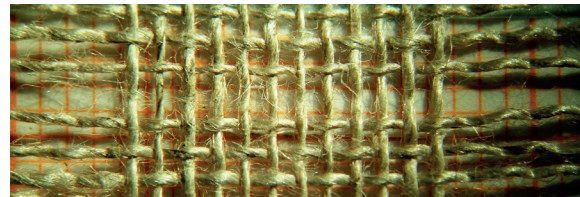
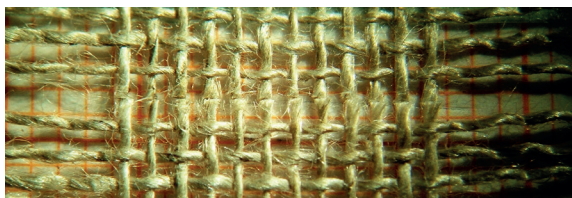


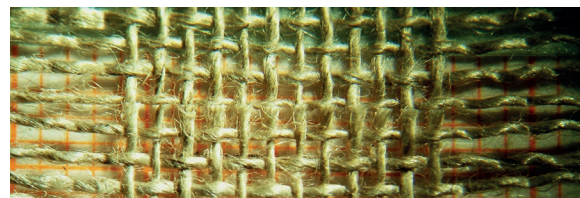
Abb. 05: Vorbereitende Positionierung der Probe.



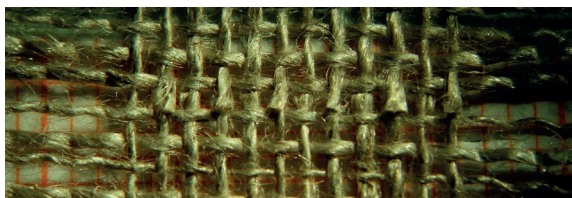
5b. Ziehen des mittleren Kettfadens. Alternativ Ziehen von zwei Kettfäden.



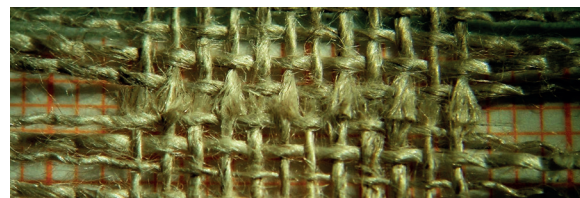
5c. Zerschneiden der Schussfäden mittels Skalpell.



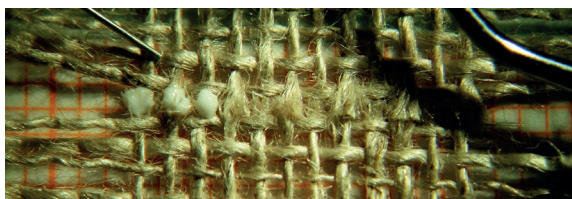
5d. Repositionierung mit 1 mm Überlappung.



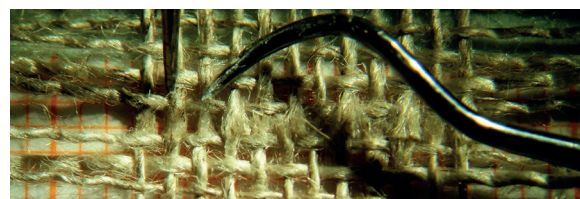
5e. Alternierende Sortierung der Fadenenden.



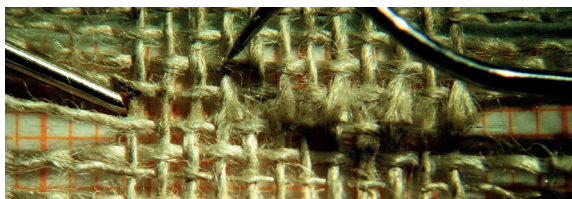
5f. Auffasern und vorbereitende Vermengung.



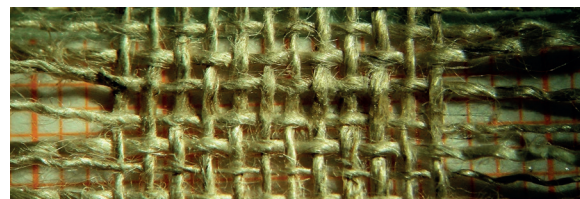
5g. Wie zuvor, feindosierte Klebstoffangabe.



5h. Einarbeitung und weitere Vermengung.



5j. Kurze Modellierung mit Heiznadel (< 80 °C).



5k. Vollständig verklebte Probe.

B.2.5 Proben mit Beschichtung

Die Verklebung der Proben mit Beschichtung verlief prinzipiell analog zu den unbeschichteten Proben, sämtliche Proben mit Beschichtung wurden jedoch lediglich in Stoß-auf-Stoß-Technik verklebt. Je nach uniaxialer Versuchsreihe (vgl. B.1) wurde vor dem Zerschneiden der 12 Schussfäden entweder kein oder ein mittlerer Kettfaden vorab aus dem Verbund herausgelöst (Abb. 06-08), anschließend erfolgte die Verklebung (vergleiche auch Abb. 09-11). Im Falle der biaxialen Kurzzeitbetrachtungen wurden keine Kettfäden im beschichteten Gewebe entfernt.

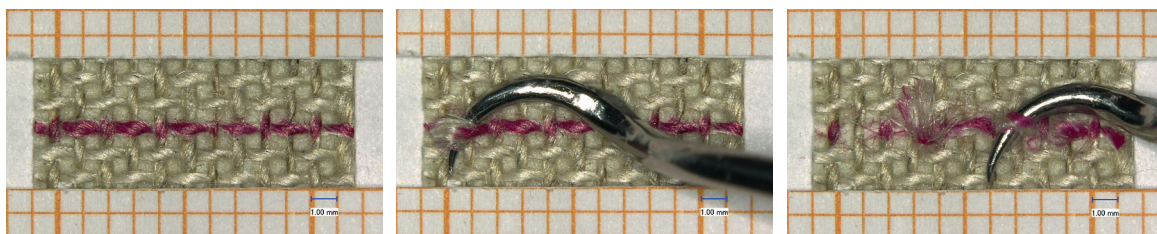


Abb. 06-08: Exemplarisches Herauslösen des mittleren Kettfadens an Streifenprobe.



Abb. 09-11: Stoß-auf-Stoß-Verklebung ohne und mit gezogenem Kettfaden im Vergleich.
Auf der Rückseite der Probe stellt sich der Schnitt durch die Grundierung dar.

Als Sonderbetrachtung wurde exemplarisch nach Entfernung des Kettfadens auch lediglich das Schussfadensystem (12 Fäden Breite) ohne Grundierung zertrennt (Abb. 12 und 14) und verklebt (Abb. 13), statt wie sonst komplett durch alle Schichten zu schneiden.



Abb. 12-14: Schnitt der Schussfäden ohne Grundierung, Verklebung und intakte Rückseite.

Bei den flächigen Gewebeprobe­n für die biaxiale Langzeitbelastung erfolgte das Zerschneiden von abweichend 13 Schussfäden (ebenfalls ohne vorherige Kettfadenentfernung) direkt in der Mitte der Probekörper. Der Schnitt erfolgte im markierten Probenbereich (s. auch B.1), nachdem zuvor die Schussfäden etwas aus der Grundierung herausgelöst wurden, indem mittels Weston-Sonde einmalig unter dem Faden hindurch gegriffen wurde (Abb. 15-17). Der verklebte Schnitt im Gewebe sowie prinzipiell unbehandelte Schnitt in der aufliegenden Grundierung (Abb. 18 und 19) sind somit flächig von allen Seiten mit intaktem Probenmaterial umgeben (siehe auch Abb. 20-22).

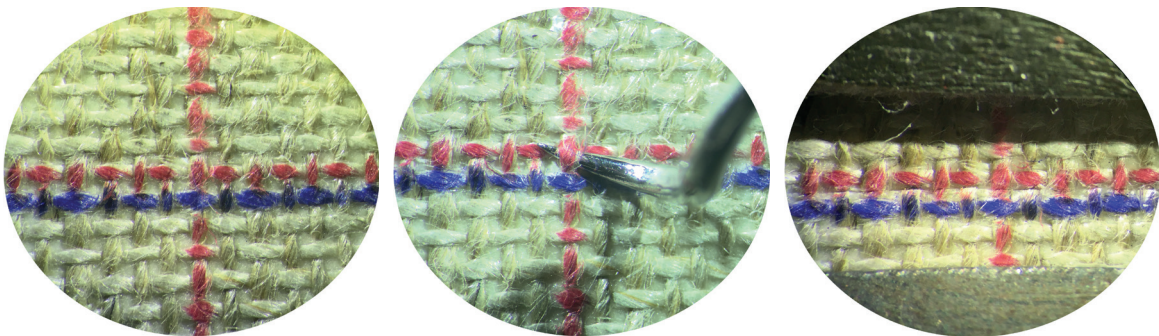


Abb. 15-17: Markierter Schnittbereich, Anheben der Schussfäden und anschließender Schnitt,

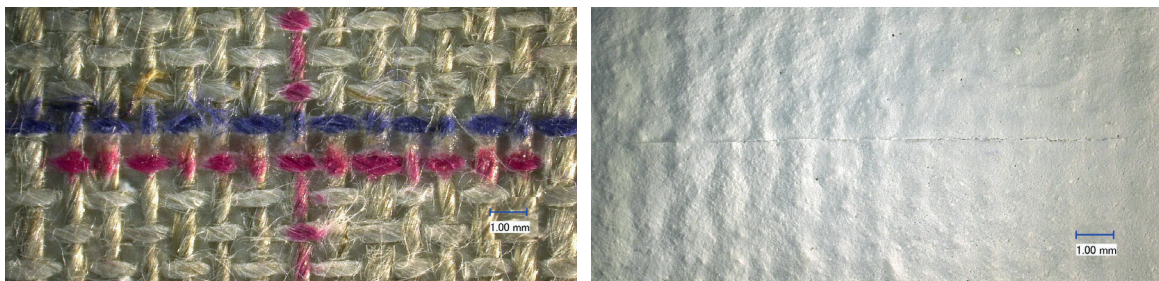


Abb. 18 und 19: Verklebte Probe von der Bearbeitungsseite und Rückseite mit Schnitt.

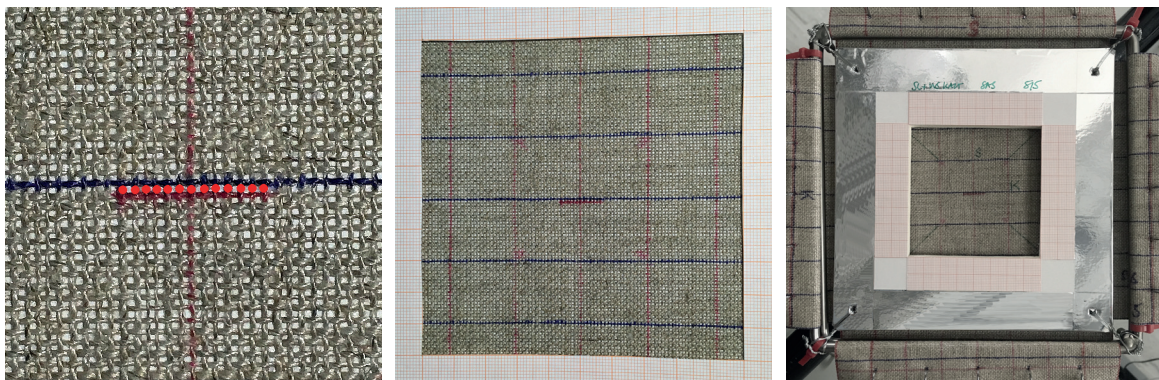
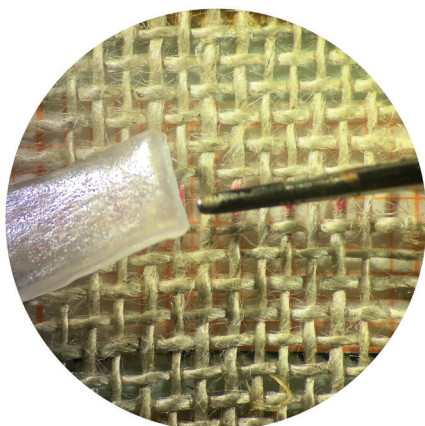


Abb. 20-22: Lokalisierung der Verklebung innerhalb der Gesamtprobenfläche.

B.2.6 Schmelzklebstoffe

Für die Verklebung mit sogenannten Polyamid-Schweißpulvern wurden diese zunächst in ca. 2 mm dicker Schicht auf Silikonpapier gerieselst, mit einem weiteren Silikonpapier bedeckt und mittels kleinem Bügeleisen (auf Temperatur des entsprechend angegebenen Schmelzbereiches der Produkte) zum Film zusammengeschmolzen. Nach Abkühlung wurde der Film in schmale Streifen geschnitten und zur Verklebung der Klebstoff direkt mit der Heiznadel vom Streifen zum Faden hin abgetragen, um eine möglichst geringe Klebstoffdosierung zu ermöglichen (Abb. 23). Das in der Praxis ebenfalls häufig angewandte Verfahren des Eindippens der Heiznadel direkt in das Pulver führt zu größeren Klebstoffmengen. Im Falle von reinem Beva 371 wurde ein solcher Klebstoffstreifen aus dem 65 µm dicken Fertigfilm gerollt; mit der Beva-Cellulosefaser-Mischung wurde ebenfalls ein Film aus der Mischung geschmolzen und in Streifen geschnitten.

Die Applikation und Dosierung der Schmelzklebstoffe weicht stark von allen anderen betrachteten Klebstoffen ab. Es konnte lediglich eine Volumenabschätzung der Klebstoffmenge unter dem Mikroskop vorgenommen werden, um eine möglichst vergleichbare Menge je Faden zu applizieren. Generell stellt es sich jedoch als äußerst schwierig dar, lediglich Kleinstmengen einzubringen. Trotz beschriebener Methodik stellte sich bei allen Schmelzklebstoffen eine gewisse, über die erforderliche Benetzung hinausgehende Überdosierung ein. Dies ist im Hinblick auf die praktische Anwendung an Objekten äußerst kritisch zu bedenken. In dem erforderlichen Schmelzbereich temperierbare Dosiergeräte mit Feindüse o.ä. könnten eine optimierte Klebstoffdosierung und -applikation ermöglichen.



Klebstofftyp	Durchschnittliche Klebstoffmenge je Probe (12 Fäden)
Beva 371	0,002 ± 0,001 g
Beva 371 + Arbocelmischung	0,002 ± 0,001 g
Lascaux 5065	0,003 ± 0,001 g
Lascaux 5350	0,002 ± 0,001 g
Kremer Polyamid	0,003 ± 0,001 g

Abb. 23: Applikation der Schmelzklebstoffe vom Streifen.

B.3 Rezepturen und Anleitungen

Die Vorgehensweisen orientierten sich prinzipiell an vorausgehenden Versuchsreihen. An dieser Stelle soll daher nur eine knappe Listung mit Verweis und ggf. Ergänzungen zwecks Vollständigkeit erfolgen. Sämtliche prozentuale Rezepturangaben der Arbeit beziehen sich auf durch Einwaage ermittelte Gewichtsanteile (GT).

Störleim

Zur Filmherstellung und Leimgewinnung aus Zuchtstörblasen, siehe detaillierte Anleitung bei FLOCK 2014 (S. 246). Die Lösung der vorbereiteten Filme zur direkten Leimherstellung erfolgte in demineralisiertem Wasser bei max. 30-35 °C.

Weizenstärkekleister

Zur Herstellung des nativen und modifizierten Weizenstärkekleisters, siehe Anleitung bei FLOCK 2014 (S. 247). Zur Mischung erfolgte die Zugabe des Weizenstärkekleisters in die warmen Leimlösungen (Störleim/Gelatine). Die gerührte Mischung wurde anschließend mittels Feinstrumpf (60 den) gesiebt. Der Klebstoff wurde immer frisch hergestellt und nicht gelagert. Als Sonderform wurden getrocknete Filme der Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung (ca. 65 µm Dicke) wieder entsprechend der Ursprungsmischung anteilig in demineralisiertem Wasser gelöst und als Klebstoff verwendet.

Gelatine

Die Herstellung der Gelatinelösung erfolgte direkt aus dem Granulat der Lieferform. Das Granulat wurde in demineralisiertem Wasser bei einer Temperatur von < 40 °C unter Rühren gelöst. Die hergestellte Leimkonzentration wurde im Kühlschrank aufbewahrt.

Celluloseether

Zur Herstellung der Celluloseetherlösungen sowie der Mischung dieser mit PVAc- und EVA-Dispersionen, siehe auch Anleitung bei FLOCK 2014 (S. 248). Das Methocel A4C-Pulver wurde hierzu in heißem, demineralisiertem Wasser dispergiert und erst nach Abkühlung und Ausbildung der gelartigen Konsistenz der Lösung mit Raumtemperatur verwendet.

Im Falle der getesteten Mischung mit Störleim wurde das hergestellte Celluloseether-"Gel" in die leicht erwärmte, flüssige Leimlösung gegeben (< 35 °C). Nach gleichmäßigem Verrühren wurde die Mischung abkühlen gelassen. Die Verarbeitung des Gemischs erfolgte mit Raumtemperatur, weder vorab im Kühlschrank gekühlt, noch zur Leimverflüssigung erwärmt. Eine Erwärmung führt

zum Viskositätsabfall aufgrund der Temperaturempfindlichkeit des Celluloseethers, sodass die angestrebte Verdickung des Störleims entfällt. Einen Sonderfall stellt die getestete Mischung von UHU easy Cyanacrylat dar, bei welcher die Pulverform direkt dem Klebstoff zugesetzt wurde.

Cellulosefaser- und MCC-Zusatz

Im Falle der Klebstoffmodifikation mit Arbocel-Cellulosefasern oder mikrokristalliner Cellulose (MCC) wurden die feinen Pulver in entsprechendem Anteil dem Klebstoff zugesetzt. Die Glutinleime wurden zuvor erwärmt und verflüssigt. Die Pulver wurden langsam unter Rühren eingerieselt und mittels Holzstäbchen homogen vermischt. Die Mischungen wurden erst nach einer Quelldauer von mind. 3 Std. zur Verklebung verwendet. Siehe hierzu auch FLOCK 2014 (S. 248). Als Sonderform wurden getrocknete Filme der Störleim-Arbocel BWW 40-Mischung (ca. 65 µm Dicke) wieder entsprechend der Ursprungsmischung anteilig in demineralisiertem Wasser gelöst und als Klebstoff verwendet.

Für die Mischung von Beva 371 und Arbocel-Cellulosefaser-Gemisch wurden zunächst die Fasertypen BWW 40 und B 800 als Pulver durch Schütteln und Rühren gemischt. Der Faserzusatz erfolgte in die verflüssigte Schmelze von Beva-Film (65 µm) unter Rühren.

Fadenbrücken

Die Herstellung der mit Beva 371 beschichteten Fadenbrücken erfolgte gemäß der bei FLOCK 2014 (S. 249 f.) dargestellten Vorgehensweise. Der 25 µm dicke Beva-Film wurde dazu mittels kleinem Reisebügeleisen auf die vorbereiteten Fadenbrücken aufgesiegelt. Der Anpressdruck betrug ca. 10 g/cm² bei einer Siegeltemperatur von ca. 73 °C (gemessen zwischen Heizfläche und Textil). Nach dem Aufsiegeln wurden die so beschichteten Fadenbrücken nochmals flächig mit ca. 3,5 g/cm² bei der Abkühlung beschwert. Nach der Abkühlung erfolgte die Rasterung mittels Heißluftföhn nach HEIBER (vgl. HEIBER 1999; HALLER et al. 2012).

Im Falle der Verwendung von Evacon-R mit Methocel A4C-Zusatz erfolgte der nasse Klebstoffauftrag direkt auf die einzelne Fadenbrücke unmittelbar vor der Applikation. Ein Aufsiegeln durch thermoplastische Reaktivierung ist aufgrund des hohen Schmelzbereichs nicht möglich.

Polyisocyanat-Zusatz

Die Modifikation der Dispersionen mittels Bayhydur ultra 305 (hydrophiles, aliphatisches Polyisocyanat auf Basis von Hexamethyldiisocyanat) zur Vernetzung erfolgte gemäß erster schriftlicher Empfehlung der Fa. Michelman / Ecronova durch 5 %-Zugabe in die Dispersion (19 GT Lieferform Dispersion, 1 GT Polyisocyanat) und homogenes Verrühren mittels Holzstäbchen. Im Falle vorliegender OH-Funktionalität (vgl. Ecronova RA 646 H) wäre das Mischungsverhältnis idealerweise abweichend nach Äquivalentgewichten zu berechnen.

B.4 Gewebebehandlung

Vorbereitung	
Aufspannung	<p>Zur Dekatur und Beschichtung wurde eine vergleichbare Aufspannung umgesetzt: Dabei wurde ein bereits zuvor genutzter Aufbau (SCHÄFER 2010, S. 42 ff.) modifiziert. Beim genannten Beispiel wurde die Aufspannung des Gewebes auf hölzerne Keilrahmen mittels an den Geweberändern angebrachten Klemmbacken erzielt, an welche definiertes Gewicht für die gewünschte näherungsweise Spannung des Gewebes [N/m] angehängt wurde (vgl. Abb. 01). Anschließend wurde die erzielte Grundspannung durch Festtackern des Gewebes auf dem Keilrahmen fixiert.</p> <p>Im modifizierten Aufbau erfolgte statt der Klemmung der Geweberänder ein Einschnitt in den Ecken (vgl. rote Markierung Abb. 02) und Umschlagen der vier Ränder zur Vernähung der entstehenden Gewebetasche mittels gerader Nähmaschinen-naht. In die so erzielten Taschen wurden Vollwellen definierten Gewichts zur Erzielung der Aufspannung eingeschoben (Abb. 02-04) und anschließend das Gewebe nach Kontrolle der fadengeraden Ausrichtung mittels Tackerklammern seitlich am Rahmen fixiert (diagonal gesetzt, Abstand ca. 10 mm). Auf diese Weise sollte eine gleichmäßigere Spannungsverteilung erzielt werden sowie eine bessere Fadenbeweglichkeit durch Verzicht auf Klemmung erhalten bleiben.</p>

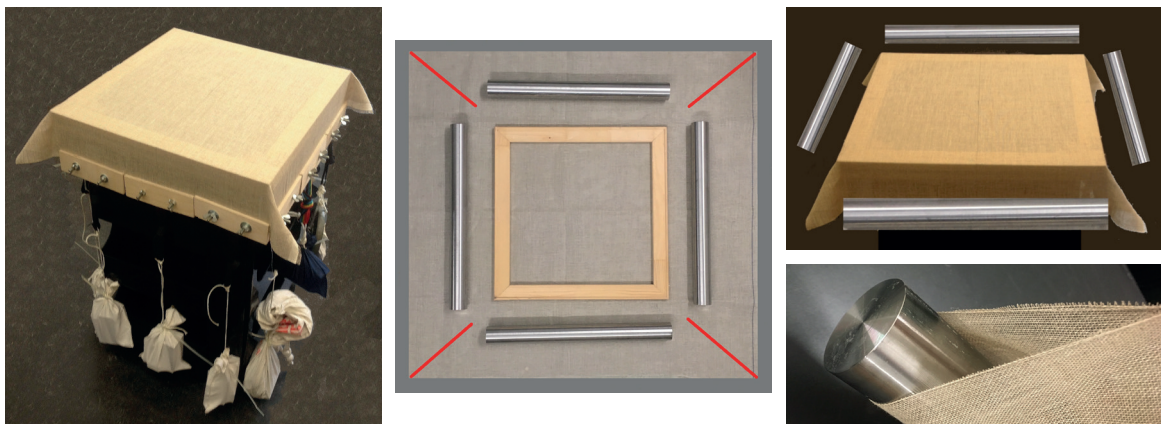


Abb. 01-04: Modifikation des waagerechten Aufspannens des Testgewebes mittels an Klemmbacken angehängten Gewichts (links) durch stattdessen eingehängte Edelstahl-Vollwellen (rechts).

Detailangaben	
Keilrahmen	50 cm x 50 cm (Nadelholz)
Fadengerader Gewebezuschnitt	ca. 100 cm x 100 cm (Typ Pattina L 13 T. E. Sironi, vgl. C.1.1)
Vollwellen	4x je 8,4 kg (Edelstahl)
Theoretische Linienspannung	ca. 165 N/m (ohne Berücksichtigung von Reibungsverlusten o.ä.)

Durchführung	
Anmerkung	Im Rahmen dieser Vorversuche zur Gewebebeschichtung wurde kein finales Konzept zur Probekörpervorbereitung erarbeitet. Für aufbauende Testreihen wäre die Durchführung der Beschichtung nach detailliert standardisierten Maßgaben zu erarbeiten, insbesondere hinsichtlich des Auftrags definierter Schichtdicken (bspw. durch die Nutzung von Lackhanteln oder Filmziehrahmen mit Einschliff).
Dekatur	Zur Dekatur wurden die vorbereitend aufgespannten Gewebe senkrecht stehend in drei Zyklen mit heißem Wasser begossen (Leitungswasser / Wasserkocher) und anschließend über Nacht waagrecht liegend getrocknet. Nach Trocknung erfolgte das Abspannen (Ziehen der Tackerklammern) und die erneute Aufspannung mittels Vollwellen. Nach Dekatur zu beschichtende Gewebe wurden vor weiterer Behandlung nach dem letzten Trocknungszyklus nochmals nachgespannt.
Warmleimung	Die Warmleimung erfolgte mittels Hasenhautleim 7 % in demin. Wasser: Dazu wurde die warme Lösung satt mittels 60 mm breitem Borstenpinsel in Schussrichtung auf das Gewebe gestrichen, sodass mit einem Pinselzug das Gewebegitter vollständig mit Leimlösung geschlossen war und gleichzeitig kein Leimüberschuss an der Oberfläche stand.
Kaltleimung	Die Kaltleimung erfolgte mit der festen, nach erstmaliger Erwärmung erneut verfestigten Leimlösung (Hautleim 7 % GT in demin. H ₂ O): Hierzu wurde die Gallerte mittels 50 mm breitem Kunststoffspachtel vornehmlich in Schussrichtung auf das Gewebe gestrichen, sodass auch hier sämtliche Zwischenräume des Fadengitters mit Leim verschlossen waren. Abschließend wurde der hindurchgedrückte Leimüberschuss von der Geweberückseite mittels Spachtel abgenommen.
Grundierung	Zur Grundierung wurden 250 g der Hasenhautleimlösung (7 % in H ₂ O) mit 400 g der Mischung Champagner / Bologneser Kreide (GT 1:1) als Füllstoff versetzt (bei Champagner Kreide handelt es sich um reines Calciumcarbonat CaCO ₃ , Bologneser Kreide ist ein Gemenge aus Calciumcarbonat und Calciumsulfat CaSO ₄ bzw. Gips CaSO ₄ ·2H ₂ O). Dazu wurde zunächst das Füllstoffgemisch in die warme Leimlösung gesiebt bzw. eingerieselt, über Nacht eingesumpft, anschließend erneut erwärmt und die fertige Grundiermasse nach Aufrühren nochmals gesiebt. Die erwärmte Grundierung wurde mittels Gummi-Rakel in Schussrichtung auf die Gewebe aufgetragen, sodass die Grundiermasse die Unebenheiten entsprechend der Höhen der Bindungspunkte des Gewebes ausglich.



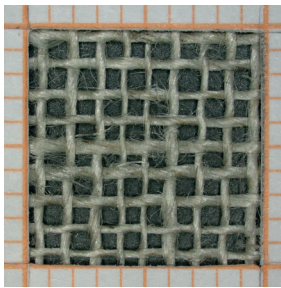
Abb. 05: Arbeitsfoto zur Gewebebeschichtung.

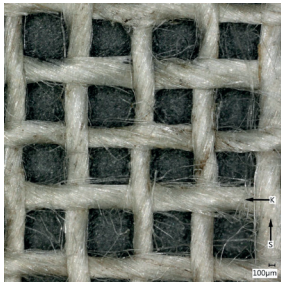
Sironi / unbehandelt (I)

Die vollständig unbehandelte Referenz ist unter C.1.1 aufgeführt.

Sironi / dekatiert (II)

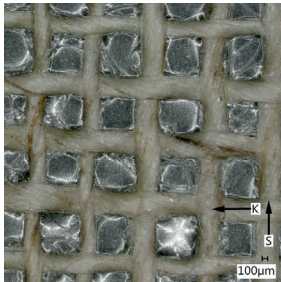
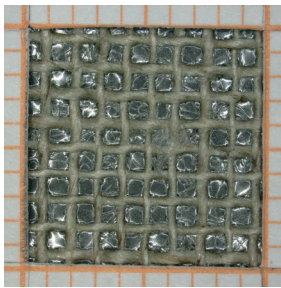
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 73,0 °	
	Schuss	Z	ca. 71,7 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,39 mm		
	Schuss	ca. 0,38 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 35,1 %		
	Schuss	ca. 34,2 %		
	Gesamt	ca. 57,3 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 150 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,50 mm			





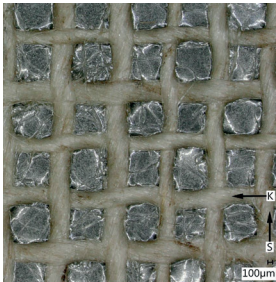
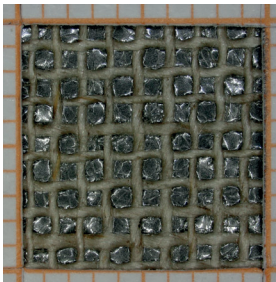
Sironi / dekatiert + warm geleimt (III)

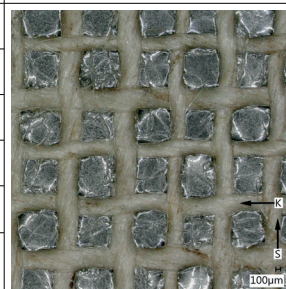
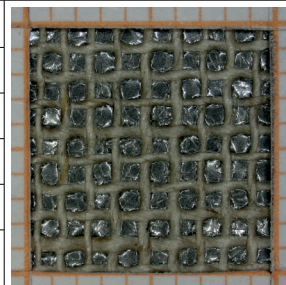
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 80,7 °	
	Schuss	Z	ca. 72,4 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,40 mm		
	Schuss	ca. 0,34 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 36 %		
	Schuss	ca. 30,6 %		
	Gesamt	ca. 55,6 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 167 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,53 mm			



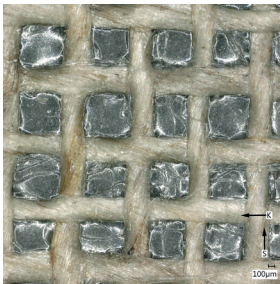

Sironi / warm geleimt (IV)

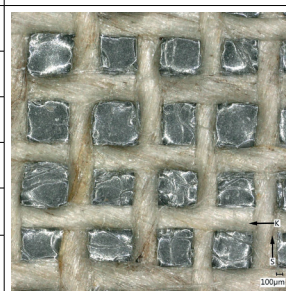
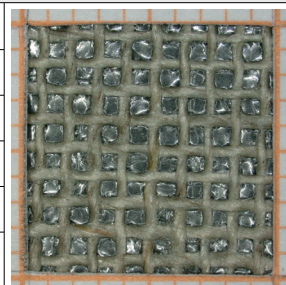
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 728 °	
	Schuss	Z	ca. 72,2 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,39 mm		
	Schuss	ca. 0,41 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 35,1 %		
	Schuss	ca. 36,9 %		
	Gesamt	ca. 59,1 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 170 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,50 mm			



**Sironi / dekatiert + kalt geleimt (V)**

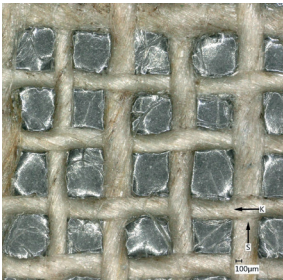
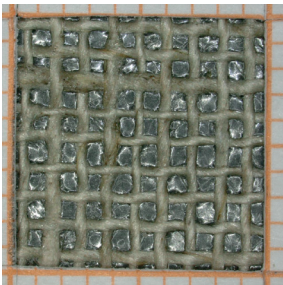
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 71,4 °	
	Schuss	Z	ca. 70,8 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,42 mm		
	Schuss	ca. 0,42 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 37,8 %		
	Schuss	ca. 37,8 %		
	Gesamt	ca. 61,3 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 176 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,46 mm			

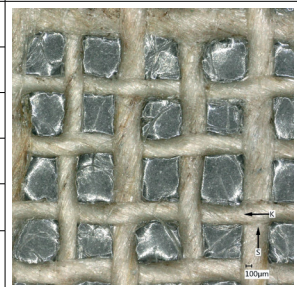




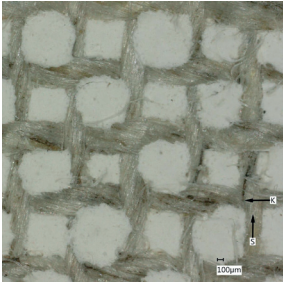
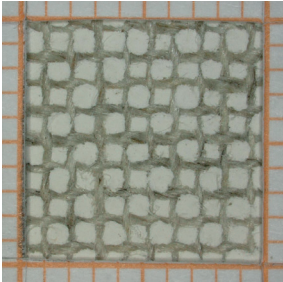
Sironi / kalt geleimt (VI)

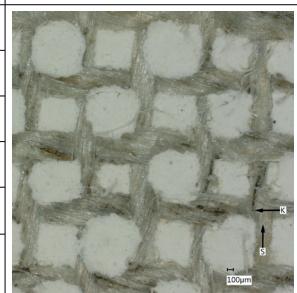
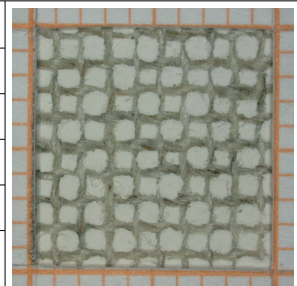
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 70,6 °	
	Schuss	Z	ca. 71,2 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,43 mm		
	Schuss	ca. 0,44 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 38,7 %		
	Schuss	ca. 39,6 %		
	Gesamt	ca. 63,0 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 180 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,50 mm			



**Sironi / grundiert (VII)**

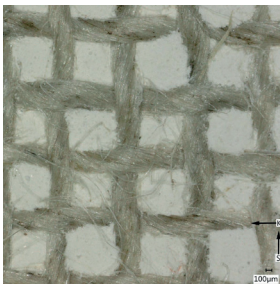
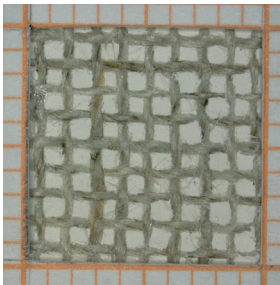
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 71,6 °	
	Schuss	Z	ca. 71,2 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,44 mm		
	Schuss	ca. 0,42 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 39,6 %		
	Schuss	ca. 37,8 %		
	Gesamt	ca. 62,4 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 600 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,60 mm			

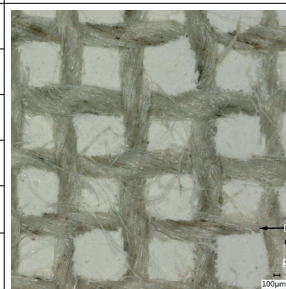
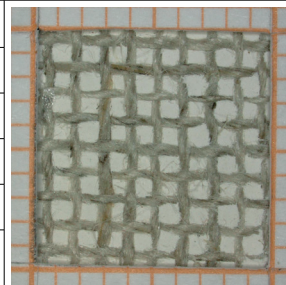




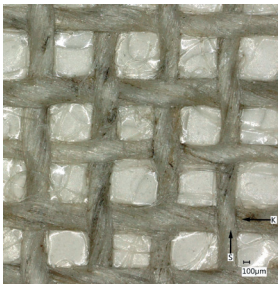
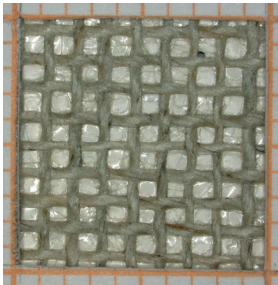
Sironi / dekatiert + grundiert (VIII)

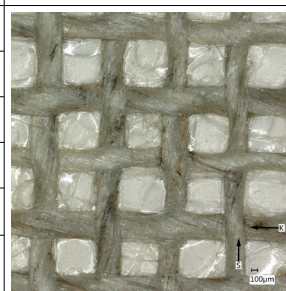
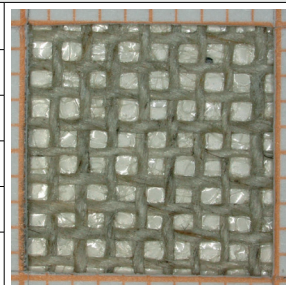
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 72,2 °	
	Schuss	Z	ca. 69,6 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,40 mm		
	Schuss	ca. 0,41 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 36,0 %		
	Schuss	ca. 36,9 %		
	Gesamt	ca. 59,6 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 620 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,58 mm			



**Sironi / dekatiert + warm geleimt + grundiert (IX)**

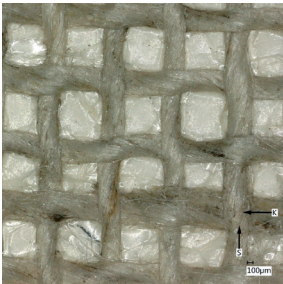
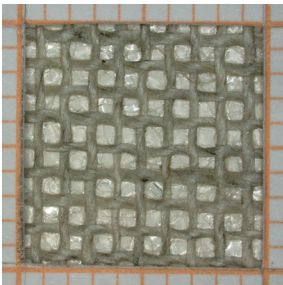
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 73,6 °	
	Schuss	Z	ca. 71,8 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,43 mm		
	Schuss	ca. 0,45 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 38,7 %		
	Schuss	ca. 40,5 %		
	Gesamt	ca. 63,5 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 530 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,55 mm			

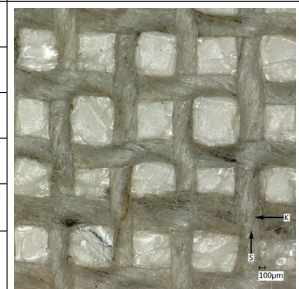
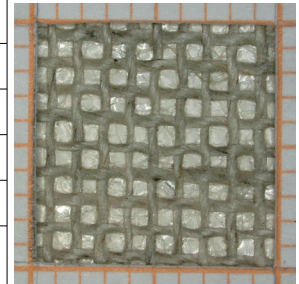




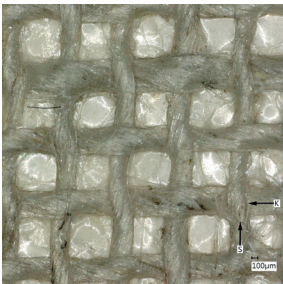

Sironi / warm geleimt + grundiert (X)

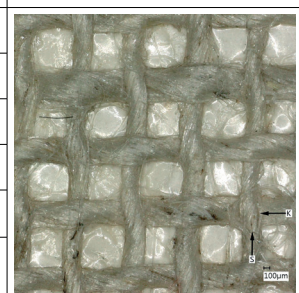
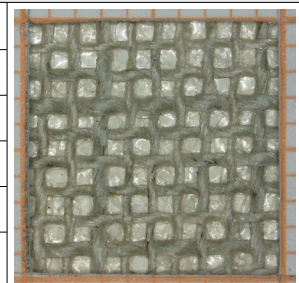
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 72,0 °	
	Schuss	Z	ca. 71,8 °	
Fadendurchmesser	Kette	0,45 mm		
	Schuss	0,43 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 40,5 %		
	Schuss	ca. 38,7 %		
	Gesamt	ca. 63,5 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 500 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,55 mm			



**Sironi / dekatiert + kalt geleimt + grundiert (XI)**

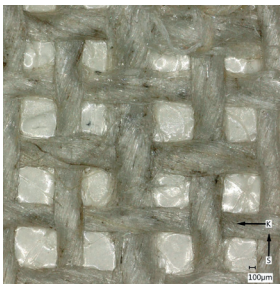
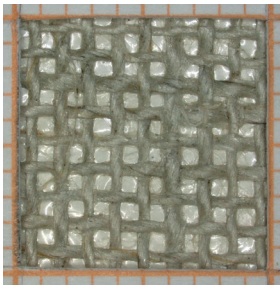
Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 73,2 °	
	Schuss	Z	ca. 71,6 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,44 mm		
	Schuss	ca. 0,45 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 39,6 %		
	Schuss	ca. 40,5 %		
	Gesamt	ca. 64,0 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 650 g/m ²			
Gewebedicke	ca. 0,60 mm			

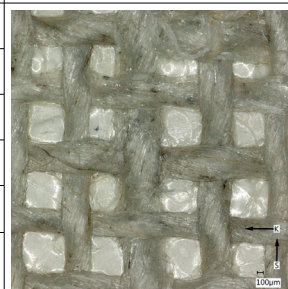
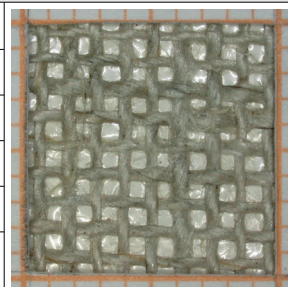




Sironi / kalt geleimt + grundiert (XII)

Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	ca. 73,0 °	
	Schuss	Z	ca. 70,3 °	
Fadendurchmesser	Kette	ca. 0,46 mm		
	Schuss	ca. 0,47 mm		
Gewebefüllung	Kette	ca. 41,4 %		
	Schuss	ca. 42,3 %		
	Gesamt	ca. 66,2 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 560 g/m²			
Gewebedicke	ca. 0,51 mm			





B.5 Langzeitaufbau

Äquibiaxiale Zugrahmen		
Funktionsprinzip	<p>Die biaxialen Zugrahmen bestehen aus zwei rechtwinkligen Rahmenhälften; die obere (doppelschienige) Hälfte wird im Winkel eingehangen und fixiert, während die untere (einschienige) Hälfte davon unabhängig frei beweglich verbleibt (Abb. 01). Durch das Einhängen einer Gewebeprobe zwischen die Rahmenwinkel wird diese (um 45 ° rotiert) durch den nach unten gerichteten Zug der unteren Rahmenhälfte äquibiaxial gespannt (Abb. 02). Durch Einhängen definierter Masse an den unteren Rahmenwinkel lässt sich die gewünschte Gewichtskraft einstellen. Wobei sich erst über die Winkelbeziehungen die so wirkende Kraft [N] bzw. Linienspannung [N/m] der Probe in ihren um 45 ° rotierten Hauptachsen (Schuss- und Kettrichtung) berechnen lässt (vgl. Kap. 5.3.1). Die Spannung ist als näherungsweise zu betrachten, sofern Reibungsverluste o.ä. nicht ausgeschlossen werden können. Der Aufbau erlaubt die Langzeitbetrachtung der Probe unter konstanter Last zwecks Evaluierung der Dehnungsentwicklung (Kriechversuch).</p>	
Detailangaben	Maße	450 mm Schenkellänge, ca. 30 mm max. Tiefe
	Material	Edelstahlstangen, 10 mm Durchmesser
	Gewicht	ca. 1800 g gesamt (oberer und unterer Rahmenwinkel)
	Innenrahmen	200 x 200 mm ² , Edelstahlstangen, 6 mm Durchmesser
	Rolllager	3D-Druck und Eisenwarenbedarf
	Anfertigung	Zentralwerkstatt Maschinenbau TH Köln

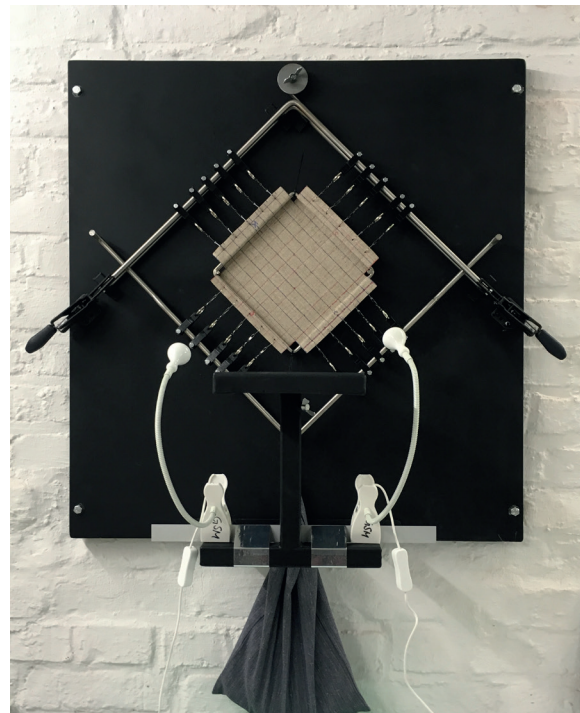


Abb. 01: Befestigungsplatte inkl. Fotostativ-Arm mit eingehängtem Basis-Zugrahmen.

Abb. 02: Exemplarisch eingehängte Gewebeprobe mit zusätzlichem Sandbeutelgewicht.

Innenrahmen	
<p>Vorbereitung</p>	<p>Die vorbereiteten Gewebeprobe(n) (siehe auch B.1) wurden nicht direkt flächig im Zugrahmen aufgespannt, sondern ein zusätzlicher Innenrahmen (200 x 200 mm²) genutzt, um eine weitere Kraftumleitung zu schaffen. Ziel ist, dass die Krafteinleitung nicht in selber Ebene mit der gespannten Gewebefläche liegt. Vielmehr soll so die Aufspannung eines Leinwandgemäldes durch seitliche Aufspannung der Umschlagränder auf einem Keil- oder Spannrahmen angenähert und die Spannung gleichmäßiger verteilt werden. Der Innenrahmen besteht aus zwei, mittels Stiften ineinandergreifender Einzelrahmen, zwischen welchen die Gewebeprobe hindurchgezogen wird (Abb. 03-06).</p> <p>Durch den späteren äquibiaxialen Zug der Gewebeprobe bei Einhängung im Zugrahmen werden die zwei Einzelhälften des Innenrahmens sicher fixiert. Um dabei eine Klemmung und damit verbundene Blockierung der Probe zu vermeiden, wurden in den Ecken der Innenrahmen Kabelbinder als Abstandhalter mit eingeklemmt. Diese dienen zudem der temporären Fixierung der Gewebeprobe zwischen den ungespannt noch beweglichen Einzel-Innenrahmen. Zwecks zusätzlicher Kontrolloption für die fotobasierte Dehnungsauswertung via DIC wurde zudem ein weiteres Inlay mit Mikrometer-Maßstab (Kapa-Platte mit Beklebung) berührungsfrei zur Probe innerhalb des Innenrahmens mittels Drähten starr fixiert (Abb. 07-09).</p>

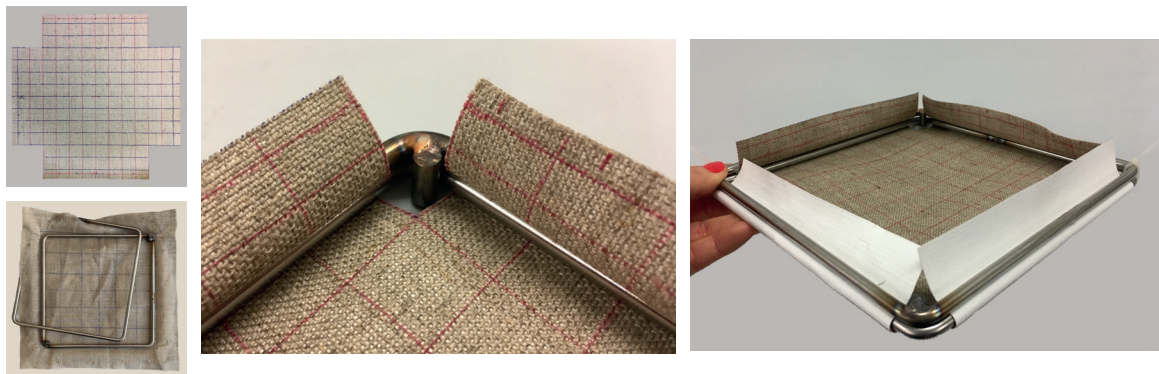


Abb. 03-06: Prinzip des zweiteiligen Innenrahmens zur Kraftumleitung und Probenfixierung.

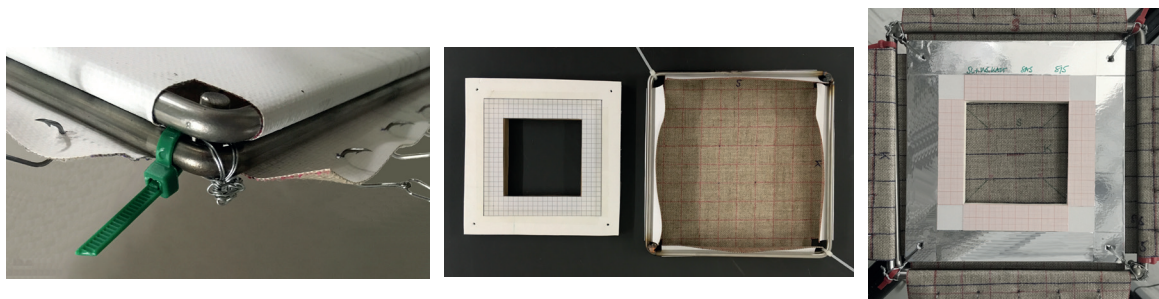


Abb. 07-09: Kabelbinder zwecks Klemmabstands sowie Fixierung des zusätzlichen Inlays mittels starrer Drähte im Innenbereich des Zusatzrahmens.



Abb. 10: Serielle Vorbereitung der bereits verklebten Proben zur Aufspannung.

Aufspannung

Durchführung

Zur Aufspannung wurden die Zugrahmen waagrecht auf einem Tisch abgelegt. Für die Aufspannung wurden zugfeste Angelhaken verwendet, welche über einen Wirbel drehbar mit den beweglichen Rolllagern der Zugrahmen verbunden wurden. Die im Innenrahmen vorbereiteten Proben (Abb. 10) wurde dann an den bereits beim Probekörperzuschnitt markierten Stellen mit den Angelhaken durchgestochen (Abb. 11 und 12). Anschließend wurde der Gesamt-Rahmen (noch ohne Ausübung von Zug o.ä. auf die mittige Probe) senkrecht aufgerichtet und dann langsam der untere Zugrahmenschenkel herabgelassen.



Abb. 11 und 12: Detailansicht der Lager und Aufhängung an den Schenkeln des oberen, doppel-schienigen Rahmenwinkels. Selbiger Aufbau findet sich auch am unteren, einschienigen Teil des Zugrahmens.

Dauerbelastung			
Lastzugabe	Zwecks erster Ausrichtung der Probe wurde zunächst lediglich das Gesamtgewicht des unteren Rahmenwinkels plus die weiteren Einzelteile belassen und dann schrittweise Sand in unten eingehängte, abgedichtete Stoffbeutel als zusätzliches Gewicht eingefüllt. Die Zugrahmen wurden dazu und während des weiteren Versuchs auf Rollständern eingehangen (Abb. 13 und 14).		
	Tag 1-3	1,2 kg Eigengewicht + schrittweise Sandzulage	
	Tag 3-48	3,7 kg (1,2 kg Eigengewicht + 2,5 kg Sand)	~ 130 N/m
	Tag 48-83	4,7 kg (1,2 kg Eigengewicht + 3,5 kg Sand)	~ 165 N/m
	Tag 83-117	5,7 kg (1,2 kg Eigengewicht + 4,5 kg Sand)	~ 200 N/m



Abb. 13 und 14: Hängung von 20 der 21 Rahmen während des Versuchs auf Rollständern.

Dehnungsauswertung	
Fotodokumentation	<p>Während 20 der 21 Rahmen auf Rollständern hängend gelagert wurden und für die regelmäßige Fotodokumentation immer möglichst erschütterungsfrei in die Befestigungsplatte eingehangen und -gespannt werden mussten, wurde ein zusätzlicher Rahmen fest hängend mit fix installierter Rahmen-, Licht- und Kameraposition beobachtet (Abb. 15 und 16). Dieser Aufbau ist prinzipiell zu bevorzugen, war jedoch auf Grund der Summe an Einzelversuchen logistisch nicht für alle Rahmen umsetzbar. Bei der Probendokumentation im Wechselgestell ist daher darauf zu achten, dass für die spätere Dehnungsauswertung via DIC alle Abstände, Winkel und Beleuchtungsvoraussetzungen vollständig standardisiert reproduziert werden können. Neben der festen Kamera- und Lampenpositionierung wurde dazu nicht nur der obere Rahmenwinkel eingehangen, mittels Schraube festgezogen und mit Spannern festgeklemmt, sondern auch der bewegliche untere Rahmenschenkel mittels Magnetbügeln im immer gleichen Abstand zur Rückseitenplatte fixiert. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass das eingehängte Sandgewicht frei hängt und nicht unterschiedlich rückseitig „anlehnt“; aus diesem Grund wurde am Wechselgestell speziell Raum für den Sandsack unterhalb der montierten Befestigungsplatte belassen.</p>

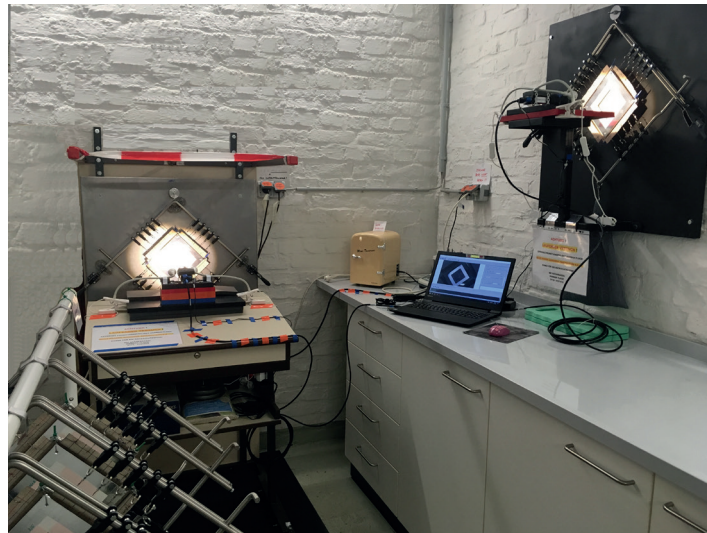


Abb. 15: Arbeitsfoto bei Bilddokumentation zur Dehnungsmessung; links im Bild zu sehen ist das Wechselgestell zur Probendokumentation der auf den Rollständern hängend gelagerten Zugrahmen mit fester Kamerainstallation.

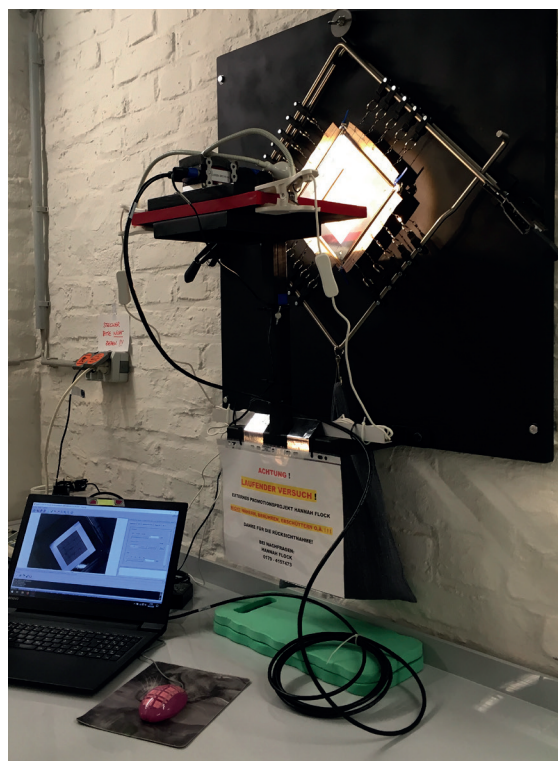


Abb. 16: Zu sehen ist die zu bevorzugende feste Installation des gesamten Prüfaufbaus, welche hier lediglich exemplarisch für einen Zugrahmen mit eigenem Kamerasystem umgesetzt wurde.

C Materialverzeichnis

C.1 Gewebecharakterisierung

C.1.1 Pattina L 13 T. E. Sironi

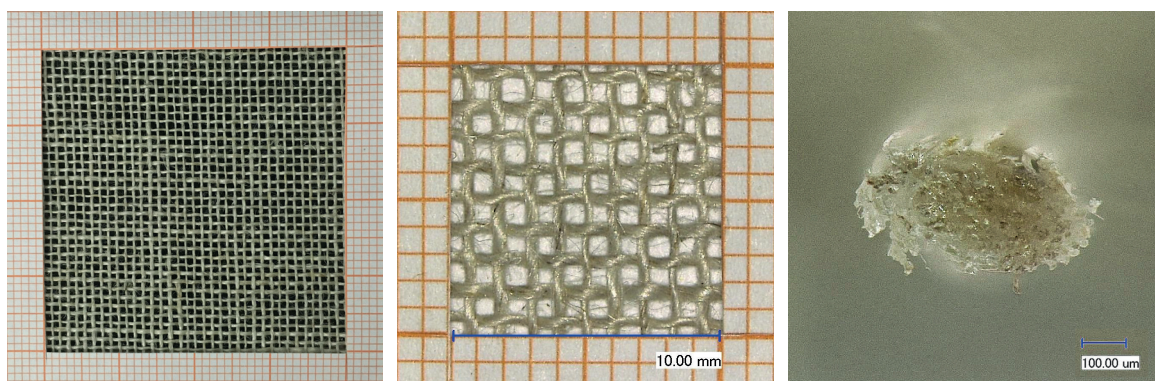


Abb. 01-03: Gewebeansichten mit vertikalem Schussfadenverlauf und Schussfadenquerschnitt.

Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Pattina L 13 (puro lino)			Tessitura Enrico Sironi Via Cappuccini 50 21013 Gallarate / Italien www.sironienrico.it info@sironienrico.it
Hersteller / Vertrieb	Tessitura Enrico Sironi			
Faserart	Flachs (Leinen)			
Webart	Leinenbindung			
Behandlung	Laut Angabe ohne Schlichte			
Webdichte	Kette	9 Fäden / cm		Messung im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop.
	Schuss	9 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	70,2 ± 2,4 ° (~ 70 °)	Messung (senkrecht zum Faserverlauf) im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop (n = 20).
	Schuss	Z	72,3 ± 1,8 ° (~ 72 °)	
Fadendurchmesser	Kette	459 ± 59 µm (~ 0,46 mm)		Messung im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop (n = 40).
	Schuss	448 ± 77 µm (~ 0,45 mm)		
Gewebefüllung	Kette	ca. 41,3 %		Berechnung nach ROUBA 1993. Bei FLOCK 2014 sind auf Grund eines Berechnungsfehlers abweichende Werte angegeben.
	Schuss	ca. 40,4 %		
	Gesamt	ca. 65 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 160 g/m²			Einwaage von 1 m².
Gewebedicke	482 ± 18 µm (~ 0,48 mm)			Messung mit Mitutoyo Messschraube, Anpressdruck 0,016 N/mm² (n = 20).
Analyse / Schlichte	Polyethylenglykol (geringe Menge)			Gemäß FTIR-Analyse durch Prof. Dr. Elisabeth Jägers.

C.1.2 Claessens Canvas 070

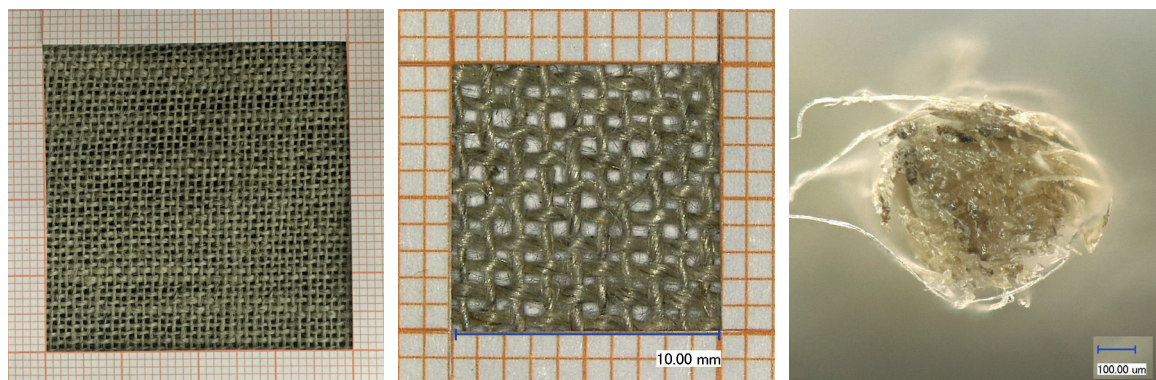


Abb. 04-06: Gewebeansichten mit vertikalem Schussfadenverlauf und Schussfadenquerschnitt.

Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Canvas 070 / 2,10 m			Claessens Canvas Molenstraat 47 8790 Waregem / Belgien www.claessenscanvas.com info@claessenscanvas.com
Hersteller / Vertrieb	Claessens Canvas			
Faserart	Flachs (Leinen)			
Webart	Leinenbindung			
Behandlung	Laut Angabe nur auf Kettfäden Schlichte „Ensiwax CPA-CV (liquid warp-waxing agent based on synthetic polymers “ (Fa. GOVI N.V.)			
Webdichte	Kette	10 Fäden / cm		Messung im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop.
	Schuss	10 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	68,0 ± 2,5 ° (~ 68 °)	Messung (senkrecht zum Faserverlauf) im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop (n = 20).
	Schuss	Z	69,6 ± 2,0 ° (~ 70 °)	
Fadendurchmesser	Kette	598 ± 76 µm (~ 0,6 mm)		Messung im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop (n = 40).
	Schuss	493 ± 58 µm (~ 0,5 mm)		
Gewebefüllung	Kette	ca. 59,8 %		Berechnung nach ROUBA 1993.
	Schuss	ca. 49,3 %		
	Gesamt	ca. 79,6 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 220 g/m²			Einwaage von 1 m².
Gewebedicke	630 ± 20 µm (~ 0,63 mm)			Messung mit Mitutoyo Messschraube, Anpressdruck 0,016 N/mm² (n = 20).
Analyse / Schlichte	Carboxymethylcellulose mit geringer Gips-Beimengung (CaSO₄)			Gemäß FTIR-Analyse durch Prof. Dr. Elisabeth Jägers.

C.1.3 Claessens Canvas 170

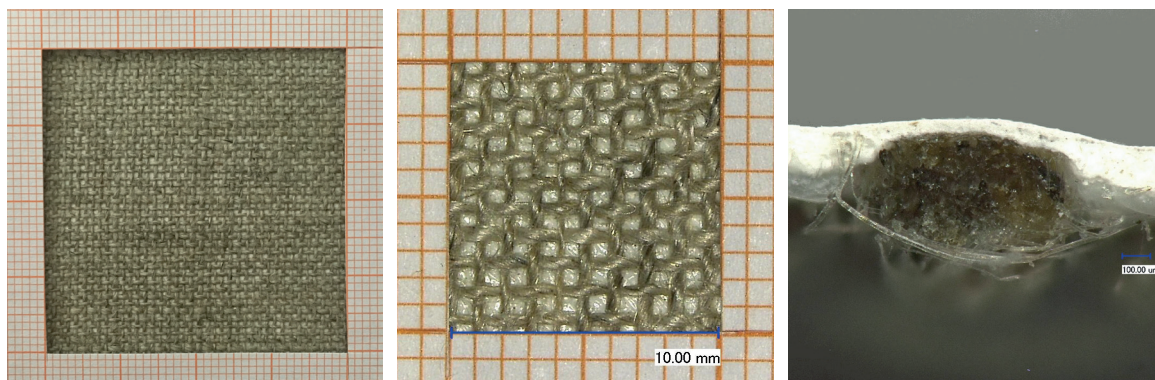


Abb. 07-09: Gewebeansichten mit vertikalem Schussfadenverlauf und Schussfadenquerschnitt.

Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Canvas 170 / 2,10 m			Claessens Canvas Molenstraat 47 8790 Waregem / Belgien www.claessenscanvas.com info@claessenscanvas.com
Hersteller / Vertrieb	Claessens Canvas			
Faserart	Flachs (Leinen)			
Webart	Leinenbindung			
Behandlung und Beschichtung	Laut Angabe nur auf Kettfäden Schlichte „Ensiwax CPA-CV“ sowie Acrylgrundierung (zweifach)			
Webdichte	Kette	10 Fäden / cm		Messung im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop.
	Schuss	10 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	68,5 ± 3,8 ° (~ 69 °)	Messung (senkrecht zum Faserverlauf) im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop (n = 20).
	Schuss	Z	68,1 ± 2,9 ° (~ 68 °)	
Fadendurchmesser	Kette	551 ± 57 µm (~ 0,55 mm)		Messung im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop (n = 40).
	Schuss	496 ± 62 µm (~ 0,5 mm)		
Gewebefüllung	Kette	ca. 55,1 %		Berechnung nach ROUBA 1993.
	Schuss	ca. 49,6 %		
	Gesamt	ca. 77,4 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 400 g/m²			Einwaage von 1 m².
Gewebedicke	606 ± 22 µm (~ 0,61 mm)			Messung mit Mitutoyo Messschraube, Anpressdruck 0,016 N/mm² (n = 20).
Analyse / Schlichte	Polyvinylalkohol, ggf. mit Acrylat-Zusatz			Gemäß FTIR-Analyse durch Prof. Dr. Elisabeth Jägers.
Analyse / Beschichtung	Ethylacrylat, Kreide (CaCO₃) und weitere Füllstoffbeimengungen			

C.1.4 Claessens Canvas 70

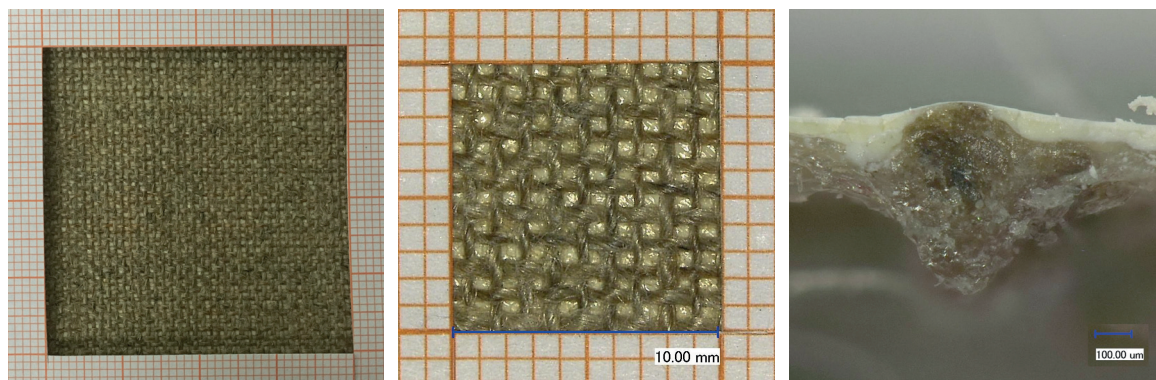


Abb. 10-12: Gewebeansichten mit vertikalem Schussfadenverlauf und Schussfadenquerschnitt.

Gewebestrukturanalyse				
Produktname	Canvas 70 / 2,10 m			Claessens Canvas Molenstraat 47 8790 Waregem / Belgien www.claessenscanvas.com info@claessenscanvas.com
Hersteller / Vertrieb	Claessens Canvas			
Faserart	Flachs (Leinen)			
Webart	Leinenbindung			
Behandlung und Beschichtung	Laut Angabe nur auf Kettfäden Schlichte „Ensiwax CPA-CV“ sowie Ölgrundierung (zweifach)			
Webdichte	Kette	10 Fäden / cm		Messung im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop.
	Schuss	10 Fäden / cm		
Fadendrehung und -winkel	Kette	Z	68,7 ± 2,0 ° (~ 69 °)	Messung (senkrecht zum Faserverlauf) im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop (n = 20).
	Schuss	Z	71,2 ± 2,7 ° (~ 71 °)	
Fadendurchmesser	Kette	602 ± 63 µm (~ 0,6 mm)		Messung im Gewebeverbund mit Keyence Videomikroskop (n = 40).
	Schuss	560 ± 72 µm (~ 0,56 mm)		
Gewebefüllung	Kette	ca. 60,2 %		Berechnung nach ROUBA 1993.
	Schuss	ca. 56,0 %		
	Gesamt	ca. 82,5 %		
Flächenbezogene Masse	ca. 465 g/m².			Einwaage von 1 m².
Gewebedicke	645 ± 26 µm (~ 0,65 mm)			Messung mit Mitutoyo Messschraube, Anpressdruck 0,016 N/mm² (n = 20).
Analyse / Schlichte	Polyvinylalkohol, ggf. mit Acrylat-Zusatz			Gemäß FTIR-Analyse durch Prof. Dr. Elisabeth Jägers.
Analyse / Beschichtung	Leinöl, Bariumsulfat (BaSO₄) und weitere Pigmentzuschläge			

C.2 Klebstoffmaterialien

Nachfolgend werden Informationen zu den verwendeten Klebstoffmaterialien gelistet. Detailangaben zu den Produkten wurden aus Herstellerangaben und Datenblättern übernommen. Zusätzliche Angaben finden sich zudem bei FLOCK 2014 (S. 202-215 / A.3.1)

Produkt	Spezifikation	Details	Hersteller	Bezugsadresse
Arbocel BWW 40	Reine Cellulosefasern, wasserquellbar	L: ca. 200 µm, d: ca. 20 µm, WBV: ca. 550 %	J. Rettenmeier & Söhne GmbH & Co KG jrs.de	Kremer Pigmente GmbH & Co KG kremer-pigmente.com
Arbocel BC 600-30		L: ca. 40 µm, d: ca. 20 µm, WBV: k.A.		Deffner & Johann GmbH deffner-johann.de
Arbocel B 800		L: ca. 130 µm, d: ca. 20 µm, WBV: ca. 470 %		s. Hersteller
Bayhydur ultra 305	Hydrophiles, aliphatisches Polyisocyanat auf Basis von Hexamethylen-diisocyanat (HDI)	NCO-Gehalt ca. 16 %	Covestro Deutschland AG covestro.com	(Zur Verfügung gestellte Produktprobe) CSC Jäklechemie GmbH & Co. KG
Beva 371 (Film 25 / 65 µm)	Copolymere Ethylenvinylacetate mit Zusätzen von Cyclohexanonharzen, Phthalat-Ester (von Hydroabietyl-alkohol) und Paraffin	Feststoff 100 %	Conservator's Products Company conservators-products.com	Deffner & Johann GmbH deffner-johann.de Kremer Pigmente GmbH & Co KG kremer-pigmente.com
Ecronova RA 646 H	Reinacrylat-Dispersion mit Selbstvernetzung	Feststoff ca. 40 %, pH ca. 6,5-7,5, Tg ca. 25/59 °C, OH-Gehalt 1,8 %, frei von APEO	Michelman Deutschland GmbH (Fusion mit Ecronova Polymer GmbH) michelman.com	(Vom Hersteller zur Verfügung gestellte Produktproben)
Ecrothan 4075	Wässrige Polyurethan-Dispersion (auf Basis von Polyesterpolyolen)	Anionisch, Feststoff ca. 40 % pH ca. 7-8,5		

Produkt	Spezifikation	Details	Hersteller	Bezugsadresse
Ecrovin LV 340 eco	Wässrige Polyvinylacetat-Dispersion (auf Basis Vinylacetat/Vinylversat/Maleinsäureester)	Anionisch, frei von APEO (Tg < 30 °C)	Michelman Deutschland GmbH (Fusion mit Ecronova Polymer GmbH) michelman.com	(Vom Hersteller zur Verfügung gestellte Produktprobe)
Evacon-R / Neutral pH Reversible EVA Adhesive	Wässrige copolymere Ethylen-vinylacetat-Dispersion	Feststoff ca. 50 %, pH ca. 6-8 (neutral gepuffert), enthält gemäß FTIR Polyvinylalkohol zur Stabilisierung	(k.A.)	CXD International Conservation by Design cxdinternational.com
Gelatine Gelita Imagel	Technische Photogelatine Typ A	185 g Bloom, pH ca. 5	Gelita AG (DFG Stoess AG) gelita.com	GMW Gabi Kleindorfer (Wilhelm LEO's Nachfolger GmbH) gmw-shop.de
Gaylord Wheat Starch Paste (instant, pre-cooked, reversible)	Stärke (ca. 6-15 % Protein)	Kaltlöslich modifiziert (vorverkleistert), pH ca. 6-6,5	(k.A.)	Gaylord Bros. PO Box 4901, Syracuse, NY 13221-4901 (USA) gaylord.com
Kremer Polyamidschweißpulver (Nr. 97800)	u.a. Polyamid (Nylon PA 11 / mikrokristallines Wachs und Polyterpenharz)	Schmelzbereich ca. 130-133 °C FTIR-Spektrum entspricht Lascaux Klebewachs 443-95	PIT GmbH & Co.KG (Produkt Texolit) pit-chemie.de / texolit.de	Kremer Pigmente GmbH & Co KG kremer-pigmente.com (nicht mehr erhältlich)
Lascaux 5065	Polyamid (identische FTIR-Spektren, vgl. Nylon PA 11, vermutlich weitere Zusätze)	Schmelzbereich ca. 80-100 °C	Alois K Diethelm AG	k.A. (nicht mehr erhältlich)
Lascaux 5350		Schmelzbereich ca. 80-100 °C	Lascaux Colours & Restauro Barbara Diethelm AG	Kremer Pigmente GmbH & Co KG kremer-pigmente.com Deffner & Johann GmbH deffner-johann.de
Lineco / Neutral pH Adhesive*	Wässrige copolymere Ethylen-vinylacetat-Dispersion (gemäß FTIR, jedoch deklariert als PVAc)	Feststoff ca. 50 %, pH ca. 6-8 (neutral gepuffert), enthält gemäß FTIR Polyvinylalkohol zur Stabilisierung *identische Produkte gemäß FTIR-Analyse	(k.A.)	Lineco lineco.com
Pel White neutral pH Adhesive*			(k.A. / Arcare Ltd. Arcare.com)	Preservation Equipment Ltd. preservationequipment.com
Arcare J 55 Neutral pH adhesive*				

Produkt	Spezifikation	Details	Hersteller	Bezugsadresse
Mikrokristalline Cellulose / MCC (Nr. 4242101)	Reine Cellulose	Partikelgröße ca. 50 µm, pH ca. 5-7	(k.A.)	Deffner & Johann GmbH deffner-johann.de
Methocel A4C**	Methylcellulose- ether (Methoxylgehalt ca. 27-31 %), ca. 320-480 mPas	Kaltwasserlöslich, Rheologieverhalten wärmeempfindlich (Gelierungspunkt ca. 50 °C), pH ca. 6,5 in Lösung demin. H ₂ O	The Dow Chemical Company dow.com	Dow Deutschland Inc. dow.com/ deutschland/
**alternativ nutzbares Produkt: Benecel A4C			Ashland Inc. ashland.com	Kremer Pigmente GmbH & Co KG kremer- pigmente.com
Mowilith DHS S1	Wässrige homopolymere Polyvinylacetat- Dispersion	Feststoff ca. 50 %, Tg ca. 38 °C, pH ca. 3,5-5	Celanese Emulsion GmbH celanese-emulsions. com	(Vom Hersteller zur Verfügung gestellte Produktproben)
Störleim	Glutinleim aus Zuchtstör- blasen	pH ca. 6-7 in Lösung demin. H ₂ O	(k.A.)	Störleim Manufaktur stoerleim- manufaktur.de
Native Weizenstärke	Stärke mind. 97 % (0,4 % Protein)	Warmlöslich (Verkleisterung zum Aufschluss), pH ca. 6,5-7	(k.A.)	GMW Gabi Kleindorfer (Wilhelm LEO's Nachfolger GmbH) gmw-shop.de
UHU easy (Sekundenkleber)	Cyanacrylat (Cyanacrylsäure- ester)	Lösungsmittelfrei, Polymerisation durch H ₂ O (Luftfeuchtigkeit)	UHU GmbH & Co. KG uhu.de	s. Hersteller / Einzelhandel
UHU plus schnellfest (2K-Epoxid- Kleber)	Epoxidharz (Reaktionsprodukt: Bisphenol-A- Epichlorhydrin- harze, Härter: 2,4,6-Tri- (dimethylaminomet hyl)phenol)	Feststoff 98,5 %		

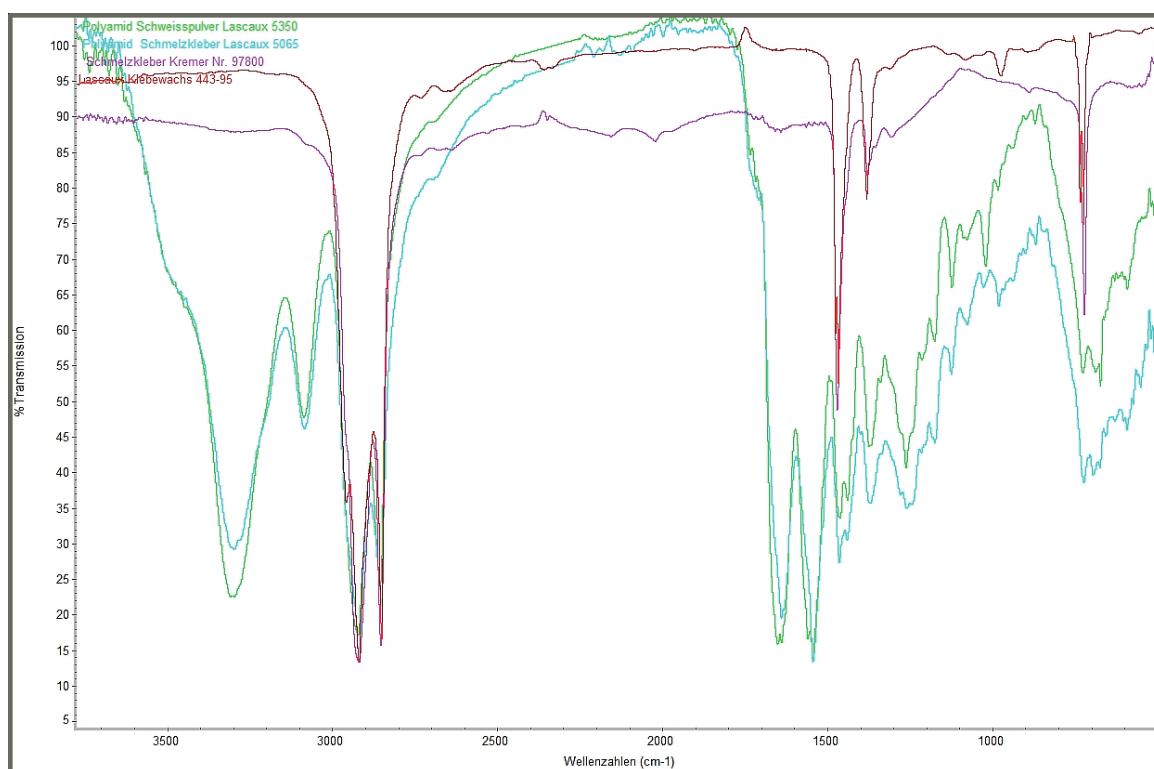


Abb. 01: FTIR-Spektren von Lascaux 5350 (grün), Lascaux 5065 (türkis), Kremer Polyamidschweißpulver (violett) und Lascaux Klebewachs 443-95; erstellt durch Prof. Dr. Elisabeth Jägers.

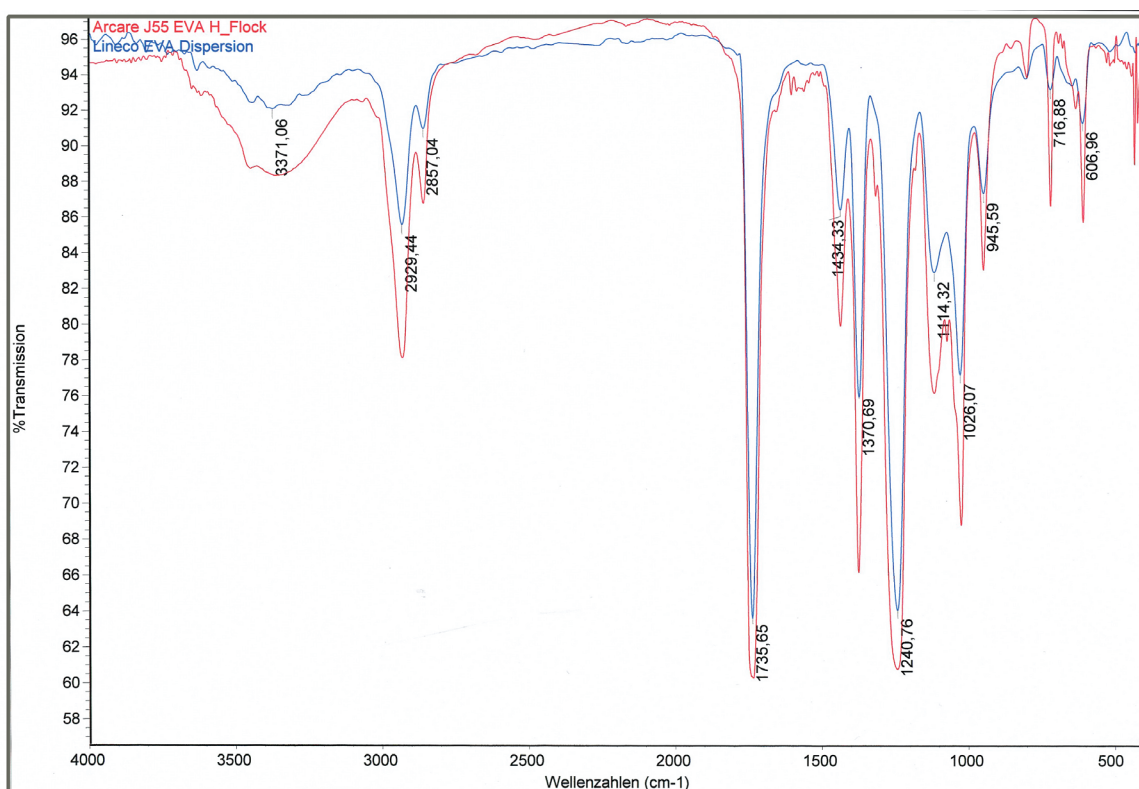


Abb. 02: FTIR-Spektren von Lineco und Arcare J 55; erstellt durch Prof. Dr. Elisabeth Jägers.

C.3 Geräte und Hilfsmittel

Anwendung	Funktion	Typ
Probendokumentation	Videomikroskop	„Keyence VHX 600“; Keyence Deutschland GmbH / keyence.de
	Mikroskopkamera	„Dino-Eye Microscope Eye-Piece Camera AM 423-X“; Metav Werkzeuge GmbH / metav-shop.de
	Digitale Mikrometermessschraube	„Digimatic Micrometer“ Typ CLM1-15QMX, 0-15 mm, Genauigkeit 0.001 mm, Anpressdruck 0,5-2,5 N; Mitutoyo Corporation / mitutoyo.de
	Digitalkamera	„Panasonic DMC SZ3“, Lumix, Leica DC; Panasonic / panasonic.com
Probenherstellung	Schneidematten	(Einzelhandel / Bürobedarf)
	Doppelklebeband	„Tesa Doppelseitiges Klebeband Universal“ (Bestell-Nr. 56170); Tesa SE / tesa.de
	Millimeterpapier	(Einzelhandel / Bürobedarf)
	Transparentes Klebeband	„Tesa film transparent“ (Bestell-Nr. 57371-02); Tesa SE / tesa.de
	Testgewebe	„Pattina L 13 (puro lino)“; Tessitura Enrico Sironi / sironienrico.it
		„Claessens Canvas 070 / 170 / 70“; Claessens Canvas / claessenscanvas.com
	Skalpell und Klingen	(unterschiedl. Bezugsquellen)
Klebstoffzubereitung	Feinwaage	„Kern PFB 120-3“, Feinwaage 0,001-120 g, (Serien-No. WF 080015); Kern & Sohn GmbH / kern-sohn.de
	Magnetrührer	„Heidolph MR 3001“; Heidolph Instruments GmbH & Co. KG / heidolph-instruments.de
	Demineralisiertes Wasser	Chemielabor CICS / TH Köln
	Holzstäbchen	(untersch. Bezugsquellen)
Einzelfadenverklebung	Stereomikroskop	„Leica MZ 6“, 10445201 0.63x; Leica Microsystems / leica-microsystems.com
	Schwanenhalslampe / Kaltlichtquelle	„KL 300 LED“; Schott AG / schott.com
	Sonden / Dentalwerkzeug	(unterschiedl. Bezugsquellen)
	Polystyrolstäbchen	„Strip Styrene, round rod“, Durchmesser 0,64 mm (Item No. 219, 025“Rod); Evergreen / evergreenscalemodels.com
	Reibahlenhalter	Karl Fischer GmbH / goldschmiedebedarf.de
	Verklebungsgewichte	(Auftragsanfertigung Metallgewerbe)

Anwendung	Funktion	Typ
Einzelfadenverklebung	Trafo Heiznadel / Consolidation Pen Winnie	„Denta-Star S, ST 083“ 7.5 W, 12 V (AC/DC [08331]); Star Tec Products / startecproducts.de
	Heiznadel	Typ „ST 083“ (Art.-Nr. 08311) + diagonale „Tear Mending Tip“ (Art.-Nr. 08191); Star Tec Products / startecproducts.de
Klebstoffdosierung und -applikation	Druckluftkompressor für Dosiergerät	WilTec Model No. AS189 (max 6 bar); WilTec Wildanger Technik GmbH
	Dosiergerät	„BELO Dosiergerät KDN“; BELO Restauriergeräte GmbH / belo-restauro.de
	Dosierkartuschen	Polypropylen-Kartuschen (Gr. 35 cc / Best.-Nr. 580141); Vieweg GmbH / dosieren.de
	Dosiernadelspitzen	Dosiernadel „Standard (lavendel)“, 1- \varnothing 0,15 mm / $\frac{1}{4}$ (Bestell-Nr. F560016- $\frac{1}{4}$); Vieweg GmbH (Fisnar) / dosieren.de
	Heizfolie	„Thermo TEC Polyester Heizfolie“, 12 V, 12 W, 110x77“ + Adapter „Volcraft - Switching Power Supply“ (Model: SNG 1500); Conrad Electronic SE / conrad.de
	Feinpipette	„Transferpette S digital“, 0,1-1 μ l Einkanal- pipette; Brand GmbH + CoKG / brand.de
	Pipettenspitzen	Standard nano-cap 0,1-20 μ l; Carl Roth GmbH + Co. KG / carlroth.com
	Consolidation Pen Winnie	„Winnie CPW-001“ (Art.-Nr. 08512); Star Tec Products / startecproducts.de
	Feinspritze	„ONCE Insulinspritze 0,5 ml“ (Polypropylen), CODAN Medical Aps (Best.-Nr. 8920); Semadeni Plastics Group / semadeni.com
	Silikonschlauch zur Adaption der Low- Binding-Pipettenspitze	Innendurchmesser 4 mm, Wanddicke 1mm; Gummi-Grün Köln e.K. / grummi-gruen.de
	Low-Binding- Pipettenspitzen	„32 Multi-MIKRO ULTRA“, 0,1-10 μ l, Sorensen TM BioScience TM Inc. (Best.-Nr. NL 51.1); Carl Roth / carlroth.com
Herstellung Fadenbrücken	Bügeleisen	„Stewardess, World travel iron, HD 1301“, Philips Deutschland GmbH / philips.de
	Heißluftfön	Heißluftgebläse mit Temperaturanzeige, Typ „HL 2305 LCD (thermo- power / thermo control)“, 2300 Watt, 50-650 °C; Steinel / steinel.de
	Oberflächenthermometer	„Testo 925“, Oberflächenthermometer mit Punktfühler (- 60 / + 1000 °C, \pm 1 °C); Deffner & Johann / deffner-johann.de

Anwendung	Funktion	Typ
Langzeitversuch	Zugrahmen	(Auftragsanfertigung ZWM / TH Köln)
	Rolllager	(Auftragsanfertigung ZWM / TH Köln)
	Schlüsselringe	Typ SL16/1,30 und SL24/1,50 (Durchmesser 15 mm und 25 mm); Pösamo VAUKA Ketten GmbH / poesamo.com
	Haken	Jig-Ankelhaken mit Loch (Gr. 11, Kohlenstoffstahl); via amazon.de
	Wirbel	Croch Karabinerwirbel (Gr. 6, bis 13 kg Last); via amazon.de
	Simplexhaken	Typ 60/6,00x3,00 halbrund (FAD244); Pösamo VAUKA Ketten GmbH / poesamo.com
	Magnetbügel	Neodym Ösenmagnete; via amazon.de
	Taschen für Sandgewicht	Jute-/Baumwollbeutel (Einzelhandel)
	Sand	„Weco Naturstein Mauersand DIN 1045“ 25 kg Beutel; (Einzelhandel / Baumarkt)
	Lampen	JANSJÖ LED-Klemmspot; IKEA Deutschland GmbH & Co. KG / ikea.de
	Kleiderstangen	RIGGA Garderobenständler (max. Last 35 kg); IKEA Deutschland GmbH & Co. KG / ikea.de
	Millimeterpapier	(Einzelhandel / Bürobedarf)
	Kapaplaten	„Kapa Line“ (Artikel-Nr.: 111110); Karthäuser-Breuer / karthaeuser-breuer.de
	Metalldraht	„Stabilit Eisendraht“, Durchmesser 0,48 mm; (Einzelhandel / Eisenwarenbedarf)

D Abkürzungsverzeichnis

-	2K	2-Komponenten
	%	Prozent
	°C	Grad Celsius
	ε	Dehnung [%]
	ε -Fmax	Höchstzugkraftdehnung [%]
	μl / μm	Mikroliter / Mikrometer
A	A4C	Methocel A4C (äquivalent: Benecel A4C)
	Abb.	Abbildung
	ABK	Akademie der Bildenden Künste (Stuttgart)
	Anm.	Anmerkung
	APEO	Alkylphenoethoxylat
	Aufdoppelg.	Aufdoppelung
B	B	Breite
	Beva / BEVA	Bergers Ethylen-Vinyl-Acetat
	biax.	biaxial
	bspw.	beispielsweise
	BWW / BWW 40	Arbocel BWW 40 (Cellulosefasern)
	bzw.	beziehungsweise
C	ca.	circa
	cm	Centimeter
D	d	Durchmesser
	D	Dicke
	demin.	demineralisiert
	d.h.	das heißt
	DIC	Digital image correlation (digitale Bildkorrelation)
	DIN	Deutsche Industrie Norm
	D-Z-Diagramm	Dehnungs-Zeit-Diagramm
E	EN (ISO)	Europäische Norm(Internationale Organisation für Normung)
	et al.	et alii / et aliae (und andere)
	ESPI	Electronic Speckle Pattern Interferometry (elektronische Speckle-muster-Interferometrie)
	etc.	et cetera (und so weiter)
	EVA	Ethylenvinylacetat
F	f.	folgende Seite
	ff.	folgende Seiten
	F	Force (Kraft)
	Fmax	Höchstzugkraft
	FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer

G	g	Gramm
	GT	Gewichtsteil/e
H	H ₂ O	Wasser
	HDI	Hexamethylen-di-isocyanat
	HfBK	Hochschule für Bildende Künste (Dresden)
	HKB	Hochschule der Künste Bern
	Hrsg.	Herausgeber
I	i.d.R.	In der Regel
	inkl.	inklusive
J	Jh.	Jahrhundert
K	k.A.	keine Angabe
	Kap.	Kapitel
	K-D-Diagramm	Kraft-Dehnungs-Diagramm
	K-D-Schleifen	Kraft-Dehnungs-Schleifen (zyklische Zugversuche)
	K-Z-Diagramm	Kraft-Zeit-Diagramm
	kg	Kilogramm
L	L	a) Länge / b) Lineco
	LE	Längeneinheit (~ Einspannlänge)
	li.	links
M	max. / min.	maximal / minimal
	MC	Methylcellulose
	MCC	mikrokristalline Cellulose (microcrystalline cellulose)
	Med / Min / Max	Median / Minimum / Maximum
	MFC	mikrofibrillierte Cellulose (mikrofibrillated cellulose)
	MFT	Mindestfilmbildungstemperatur
	min	Minute
	mind.	mindestens
	mm	Millimeter
	mod.	modifiziert
	Mow.	Mowilith DHS S1
	MPa	Megapascal (vgl. N/mm ²)
	MSAJ	Membrane Structures Association of Japan
	MW	Arithmetischer Mittelwert
N	n	Stichprobenanzahl
	NCO	Isocyanat-Gruppe
	N / kN / cN	Newton / Kilonewton (1000 Newton) / Centinewton (0,01 Newton)
	N/mm ²	Newton pro Quadratmillimeter
	Nr.	Nummer
	No.	Number

O	o.ä.	oder ähnliches
	OH	Hydroxid
P	PA	Polyamid
	pH	potentia Hydrogenii / pondus Hydrogenii (~ pH-Wert)
	PU	Polyurethan
	PVAc	Polyvinylacetat
	PVAI	Polyvinylalkohol
R	re.	rechts
	Ref	Referenz
	r.F.	relativer Feuchte / relative Luftfeuchtigkeit
	Rm	Zugfestigkeit
	RT	Raumtemperatur
S	s. / s.a.	siehe / siehe auch
	S	Standardabweichung
	S.	Seite
	S-D-Diagramm	Spannungs-Dehnungs-Diagramm
	SL	Störleim
	SAS	Stoß-auf-Stoß (Verklebungstechnik)
	SAS+B	Stoß-auf-Stoß mit Fadenbrücken (Verklebungstechnik)
	sec	Sekunde/n
	sog.	sogenannte
T	T.	Temperatur [°C]
	Tg	Glasübergangstemperatur/-bereich
	TU	Technische Universität
U	u.	und
	u.a.	unter anderem / und andere
	u.ä.	und ähnliches/m
	Ü	überlappend (Verklebungstechnik)
	uniax.	uniaxial
	untersch./ unterschiedl.	unterschiedlich
	Ü+V	überlappend-vermengt (Verklebungstechnik)
	uvm.	und vieles mehr
V	v.	von
	v.a.	vor allem
	versch.	verschieden
	vgl.	vergleiche
	via	durch / anhand / mittels / über
	Vk	Vorkraft

V	VK	Variationskoeffizient
	Vol.	Volume
W	WBV	Wasserbindevermögen
	WS	Weizenstärke(kleister)
	WSK	Weizenstärkekleister
	wechs.	wechselnd
Z	z.B.	zum Beispiel
	ZWM	Zentralwerkstatt Maschinenbau (TH Köln)

E Abbildungsnachweise

Kap. 7 / Abb. 7.03-07 Erstellt und zur Verfügung gestellt von Teresa Flock M.Sc.

Anhang C.2 / Abb. 01-02 Erstellt und zur Verfügung gestellt von Prof. Dr. Elisabeth Jägers

Sofern nicht oben anders ausgewiesen, wurden sämtliche weitere in der Arbeit verwendete Abbildungen von der Verfasserin erstellt. Etwaige Vorlagen wurden im Zuge der Bildunterschriften ausgewiesen.

