# In-Situ-Überwachung von Laserschweißprozessen mittels höherfrequenter Schallemissionen

## Dissertation

zur Erlangung des Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften
der Universität des Saarlandes

von

**Matthias Bastuck**

Saarbrücken, 2016

| | |
|---|---|
| Tag des Kolloquiums: | 18.07.2016 |
| Dekan: | Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre |
| Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann |
| | Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre |
| Vorsitz: | Prof. Dr. mont. Christian Motz |
| Akad. Mitarbeiter: | Dr.-Ing. Frank Aubertin |

# VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IZFP in Saarbrücken. Sie geht in Teilen aus dem öffentlich geförderten ZIM Projekt „AkuProLas“ (KF2455310DF3) hervor, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wurde. Daher wurden bereits Teile der vorliegenden Ergebnisse in Zwischen- und Abschlussberichten zum ZIM Projekt veröffentlicht.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann für die fachliche und menschliche Betreuung während der gesamten Arbeit. In vielen kritischen Diskussionen wurden der Arbeitsfortschritt und neue Ideen zum Thema kritisch diskutiert, welche ich dann mit der nötigen wissenschaftlichen Freiheit mit Inhalten füllen konnte. Ich möchte auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre für die Unterstützung seit der Anfertigung meiner Masterthesis und für die Übernahme des Zweitgutachtens meiner Dissertation danken. Er hat stets den Fortschritt meiner Arbeiten verfolgt und wertvolle Tipps für die weitere Entwicklung im Themengebiet gegeben. Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. mont. Christian Motz für die wissenschaftliche Begleitung der Arbeit.

Weiterer Dank gilt allen Kollegeninnen und Kollegen am Fraunhofer IZFP für die Unterstützung über viele Jahre meiner Tätigkeit. Dazu gehört Herr Prof. Dr.-Ing. Bernd Valeske für die Förderung bereits während meines Masterstudiums und im Rahmen meiner Masterthesis. Besonderer Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Bernd Wolter für die fachliche und menschliche Unterstützung und Förderung während meiner Tätigkeit in seiner Abteilung. Danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Matthias Goebel für die Geduld und Unterstützung bei der Einweisung in die Metallografie. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Projektmitarbeitern David Böttger, Dr.-Ing. Leonardo Batista, Dipl.-Ing. Ute Maisl und Florian Weber für die tatkräftige Unterstützung im Rahmen des Forschungsprojektes bedanken.

Ich möchte mich auch bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Arbeitsgruppe INTEGRA-TiF der ZeMA gGmbH für die Unterstützung im Rahmen der Laserschweißversuche bedanken. Insbesondere gilt dies für die Herren Frank Leinenbach (M.Sc.) und Ralf-Kilian Zäh (M.Sc.), die

nicht müde wurden die Anlage immer wieder nach meinen Vorstellungen umzubauen bzw. umzuprogrammieren um etliche Schweißversuche durchzuführen.

Weiterer Dank gilt auch dem Projektpartner des ZIM Projektes, der QASS GmbH für die sehr fruchtbare und kollegiale Zusammenarbeit. Insbesondere danke ich Herrn Ulrich Seuthe für die ausgesprochene Offenheit und Neugier an neuen Ideen und Verfahren. Auch den Herren Dr. Peter-Christian Zinn, Dirk Schulte, Dipl.-Ing und Javier Cambra (M.Sc.) gilt mein besonderer Dank für die unzähligen fachlichen Diskussionen im Rahmen der Arbeit.

Ich möchte auch den Kollegen des Fraunhofer ILT für die fachliche Unterstützung der Arbeiten danken. Besonderer Dank gilt hier den Herren Dr. rer. nat. Dirk Petring und Dipl.-Ing. Martin Dahmen.

Schließlich gilt mein besonderer Dank auch meiner ganzen Familie und allen Freunden, vor allem für die menschliche Unterstützung und den Ausgleich während der Zeit der Promotion.

Matthias Bastuck

# KURZZUSAMMENFASSUNG

Die Prozessfenster beim Laserstrahlschweißen sind aufgrund vieler Einflussgrößen schmal. Daher spielt in der Großserienproduktion eine prozessnahe Überwachung der Fertigungsqualität eine große Rolle. Dies kann beispielsweise über die Detektion von elektromagnetischen oder akustischen Prozessemissionen realisiert werden. Beides hat bisher nicht zu zufriedenstellenden Überwachungskonzepten geführt. Der Schwerpunkt der Entwicklung lag in den letzten Jahren vorwiegend auf der optischen Prozessüberwachung, da die Detektion resonanter akustischer Emissionen im niederfrequenten Bereich bisher keine verlässlichen Ergebnisse geliefert hat. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit die hochfrequenten Körper- und Luftschallemissionen von Laserschweißprozessen untersucht. Es wird die Fragestellung geklärt, ob ein Laserschweißprozess überhaupt hochfrequente Schallemissionen aussendet. Auch wird gezeigt, wie diese mit Stellparametern und Qualitätsmerkmalen einer Laserschweißnaht korreliert werden können und ein Prozessmodell gebildet werden kann. Auf Basis eines solchen Prozessmodells kann eine Fehlerdetektion erfolgen und ein Konzept für die Prozessüberwachung von Laserschweißprozessen mittels hochfrequenten Schallemissionen für die Fertigung erarbeitet werden. Damit können zusätzliche Informationen über den Laserschweißprozess gewonnen werden, was einen wichtigen Beitrag im Hinblick auf die Realisierung eines robusten Prozessüberwachungskonzeptes für das Laserstrahlschweißen liefert.

# ABSTRACT

Process windows of laser welding are quite narrow due to different influences. Therefore, process-oriented quality control is a key in large-volume production. This can be realized by detection of electromagnetic or acoustic process emissions. Up to now, both variants were not leading to realization of satisfying concepts of process monitoring. In the last years, the key aspect in this development was mainly put on optical process monitoring, because the detection of resonant acoustic emissions in low frequency ranges were not delivering reliable results. Therefore, the high frequency structure- and air-borne emissions will be deeply investigated in this thesis. The first emphasis will be on the clarification of the existence of high frequency acoustic emissions in laser welding processes besides the already known low frequency resonant acoustic emissions. In the second step, the correlation of these emissions with the parameters and quality characteristics of laser welding seams will be developed. By means of this, a process model will be formed. Based on this process model, a defect detection, as well as a concept for process monitoring of laser welding processes by means of high frequency acoustic emissions, can be established. Using this concept, additional information about laser welding processes can be gained, which helps to realize a robust and stable concept for process monitoring of laser welding in industrial scale.

# INHALTSVERZEICHNIS

**INHALTSVERZEICHNIS ..... VIII**

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ..... XI**

**FORMELZEICHENVERZEICHNIS ..... XIII**

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... XV**

**TABELLENVERZEICHNIS ..... XVIII**

**1 EINLEITUNG ..... 1**

1.1 Einführung ..... 1

1.2 Motivation ..... 2

**2 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK UND WISSENSCHAFT ..... 4**

2.1 Laserstrahlschweißen ..... 4

2.1.1 Laserschweißprozess ..... 4

2.1.2 Strahlerzeugung ..... 6

2.1.3 Strahlleitung ..... 7

2.1.4 Laserschweißoptik ..... 7

2.1.5 Fehlstellen ..... 8

2.2 Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen ..... 9

2.2.1 Abgrenzung ..... 9

2.2.2 Offline-Prüfung ..... 10

2.2.3 Inline-Prüfung ..... 13

2.2.4 Signalauswertung bei der In-Process-Überwachung ..... 25

**3 NEUER ANSATZ ZUR ÜBERWACHUNG VON LASERSCHWEIßPROZESSEN MITTELS HÖHER-FREQUENTER SCHALLEMISSIONEN ..... 27**

3.1 Zielsetzung ..... 27

3.2 Aufbau der Arbeit ... 28

**4 VERSUCHSAUFBAU ... 29**

4.1 Strahlquelle und Schweißoptik ... 29

4.2 Ultraschallsensoren ... 29

4.2.1 Luftschall ... 29

4.2.2 Körperschall ... 30

4.3 Schweißproben ... 31

4.3.1 Probenmaterial ... 31

4.3.2 Stoßarten ... 32

4.4 Mechanischer Aufbau ... 32

4.5 Signalverarbeitung ... 34

4.5.1 Datenerfassung ... 34

4.5.2 Datenauswertung ... 35

4.6 Metallografische Schliffe ... 37

**5 MODELLBILDUNG FÜR HÖHERFREQUENTE SCHALLEMISSIONEN IM SCHWEIßPROZESS ... 39**

5.1 Korrelation zwischen Laserleistung und Einschweißtiefe zu den Ultraschallemissionen ... 39

5.1.1 Blindschweißungen mit konstanter Laserleistung ... 39

5.1.2 Blindschweißungen mit modulierter Laserleistung ... 50

5.1.3 Versuche zur Zinkverdampfung ... 67

5.1.4 Modell zur Schallentstehung ... 75

5.2 Übertragung der Ergebnisse auf Fügeverbindungen ... 80

5.2.1 Überlappverbindung ... 80

5.2.2 Stumpfstoßverbindung ... 86

5.2.3 Zwischenfazit ... 90

5.3 Nutzung der Schallemission zur Fehlerdetektion ... 91

5.3.1 Blindschweißungen ... 91

5.3.2 Überlappschweißungen ... 99

5.3.3 Stumpfstoßschweißungen ... 102

5.3.4 Zwischenfazit ... 105

**6 KONZEPT FÜR DIE FERTIGUNG ... 107**

6.1 Luftschallemissionen, LSE ... 107

6.2 Körperschallemissionen, KSE ..... 109
6.3 Bewertung und Grenzen ..... 111
6.3.1 Körperultraschallemissionen ..... 111
6.3.2 Luftultraschallemissionen ..... 113

**7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ..... 116**

**LITERATURVERZEICHNIS ..... 120**

**ANHANG ..... 133**

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| Symbol | Beschreibung |
|---|---|
| cw | Dauerstrich (continuous wave) |
| DS | Durchschweißung |
| EMUS | Elektromagnetischer Ultraschall |
| ET | Wirbelstromprüfung (eddy current testing) |
| FFT | Schnelle Fourier-Transformation (fast Fourier transform) |
| FS | Fehlerschweißungen |
| InGaAs | Indium-Gallium-Arsenid |
| IRT | Thermografieprüfung (infrared thermographic testing) |
| KSE | Körperschallemissionen |
| LLK | Lichtleitkabel |
| LSE | Luftschallemissionen |
| MFL | Magnetische Streuflussprüfung (magnetic flux leakage) |
| MT | Magnetpulverprüfung (magnetic particle testing) |
| NIR | Nahes Infrarot |
| OB | Oberblech |
| PT | Eindringprüfung (penetrant testing) |
| RLW | Remotelaserschweißen |
| S | Schwelle zwischen Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich bzw. dem Tiefschweißen |

| | |
|---|---|
| STFT | Kurzzeit-Fourier-Transformation (short-time Fourier transform) |
| TB | Toleranzband |
| TS | Tiefschweißen |
| TWB | Maßgeschneiderte Blechplatine (tailor welded blank) |
| Ü | Übergangsbereich |
| UB | Unterblech |
| UT | Ultraschallprüfung (ultrasonic testing) |
| VT | Sichtprüfung (visual testing) |
| WLS | Wärmeleitschweißen |

# FORMELZEICHENVERZEICHNIS

| Symbol | Einheit | Beschreibung |
|---|---|---|
| A | a.u. | Amplitude |
| $A_F$ | $m^2$ | Fläche des Fokusflecks |
| $A_{KSE}$ | a.u. | Amplitude der Körperschallemissionen |
| $A_{LSE}$ | a.u. | Amplitude der Luftschallemissionen |
| $A_N$ | -- | Aspektverhältnis |
| b | m | Schweißnahtbreite |
| $d_f$ | m | Fokusdurchmesser |
| $d_S$ | bit | Samplingtiefe |
| f | Hz | Frequenz |
| $f_S$ | Hz | Samplingrate |
| I | $W/m^2$ | Laserleistungsdichte |
| nfft | -- | Frequenzauflösung |
| noverlap | -- | Überlappung |
| $O_S$ | -- | Oversamplingfaktor |
| P | a.u. | Plasmahelligkeit |
| $P_L$ | W | Laserleistung |
| R | a.u. | Laserrückreflex |
| s | m | Einschweißtiefe |
| T | a.u. | Temperaturstrahlung |
| t | m | Fügequerschnitt |

| | | |
|---|---|---|
| $t$ | s | Zeit |
| $v_S$ | m/s | Schweißgeschwindigkeit |
| window | -- | Fenstergröße |
| $z_A$ | m | Arbeitsabstand |
| $z_S$ | m | Arbeitsabstand des Luftschallsensors |
| $\alpha$ | ° | Anstellwinkel des Luftschallsensors zur Senkrechten |

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS


Abbildung 1: Emissionen während des Lasertiefschweißprozesses ..... 5

Abbildung 2: Abgrenzung zwischen Inline- und Offline-Verfahren ..... 10

Abbildung 3: Sensoranordnung ..... 13

Abbildung 4: Qualitätsüberwachung beim Laserstrahlschweißen ..... 19

Abbildung 5: Zusammenfassung bisher untersuchter Frequenzbereiche ..... 22

Abbildung 6: Verschiedene Varianten der Anbringung der Körperschallsensoren ..... 30

Abbildung 7: Schematischer mechanischer Versuchsaufbau ..... 33

Abbildung 8: Realer Versuchsaufbau ..... 34

Abbildung 9: Schematische Darstellung der Datenerfassung ..... 35

Abbildung 10: Schematisches Vorgehen bei der Datenauswertung ..... 36

Abbildung 11: Ausgewählte STFT Diagramme für vier Leistungsstufen ..... 41

Abbildung 12: Ausgewählte STFT-Diagramme für vier Leistungsstufen ..... 43

Abbildung 13: Ausgewählte STFT-Diagramme für vier Leistungsstufen ..... 44

Abbildung 14: Ausgewählte STFT-Diagramme für vier Leistungsstufen ..... 46

Abbildung 15: Gemessene Einschweißtiefe s im Querschliff ..... 48

Abbildung 16: Gemessene Einschweißtiefe s im Querschliff ..... 49

Abbildung 17: Laserleistung P über der Zeit t ..... 51

Abbildung 18: Körperschallamplitude $A_{KSE}$ über der Laserleistung P ..... 52

Abbildung 19: KSE-Amplitude $A_{KSE}$ für fünf Wiederholungsproben ..... 53

Abbildung 20: Laserleistung P über der Zeit t (a) ..... 54

Abbildung 21: Körperschallamplitude $A_{KSE}$ über der Laserleistung P ..... 55

Abbildung 22: KSE-Amplitude $A_{KSE}$ für fünf Wiederholungsproben ..... 56

Abbildung 23: Laserleistung P über die Zeit t (a) ..... 57

Abbildung 24: Luftschallamplitude $A_{LSE}$ über der Laserleistung P ..... 58

Abbildung 25: LSE-Amplitude $A_{LSE}$ für fünf Wiederholungsproben ..... 59

Abbildung 26: Laserleistung P über der Zeit t (a) ..... 60

Abbildung 27: Luftschallamplitude $A_{LSE}$ über der Laserleistung P ..... 61

Abbildung 28: LSE-Amplitude $A_{LSE}$ für fünf Wiederholungsproben ..... 62

Abbildung 29: Schweißergebnis Probe 1702 ..... 63

Abbildung 30: Schweißergebnis der Wiederholproben 1700 – 1704 ..... 64

Abbildung 31: Schweißergebnis Probe 1856 ..... 65

Abbildung 32: Schweißergebnis der Wiederholproben 1855 – 1859 ..... 66

Abbildung 33: Probenpräparation ..... 67

Abbildung 34: Körperschallemissionen beim Schweißen teilweise entschichteter Proben . 68

Abbildung 35: Luftschallemissionen beim Schweißen teilweise entschichteter Proben ..... 70

Abbildung 36: Luftschallemissionen beim Schweißen teilweise entschichteter Proben ..... 71

Abbildung 37: Luftschallemissionen beim Schweißen teilweise entschichteter Proben ..... 72

Abbildung 38: Schweißergebnis beim Schweißen teilweise entschichteter Proben ..... 73

Abbildung 39: Schweißergebnis beim Schweißen teilweise entschichteter Proben ..... 74

Abbildung 40: Schweißergebnis beim Schweißen teilweise entschichteter Proben ..... 74

Abbildung 41: Modell zu Entstehung von Körperultraschallemissionen ..... 76

Abbildung 42: Modell zu Entstehung von Luftultraschallemissionen ..... 78

Abbildung 43: Laserleistung P über der Zeit t (a) ..... 81

Abbildung 44: Diagramm des KSE-Signals des Unterblechs ..... 83

Abbildung 45: STFT-Diagramm des LSE-Signals ..... 84

Abbildung 46: Schweißergebnis ..... 85

Abbildung 47: Laserleistung P über der Zeit t ..... 87

Abbildung 48: STFT-Diagramm des KSE-Signals von Fügepartner 2 ..... 88

Abbildung 49: STFT-Diagramm des LSE-Signals der Stumpfstoßverbindung ..... 89
Abbildung 50: Schweißergebnis beim Schweißen von Stumpfstoßproben..... 90
Abbildung 51: KSE-Amplituden $A_{KSE}$ der 30 Referenzproben..... 92
Abbildung 52: Laserleistung P über der Zeit t ..... 93
Abbildung 53: Laserleistung P über die Zeit t..... 94
Abbildung 54: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der 30 Referenzproben ..... 95
Abbildung 55: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der Fehlerprobe 2157 ..... 96
Abbildung 56: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der Fehlerprobe 2211 ..... 97
Abbildung 57: Schweißergebnis von provozierten Fehlerproben ..... 98
Abbildung 58: Schweißergebnis von zufälligen Fehlerproben ..... 99
Abbildung 59: KSE-Amplituden $A_{KSE}$ der Fehlerprobe 1965..... 100
Abbildung 60: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der Fehlerprobe 1965 ..... 101
Abbildung 61: Schweißergebnis von provozierten Fehlerproben ..... 102
Abbildung 62: KSE Amplituden $A_{KSE}$ der Fehlerprobe 2022 ..... 103
Abbildung 63: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der Fehlerprobe 2022 ..... 104
Abbildung 64: Schweißergebnis von provozierten Fehlerproben ..... 105
Abbildung 65: Überwachung der Zinkentschichtung..... 108
Abbildung 66: Signalverlauf bei Überwachung des Laserschweißprozesses ..... 110
Abbildung 67: Realer Versuchsaufbau..... 133
Abbildung 68: Querschliffe ausgewählter nicht durchgeschweißter Blindschweißungen . 134
Abbildung 69: Querschliffe ausgewählter nicht durchgeschweißter Blindschweißungen . 134
Abbildung 70: Querschliffe ausgewählter nicht durchgeschweißter Blindschweißungen . 135

# TABELLENVERZEICHNIS


Tabelle 1: Zusammenfassung und Bewertung der In-Process Verfahren ..... 24

Tabelle 2: Zusammenfassung der verwendeten Luftultraschallsensoren ..... 29

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Probenmaterialien ..... 32

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Stoßarten ..... 32

Tabelle 5: Zusammenfassung der Analog-Digital-Wandlung ..... 35

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Einführung

Das Laserstrahlschweißen hat sich in den vergangenen Jahren als großserientaugliches Fügeverfahren in der industriellen Produktion immer stärker durchsetzen können. Vor allem im Bereich des automobilen Karosseriebaus gewinnen lasergeschweißte Fügeverbindungen zunehmend an Akzeptanz, da die Herstellung einer stoffschlüssigen Verbindung mittels Laser viele Vorteile gegenüber anderen Fügeverfahren bietet. Dazu gehören die hohen Schweißgeschwindigkeiten und die daraus resultierenden kurzen Taktzeiten für den Fügeprozess. Aufgrund der hohen Energiedichte des Laserlichtes wird die Energie in das zu schweißende Bauteil nur sehr lokal (punktuell bzw. linienhaft) eingebracht. Dadurch werden negative Effekte infolge eines starken Wärmeeintrages vermieden, wie etwa Verzug oder eine breite Wärmeeinflusszone, die gerade bei Dünnblechverbindungen eine starke Einschränkung der Anwendungsmöglichkeiten zur Folge hätte. Beim Laserstrahlschweißen ermöglichen moderne Schweißoptiken kombiniert mit innovativer Robotertechnik ein Höchstmaß an Automatisierung, was zur Produktions- und Qualitätssteigerung beiträgt. Diese Gerätetechnik gewährleistet auch das berührungslose Fügen mit großem Arbeitsabstand, weswegen moderne Laserschweißanlagen generell sehr flexibel ausgelegt und schnell an geänderte Bedingungen oder Schweißaufgaben angepasst werden können. Im Vergleich zu anderen Schmelzschweißverfahren können beim Laserschweißen besonders präzise Fügeverbindungen hergestellt werden. Durch Reduzierung der Schweißflansche kann daher Material eingespart werden. Infolge der Entwicklung immer effizienterer Strahlquellen im Bereich der Festkörperlaser wird der Energieeinsatz zur Strahlerzeugung gesenkt. Die Laserlichtleitung in Glasfasern unterliegt zudem höchsten Sicherheitsstandards, wodurch die Akzeptanz des Einsatzes von Lasern in den letzten Jahren signifikant gesteigert werden konnte. Mittlerweile können Laserstrahlquellen flexibel und simultan zum Schneiden und Schweißen verwendet werden, wodurch sich das Einsatzfeld von Lasern, vor allem im automobilen Karosseriebau, weiter vergrößern wird.

Trotz aller Vorteile ist das Laserschweißen in der Großserienproduktion nicht ohne Einschränkungen einsetzbar. Allen voran ist die Kombination der für Gutschweißungen erforderlichen engen Prozessführung und der oftmals unzureichenden Schweißprozessstabilität ein limitierender

Faktor. Dem entgegen sprechen immer anspruchsvoller werdende Standards in Bezug auf die Qualität der erzeugten Produkte und der immer komplexer werdenden Eingangsgrößen, wie zum Beispiel Beschichtungen und Materialkombinationen. Dies zeigt sich vor allem im automobilen Karosseriebau. Hier werden zum Teil Stahlsorten mit sehr unterschiedlichen Festigkeiten miteinander verschweißt. Dies führt bereits bei der Auslegung der Spannkonzepte zu erheblichen Schwierigkeiten, da unter anderem das Spaltmaß bei Überlappverbindungen eine sehr kritische Eingangsgröße für den Laserschweißprozess darstellt. Ein Nullspalt kann gerade bei beschichteten Fügepartnern zu Schmelzauswürfen führen, wohingegen ein zu großes Spaltmaß Anbindefehler hervorruft. Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl weiterer Einflussfaktoren auf den Schweißprozess und die produzierte Schweißnahtqualität.

Da der Laserschweißprozess nicht in vollem Umfang beherrschbar ist, treten immer wieder Schweißfehler auf, die dann mit geeigneten sensorischen Verfahren detektiert werden müssen. Im Idealfall werden die sensorischen Verfahren direkt in den Schweißprozess integriert, um die Schweißfehler bereits während oder unmittelbar nach ihrer Entstehung zu erkennen. Hierfür können die Prozessemissionen (z.B. akustische und/oder elektromagnetische Emissionen) des Laserschweißens erfasst werden. Kündigt sich ein Fehler durch einen charakteristischen Signalverlauf bereits vor der Entstehung an, kann diese Information in einem geschlossenen Regelkreis dazu genutzt werden, die Fehlerentstehung zu vermeiden. Dies stellt den Idealfall dar, um eine gleichbleibend gute Laserschweißnahtqualität auch bei einem derart anspruchsvollen Prozess zu generieren.

## 1.2 Motivation

Bisher untersuchte sensorische Verfahren zur Echtzeit-Überwachung des Laserschweißprozesses konzentrieren sich auf die Erfassung der elektromagnetischen und akustischen Emissionen (vgl. Kapitel 2.2.3.3). Diese Emissionen können als Regelgrößen des Prozesses verwendet werden, die einerseits mit den Qualitätsmerkmalen der Schweißung (Schweißnahtqualität) korrelieren und andererseits Zusammenhänge zu den Stellgrößen des Prozesses, wie Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit aufweisen. Sind die Zusammenhänge zwischen Stell- und Regelgrößen in Form eines Prozessmodells beschrieben, so können die Emissionen nicht nur zur Echtzeitbeurteilung der Schweißnahtqualität sondern auch zur Regelung und Optimierung des Schweißprozesses verwendet werden, wodurch Schweißfehler vermieden oder zumindest reduziert werden können.

Bereits mit der Entwicklung des Laserschweißens wurden akustische und elektromagnetische Emissionen des Laserschweißprozesses auf deren Informationsgehalt vergleichend untersucht (Gatzweiler, 1989). Dabei stellte sich heraus, dass die akustischen Emissionen im Hörschallbe-

reich zwar wichtige Informationen über den Ablauf des Schweißprozesses liefern, jedoch zu störanfällig sind, um prozesssicher einen gut von einem schlecht laufenden Schweißprozess zu unterscheiden. Diese Störanfälligkeit hat sich als ein zu großes Hindernis herausgestellt. Daher wurden die meisten Arbeiten auf diesem Gebiet in der folgenden Zeit auf den Einsatz der elektromagnetischen Verfahren fokussiert. Dies führte auch teilweise zum Erfolg, jedoch ist derzeit noch kein zuverlässiges Prozessüberwachungskonzept umgesetzt (vgl. Kapitel 2.2.3.3).

Offen blieb bisher die Fragestellung nach dem Informationsgehalt von hochfrequenten akustischen Emissionen in Bezug auf den Laserschweißprozess. Dies betrifft sowohl die Körper-, als auch die Luftschallemissionen und deren Potential zur Realisierung einer In-Situ-Überwachung von Laserschweißprozessen. Dies soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit geklärt und damit ein wichtiger Beitrag zur Erreichung von stabilen und beherrschbaren Laserschweißprozessen geliefert werden.

# 2 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK UND WISSENSCHAFT

In Bezug auf die Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen wird zunächst der Laserschweißprozess grundlegend beschrieben (vgl. Abschnitt 2.1). Zusätzlich wird der Stand der Technik und Wissenschaft bezüglich der Prozessüberwachungsverfahren in diesem Kapitel aufgearbeitet (vgl. Abschnitt 2.2).

## 2.1 Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen lässt sich nach DIN 8580 der Hauptgruppe 4: Fügen zuordnen. Innerhalb dieser gehört es zu der Gruppe 4.6: Fügen durch Schweißen (DIN 8593-6), genauer zur Untergruppe 4.6.2: Schmelzverbindungsschweißen. Innerhalb dieser ist es den Verfahren der Unterteilung 4.6.2.5: Schmelzschweißen durch Strahlung zuzuordnen (DIN 8580). In den folgenden Abschnitten sollen zunächst der Laserschweißprozess (vgl. Abschnitt 2.1.1), anschließend die notwendigen Einrichtungen (vgl. Abschnitt 2.1.2 - 2.1.4) sowie die möglichen Fehlstellen einer Laserschweißnaht (vgl. Abschnitt 2.1.5) beschrieben werden.

### 2.1.1 Laserschweißprozess

Die Laserstrahlung, welche auf das Werkstück trifft, ruft aufgrund der hohen Leistungsdichte I, welche sich aus dem Quotient aus einfallender Laserleistung $P_L$ und der Fläche des Fokusflecks $A_F$ (vgl. Formel (1)) ergibt, ein Erwärmen, Schmelzen und/oder Verdampfen des Werkstoffes hervor.

$$I = \frac{P_L}{A_F} \tag{1}$$

In Abhängigkeit der Transparenz des Werkstoffes für die Laserstrahlung, der Oberflächenbeschaffenheit, des Grundmaterials, usw., wird die eingestrahlte Laserleistung zu unterschiedlichen Teilen reflektiert, transmittiert und absorbiert. Je höher der absorbierte Strahlungsanteil ist, desto wärmer wird das Werkstück bis es schließlich aufschmilzt oder verdampft. Bei niedrigen Laserleistungsdichten, in der Größenordnung von $10^5$ W/cm$^2$ für Stahlwerkstoffe, reicht der bei der

Verdampfung entstehende Dampfdruck nicht aus, um im Schmelzbad eine sogenannte Dampfkapillare zu bilden. Dieser Prozessbereich wird als Wärmeleitschweißen bezeichnet. Wird die eingestrahlte Laserleistungsdichte bei Stahlwerkstoffen bis auf einige $10^5$ W/cm$^2$ bzw. in die Größenordnung von $10^6$ W/cm$^2$ gesteigert, so steigt der Dampfdruck im Bereich des Fokusfleckes. Ist der Dampfdruck so hoch, dass er die Schmelze seitlich verdrängt, bildet sich die Dampfkapillare (auch Keyhole genannt). Die einfallende Laserstrahlung wird an den Dampfkapillarwänden reflektiert und führt zur weiteren Verdampfung des Werkstückes im Bereich des Dampfkapillarbodens. Dadurch wird immer tiefer eingeschweißt, ohne, dass die Schweißnaht signifikant breiter wird. Dies wird als Tiefschweißen bezeichnet. Ein Merkmal des Tiefschweißens ist ein großes Aspektverhältnis $A_N$, welches aus dem Quotient aus Einschweißtiefe s und Nahtbreite b berechnet wird (vgl. Formel (2)) (Kuhl, 2010), (Birnesser, 2011), (Ruß, 2006).

$$A_N = \frac{s}{b} \tag{2}$$

Aus vielen Untersuchungen (siehe auch Kapitel 2.2) ist bekannt, dass der Laserschweißprozess Prozessemissionen hervorruft. Dazu gehören grundsätzlich Schallemissionen und elektromagnetische Emissionen (siehe Abbildung 1). Ursachen für die elektromagnetischen Emissionen sind z.B. der abströmende Metalldampf, das Plasma, die vom Bauteil reflektierte Laserstrahlung, das Schmelzbad oder die erstarrende Schmelze. Zu den wichtigsten Schallemissionen gehören im Allgemeinen die Luft- und Körperschallemissionen, die durch unterschiedliche Effekte beim Schweißprozess angeregt werden (Birnesser, 2011), (Müller-B., 2009).

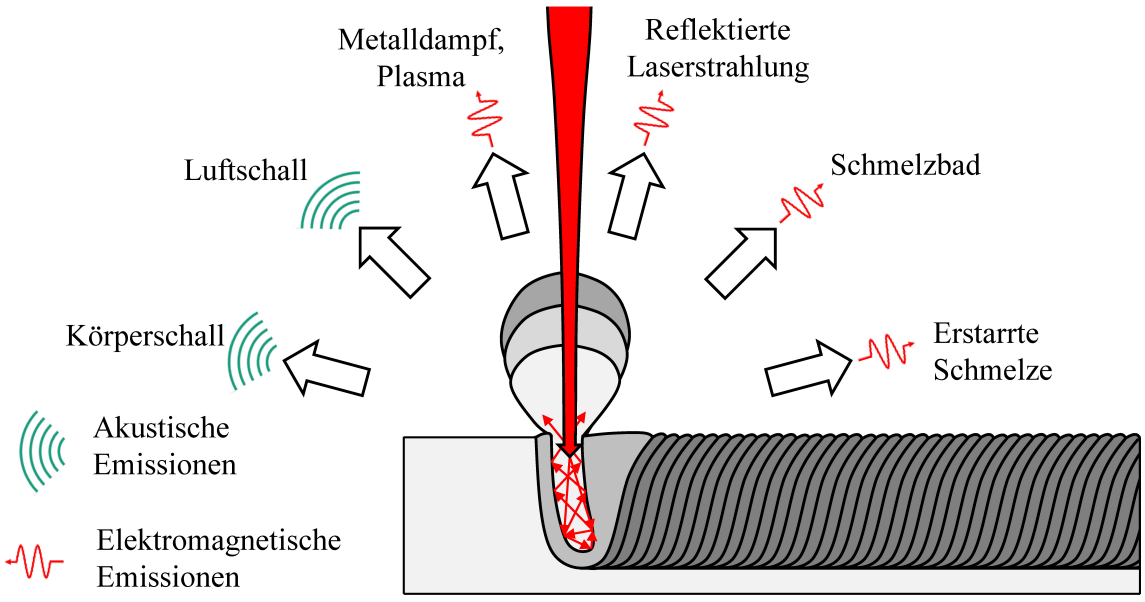



Abbildung 1: Emissionen während des Lasertiefschweißprozesses

### 2.1.2 Strahlerzeugung

Die Laserstrahlung, welche zum Schweißen verwendet wird, kann auf unterschiedliche Arten erzeugt werden. Für die grundlegenden Eigenschaften der erzeugten Laserstrahlung ist vor allem das sogenannte laseraktive Medium verantwortlich, welches ein Festkörper, eine Flüssigkeit oder ein Gas sein kann. Zu den industriell relevanten Typen der Festkörperlaser gehören der Stab-, Faser-, Dioden- und der Scheibenlaser (Neubert, 2009). Aufgrund der besseren Strahlqualität haben die Festkörperlaser das größte Potential für das Laserstrahlschweißen im automobilen Karosseriebau (Ruß, 2006). Bei ihnen werden durch Zuführung einer optischen Strahlung (Pumpstrahlung) die Elektronen des laseraktiven Mediums auf ein höherenergetisches Niveau gehoben. Fallen diese wieder auf ein niedrigeres Energieniveau wird Laserstrahlung erzeugt. Nach dem aktuellen Stand der Technik werden hauptsächlich die Festkörperlasertypen Scheiben- und Faserlaser verwendet. Darauf werden auch die folgenden Erläuterungen beschränkt.

#### 2.1.2.1 Scheibenlaser

Die Entwicklung des Scheibenlasers fand am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) in Stuttgart statt. Dieser Lasertyp zeichnet sich dem Namen nach dadurch aus, dass das aktive Medium (z.B. Yb:YAG, Wellenlänge $\lambda = 1030$ nm) in Form einer 100 µm – 500 µm dicken Scheibe vorliegt. Die Dicke der Scheibe ist dabei sehr viel kleiner als deren Durchmesser. Sie ist auf der Rückseite hochreflektierend sowohl für die Pump- als auch für die erzeugte Laserstrahlung beschichtet. Die Vorderseite ist für beide Strahlungsarten durchlässig. Das scheibenförmige laseraktive Medium ist rückseitig an eine Wärmesenke gekoppelt, welche für die Kühlung sorgt. Die Pumpleistung kann mittels Laserdioden zugeführt werden. Sie wird über Umlenkung mittels Parabolspiegeln mehrfach durch die Scheibe geleitet, womit sich ein Verstärkungseffekt erzielen lässt. Somit lassen sich Laserleistungen von mehr als 5 kW bei einem optischen Wirkungsgrad von mehr als 65% und einem elektrischen Wirkungsgrad von 25% aus einer einzelnen Scheibe erzeugen. Um höhere Leistungen zu erzielen ist auch die Koppelung mehrerer Scheiben in einem Resonator bekannt. Scheibenlaser finden sowohl zur Erzeugung kontinuierlicher (cw) als auch gepulster Laserstrahlung Anwendung (Stolzenburg, 2010), (Giesen, 2007).

#### 2.1.2.2 Faserlaser

Der Faserlaser gehört, wie auch der oben beschriebene Scheibenlaser, zur Gruppe der Festkörperlaser, da das laseraktive Medium in festem Aggregatzustand vorliegt. Die ersten Laseranlagen dieser Art wurden bereits vor über 50 Jahren für den Bereich Telekommunikation entwickelt. Im Gegensatz zum Scheibenlaser ist hier eine mehrere Meter lange Faser mit dem aktiven Medium (z.B. Ytterbium) dotiert. Die Faser kann auf einem zylindrischen Kühlelement aufgewickelt sein,

um eine regelbare Temperaturführung zu ermöglichen. Die Wellenlänge eines Faserlasers liegt im Bereich von 1 µm, wodurch eine Strahlführung zur Bearbeitungsoptik in Lichtleitkabeln möglich ist. Die Pumpstrahlung kann mittels Diodenlasern erzeugt und in die Faser mit dem aktiven Medium eingekoppelt werden. Den Durchbruch der Faserlaser stellte die Entwicklung von Doppelkernfasern dar, wodurch die Ausgangsleistung deutlich angehoben werden kann, da die Wechselwirkungsmöglichkeit der Pumpstrahlung mit dem aktiven Medium gesteigert werden kann (Kratky, 2009). Somit können Ausgangsleistungen von über 4 kW bei ca. 80% optischem Wirkungsgrad mit einer einzigen Faser realisiert werden. Es ist auch möglich, mehrere Fasern zu einem Verbund zu koppeln, womit noch höhere Leistungen zur Verfügung stehen können. Bei Faserkopplung sinkt jedoch die Strahlqualität ab (Ruppik, 2012). Der elektrische Wirkungsgrad eines Faserlasers liegt im Bereich von 25-30% (Poprawe, 2008).

### 2.1.3 Strahlleitung

Die Wellenlänge eines Festkörperlasers liegt, je nach laseraktivem Medium, im Bereich von 1 µm. Dies erlaubt die Lichtleitung in Glasfasern. Die Basis dafür ist das Prinzip der Totalreflexion an der Grenzfläche zwischen optisch dichterem und optisch dünnerem Medium. Die Verluste von 2 bis 4%, welche bei der Führung des Laserlichtes in einem Lichtleitkabel (LLK) auftreten, sind vorwiegend auf die Strahlein- und Strahlauskopplung zurückzuführen (Andreev, 2011). Der Verlust durch die Lichtleitung in der Faser beschränkt sich auf ca. 0,5% bei einer Wegstrecke von einem Kilometer. Die meisten optisch transparenten Materialien können für die Laserlichtleitung eingesetzt werden. Am häufigsten werden jedoch $SiO_2$-Fasern verwendet (Webber, 2011).

Die Durchmesser des Kerns der LLK liegen im Bereich zwischen 10 µm und 600 µm (Trumpf, 2015). Besonders wichtig ist die Sicherheitstechnik bei einer Übertragung einer großen Laserleistung über lange Strecken. Die Lichtleitkabel sind daher vielfältig geschichtet aufgebaut, wobei mehrere Lagen Metall und isolierende PVC-Schichten verwendet werden. Diese dienen zur Überwachung der Faser und zur Notabschaltung im Falle eines Faserbruches (Armbruster, 2011).

### 2.1.4 Laserschweißoptik

Die Laserschweißoptik hat die Aufgabe, den ankommenden Laserstrahl auf den gewünschten Fokusdurchmesser am Werkstück zu bündeln. Dazu wird der vom LLK zur Verfügung stehende Laserstrahl am Eingang in die Optik zunächst kollimiert und anschließend fokussiert. Damit können mit einer Laserstrahlquelle unterschiedlich große Fokusdurchmesser und damit auch Leistungsdichten am Werkstück erzeugt werden. Nahezu alle kommerziell erhältlichen Optiken für das Laserstrahlschweißen sind mit einem Beobachtungsmodul ausgestattet. Dies ermöglicht es, über ei-

nen halbdurchlässigen Spiegel das Licht vom Werkstück, welches beim Schweißprozess entsteht, zu erfassen (Andreev, 2011).

Aufgrund der hohen Strahlqualität eines Festkörperlasers lässt sich dessen Laserstrahlung auf einen kleineren Fokusdurchmesser bündeln als bei einer Strahlquelle schlechterer Strahlqualität, wodurch bei konstanter Leistung eine höhere Leistungsdichte am Werkstück erreicht werden kann. Der Wärmeeintrag in das Bauteil kann gesenkt und die Schweißgeschwindigkeit erhöht werden. Die Laserstrahlung von Schweißoptiken ohne interne Strahlmanipulation muss mittels Manipulationstechnik (z.B. Roboter) an die gewünschte Bearbeitungsstelle gebracht werden. Die Strahlmanipulation erfolgt dabei ausschließlich über externe Komponenten, was zu teilweise hohen Nebenzeiten zwischen zwei Schweißungen führt. Ein deutlicher Fortschritt beim Laserstrahlschweißen konnte durch die Entwicklung von sogenannten Scanneroptiken erzielt werden. Diese ermöglichen durch ein in die Optik integriertes, bewegliches Spiegelsystem eine zusätzliche Strahlmanipulation auf einem runden bzw. elliptischen Bearbeitungsfeld. Mit einer zusätzlichen Fokuslagenverstellung kann dieses Feld sogar auf einen Bearbeitungsraum (X, Y, Z) erweitert werden. In Kombination mit einer Robotermanipulation können somit die Flexibilität des Schweißsystems deutlich gesteigert und die Prozesszeiten gesenkt werden. Dies gilt besonders für komplexe im Raum liegende Schweißnähte an 3D-Strukturen. Daher werden in der Automobilindustrie überwiegend Scanneroptiken zum Laserstrahlschweißen verwendet. Diese Kombination wird dann als Scanner- oder Remotelaserschweißen (RLW) bezeichnet (Sovetchenko, 2007).

Ein weiterer, sehr wichtiger Parameter für das RLW ist der Abstand der Laseroptik zum Fokuspunkt (Arbeitsabstand). Je größer dieser ist, umso flexibler und schneller ist dadurch das Gesamtsystem. Der Arbeitsabstand wird wiederum entscheidend von der Strahlqualität der Laserstrahlquelle beeinflusst. Je besser die Strahlqualität, desto größer kann der Arbeitsabstand gewählt werden (Reinhart, 2008).

### 2.1.5 Fehlstellen

Die DIN EN ISO 13919-1 bietet einen systematischen Überblick der möglichen Fehlstellen beim Laserstrahlschweißen und Elektronenstrahlschweißen. Je nach gewählter Bewertungsgruppe werden hier die zulässigen Grenzen für die verschiedenen Unregelmäßigkeiten dargestellt. Dazu gehören Poren, Risse, Lunker, Einschlüsse, Bindefehler, Kerben, Nahtüberhöhung, Wurzelüberhöhung, Kantenversatz, Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall, Schweißspritzer, etc. Im DVS Merkblatt DVS 3214 sind Unregelmäßigkeiten an Laserstrahlschweißnähten bezüglich der Ursachen und Maßnahmen zur Abhilfe dargestellt. Darüber hinaus haben die meisten Anwender des Laserstrahlschweißens in der Großserie eigene Werksnormen. Viele nehmen dabei Bezug auf die o.g.

DIN EN ISO 13919-1 und ergänzen diese um spezifische Fehlstellen. Dazu gehört beispielsweise die Prüfvorschrift PV 6719 von Volkswagen. Hier ist über den Umfang der DIN EN ISO 13919-1 hinaus z.B. auch der Einfluss von intermetallischen Phasen (Fe-Al) auf eine Laserschweißnaht beschrieben.

## 2.2 Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

### 2.2.1 Abgrenzung

Die Prozessanalytik unterscheidet die Begriffe „inline“, „online“, „atline“ und „offline“. Die Bezeichnungen „inline“ und „online“ werden im Sprachgebrauch häufig synonym verwendet. In der Prozessanalytik werden diese jedoch unterschieden. Eine Online-Prüfung beinhaltet einen Bypass, welcher parallel zum Produktionsfluss angelegt ist und worüber kontinuierlich Proben entnommen und der Prüfung zugeführt werden. Bei der Inline-Prüfung (In-situ-Prüfung) erfolgt die Messung direkt im Produktionsfluss (vgl. Abbildung 2), was üblicherweise über Sonden bzw. Sensoren realisiert wird. Um sowohl bei der Online- als auch bei der Inline-Prüfung einen geschlossenen Steuer- oder Regelkreis aufbauen zu können, ist es entscheidend, dass die Prozess- oder die Produkteigenschaften sich langsamer ändern müssen als die Prüfung und Auswertung dauert (Kessler, 2006).

Zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen findet prinzipiell eine Inline-Prüfung und/oder eine Offline-Prüfung statt. Die Inline-Verfahren können nach Abbildung 2 wiederum in Pre-, In- und Post-Process Verfahren unterteilt werden. Eine direkt dem Schweißprozess vorgeschaltete Inspektion der Nahtstelle wird dabei den Pre-Process Verfahren (vorlaufend) zugeordnet. Die Erfassung der Emissionen während des Laserschweißprozesses wird den In-Process-Verfahren (prozessnah) und die Inspektion der erstarrten Schmelze im direkten Anschluss an das Fügen den Post-Process-Verfahren (nachlaufend) zugeordnet. Im Folgenden werden sowohl die nach dem Stand der Technik und Wissenschaft bekannten Inline-Verfahren (vgl. Kapitel 2.2.3) im Pre-, In- und Post-Process als auch die Offline-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.2.2) beschrieben.

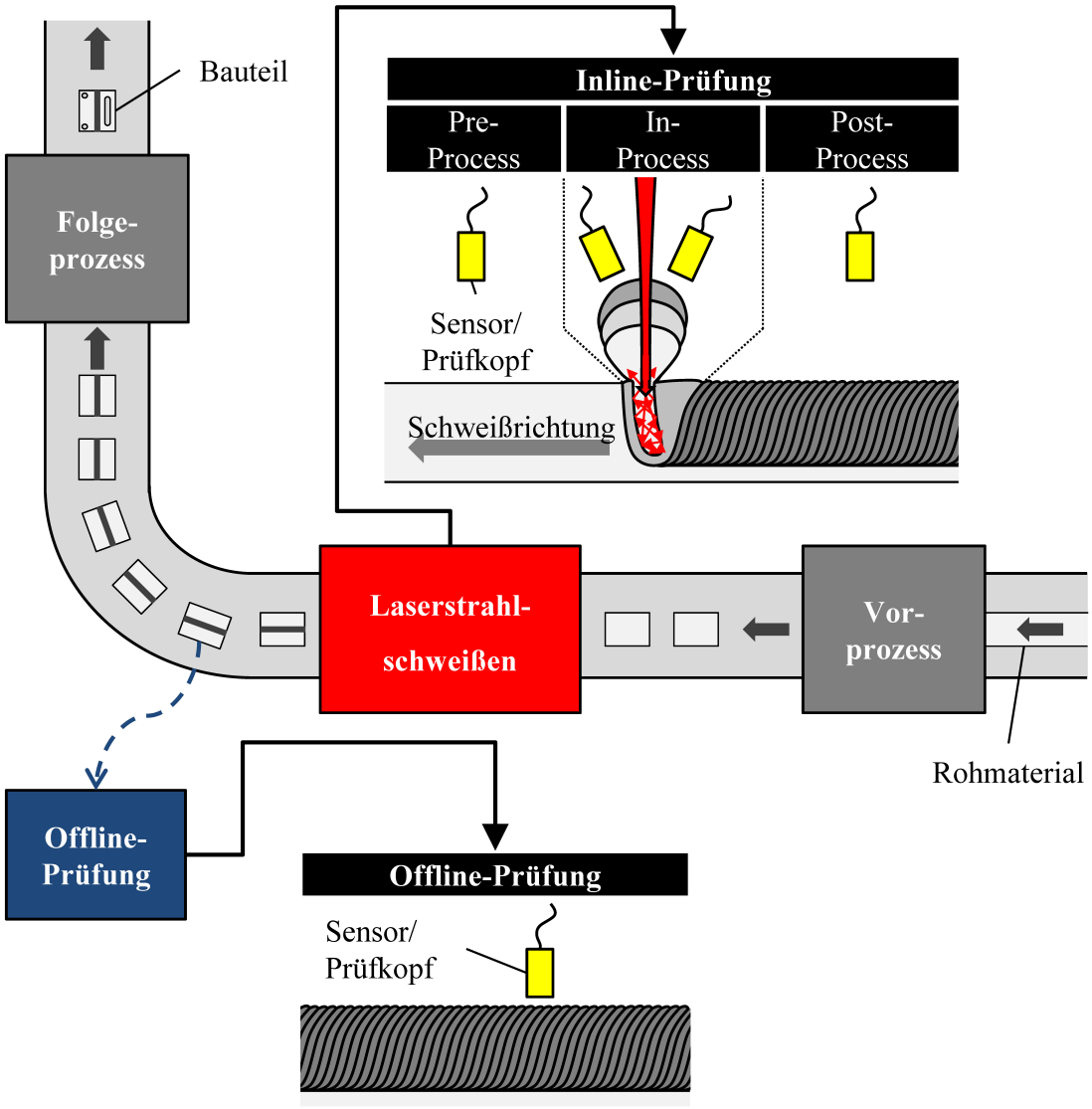



Abbildung 2: Abgrenzung zwischen Inline- und Offline-Verfahren

## 2.2.2 Offline-Prüfung

### 2.2.2.1 Zerstörende Prüfverfahren

Bei der zerstörenden Werkstoffprüfung steht die Analyse der mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften der Fügeverbindung im Vordergrund. Das DVS Merkblatt DVS 3210 beschreibt die gängigen Verfahren, welche für Laserstrahlschweißverbindungen zur Anwendung kommen. Dazu gehören die Zugprüfung nach DIN EN ISO 4136 zur Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften wie Dehnung, Dehn- oder Streckgrenze und Brucheinschnürung, etc. Auch Bruchprüfungen nach DIN EN ISO 9606 bzw. nach DIN EN ISO 9017 für Stahlwerkstoffe finden Anwendung. Diese sind zum Aufzeigen des Einflusses von innenliegenden Fehlstellen (Poren, Lunker, etc.) oder Bindefehlern auf die Belastbarkeit von Laserschweißverbindungen geeignet. Biegeprüfungen von Laserschweißnähten sind nach DIN EN ISO 5173 genormt. Mit

Hilfe von Kerbschlagbiegeversuchen nach DIN EN ISO 9016 kann die Bruchenergie von Schweißverbindungen ermittelt werden. Metallografische Untersuchungen im Rahmen von makroskopischen und mikroskopischen Quer-, Längs- oder Horizontalschliffen werden in der DIN EN ISO 17639 geregelt. Diese dienen vorwiegend zur Auffindung von innenliegenden Fehlstellen und zur Ermittlung der Einschweißtiefe, sowie zur Untersuchung des ausgebildeten Gefüges, der Wärmeeinflusszone und der Erstarrungsstrukturen. Weitere zerstörende Prüfverfahren für Schweißnähte sind Härteprüfungen nach DIN EN ISO 9015-1 für das Lichtbogenschweißen, sowie die Mikrohärteprüfung von Laserschweißnähten nach DIN EN ISO 9015-2. Gerade für dynamisch belastete lasergeschweißte Strukturen spielt auch die Betriebsfestigkeitsprüfung eine große Rolle. Auch die Korrosionsprüfung findet v.a. im automobilen Fertigungsumfeld sehr verbreitet Anwendung (DVS 3210). Die meisten Automobilhersteller arbeiten bezüglich der Ausführung und den zulässigen Grenzwerten der beschriebenen zerstörenden Prüfverfahren nach eigenen bzw. ergänzenden Werksnormen und Regelwerken.

#### 2.2.2.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Im DVS Merkblatt DVS 3210 sind für das Laserstrahlschweißen relevante zerstörungsfreie Prüfverfahren aufgelistet. Dazu gehören Sichtprüfung (VT), Eindringprüfung (PT), Magnetpulverprüfung (MT), Wirbelstromprüfung (ET), Ultraschallprüfung (UT) und Durchstrahlungsprüfung (RT). Ergänzend kann auch die Thermografieprüfung (IRT) hinzugefügt werden, welche im DVS Merkblatt keine Erwähnung findet. Weitere Übersichten zu Verfahren der Prüfung von Schweißverbindungen können der DIN EN ISO 17635 oder dem AD 2000-Merkblatt HP 5/3 entnommen werden. Die oben genannten Verfahren werden hinsichtlich des aktuellen Stands der Technik und Wissenschaft in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Sichtprüfung (VT)

Die allgemeinen Regularien der Sichtprüfung sind in der DIN EN 13018 beschrieben. Die speziellen Anforderungen bei der Prüfung von Schweißnähten sind der DIN EN ISO 17637 zu entnehmen.

Eindringprüfung (PT)

Die Eindringprüfung ist im Allgemeinen nach DIN EN ISO 3452-1 genormt. Spezielle Zulässigkeitsgrenzen für Schmelzschweißverbindungen sind der DIN EN ISO 23277 zu entnehmen. Siltanen et al. (Siltanen, 2012) beschreiben den Einsatz der Eindringprüfung für Laserschweißnähte an Seitenwandsegmenten von Bahnwaggons bei relativ geringen Gesamtstückzahlen und Taktzeiten.

Magnetpulverprüfung (MT)

Die Magnetpulverprüfung von Schweißnähten ist speziell für Schweißverbindungen in der DIN EN ISO 17638 reglementiert. O'Connor et al. (O`Connor, 2002) beschreiben ein Streufluss Verfahren (MFL, engl. magnetic flux leakage), bei welchem der Bereich der Laserschweißnaht eines Tailor Welded Blanks mit Hilfe eines Permanentmagneten magnetisiert wird. Eine Hall-Sonde wird zur automatisierten Erfassung der magnetischen Flussdichte verwendet.

Wirbelstromprüfung (ET)

Die Wirbelstromprüfung ist im Allgemeinen nach DIN EN ISO 15549 genormt. Die DIN EN 1711 beschreibt die speziellen Richtlinien bei der Schweißnahtprüfung mittels Vektorauswertung. Kuhl untersucht ein Wirbelstromverfahren zur Prüfung von Laserschweißnähten. Hierbei wird die Laserschweißverbindung mit einer Wirbelstromsonde automatisiert abgetastet (Kuhl, 2010). Weitere Verfahren sind den Quellen (Vidal, 2011), (Zösch, 2006) und (Zösch, 2008) zu entnehmen.

Ultraschallprüfung (UT)

Die zerstörungsfreie Ultraschallprüfung ist im Allgemeinen nach DIN EN ISO 16810 genormt. Spezielle Richtlinien für die Prüfung von Schweißnähten sind in der DIN EN ISO 17640 aufgeführt. Die Prüfung mittels elektromagnetisch erzeugten Ultraschalls (EMUS) wird bereits als schnelles Post-Process-Verfahren (vgl. Kapitel 2.2.3.4, Seite 22ff) in der industriellen Produktion eingesetzt (Salzburger, 2001), (Salzburger, 2004). Passini et al. (Passini, 2011) beschreiben in ihrer Untersuchung ein Verfahren, um mittels Kontakttechnik-Ultraschallprüfung Laserschweißnähte an Aluminium zu untersuchen. Koehler et al. (Koehler, 2008) untersuchen eine automatisierte Prüfung von lasergeschweißten Schalträdern eines Getriebes sowohl mittels Kontakt- als auch mit Tauchtechnik. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde u.a. die Leistungsfähigkeit des laserangeregten Ultraschalls zur Prüfung von lasergeschweißten Überlappnähten ermittelt (Dilger, 2007).

Durchstrahlungsprüfung (RT)

Die allgemeinen Grundlagen zur Durchstrahlungsprüfung von metallischen Werkstoffen sind in der DIN EN ISO 5579 geregelt. Spezielle Richtlinien für die Röntgenprüfung von Schmelzschweißverbindungen können der DIN EN ISO 17636 entnommen werden. Die hierzu zulässigen Grenzen sind in der DIN EN ISO 10675 reglementiert. Norris et al. (Norris, 2011) untersuchten mit Hilfe der Röntgenprüfung den Effekt der Laserschweißparameter auf die Porenbildung. Takayama et al. (Takayama, 2011) haben lasergeschweißte Strukturen mittels Durchstrahlungsprüfung geprüft.

Thermografieprüfung (IRT)

Die aktive Thermografieprüfung ist im Allgemeinen nach DIN 54192 genormt. Sie stellt ein noch relativ junges Verfahren dar, wodurch für die Schweißnahtprüfung noch keine speziellen Normen existieren. Döttinger (Döttinger, 2007) beschreibt eine automatisierte Prüfung von Laserschweißnähten mittels aktiver Thermografie. Weitere Untersuchungen zur Eignung der aktiven Thermografie zur Qualitätsüberwachung beim Laserstrahlschweißen sind u.a. den Quellen (Döttinger, 2009), (Srajbr, 2009), (Dilger, 2007), (Hierl, 2011), (Huo, 2009) und (Zettner, 2003) zu entnehmen.

## 2.2.3 Inline-Prüfung

### 2.2.3.1 Sensoranordnung

In Bezug auf die Bauteiloberfläche besteht die Möglichkeit, den Sensor oberhalb oder unterhalb des Werkstückes anzuordnen. Die sensorische Erfassung der Prozessemissionen auf der Bauteilrückseite ist nur eingeschränkt für eine Überwachung des Laserschweißprozesses in Großserie geeignet, da diese meist nur schlecht oder mit größerem Manipulationsaufwand zugänglich ist. Daher wird hier die Platzierung des Sensorsystems oberhalb des Bauteils, also auf der gleichen Seite wie die Laserschweißoptik, bevorzugt (Birnesser, 2011).

Die Positionierung der Sensoren zur Prozessbeobachtung beim Laserstrahlschweißen kann in Achse des einfallenden Laserstrahles (koaxial) realisiert werden. Wird die Sensorik seitlich angebracht, so kann dies als off-axiale Positionierung bezeichnet werden (siehe Abbildung 3).

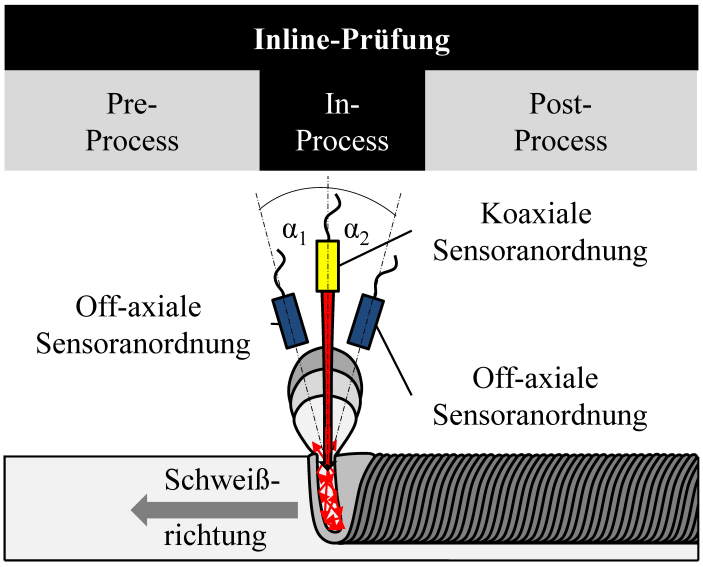



Abbildung 3: Sensoranordnung

#### 2.2.3.2 Pre-Process

Die Prozessüberwachungsverfahren, die vor dem eigentlichen Laserstrahlschweißprozess positioniert werden (Pre-Process), sollen die werkstückseitigen Eingangsparameter des Schweißprozesses ermitteln. Hier spielen, je nach Stoß- und Nahtart, unter anderem die Ausrichtung und das Spaltmaß der Fügepartner sowie die Erfassung des tatsächlichen Nahtverlaufes eine übergeordnete Rolle. Dazu werden verschiedene Verfahren eingesetzt, welche sich nach den physikalischen Wirkprinzipien gliedern lassen (DVS 3219). In der industriellen Fertigung werden fast ausschließlich optische Systeme eingesetzt. Es sind aber u.a. auch akustische und elektronische Pre-Process-Verfahren z.B. zur Erfassung des Spaltmaßes bekannt. Es werden auch mechanische Systeme verwendet, welche taktil die Schweißnahtposition erfassen (Kuhl, 2010), (Dorsch, 2012), (Berndl, 2011). Im Nachfolgenden werden potentielle Pre-Process-Verfahren kurz beschrieben.

Pre-Process - Optisch

Optische Verfahren zur Überprüfung der Ausrichtung der Fügepartner zueinander, zur Messung des Kantenversatzes oder zur Korrektur der Bahnkurve des Laserschweißroboters arbeiten zumeist nach dem Prinzip der Laserlinienscanner. Es wird eine Laserlinie oder auch ein Laserfleck, meist mittels Diodenlaser erzeugt, auf den Nahtbereich projiziert. Der Rückreflex wird mit Hilfe eines Kamerasystems detektiert und sowohl der Verlauf (Triangulation) als auch die Intensität ausgewertet. Je nach Anforderungen kann auch eine zusätzliche Beleuchtungseinheit eingesetzt werden und der Schattenwurf ausgewertet werden. Die Diode zur Erzeugung der Laserlinie bzw. des Laserpunktes kann ko- oder off-axial in die Schweißoptik integriert sein. Gleiches gilt auch für die Kamera. Somit kann Schweißfehlern, welche durch falsche Positionierung entstehen, vorgebeugt werden. Eine Garantie für eine fehlerfreie Laserschweißung bieten solche Systeme jedoch nicht. Verschiedene Arbeiten zu optischen Pre-Process Systemen sind in den Quellen (Zösch, 2008), (Dorsch, 2012), (Hesse, 2009), (Zhang, 2009), (Nicolay, 2009), (Trbola, 2006) beschrieben.

Pre-Process - Akustisch

In den Quellen (Zösch, 2008) und (Kuhl, 2010) wird ein Verfahren beschrieben, mit welchem beim Laserstrahlschweißen die akustischen Emissionen in Form von Körperschall aufgenommen werden. Eine geeignete Auswertung soll einen Rückschluss auf das Spaltmaß der Fügepartner im Überlappstoß ermöglichen. Kuhl beschreibt in seiner Arbeit jedoch, dass dieses System in den von ihm durchgeführten Versuchen keine reproduzierbaren Ergebnisse lieferte.

Ein anderes akustisches Verfahren zur Nahtverfolgung wird im Patent US6155117A erwähnt. Hier wird elektromagnetisch erzeugter Ultraschall (EMUS) in beiden Fügepartnern erzeugt und

anhand der Laufzeit der Ultraschallwellen die Nahtposition ermittelt (Stevens, 1999). Ein weiteres Verfahren zur akustischen Detektion der Schweißnahtposition ist aus dem Metall-Inertgas- bzw. Wolfram-Inertgasschweißen bekannt. Hier wird im Vorlauf zum Schweißprozess die Nahtposition mittels Luftultraschallwandlern ermittelt (Zhang, 1998).

Pre-Process - Mechanisch

Das Patent WO2011042292 beschreibt ein taktiles Nahtverfolgungssystem beim Laserstrahlschweißen bzw. –löten mit Zusatzdraht. Dieser Schweißzusatzdraht dient dabei gleichzeitig als taktile Einrichtung zur Verfolgung der Schweißposition (BMW, 2012), (Berndl, 2011). Nach DVS 3219 lassen sich pneumatische Verfahren auch zu den mechanischen Systemen zuordnen. Diese können beispielsweise zur Abstandsmessung der Schweißoptik zum Bauteil eingesetzt werden. Dabei kann das aus einer Ringdüse ausströmende Schutzgas genutzt werden. Der vor der Optik gemessene Staudruck ist ein Maß für den Bearbeitungsabstand (DVS 3219).

Pre-Process - Elektronisch

Zur Erfassung der Nahtposition und zur Ermittlung des Spaltmaßes der Fügepartner, beispielsweise im Überlappstoß, wurde auch die Eignung von induktiven Sensoren untersucht. Bae et al. (Bae, 2006) zeigten, dass beide genannten Parameter mit dem betrachteten Drei-Sensorsystem ermittelt werden können. Der vorlaufende Sensor ermittelt das Spaltmaß der Fügepartner. Die linken und rechten Sensoren dienen zur exakten Erfassung der Nahtposition.

#### 2.2.3.3 In-Process

In-Process-Verfahren dienen zur Erfassung der Prozessemissionen direkt während des Laserstrahlschweißens. Damit eignen sie sich zur Prozessüberwachung. Anhand der DVS-Richtlinie DVS 3219 lassen sich die In-Process-Verfahren nach ihrem physikalischen Wirkprinzip in mechanische, elektronische, optische und akustische Verfahren untergliedern. Zusätzlich werden in dieser Arbeit noch radiografische Verfahren erläutert. Zu den mechanischen Systemen gehören pneumatische und taktile Verfahren, welche zumeist zur Nahtverfolgung eingesetzt werden. Diese gehören streng genommen zu den Pre-Process-Verfahren und wurden daher bereits im vorherigen Kapitel 2.2.3.2 behandelt. Kapazitive und induktiv arbeitende Verfahren sind dem Oberbegriff der elektronischen Systeme zuzuordnen. Die sehr verbreitet eingesetzten optischen Verfahren erfassen z.B. die elektromagnetischen Emissionen des Schweißprozesses in verschiedenen Wellenlängenbereichen. Akustische Verfahren zeichnen die Luft- oder Körperschallemissionen des Schweißprozesses auf und verwerten diese Informationen (DVS 3219), (Kuhl, 2010, S.35ff). Im Folgenden werden bekannte Verfahren der genannten Gruppen vorgestellt.

In-Process - Elektronisch

Als elektronische Verfahren zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen werden zumeist induktive oder kapazitive Systeme verwendet. Li et al. (Li, 1996) beschreiben ein Verfahren zur Erfassung der elektrischen Ladung im Raum zwischen der Laserschweißoptik und dem Werkstück. Diese entsteht beispielsweise durch Bildung eines Plasmas beim Schweißen mit einer $CO_2$-Laserstrahlquelle. Die Ursache der Ladungsbildung ist ein Unterschied in der Beweglichkeit der positiv geladenen Ionen und der Elektronen im Plasma. Die Messung der Ladung erfolgt über eine isolierte Düse, welche über einen hohen Eingangswiderstand mit dem Bauteil verbunden ist. Die Plasmaladung ist ein Indikator für die Ausbildung des Keyholes. Eine Erhöhung der Einschweißtiefe oder eine Verbreiterung der Schweißnaht führt zu einem Anstieg der Anzahl von geladenen Teilchen im Plasma und damit zur Veränderung des Sensorsignals. Die Erfolgsrate dieses „Plasma Charge Sensors“ zur Auffindung von Laserschweißnahtfehlern (Poren, mangelnde Durchschweißung, Endkrater, Schweißen neben der Nahtposition, etc.) beträgt den Untersuchungen zufolge bis zu 90%.

In-Process - Radiografisch

Für die Inline In-Process-Überwachung beim Laserstrahlschweißen sind auch Röntgenverfahren bekannt. Vänskä et al. (Vänska, 2013) beschreiben einen Aufbau, mit Hilfe dessen eine Hochgeschwindigkeits-Röntgendiagnostik realisierbar ist. Damit ist es möglich, den Schweißprozess und die damit verbundene Ausbildung der Dampfkapillare in Echtzeit zu beobachten. So können Fehlstellen in der Entstehung visualisiert werden. Auch die Neigung und Stabilität der Dampfkapillare in Abhängigkeit der Schweißparameter kann sichtbar gemacht werden (Abt, 2011).

In-Process - Optisch

Bei optischen Verfahren zur Inline In-Process-Überwachung des Laserstrahlschweißens kann grundsätzlich zwischen aktiven und passiven Systemen differenziert werden. Passive Verfahren erfassen Prozessemissionen im Gegensatz zu aktiven Systemen, welche über zusätzlich aktiv betriebene Messungen Prozessinformationen generieren. Des Weiteren kann bei passiven Verfahren nach der Dimension der erfassten Sensorsignale unterschieden werden. Eindimensional arbeitende Systeme, wie zum Beispiel Dioden, erfassen die elektromagnetische Strahlung annähernd nur in einem Punkt. Andere Systeme, wie zum Beispiel Kameras, arbeiten mehr-dimensional (Kuhl, 2010), (Eriksson, 2011).

*Optisch – Passiv – 1-D*

Eindimensionale optische In-Process-Verfahren arbeiten zumeist koaxial, d.h. die Photodiode, welche elektromagnetische Strahlung eines bestimmten Wellenlängenbereiches erfassen kann,

wird in die Laserschweißoptik integriert. Die Emissionszuführung kann beispielsweise über einen Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel) realisiert werden. Bei Festkörperlasern werden meist drei Photodioden gleichzeitig eingesetzt, welche für die Wellenlängen 1100-1800 nm (T), 400-600 nm (P) und 1064 nm bzw. 1030 nm (R) empfindlich sind. Der Bereich im nahen Infrarot (NIR) ist der Temperatur T zuzuordnen. Durch Beobachtung dieser Emissionen können Informationen über die Temperaturverteilung im Schmelzbad und während des Abkühlprozesses der Schweißnaht gewonnen werden. Die Wellenlängen 400-600 (800) nm sind den elektromagnetischen Emissionen des Keyholes und des ausströmenden Metalldampfes zuzuordnen. Mit einer im Wellenlängenbereich der einfallenden Laserstrahlung sensitiven Photodiode kann der vom Werkstück rückreflektierte Strahlungsanteil (R) erfasst werden. Mit gezielter Beobachtung dieser Wellenlängenbereiche und vorheriger statistischer Ermittlung zulässiger Toleranzbänder können Schweißfehler schon im Entstehen erkannt werden. Die Verlässlichkeit dieses Systems ist bis dato jedoch relativ eingeschränkt. Es liefert unzureichende Aussagen über auftretende Fehlstellen (Eriksson, 2011), (Paura, 2011), (Olsson, 2011).

Eine weitere Möglichkeit der eindimensionalen optischen Prozessüberwachung ist die spektroskopische Analyse des Leuchtens des Plasmas bzw. des Metalldampfes. So können beispielsweise entgasende Beschichtungsstoffe erfasst werden. Kong et al. (Kong, 2012) konnten zeigen, dass sich beim Laserstrahlschweißen von zinkbeschichteten und teilweise entschichteten Stahlblechen (DP980) mit einer Blechstärke von 1,2 mm bzw. 1,5 mm im Überlappstoß die spektral zerlegten Emissionen des Metalldampfes bzw. des Plasmas deutlich unterscheiden. Weitere Untersuchungen zur spektralen Analyse des Prozessleuchtens (Metalldampf, Plasma) sind in (Sibiliano, 2009), (Anabitarte, 2012), (Sebestova, 2012) und (Ancona, 2008) zu finden.

*Optisch – Passiv– Mehr-D*

Mehrdimensionale bildgebende Verfahren zur optischen Erfassung der elektromagnetischen Prozessemissionen beim Laserstrahlschweißen liefern ortsaufgelöste Informationen. Dadurch kann das gesamte Schmelzbad und die Kapillare dargestellt und beobachtet werden. Im Vergleich zur eindimensionalen Erfassung ist hier der Hard- und Softwareaufwand deutlich höher. Die eingesetzten Kamerasysteme müssen eine hohe Bildfolgefrequenz aufweisen, um dem sehr dynamischen Laserschweißprozess folgen zu können. Weiter müssen geeignete Auswertealgorithmen existieren, um mögliche Schweißfehler automatisiert zuordnen zu können. Müller-Boharnian (Müller-B., 2009) hat gezeigt, dass sich durch eine Beobachtung des Schmelzbades und der Kapillare mit einer koaxial angeordneten CMOS-Kamera (Wellenlängenbereich zwischen 0,4 µm und 1,1 µm) sowie eine anschließende automatisierte Auswertung der Formparameter, Schweißnahtfehler bereits im Prozess erkennen lassen. Die zu beobachtende Strahlung wurde für die Detektion

über einen Strahlteiler ausgekoppelt und beispielsweise der Schwerpunkt und die maximalen Abmessungen des Schmelzbades erfasst. Für jeden so ermittelten Formparameter müssen vorher zulässige Toleranzbänder festgelegt werden. Ein Ausbruch deutet auf einen Fehler hin. Mit Hilfe dieses kamerabasierten Überwachungsverfahrens können u.a. Abweichungen der Parameter Laserleistung, Fokuslage, Spalt im Überlappstoß oder Lateralversatz bei einer Kehlnahtschweißung erkannt werden. Neben dem Einsatz der oben beschriebenen CMOS-Kameras können auch CCD-Kameras für die Prozessüberwachung eingesetzt werden. Die Bildfolgefrequenz ist hier auf ca. 50 Hz beschränkt, was für die hohe Dynamik eines Laserstrahlschweißprozesses oft nicht ausreichend ist. Weitere kamerabasierte Verfahren sind u.a. den Quellen (Abt, 2011a), (Gao, 2012), (Kim, 2012) und (Norman, 2008) zu entnehmen.Verschiedene optische Prozessüberwachungsverfahren sind kommerziell erhältlich. Herstellerangaben zufolge können mit Hilfe von Photodioden und Kamerasystemen Einschweißtiefe, Durchschweißung, Anbindungsquerschnitt, Löcher, Schmelzauswürfe, Nahtposition, Poren und Schweißspritzer während des Laserstrahlschweißprozesses erkannt werden (Kogel-H., 2012).

*Optisch – Aktiv*

Kogel-Hollacher (Kogel.H., 2014), (Kogel.H., 2015) stellt ein Verfahren vor, mit welchem während des Laserschweißprozesses die Einschweißtiefe aktiv gemessen werden kann. Als Prinzip dient dabei die sogenannte Kurzkohärenz-Interferometrie. Die Messung erfolgt koaxial während des Schweißprozesses. Ein Messlaserstrahl wird auf das Keyhole ausgerichtet. Dabei wird der auf den Schweißprozess ausgerichtete Messstrahl mit einem Referenzstrahl in einem Interferometer verglichen. Untersuchungen ergaben eine gute Korrelation des Messwertes zur erzielten Einschweißtiefe während des Tiefschweißprozesses.

In-Process – Akustisch

Die akustischen Prozessemissionen beim Laserstrahlschweißen können für das Monitoring genutzt werden. Hier bestehen grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten, welche u.a. im DVS Merkblatt DVS 3219 oder von Shao et al. (Shao, 2005) beschrieben werden (siehe Abbildung 4):

1. Körperschall in der Schweißoptik (Spiegel)
2. Körperschall im Bauteil (direkt oder über Schallleitung)
3. Luftschall

Es ist möglich, die Messung der akustischen Schwingung der Spiegel in der Laseroptik über einen angekoppelten Schallwandler (S1) durchzuführen. Eine andere Möglichkeit ist die Detektion des Körperschalls über einen Sensor (S2) direkt am zu schweißenden Bauteil. Auch die Leitung des Körperschalls zum Detektor über einen angekoppelten Wellenleiter ist bekannt. Eine weitere

Möglichkeit ist die Detektion des in die Luft abgestrahlten Schalls über einen off-axial angeordneten Sensor S3. (DVS 3219). Im Folgenden werden die oben beschriebenen Verfahren näher erläutert.

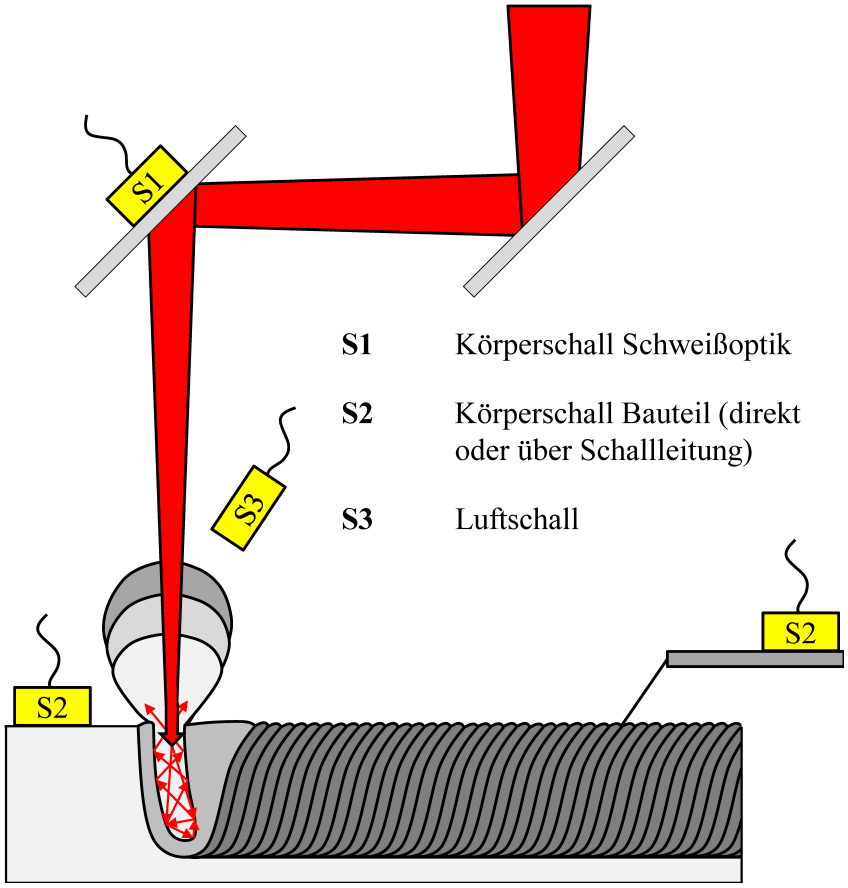



Abbildung 4: Qualitätsüberwachung beim Laserstrahlschweißen, Inline, In-Process, akustisch, verschiedene Verfahren

*Akustisch – Körperschall in Schweißoptik*

Werden Schallwandler auf den Spiegeln der Laseroptik angebracht, können diese die akustischen Schwingungen, welche vom zurückreflektierten Laserstrahl ausgelöst werden, erfassen. Eine Untersuchung von Li (Li, 2002) hat gezeigt, dass das Signal an dem letzten Spiegel vor Austritt der Laserstrahlung aus der Optik am stärksten ist. Es liegt im Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 600 kHz. Beim Einschweißvorgang ist das Signal am stärksten. Sobald sich das Keyhole ausgebildet hat, sinkt die Amplitude des Signals ab. In diesem Versuch wurde die Intensität der Laserstrahlung am Werkstück zunächst gesteigert, bis ein Tiefschweißen erzielt werden kann und anschließend wieder abgesenkt. Zu Beginn reicht die Intensität zum Tiefschweißen nicht aus. Es kann sich kein vollständiges Keyhole bilden, wodurch ein relativ großer Anteil der einfallenden Laserstrahlung zurückreflektiert wird und zu starken akustischen Signalen führt. Sobald ein Keyhole geformt wird, sinkt das Signal des Sensors deutlich ab, da durch die Mehrfachreflexio-

nen der einfallenden Laserstrahlung im Keyhole der Absorptionsgrad deutlich ansteigt, wodurch weniger Rückreflexe auftreten. Damit ist dieses Sensorsystem geeignet, den Tiefschweißeffekt zu überwachen. Eine ähnliche Untersuchung ist der Quelle (Weerasinghe, 1990) zu entnehmen.

*Akustisch – Körperschall im Bauteil*

Der Körperschall, welcher sich bei der Lasermaterialbearbeitung im Bauteil ausbreitet, kann für das inline In-Process Monitoring genutzt werden. Dazu werden zumeist Frequenzbereiche zwischen 50 und 900 kHz betrachtet. Das Verfahren ist zur Auffindung innenliegender makroskopischer Fehler wie Risse und Poren, aber auch zur Erfassung der Einschweißtiefe und von Schweißspritzern geeignet (Huang, 2009). Bordatchev et al. (Bordatchev, 2006) untersuchten beispielsweise den Einfluss der Fokusposition beim Laserabtragen auf die akustischen Emissionen in Form von Körperschall. Dazu wurde ein Sensor auf das zu bearbeitende Bauteil aufgesetzt, welcher akustische Emissionen bis zu einer maximalen Frequenz von 500 kHz erfassen kann. Die schnelle Fourier-Transformation (FFT) zeigt, dass je nach Fokusposition im Spektrum andere Frequenzinhalte mit anderen lokalen Maximalamplituden zu finden sind. Die statistische Auswertung der Signale hat gezeigt, dass die Fokuslage des Laserstrahles mit Hilfe der Körperschallemissionen während des Schweißprozesses erfasst werden kann, was dieses Verfahren für die Prozessüberwachung interessant macht. Weitere Untersuchungen zur Prozessüberwachung des Laserstrahlschweißens mittels Körperschallemissionen im Bauteil können den Quellen (Crostack, 1998), (Stork, 2009), (Sun, 2001) entnommen werden. Sun et al. (Sun, 1999) haben in vergleichenden Untersuchungen zwischen Luft- und Körperschall nachgewiesen, dass die im Werkstück übertragenen Körperschallsignale unterhalb von 200 kHz liegen.

*Akustisch – Luftschall*

Es sind auch Verfahren bekannt, mit welchen die Luftschallemissionen des Laserschweißens erfasst und ausgewertet werden können. Hierzu finden meist Mikrofone Anwendung, die im Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 100 kHz arbeiten. Zu den erfassbaren Parametern gehören die Einschweißtiefe und Schweißnahtqualität. Schweißfehler lassen sich mit Hilfe der Luftschallemissionen in diesem Frequenzbereich bei Stumpfnähten zuverlässiger nachweisen als bei Überlappnähten (Artinger, 1990). Gatzweiler et al. (Gatzweiler, 1989) beschreiben die Entstehung von Luftschallemissionen im Vergleich zur Dampfabströmung bzw. zur Plasmaentstehung unter Berücksichtigung der Druckverhältnisse im Keyhole beim Laserschweißen mit $CO_2$-Lasern. Sie stellen ein Modell für das Schweißen mit $CO_2$-Lasern auf, welches die optischen und akustischen Emissionen erklären soll. Farson et al. (Farson, 1999) erläutern die Entstehung von Luftschallemissionen infolge der Dampfabströmung aus dem Keyhole. Dabei konnten die theoretisch ermittelten Ergebnisse auf Basis eines vereinfachten Modells experimentell mittels eines $CO_2$-Lasers

bewiesen werden. Die betrachteten Abtastraten (Samplingraten) betrugen bei diesen Untersuchungen 50 kHz. Gu et al. (Gu, 1996) untersuchten die Luftschallemissionen im Bereich zwischen 20 Hz und 20 kHz. Für die Schweißversuche wurde ein gepulster $CO_2$-Laser verwendet. Gute Schweißnahtqualität konnte an einem schmalen Band akustischer Emissionen im Bereich von 4,5 kHz erkannt werden, wohingegen qualitativ schlechte Laserschweißnähte eine Vielzahl von Frequenzinhalten im Spektrum erkennen ließen. Huang et al. (Huang, 2009) zeigen in ihrer Untersuchung mit einem Mikrofon (Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 20 kHz), dass es einen Zusammenhang zwischen der Einschweißtiefe und dem Schalldruck gibt. Für die Schweißungen wurde ein 4 kW Faserlaser als Strahlquelle verwendet. Bei vollständiger Durchschweißung kann sich eine vollständige Dampfkapillare ausbilden, was zu höheren Schalldrücken im Vergleich zur unvollständigen Durchschweißung führt. Im Frequenzspektrum sind Änderungen im Frequenzbereich von 1000 Hz zu beobachten, sobald eine Durchschweißung stattfindet. Auch eine Strategie zur Reduzierung der Umgebungsgeräusche, ausgelöst durch Crossjet oder Schutzgasausströmung, wird hier beschrieben. Dazu werden zunächst die Umgebungsgeräusche separat aufgezeichnet und später aus dem Gesamtsignal herausgefiltert. Luo et al. (Luo, 2005) haben Untersuchungen zur Erfassung der Luftschallemissionen während des Schweißens mit einem $CO_2$-Laser durchgeführt. Die Aufzeichnungen wurden im Frequenzband zwischen 0 und 20 kHz mit einem Mikrofon durchgeführt, wobei der Fokus auf der Erfassung der Schallereignisse im gebildeten Plasma lag. Eine gezielte Einstellung von Lücken der Fügepartner im Überlappstoß sowie ein Kantenversatz der Fügepartner im Stumpfstoß provozierte Schweißfehler. Mit Hilfe einer FFT sowie einer Waveletanalyse wurden die aufgenommenen Signale analysiert. Die automatisierte Auswertung erfolgte mit einem künstlichen neuronalen Netz. Sun et al. (Sun, 1999) zeigen in Untersuchungen zum Vergleich von Körper- und Luftschall, dass die signifikanten Luftschallemissionen im Bereich < 10 kHz liegen. Weitere Verfahren und Untersuchungen zur Erfassung und Auswertung der Luftschallemissionen eines Laserschweißprozesses sind u.a. den Quellen (Ali, 2000), (Duley, 1994), (Farson, 1990), (Farson, 2000), (Gu, 1996a), (Huang, 2011), (Palanco, 2003), (Sansan, 2010), (Jon, 1982), (Huang, 2010), (Lee, 2015), (Sun, 2001), (Sun, 1999) zu entnehmen. Abbildung 5 zeigt eine Auswahl verschiedener Literaturquellen in Bezug auf den untersuchten Frequenzbereich der Luftschallsignale beim Laserstrahlschweißen. Diese liegen, bis auf zwei Ausnahmen, zwischen 20 Hz und 20 kHz.

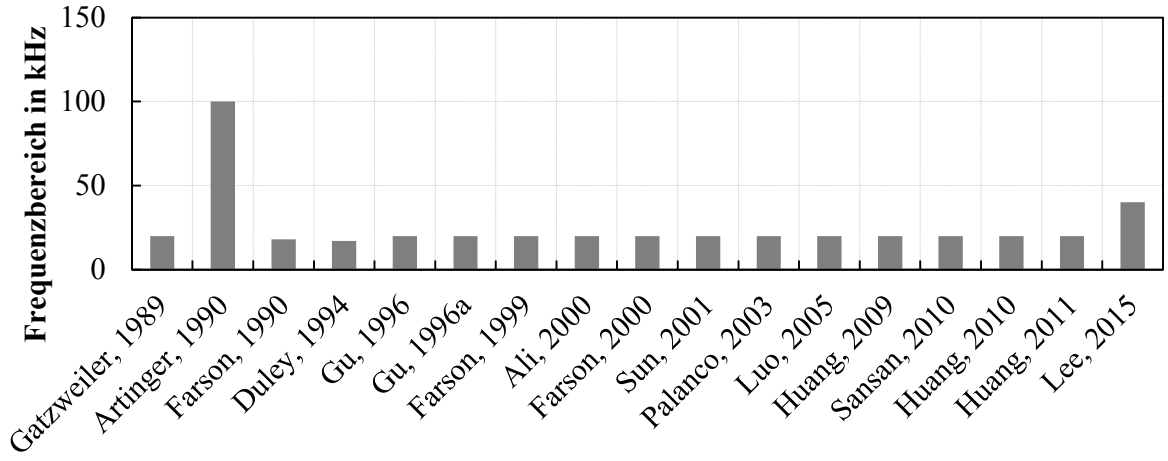



Abbildung 5: Zusammenfassung bisher untersuchter Frequenzbereiche der Luftschallemissionen beim Laserstrahlschweißen

#### 2.2.3.4 Post-Process

Verfahren, welche die Qualitätsmerkmale von Laserschweißnähten taktzeitgerecht nach dem Schweißprozess erfassen, werden als Post-Process-Verfahren bezeichnet. Im Folgenden werden die wichtigsten Methoden kurz vorgestellt.

Post-Process - Optisch

Zur Visualisierung des Abkühlverhaltens ist die Verwendung von Kameras, welche im Spektrum des nahen Infrarots NIR empfindlich sind, bekannt. Hier können zum Beispiel InGaAs (Indium-Gallium-Arsenid) Sensoren verwendet werden, welche Bildfolgefrequenzen im kHz-Bereich ermöglichen. Der typische Wellenlängenbereich solcher Kameras liegt zwischen 1100 nm und 1800 nm, wodurch der kurzwellige NIR-Bereich abgedeckt ist. Damit können der Erstarrungsprozess und die Abkühlung der Schweißnaht überwacht werden. Mögliche Inhomogenitäten der Schweißnaht, z.B. eine fehlende Anbindung („Falsche Freunde“), führen zu einer Verzögerung der Abkühldauer gegenüber vollständig durchgeschweißten Fügepartnern im Überlappstoß. Aufgrund der geringen Transmission von elektromagnetischen Wellen im spektralen Wellenlängenbereich > 1800 nm durch Glaslinsen, welche bei herkömmlichen Festkörperlaserschweißoptiken eingesetzt werden, können Infrarot (IR) Kameras im Wellenlängenbereich (3,4 µm – 5,1µm) nicht koaxial angeordnet werden (Dorsch, 2012), (Müller-B., 2009). Xu et al. (Xu, 2010) haben für optisch, mehrdimensionale Post-Process-Verfahren in ihrer Untersuchung an Laserschweißnähten von Tailor Welded Blanks gezeigt, wie ein automatisierter Auswertealgorithmus aufgebaut werden kann. Dieser findet zuverlässig und robust alle oberflächlichen Schweißnahtfehler und ist daher für eine Inline-Prüfung geeignet. Die aufgenommenen Daten können im Hinblick auf einen durchgängigen Qualitätsüberwachungsprozess gespeichert werden. Huang (Huang, 2010) be-

schreibt ein Verfahren zur dreidimensionalen Abtastung und Aufzeichnung der Topologie von Schweißnähten, womit beispielsweise der Schweißnahteinfall und die Schweißnahtbreite sowie oberflächenoffene Fehlstellen im Post-Process detektiert werden können.

Post-Process - Akustisch

Zur taktzeitgerechten Inline Post-Process-Überwachung des Laserstrahlschweißens im automobilen Karosseriebau ist der Einsatz der EMUS-Technik bekannt. Dieses Verfahren wird beispielsweise bei der Herstellung der Ausgangsplatinen für Tailor Welded Blanks (TWB) angewendet. Der Schallwandler wird bei diesem Verfahren koppelmittelfrei auf das geschweißte Tailor Welded Blank aufgesetzt und erzeugt elektromagnetisch im Bauteil Ultraschallwellen. Diese werden in Richtung der Schweißnaht abgestrahlt und an vorhandenen Fehlstellen reflektiert bzw. transmittiert. Die Schallreflexionen an Fehlstellen können erfasst und ausgewertet werden. Damit können beispielsweise Kantenbindungsfehler oder auch Poren, Porenzeilen und andere innenliegende Fehlstellen erkannt werden. Der EMUS-Wandler kann von Robotern manipuliert werden oder auch feststehen und das geschweißte Blech kann darüber hinweg laufen. Post-Process-Verfahren, welche nach diesem Prinzip arbeiten, werden bereits verbreitet in der industriellen Fertigung von TWB‘s eingesetzt (Salzburger, 2001), (Salzburger, 2004).

#### 2.2.3.5 Zusammenfassung und Bewertung der Inline-Verfahren

Eine tabellarische Zusammenfassung und Bewertung der bekannten Inline-Verfahren zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen ist in Tabelle 1 dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass diese Arbeit sich ausschließlich mit In-Process-Verfahren beschäftigt, wird die Zusammenfassung auch auf diese Art der Verfahren beschränkt.

Elektronische Verfahren sind für die Anwendung in einer modernen Fertigung nicht geeignet, da hier zumeist Festkörperlaser und nicht $CO_2$-Laser zum Einsatz kommen. Radiografische Verfahren können nicht zur In-Process-Überwachung in einer Serienproduktion eingesetzt werden, da der Aufwand und die praktische Umsetzung mit einem viel zu hohen Aufwand verbunden wären. Passive optische Verfahren (1D) dienen der Erfassung von elektromagnetischen Emissionen. Sie werden bereits in der Serienproduktion eingesetzt. Jedoch ergibt sich hier oft der Nachteil der mangelnden Aussagekraft in Bezug auf die Fehlerdetektion. Dies kann zu Fehlinterpretationen führen. Gleiches gilt für die Überwachung mittels passiven optischen mehrD-Verfahren. Diese sind aufgrund der zu installierenden Kameratechnik auch kostenintensiver als 1D-Verfahren. Aktive optische Verfahren sind noch relativ neu. Aus diesem Grund sind noch keine ausführlichen Studien bekannt.

Tabelle 1: Zusammenfassung und Bewertung der In-Process Verfahren zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

| **Prozessein-ordnung** | **Physikalisches Prinzip** | **Anwendung** | **Bewertung** |
|---|---|---|---|
| In-Process | Elektronisch | Erfassung elektrischer Ladung beim Schweißen mit $CO_2$-Lasern | Keine Anwendung bei Festkörperlasern, daher nicht geeignet für die moderne Serienproduktion |
| In-Process | Radiografisch | Echtzeitbeobachtung der Dampfkapillare | Zu aufwendig für Serienproduktion |
| In-Process | Optisch; passiv; 1D | Beobachtung elektromagnetischer Prozessemissionen verschiedener Wellenlängen mittels Dioden | Anwendbar in der Serienproduktion; Aussagekraft teilweise nicht eindeutig |
| In-Process | Optisch; passiv; mehrD | Beobachtung elektromagnetischer Prozessemissionen verschiedener Wellenlängen mittels Kamera | Anwendbar in der Serienproduktion; Aussagekraft teilweise nicht eindeutig; Aufwendiger als Überwachung mittels Dioden (1D) |
| In-Process | Optisch; aktiv | Echtzeitmessung der Einschweißtiefe | Anwendbar in Serienproduktion; Nur Aussage über Einschweißtiefe; Keine ausführlichen Parameterstudien bekannt |
| In-Process | Akustisch; Körperschall in Schweißoptik | Indirekte Messung des rückreflektierten Laserstrahls | Direkte Messung über Dioden ist besser |
| In-Process | Akustisch; Körperschall im Bauteil | Beobachtung von Körperschallemissionen über direkt angekoppelte Sensoren | Direkte Kopplung der Sensoren nicht serientauglich; Keine ausführlichen Parameterstudien bekannt |
| In-Process | Akustisch; Luftschall | Beobachtung von Luftschallemissionen | Bisher nur resonante niederfrequente Luftschallemissionen untersucht; Schlechte Korrelation durch hohe Beeinflussung durch Störquellen |

Mit der Überwachung des Körperschalls in der Schweißoptik kann nur ein Teil des zur Verfügung stehenden Informationsgehaltes berücksichtigt werden. Es handelt sich um eine indirekte Erfassung der zurückreflektierten Laserstrahlung, welche mittlerweile deutlich besser über optische Sensorik (Dioden) erfasst werden kann.

Nachteilig bezüglich der Erfassung von Körperschallemissionen im Bauteil wird die Notwendigkeit der Kopplung der Sensoren mittels Koppelmittel an das zu schweißende Bauteil beschrieben, obwohl dem Körperschallsignal grundsätzlich hoher Informationsgehalt zugesprochen wird (Hillers, 2003). Die Kopplung der Sensoren ist nur schwer in einer Serienproduktion umsetzbar. Dazu ist keine systematische Untersuchung der Korrelation der Körperschallemissionen zu den wichtigen Stellparametern des Schweißprozesses sowie zum Schweißergebnis bekannt.

Als nachteilig bezüglich der Überwachung des Laserschweißprozesses mittels Luftschallemissionen wird vor allem die Beeinflussung durch Störgeräusche aus der Umgebung beschrieben. Diese sind nicht bzw. nur mit sehr hohem Aufwand vom Nutzsignal trennbar (Hillers, 2003). Dazu wurden bisher ausschließlich niederfrequente resonante Luftschallemissionen untersucht. Es ist keine Untersuchung von breitbandigen und höherfrequenten Luftschallemissionen bekannt. Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass die oben genannten Verfahren keine zuverlässige Korrelation von Luftschallemissionen über den gesamten Frequenzbereich mit den Stellparametern des Laserschweißprozesses und den Qualitätsmerkmalen von Laserschweißnähten erlauben.

### 2.2.4 Signalauswertung bei der In-Process-Überwachung

Die Auswahl des sensorischen Verfahrens zur In-Process-Überwachung mit allen zuvor dargestellten Vor- und Nachteilen ist lediglich ein Teil zur Realisierung einer robusten und tauglichen Prozessüberwachung. Die Sensoren liefern kontinuierliche Signale, welche die gewünschten Prozessinformationen enthalten. Im Hinblick auf eine In-Process-Überwachung müssen diese analysiert werden, um z.B. Fehlstellen oder Instabilitäten erkennen zu können.

Vor allem bei akustischen Signalen hat es sich in vorherigen Untersuchungen als vorteilhaft erwiesen, das Amplituden-Zeit-Signal zuvor mittels Kurzzeit-Fourier-Transformation (engl. Short-Time-Fourier-Transform STFT) darzustellen, um die Veränderung des Frequenzinhaltes über die Zeit zu ermitteln. So kann ein Frequenzbereich extrahiert werden, in dem der Signal-Rausch-Abstand zwischen Umgebungs- und Störgeräuschen gegenüber dem Nutzsignal ausreichend groß ist. In diesem Bereich kann dann der zeitliche Energieverlauf berechnet werden um wiederum ein Amplituden-Zeit-Signal zu erhalten.

Bekannte Verfahren zur Auswertung von Amplituden-Zeit-Signalen, v.a. beim Laserstrahlschweißen sind Toleranzband-, Schwellwertverfahren, Grenzwerte, modellbasierende Verfahren,

wie künstliche neuronale Netze, (multivariate) Statistik sowie Mustererkennungs- und Klassifizierungsverfahren wie die Fuzzy-Klassifikation (Kuhl, 2009), (Panchenko, 2007).

# 3 NEUER ANSATZ ZUR ÜBERWACHUNG VON LASERSCHWEIßPROZESSEN MITTELS HÖHER-FREQUENTER SCHALLEMISSIONEN

## 3.1 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den dargestellten Stand der Technik und Wissenschaft bezüglich der In-Process-Überwachung beim Laserstrahlschweißen mittels Ultraschallemissionen zu erweitern. Dies betrifft die Körperschallemissionen im Bauteil sowie die Luftschallemissionen. Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Hemmnisse und Prozessfenster, welche für die Ultraschallemissionen beim Laserstrahlschweißen bekannt sind, gilt es zu überprüfen und ggf. zu erweitern. Die wissenschaftlichen Fragestellungen und Grundüberlegungen sind in Erweiterung zu den bisherigen Erfahrungen und Arbeiten (siehe Kapitel 2) folgende:

- Existieren hochfrequente Schallemissionen (Körper- und Luftschall) beim Laserstrahlschweißen?
- Korrelieren hochfrequente Schallemissionen (Körper- und Luftschall) mit dem Schweißprozess und der Entstehung von Fehlstellen?
- Können die hochfrequenten Schallemissionen (Körper- und Luftschall) zur Prozessüberwachung verwendet werden?

In Kapitel 2 wurde dargestellt, dass die akustischen Emissionen bisher nur in Bezug auf resonante Schallemissionen untersucht wurden. Da der Laserschweißprozess ein hochdynamischer Prozess ist, ist zu vermuten, dass neben diesen resonanten Schallemissionen auch breitbandige Emissionen auftreten und für eine Prozessüberwachung genutzt werden können. Die Schallursachen können zum Beispiel Kavitationen bei Verdampfungsprozessen oder auch die Interaktion der einfallenden Laserstrahlung mit dem Bauteil sein. Diese rufen Impulse hervor, welche wiederum breitbandige und damit hochfrequente Schallemissionen erzeugen können.

## 3.2 Aufbau der Arbeit

Um die im vorherigen Abschnitt genannten wissenschaftlichen Thesen zu untermauern, wird die Arbeit auf insgesamt drei Blöcke konsekutiv aufgebaut.

Im ersten Schritt soll zunächst unter Verwendung geeigneter Sensorik der Nachweise von Schallemissionen – auch im höherfrequenten Bereich - beim Laserstrahlschweißen erfolgen. Diese Vorgehensweise übersteigt den in Kapitel 2 dargestellten, bisher erreichten Stand der Technik. Dies betrifft sowohl den Körper- als auch den Luftultraschall. Mittels systematischer Schweißversuche soll eine Korrelation der Ultraschallemissionen zum Schweißprozess erarbeitet werden. Die zentralen Größen, wie Laserleistung als Stell- bzw. Regelparameter des Schweißprozesses, sowie die am Werkstück erzielte Einschweißtiefe als Qualitätsmerkmal werden in Zusammenhang gebracht. Dabei soll untersucht werden, wie sich die Ultraschallemissionen über die verschiedenen Prozessphasen in Abhängigkeit der Laserleistung verhalten. Dies betrifft das Erwärmen des Bauteils bei niedriger Laserleistung, das Abdampfen einer ggf. vorhandenen Beschichtung, die Überschreitung der Schwelle zwischen dem Wärmeleit- und dem Tiefschweißen sowie die Durchschweißung des Bauteils bei höheren Laserleistungen. Zur Validierung werden vorwiegend metallografische Quer- und Längsschliffe verwendet. Damit soll eine zuverlässige Korrelation der Schallemissionen mit dem Laserschweißprozess zur In-Process-Überwachung erreicht werden.

Im zweiten Schritt werden die erarbeiteten Korrelationen bezüglich ihrer Fähigkeit zur Fehlerdetektion überprüft. Als zentrale Fehlergröße dient dabei wiederum die Einschweißtiefe. Ein Fehler liegt vor, wenn das Bauteil nicht in seinem kompletten Querschnitt durchgeschweißt werden kann. Die grundsätzlichen Versuche bezüglich Fehlerdetektion werden an Blindschweißungen durchgeführt, wobei die Übertragung auf Überlapp- und Stumpfstöße überprüft wird. Auch ein Verfahren zur automatisierten Auswertung, z.B. mittels Toleranzbandverfahren, soll hinsichtlich seiner Aussagekraft betrachtet werden. Die Validierung der Ergebnisse erfolgt wiederum mittels metallografischer Quer- und Längsschliffe. Damit soll eine wissenschaftlich fundierte Basis für eine praxisbezogene Umsetzung dieses Ansatzes zur In-Process-Überwachung erreicht werden.

Im dritten Schritt soll ein Konzept zur Prozessüberwachung des Laserstrahlschweißens mittels Ultraschallemissionen auf Basis der erzielten Ergebnisse erarbeitet werden. Es soll betrachtet werden, welche Sensorik sich am besten eignet sowie welcher Versuchsaufbau bezüglich der praktischen Umsetzung in einer industriellen Fertigung am besten geeignet ist.

# 4 VERSUCHSAUFBAU

## 4.1 Strahlquelle und Schweißoptik

Ein diodengepumpter Scheibenlaser (TruDisk 4002, Fa. Trumpf) mit einer verfügbaren Maximalleistung von $P_{L,\ max} = 2$ kW und einem Lichtleitkabel mit einem Faserdurchmesser von 200 µm dient als Laserstrahlquelle. Als Schweißoptik wurde eine Scanneroptik mit integriertem Spiegelsystem (PFO 33, Fa. Trumpf) verwendet, welche einen Arbeitsabstand von $z_A = 533$ mm ermöglicht. Der erzielte Fokusdurchmesser auf dem Werkstück beträgt $d_f = 0{,}6$ mm. Ein in die Optik integrierter Crossjet schützt mittels einer Druckluftströmung die empfindliche Schweißoptik vor Spritzern oder anderen möglichen Beschädigungen.

## 4.2 Ultraschallsensoren

### 4.2.1 Luftschall

Zur Erfassung von Luftultraschallemissionen wurden verschiedene piezoelektrische Sensoren getestet. Dabei wurden Sensoren verwendet, welche auch bei der aktiven, zerstörungsfreien Luftultraschallprüfung am Fraunhofer IZFP eingesetzt werden. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der verschiedenen Sensoren.

Tabelle 2: Zusammenfassung der verwendeten Luftultraschallsensoren

| Nr. | Frequenz, kHz | Form |
|---|---|---|
| 1 | 60 | Eben |
| 2 | 130 | Eben |
| 3 | 200 | Eben |
| 4 | 330 | Eben |
| 5 | 500 | Eben |
| 6 | 500 | Fokussierend |
| 7 | 870 | Fokussierend |

Die in Tabelle 2 dargestellte Frequenz ist die Mittenfrequenz der ersten Dickenschwingung des Sensors. Darüber hinaus ist auch die Form des Ultraschallwandlers in der Tabelle enthalten. Diese ist entweder eben oder durch eine sphärische Krümmung der Piezokeramik fokussierend. In Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass die Verwendung von Luftultraschallsensoren, welche für Frequenzen > 300 kHz sensitiv sind, ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis zwischen den Störsignalen (Crossjet, Antriebe, etc.) und dem akustischen Schweißprozesssignal ergibt. Dies liegt daran, dass die Störgeräusche aus der Peripherie ab einer Frequenz > 200 kHz deutlich in der Amplitude abnehmen. Einen weiteren Vorteil bezüglich der Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes zwischen Stör- und Nutzsignalen hat die Verwendung von fokussierenden Luftschallsensoren bewirkt. Der so erzielbare Fokusdurchmesser liegt im Bereich von 3-4 mm. Durch genaue Ausrichtung des Luftschallsensors mittels Linienlasern auf die Schweißstelle werden somit die Störgeräusche aus der Umgebung minimiert.

Auf Basis der Voruntersuchungen wurde somit ein fokussierender Luftschallsensor mit einer Mittenfrequenz von 870 kHz für die systematischen Versuche aufgebaut und verwendet (siehe Nr. 7 in Tabelle 2).

### 4.2.2 Körperschall

Zur Erfassung der Körperschallemissionen wurden ebenfalls piezoelektrische Sensoren verwendet. Hier wurde auf kommerziell verfügbare Sensorik (QS1) der Firma QASS GmbH zurückgegriffen. Die verschiedenen Varianten der Anbringung der Sensoren sind in Abbildung 6 dargestellt.

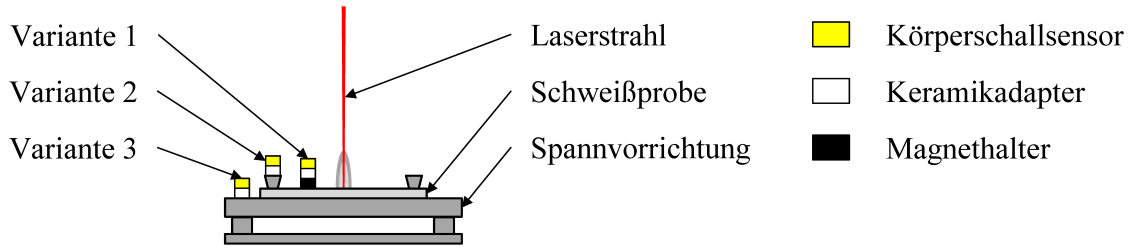



Abbildung 6: Verschiedene Varianten der Anbringung der KörperschallsensorenDer Sensor ist bis ca. 1 MHz sensitiv und kann mittels Gewindestift mit einem definierten Drehmoment an die gewünschte Stelle angeschraubt werden. In den Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass sich die Verwendung eines zusätzlichen Keramikadapters zwischen der Schweißprobe und dem Körperschallsensor empfiehlt, um den Signal-Rausch-Abstand zu verbessern. Es wurden insgesamt drei unterschiedliche Sensorpositionen untersucht:

Variante 1 Körperschallsensor + Keramikadapter + Magnethalter direkt auf der Schweißprobe

Variante 2 Körperschallsensor + Keramikadapter an der Spannvorrichtung (ohne direkten Kontakt zur Schweißprobe)

Variante 3 Körperschallsensor + Keramikadapter auf dem Spanner

Das beste Signal-Rausch-Verhältnis lieferte die Anbringung des Sensors mit Keramikadapter auf dem Spanner (Variante 3, Abbildung 6), da hier der Schalllaufweg am kürzesten ist. Der Spanner sitzt in direkter Nähe zur Schweißstelle, wodurch die Schallübertragung von der Probe auf den Spanner und vom Spanner auf den Sensor am wenigsten verlustbehaftet ist. Etwas schlechter ist die Anbringung des Körperschallsensors mit Keramikadapter an der Spannvorrichtung (Variante 2, Abbildung 6). Der Schalllaufweg ist hier länger und die Schallübertragung muss über mehrere Schnittstellen laufen. Der Schall wird zunächst von der Schweißprobe auf die Spannvorrichtung übertragen und in der Spannvorrichtung verteilt. Ein Teil des Schalls gelangt damit auch zu der Stelle, an der der Sensor montiert ist und wird von der Spannvorrichtung an den Sensor übertragen und somit detektiert. Das schlechteste Ergebnis lieferte die Anbringung des Körperschallsensors mit Keramikadapter durch einen Magnethalter direkt an die Schweißprobe (Variante 1, Abbildung 6). Der Körperschall muss zunächst von der Schweißstelle zum Sensor gelangen. Hier muss die Schallübertragung durch eine Schnittstelle mehr erfolgen, da zusätzlich ein Magnet zwischen dem Sensorelement und der Schweißprobe vorhanden ist. Dadurch ergibt sich eine erhebliche Schalldämpfung. Zudem ist die Anpresskraft zwischen Sensor und Schweißprobe bei Verwendung eines Magnethalters kleiner und schlecht zu reproduzieren im Vergleich zum Anschrauben des Sensors mit einem definierten Anzugsmoment.

Aufgrund der Tatsache, dass die Anbringung des Körperschallsensors an die Spannvorrichtung bezüglich der Durchführung von vielen Schweißversuchen am praktikabelsten ist, wird diese Art der Sensoranbringung betrachtet. Dies bietet den großen Vorteil, dass die Sensoren einmal montiert werden und über das gesamte Versuchsprogramm nicht mehr verändert werden. Auch beim Probenwechsel bleibt der Sensor an Ort und Stelle.

## 4.3 Schweißproben

### 4.3.1 Probenmaterial

In der Arbeit werden drei unterschiedliche Werkstoffe betrachtet. Der Werkstoff DC04 ist ein Kaltumformstahl und wird unbeschichtet verwendet. Die Stahlgüte DX51D ist ebenfalls ein Kaltumformstahl und wird mit Zinkbeschichtung (feuerverzinkt) geschweißt. Der Werkstoff S235JR+Z ist ein unlegierter Baustahl mit Feuerverzinkung. Die chemischen Zusammensetzungen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Probenmaterialien

| EN 10027-1 | EN 10027-2 | C % max | Si % max | Mn % max | P % max | S % max | Ti % max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DC04 | 1.0338 | 0,08 | - | 0,4 | 0,030 | 0,030 | - |
| DX51D | 1.0226 | 0,180 | 0,500 | 1,200 | 0,120 | 0,045 | 0,300 |
| S235JR+Z | 1.0037 | 0,17 | - | 1,40 | 0,035 | 0,035 | - |

### 4.3.2 Stoßarten

Tabelle 4 zeigt einen Überblick der in der Arbeit betrachteten Stoßarten. Wie bereits in Kapitel 3.2 erläutert, werden die systematischen Versuche zur Korrelation der Ultraschallemissionen zu Laserleistung bzw. erzielter Einschweißtiefe zunächst an Blindschweißungen durchgeführt. Dafür werden alle Probenmaterialien betrachtet. Um den grundsätzlichen Einfluss der Zinkbeschichtung auf die Luft- und Körperultraschallemissionen zu untersuchen, werden die Materialien DC04 und DX51D vergleichend mit einem Fügequerschnitt von t = 2 mm blind geschweißt. Um den Effekt von nicht vorhandener Durchschweißung auch bei höheren Leistungen zu betrachten, wird zusätzlich mit einem unlegierten Baustahl (S235JR+Z) mit einem Gesamtfügequerschnitt von t = 5 mm gearbeitet. Für die Stoßarten Stumpfstoß und Überlappstoß werden nur die Materialien DC04 und DX51D mit einem Gesamtfügequerschnitt von t = 2 mm berücksichtigt. Das bedeutet, dass beim Stumpfstoß Blechdicken von jeweils 2 mm und beim Überlappstoß von je 1 mm verschweißt werden.

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Stoßarten

| | | | |
|---|---|---|---|
| **DC04** (t = 2mm) | X | X | X |
| **DX51D** (t = 2mm) | X | X | X |
| **S235JR + Z** (t = 5mm) | X | - | - |

## 4.4 Mechanischer Aufbau

Abbildung 7 zeigt den schematischen mechanischen Versuchsaufbau, welcher für nahezu alle experimentellen Untersuchungen verwendet wurde.

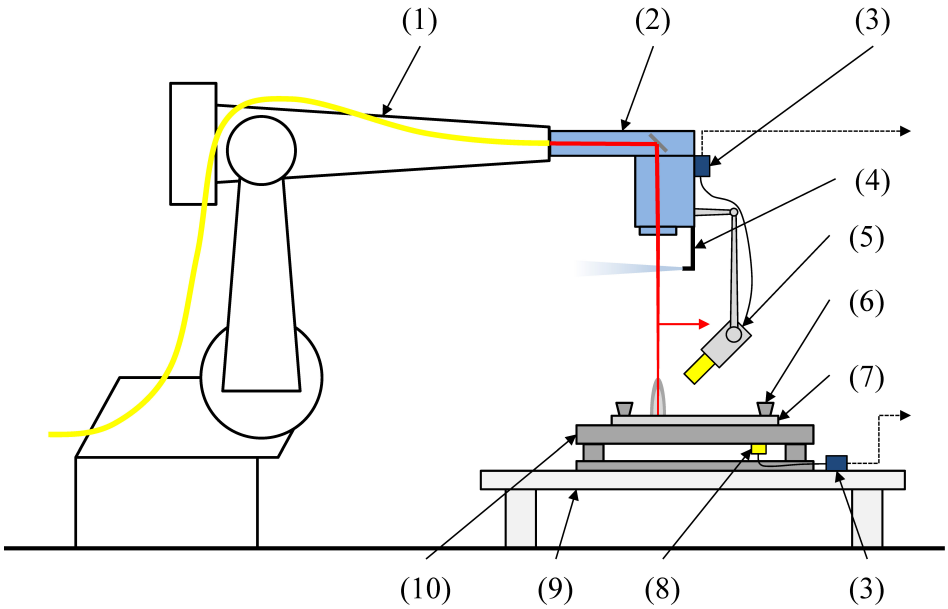



Abbildung 7: Schematischer mechanischer Versuchsaufbau

Die ankommende Laserstrahlung wird mittels Lichtleitkabel am Roboter (1) entlang zur Schweißoptik (2) geführt. Die Schweißoptik wird mittels Crossjet (4) vor Schweißspritzern geschützt. Der Luftschallsensor wird samt Goniometer und Positionierungslasern in einer Einheit (5) an den Roboter montiert und damit bei der Schweißung mitbewegt. Das Goniometer dient zur Feinpositionierung des Luftschallsensors über zwei translatorische und drei rotatorische Achsen. Der Arbeitsabstand $z_S$ des Sensors beträgt 70 mm und der optimale Anstellwinkel zur Senkrechten $\alpha$ liegt zwischen 45° und 60°. Der Luftschallsensor wird über zwei 90° versetzte Linienlaser genau auf den Laserspot der Schweißoptik ausgerichtet. Die Anbringung des Luftschallsensors erfolgt auf der Seite des Crossjets. Bezüglich der Schweißrichtung ist der Sensor vorlaufend positioniert. Die Spannvorrichtung (10) ist auf dem Schweißtisch (9) befestigt. Die Schweißprobe (7) wird mittels Spannern (6) an der Schweißvorrichtung fixiert. Die Fixierung erfolgt immer mit der gleichen Spannkraft. Der Körperschallsensor (8) wird mittels Keramikadapter an der Spannvorrichtung befestigt. Die Sensorsignale von Luft- und Körperschallsensor werden an die in der Schweißzelle befindlichen Vorverstärker (3) übergeben. Die Weiterleitung der Daten vom Vorverstärker an den außerhalb der Messzelle befindlichen Messrechner erfolgt über Ethernetkabel. Die Datenerfassung und Datenauswertung ist in Kapitel 4.5 beschrieben. Die Synchronisierung der Ultraschallemissionsmessung mit den Einrichtungen der Schweißzelle wird über die Robotersteuerung gewährleistet. Die Schallemissionsmessung wird zusammen mit der Druckluftfreigabe des Corssjets gestartet. Dies ist, je nach Versuchsreihe 0,5 s bis 2 s vor dem Start des Schweißprozesses der Fall. Die interne Zeitverzögerung, welche bei den Messdaten Berücksichtigung findet,

beträgt dabei ca. 50 ms. Die Ermittlung der tatsächlich anliegenden Laserleistung erfolgt über ein Messsystem, welches an die Schweißoptik angekoppelt ist.

Abbildung 8 zeigt die Implementierung der Luft- und Körperschallsensoren in den realen Versuchsaufbau. Der Luftschallsensor (1) wird mittels eigenen Linienlasern unter Verwendung eines Goniometers exakt auf den Fokusfleck der Schweißoptik ausgerichtet. Die Körperschallsensoren (2) sind unter Verwendung von Keramikadaptern an die Schweißvorrichtung (3) montiert. Zur Verbesserung der Schallübertragung sind die Schnittstellen vor der Montage mit Fett gefüllt worden. Die Spanner (4) werden mit definiertem Drehmoment angezogen, sodass die Anpresskraft der Schweißprobe (5) an die Vorrichtung immer identisch ist. Abbildung 8 zeigt im rechten Teil noch zusätzlich die Montage der Körperschallwandler (2) direkt an die Spanner (4). Für die systematischen Versuche wird jedoch der in Abbildung 8 (links) dargestellte Aufbau verwendet (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.2). Eine Abbildung des kompletten realen Versuchsaufbaus ist dem Anhang zu entnehmen.

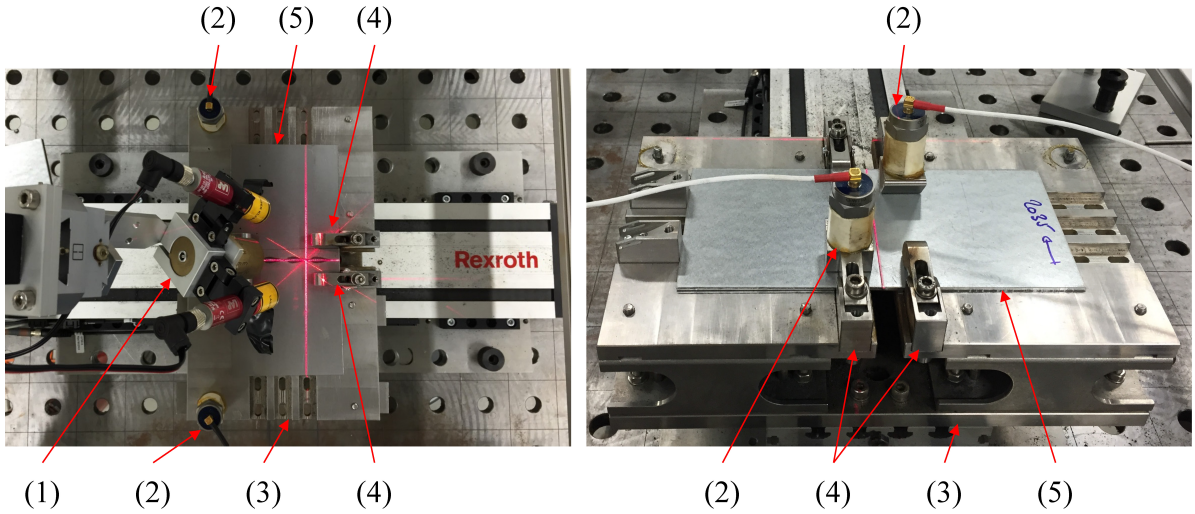



Abbildung 8: Realer Versuchsaufbau mit Implementierung der Luft- und Körperschallsensoren

## 4.5 Signalverarbeitung

### 4.5.1 Datenerfassung

Abbildung 9 zeigt die schematische Kette zur Datenerfassung. Diese ist für den Luft- und den Körperschallsensor identisch. Der ankommende Ultraschall wird von dem jeweiligen piezoelektrischen Sensor in ein analoges Spannungssignal ± 1 V (1) gewandelt.

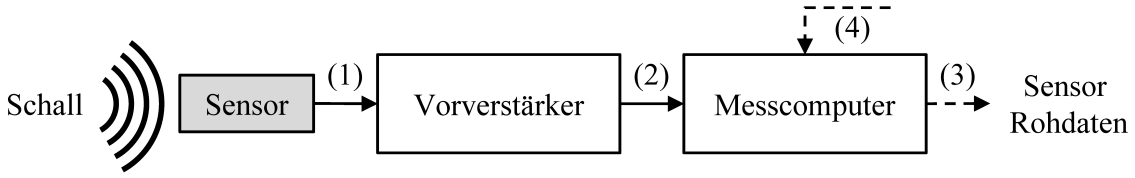



Abbildung 9: Schematische Darstellung der Datenerfassung

Der Vorverstärker verstärkt die Signale gemäß des Faktors, welcher am Messcomputer eingestellt wird. Zusätzlich wird das Spannungsniveau um einen festen Wert angehoben, sodass das an den Messcomputer übertragene Spannungssignal ausschließlich positiv ist und zwischen 0 V und 5 V (2) oszilliert. Die Datenübertragung zwischen Vorverstärker, welcher sich noch in der Schweißzelle befindet, und Messcomputer, welcher außerhalb der Messzelle steht, erfolgt über ein Ethernetkabel. Im Messcomputer erfolgt die Wandlung des analogen Sensorsignals in ein digitales Signal (3), welches als Rohdaten weiterverarbeitet wird. Die Triggerung des Systems erfolgt über ein Spannungssignal 0 – 20 V (4), welches von der Robotersteuerung zur Verfügung gestellt wird. Die interne Zeitverzögerung beträgt ca. 50 ms.

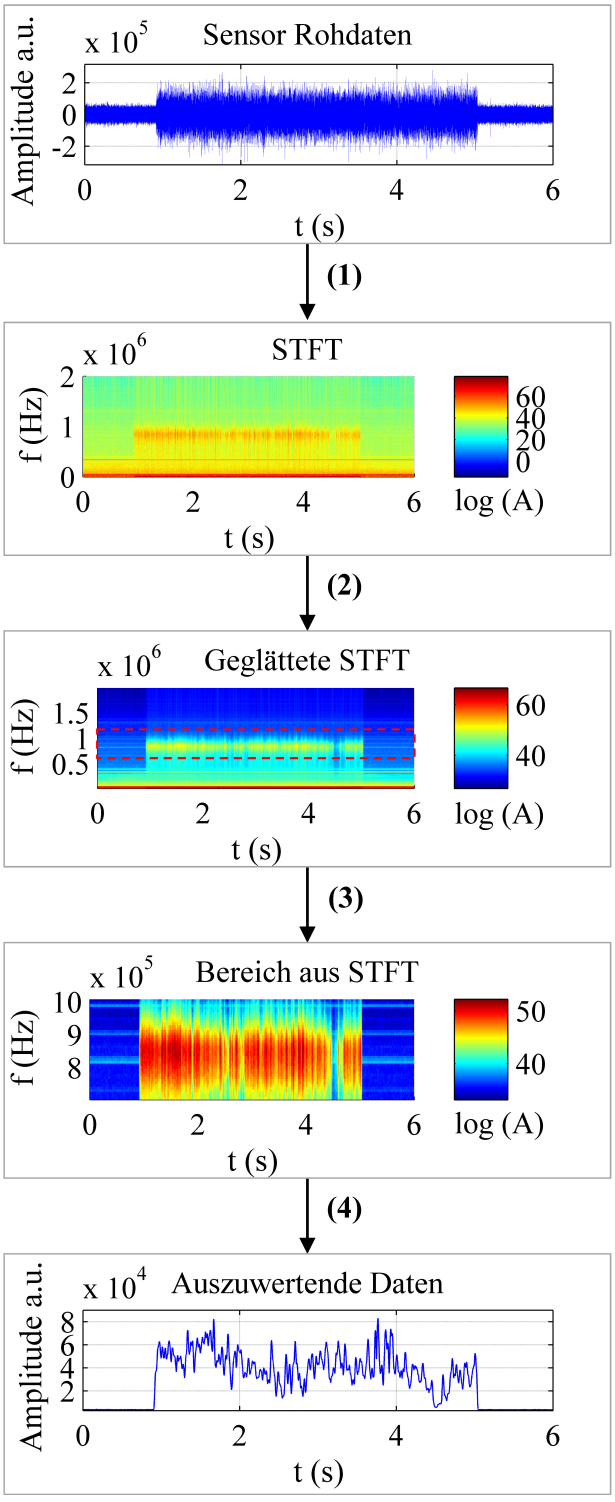
Die wichtigsten Daten der Analog-Digital-Wandlung (A/D-Wandlung) sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Dabei wird für den Luftschallkanal mit einer Samplingtiefe $d_S = 24$ bit und einer Abtastrate $f_S = 4$ MHz gearbeitet. Der Körperschallkanal wird mit $d_S = 16$ bit und $f_S = 3{,}125$ MHz abgetastet. Um zusätzlich die zeitliche Auflösung zu verbessern wird mit einem Oversampling von $O_S = 8$ gearbeitet.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Analog-Digital-Wandlung der Sensorsignale

| | **Samplingrate, $f_S$, MHz** | **Samplingtiefe, $d_S$, bit** | **Oversampling, $O_S$** |
|---|---|---|---|
| Luftultraschall | 4 | 24 | 8 |
| Körperultraschall | 3,125 | 16 | 8 |

### 4.5.2 Datenauswertung

Abbildung 10 zeigt schematisch das Vorgehen bei der Datenauswertung am Beispiel eines Luftultraschallsignals. Die Eingangsdaten sind die Rohdaten des Vorprozesses der Datenerfassung (siehe Kapitel 4.5.1). Diese Sensor-Rohdaten werden im ersten Schritt (siehe (1), Abbildung 10) einer Short-Time-Fourier Transformation (STFT) unterzogen. Dazu wird die Software MATLAB unter Verwendung der Funktion „Spectrogram“ genutzt.




**(1)**

- Frequenzauflösung, nfft = 512
- Fenstergröße, window = 512
- Überlappung, noverlap = 0

**(2)**

- Gleitender Medianfilter
- Robuste lokal gewichtete Regression

**(3)**

- Auswahl gewünschter Frequenzbereich

**(4)**

- Median über Frequenzbereich zu jedem Zeitpunkt

Abbildung 10: Schematisches Vorgehen bei der Datenauswertung am Beispiel eines Luftultraschallsignals

Neben den Rohdaten und der Samplingrate werden noch drei weitere Einstellparameter für diese Funktion gesetzt. Zum einen die Frequenzauflösung (nfft = 512), welche die Anzahl der Datenpunkte auf der Frequenzachse festlegt. Des Weiteren wird die Fenstergröße (window = 512) festgelegt, welche die Größe des Berechnungsfensters auf der zeitlichen Achse festlegt. Die Überlap-

pung (noverlap = 0) der Fenster auf der Zeitachse wird nicht verwendet. Damit kann im ersten Auswertungsschritt die Prozesslandschaft mittels STFT in Zeit-, Frequenz- und Amplitudenraum aufgespannt werden.

Im zweiten Schritt der Datenauswertung (siehe (2), Abbildung 10), soll der Signal-Rausch-Abstand durch geeignete Filterung verbessert werden. Dazu wird zunächst ein gleitender Medianfilter in zeitlicher Richtung auf die STFT-Daten angewendet. Die Fenstergröße beträgt 0,05% der Gesamtsignallänge. Im Anschluss werden die Daten wiederum in zeitlicher Richtung mittels lokal gewichteter Regression weiter geglättet. Dazu wird die MATLAB-Funktion „lowess“ verwendet.

Nun kann im nächsten Schritt (siehe (3), Abbildung 10) der gewünschte Frequenzbereich in der STFT ausgewählt werden, in dem die Auswertung erfolgen soll (siehe beispielhaft markierter Bereich). Diese Art der Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass mehr oder weniger direkt bereits optisch erkannt werden kann, in welchen Frequenzbereichen die Störsignale am besten von den Prozesssignalen unterschieden werden können. Am in Abbildung 10 dargestellten Beispiel von Luftultraschallemissionen beim Laserstrahlschweißen wird ersichtlich, dass die Störsignale, welche aus der Peripherie kommen, sich auf den niederfrequenten Bereich (< 500 kHz) konzentrieren. Da der Luftschallsensor seine Mittenfrequenz bei 870 kHz (siehe Abschnitt 4.2.1) hat, ist hier die Auswahl des Frequenzbereiches zwischen 700 kHz und 1000 kHz sinnvoll.

Im vierten Schritt der Datenauswertung (siehe (4), Abbildung 10) wird nun die dreidimensionale Prozesslandschaft im ausgewählten Bereich der STFT wieder auf ein Amplituden-Zeit-Signal zurückgeführt, um die Auswertung zu erleichtern. Dazu wird zu jedem Zeitpunkt im STFT-Signal der Median in Frequenzrichtung bestimmt. Dadurch wird pro Zeitpunkt ein Signalwert erzeugt. Das Auftragen dieser Signalwerte über die Zeit liefert ein zweidimensionales Prozesssignal mit optimiertem Signal-Rausch-Abstand im Vergleich zu den Sensor-Rohdaten.

Die oben beschriebene Art der Datenauswertung wird für jedes Prozesssignal in der vorliegenden Arbeit verwendet. Dies gilt sowohl für die Körper- als auch für die Luftultraschalldaten. Die jeweils ausgewählten Frequenzbereiche werden in den Daten angegeben.

## 4.6 Metallografische Schliffe

Für die metallografischen Quer- und Längsschliffe wurden die Proben auf unterschiedliche Arten präpariert. Die Längsschliffe wurden zunächst mit einem definierten Abstand zur Probenmitte vorgefräst. Anschließend wurden diese mittels Kalteinbettmittel eingebettet. Die Querschliffe wurden direkt mit einer Kalttrennmaschine an der gewünschten Stelle geschnitten und warm eingebettet.

Das Schleifen und Polieren erfolgte für die Quer- und Längsschliffe in mehreren Stufen entsprechend einschlägig bekannter Anleitung. Nach dem Planschleifen erfolgte in den Körnungsstufen 125 µm, 54 µm und 18 µm das Feinschleifen. Anschließend wurde mittels 3 µm Suspension poliert. Alle diese Schritte wurden auf einem Polier- und Schleifautomaten (Struers, TegraPol 21 / TegraForce-5) durchgeführt. Um die Einschweißtiefe und den Schweißnahtquerschnitt sowie den Einschweißtiefenverlauf sichtbar zu machen, wurden die Schliffe mittels Nital geätzt. Die geometrischen Vermessungen erfolgten unter einem Auflichtmikroskop (Leica, DM6000 M).

# 5 MODELLBILDUNG FÜR HÖHERFREQUENTE SCHALLEMISSIONEN IM SCHWEIßPROZESS

## 5.1 Korrelation zwischen Laserleistung und Einschweißtiefe zu den Ultraschallemissionen

### 5.1.1 Blindschweißungen mit konstanter Laserleistung

#### 5.1.1.1 Versuchsbeschreibung

Zur Korrelation der Laserleistung und der erzielten Einschweißtiefe mit den Luft- und Körperschallemissionen wurden zunächst verschiedene Versuchsreihen mit konstanter Laserleistung pro Probe durchlaufen. Die Laserleistung wurde zwischen den Versuchen in Stufen von 100 W gesteigert, wobei die Schweißgeschwindigkeit ($v_S = 20$ mm/s) für alle Proben konstant blieb. Je Leistungsstufe wurden drei Proben geschweißt. Diese Versuche wurden ausschließlich mit Blindschweißproben durchgeführt. Die verwendeten Werkstoffe sind: DC04, DX51D, S235JR+Z (siehe Kapitel 4.3). Für jede Probe wurden simultan nach der in Kapitel 4.5 beschriebenen Vorgehensweise die Luft- und die Körperschallemissionen im höherfrequenten Bereich gemessen und ausgewertet. Der ausgewertete Frequenzbereich liegt sowohl für die Luft- als auch für die Körperschallemissionen zwischen 400 kHz und 700 kHz. Dieser Bereich wurde gewählt, da sich hier der Signal-Rausch-Abstand für die Körperschallemissionen als optimal erwies. Damit die ausgewerteten Luftschallemissionen vergleichbar bleiben, wurde der gleiche Frequenzbereich gewählt, obwohl hier der Signal-Rausch Abstand nicht optimal ist. Für alle in diesem Abschnitt dargestellten Versuche liegt der Beginn des Schweißprozesses, gekennzeichnet durch das Einschalten des Lasers, bei $t = 0{,}915$ s. Das Ende des Schweißprozesses (Ausschalten des Lasers) liegt bei $t = 5{,}041$ s. Im Bereich vor dem Schweißprozess sind alle Geräte in der Peripherie (Crossjet, Antriebe, etc.) bereits eingeschaltet, so dass hier bereits alle Störsignale (Grundrauschen) vorhanden sind. Die nicht vollständig durchgeschweißten Proben wurden im Anschluss jeweils in der Mitte geschnitten und die Einschweißtiefe s metallografisch (siehe Kapitel 4.6) vermessen. Die charakteristischen Punkte, der Grenzbereich zwischen dem Wärmeleitschweißen und der Übergangszone

zum Tiefschweißen sowie die Durchschweißung des gesamten Probenquerschnittes, sind von besonderer Bedeutung für die Bewertung.

#### 5.1.1.2 Körperschallemissionen, KSE

DC04 (t = 2 mm) – Blindschweißung

Abbildung 11 (a) zeigt insgesamt vier STFT-Diagramme für vier unterschiedliche Leistungsstufen beim Laserstrahlblindschweißen der Proben aus dem Werkstoff DC04. Für die Leistungsstufe P = 500W ist im STFT-Diagramm nur Grundrauschen zu sehen, der Schweißprozess hebt sich nicht ab. Für die Leistungsstufe P = 1000 W sind im dargestellten STFT-Diagramm breitbandige Körperschallemissionen erkennbar, welche mit dem Start des Schweißprozesses auftreten und sofort nach dem Ausschalten des Lasers zurückgehen. Gleiches ist für die Leistungsstufe P = 1400 W zu beobachten, wobei die auftretenden KSE eine höhere Amplitude aufweisen. Für die höchste Leistungsstufe P = 2000 W ist lediglich beim Start des Schweißprozesses, also beim Einschweißen in ein kaltes Blech ein schmaler Signalpeak über dem dargestellten Frequenzbereich zu sehen. Im sonstigen zeitlichen Verlauf ist nur Grundrauschsignal feststellbar. Abbildung 11 (b) zeigt den Verlauf der KSE im Frequenzbereich zwischen 400 kHz und 700 kHz in Abhängigkeit der eingestrahlten Laserleistung P für Blindschweißungen am Werkstoff DC04, welcher gemäß Kapitel 4.5.2 ermittelt wurde. Aus dem Diagrammverlauf ist ersichtlich, dass für niedrige Laserleistungen im Bereich zwischen der Minimalleistung P = 100 W und der Leistungsstufe P = 900 W die KSE-Amplitude auf einem Niveau von $A_{KSE} \approx 140$ liegt. Dabei ist der Verlauf in diesem Bereich mehr oder weniger horizontal. Die Streuung der jeweils drei Wiederholungen pro Leistungsstufe ist sehr gering, so dass die Punkte im Diagramm kaum voneinander zu unterscheiden sind. Erfolgt eine Steigerung der Laserleistung auf P > 900 W ist im Diagramm ein zunächst recht steiler Anstieg der KSE-Amplitude zu beobachten. Dieser Anstieg entspricht dem metallografisch ermittelten Übergang (siehe Abschnitt 5.1.1.4) zwischen dem Wärmeleitschweißen (WLS) zum Übergangsbereich (Ü) bzw. zum bei noch höheren Leistungen dominierenden Tiefschweißen (TS). Ab einem Leistungswert von P = 1300 W bis einschließlich P = 1400 W ist ein wiederum horizontaler Verlauf auf einem Niveau von $A_{KSE} \approx 400$ festzustellen. Die Streuung der Datenwerte im Bereich zwischen P = 1000 W bis P = 1400 W ist deutlich höher als in den Randbereichen des Diagramms. Wird die Laserleistung auf Werte P ≥ 1500 W erhöht, erfolgt ein recht abrupter Abfall der KSE-Amplitude auf einen Wert von $A_{KSE} \approx 140$, welcher dem im linken Diagrammteil (Grundrauschen) entspricht. Auch hier sind wiederum die Streuungen der Datenwerte pro Leistungsstufe so gering, dass die drei Datenpunkte im Diagramm kaum zu unterscheiden sind. Die metallografische Untersuchung (siehe Abschnitt 5.1.1.4) hat gezeigt, dass ab einer Leistung von P = 1500 W eine vollständige Durchschweißung (DS) der Proben erreicht werden kann.

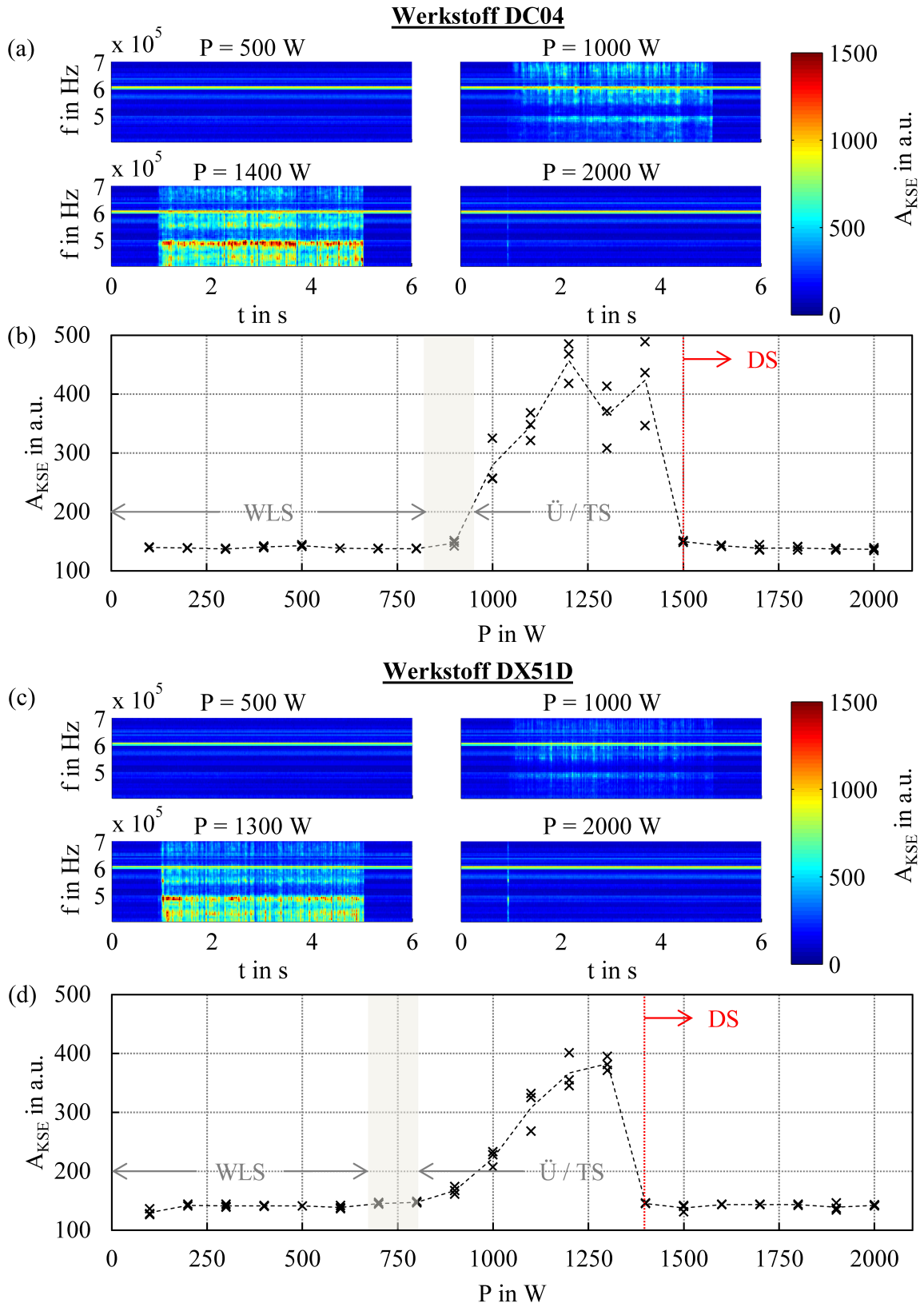



Abbildung 11: Ausgewählte STFT Diagramme für vier Leistungsstufen, Werkstoffe DC04 (a) und DX51D (c); KSE-Amplitude $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Laserleistung P für DC04 (b) und DX51D (d) für Blindschweißungen, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

DX51D (t = 2 mm) – Blindschweißung

Abbildung 11 (c) zeigt im Vergleich zu Abbildung 11 (a) beim Werkstoff DX51D ein ähnliches Verhalten der akustischen Emissionen in den ausgewählten STFT-Diagrammen. Gleiches gilt für den in Abbildung 11 (d) dargestellten Verlauf der Amplitude des KSE-Signals $A_{KSE}$ über den gesamten untersuchten Laserleistungsbereich. Bei niedrigen Laserleistungen ist das Niveau von $A_{KSE} \approx 140$ (Grundrauschen) mit dem Werkstoff DC04 vergleichbar. Dies gilt auch für die Größenordnung des maximalen Werts von $A_{KSE} \approx 380$. Der markante Signalabfall im Bereich der Durchschweißung tritt jedoch schon bei einer Laserleistung P = 1400 W auf. Das bei höheren Leistungen feststellbare Grundrauschniveau liegt bei $A_{KSE} \approx 140$, was wiederum vergleichbar mit dem Werkstoff DC04 ist.

S235JR+Z (t = 5 mm) – Blindschweißung

Abbildung 12 (a) zeigt ausgewählte STFT-Diagramme der Körperschallemissionen beim Blindschweißen des Werkstoffes S235JR+Z für insgesamt vier unterschiedliche Leistungsstufen. Für die niedrigste dargestellte Laserleistung von P = 500 W zeigt die STFT nur Grundrauschen, kein Prozesssignal, was vergleichbar mit den zuvor dargestellten Diagrammen für die Werkstoffe DC04 und DX51D ist. Auch eine Erhöhung der Leistung auf P = 1000 W bzw. P = 1300 W führt zu vergleichbaren Ergebnissen zu den beiden anderen Werkstoffen. Aufgrund der größeren Blechstärke kann keine Durchschweißung erfolgen (siehe Abschnitt 5.1.1.4), was dazu führt, dass auch bei P = 2000 W, im Gegensatz zu den vorher dargestellten Ergebnissen bei geringeren Blechquerschnitten, breitbandige Körperschallemissionen im STFT Diagramm erkennbar sind.

Abbildung 12 (b) zeigt den Verlauf der Amplituden der Körperschallemissionen bei Variation der Laserleistung. Im Bereich niedriger eingestrahlter Laserleistungen $100 \text{ W} \leq P \leq 800 \text{ W}$ liegt das Signal der Körperschallemissionen bei $A_{KSE} \approx 140$ (Grundrauschniveau) mit sehr niedriger Streuung der Wiederholungen pro Leistungsstufe. Dies ist vergleichbar mit den zuvor diskutierten Ergebnissen bei dünneren Blechquerschnitten. Steigt die Laserleistung über P = 800 W an, steigt auch die Amplitude $A_{KSE}$ des Körperschallsignals über das Grundrauschniveau an. Die Streuung der Wiederholungsproben nimmt deutlich zu. Dies korreliert mit dem metallografisch bestimmten Wechsel des Wärmeleitschweißens zum Übergangsbereich bzw. zum Tiefschweißen (siehe Abschnitt 5.1.1.4), welcher im Diagramm Abbildung 12 (b) hervorgehoben ist. Bei weiterer Erhöhung der Laserleistung steigt die Schallamplitude bis zu einem Leistungswert von P = 1300 W weiter an. Der Verlauf wird bei weiterer Erhöhung der Laserleistung flacher und verläuft im Bereich hoher Laserleistungen $P \geq 1500 \text{ W}$ annähernd horizontal. Eine Ausnahme dabei ist bei P = 1700 W zu finden, hier liegen die Körperschallamplituden mit $A_{KSE} \approx 400$ im Vergleich

zu den benachbarten Datenpunkten auf einem deutlich höheren Niveau. Dies unterscheidet diese Versuchsreihe von den zuvor dargestellten beiden Reihen, da eine nicht vorhandene Durchschweißung zu einem Körperschallsignal auf einem mehr oder weniger konstant hohen Niveau führt. Die abnehmende Streuung der Wiederholungsproben der hohen Leistungsstufen könnte auf einen eingeschwungenen, stabil verlaufenden Prozess hindeuten.

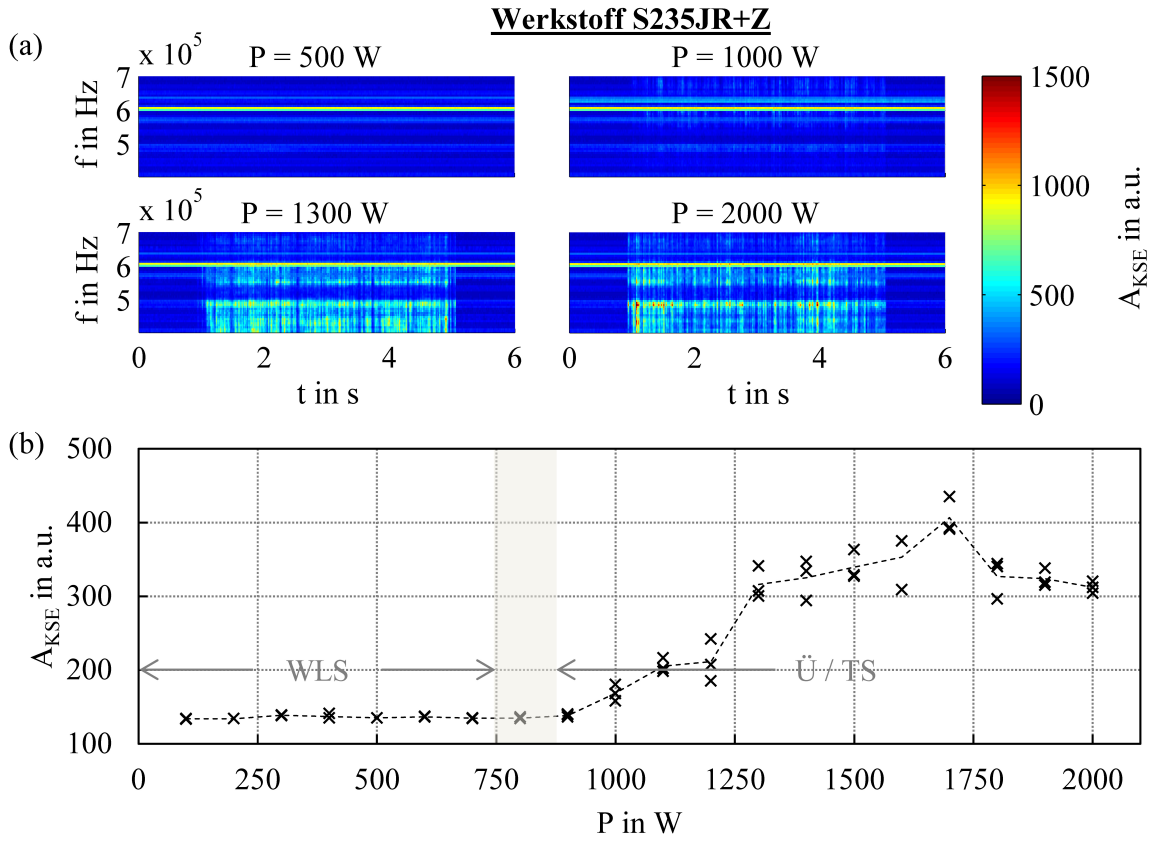



Abbildung 12: Ausgewählte STFT-Diagramme für vier Leistungsstufen (a); KSE Amplitude $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Laserleistung P (b) für Blindschweißungen; Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Werkstoff S235JR+Z

#### 5.1.1.3 Luftschallemissionen, LSE

DC04 (t = 2 mm) – Blindschweißung

Abbildung 13 (a) zeigt für die durchgeführten Blindschweißungen am Werkstoff DC04 vier beispielhafte STFT-Diagramme der Luftschallsignale im Frequenzbereich zwischen 400 kHz und 700 kHz. Für die geringste Leistungsstufe ist lediglich Grundrauschen der Umgebungseinrichtungen zu sehen. Wird die Leistung auf P = 700 W erhöht, so zeigt die STFT der Luftschalldaten breitbandige Schallemissionen im gesamten betrachteten Frequenzbereich, lokalisiert auf die gesamte zeitliche Ausdehnung des Schweißprozesses. Bei einer höheren Laserleistung von P = 1400 W zeigt die STFT der Luftschallsignale einen ähnlichen Verlauf wie bei P = 700 W.

Wird die Leistung des Lasers noch weiter auf P = 2000 W angehoben, so sind im STFT-Diagramm nur noch sehr schwach ausgeprägte Luftschallemissionen erkennbar.

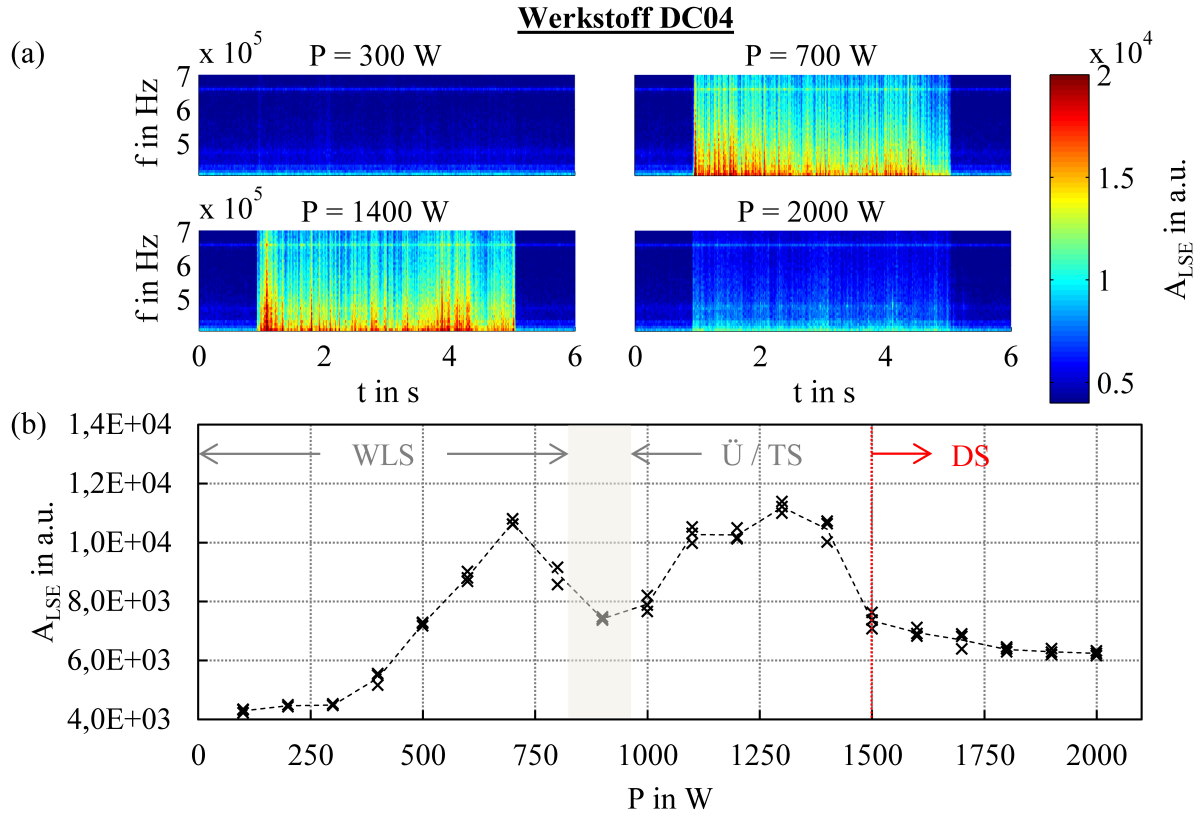



Abbildung 13: Ausgewählte STFT-Diagramme für vier Leistungsstufen (a); LSE Amplitude $A_{LSE}$ in Abhängigkeit der Laserleistung P (b) für Blindschweißungen; Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Werkstoff DC04

Werden die gesamten Luftschallemissionsdaten entsprechend der zuvor vorgestellten Vorgehensweise ausgewertet, so ergibt sich der in Abbildung 13 (b) dargestellte Verlauf der Amplitude der Luftschallemission $A_{LSE}$ in Abhängigkeit der Laserleistung P. Im sehr niedrigen Laserleistungsbereich von 100 W ≤ P ≤ 300 W stellt sich ein nahezu horizontaler Verlauf auf einem Niveau von $A_{LSE} \approx 4500$ ein. Dieser Bereich ist dominiert von dem Grundrauschen durch die Peripheriegeräte. Bei weiterer Steigerung der eingestrahlten Laserleistung steigen die Luftschallamplituden signifikant auf einen lokalen Maximalwert von $A_{LSE} \approx 10500$ bei P = 700 W an. Eine weitere Steigerung der Laserleistung führt zu abnehmender Schallamplitude des Luftschallsensors auf einen lokalen Minimalwert von $A_{LSE} \approx 7400$ bei P = 900 W. Hier liegt der metallografisch ermittelte und im Diagramm eingezeichnete Wechsel vom Wärmeleitschweißen (WL) zum Übergangsbereich (Ü) bzw. bei höheren Leistungen zum Tiefschweißen (TS) (siehe Abschnitt 5.1.1.4). Eine weitere Erhöhung der eingestrahlten Laserleistung führt wiederum zum Anstieg der Luftschallamplitude im betrachteten Frequenzbereich auf ein ähnliches Amplitudenniveau wie zuvor im Bereich des loka-

len Maximums. Ab P = 1100 W bis einschließlich P = 1400 W stellt sich ein mehr oder weniger horizontaler Signalverlauf auf einem Amplitudenniveau von $A_{LSE} \approx 10100$ ein. Wird die Laserleistung über 1400 W erhöht, so fällt die Luftschallamplitude schlagartig und deutlich auf $A_{LSE} \approx 7400$ bei P = 1500 W ab. Dies korreliert mit der im Querschliff ermittelten Schwelle zum Durchschweißen (DS). Ab einer Leistung von $P \geq 1500$ W können die betrachteten Proben vollständig durchgeschweißt werden (siehe Abschnitt 5.1.1.4). Im Laserleistungsbereich zwischen $1500 \text{ W} \leq P \leq 2000$ W nimmt die Luftschallamplitude mit Steigerung der Leistung leicht ab bis sich ein mehr oder weniger horizontaler Verlauf auf einem Amplitudenniveau von $A_{LSE} \approx 6400$ einstellt. Die Streuung der jeweils drei Wiederholungsmessungen pro Leistungsstufe ist über den gesamten betrachteten Leistungsbereich ähnlich.

DX51D (t = 2 mm) – Blindschweißung

Die STFT-Diagramme der Luftschallsignale von vier ausgewählten Proben des Werkstoffes DX51D (je unterschiedliche Laserleistungsstufen) sind in Abbildung 14 (a) dargestellt. Für die Leistungsstufe P = 300 W sind starke breitbandige Schallemissionen erkennbar. Die höchste Schallamplitude ist jedoch bei höheren Frequenzen (f = 700 kHz) zu finden. Wird die Laserleistung auf P = 800 W erhöht, so zeigt die STFT des Luftultraschallsignals im betrachteten Frequenzbereich breitbandige Emissionen mit deutlich niedrigerer Amplitude. Auch eine Konzentration der maximalen Amplituden in einem gewissen Frequenzbereich ist nicht mehr zu beobachten. Bei weiterer Steigerung der Leistung auf P = 1300 W, steigen wiederum die Schallamplituden im Luftschallsignal leicht an. Eine Konzentration der Maximalamplituden im niedrigeren Frequenzbereich (400 kHz) kann erkannt werden, wobei der Charakter des Schallsignals immer noch breitbandig ist. Eine Erhöhung auf P = 2000 W führt zu einem deutlichen Absinken der Schallamplituden über den gesamten Frequenzbereich. Abbildung 14 (b) zeigt den Verlauf der extrahierten Luftschallamplitude $A_{LSE}$ aus den STFT-Diagrammen für die komplette Versuchsreihe mit jeweils drei Wiederholungen je Leistungsstufe beim Blindschweißen des zinkbeschichteten Werkstoffes DX51D. Es deutlich erkennbar, dass bereits ab sehr niedrigen Laserleistungen P > 100 W die Luftschallamplitude $A_{LSE}$ stark auf ein lokales Maximum von $A_{LSE} \approx 22300$ bei P = 300 W ansteigt. Bei weiterer Erhöhung fällt die Schallamplitude wiederum ab, bis bei P = 800 W ein lokales Minimum auf einem Niveau von $A_{LSE} \approx 10300$ erreicht wird. Hier hat die metallografische Untersuchung (siehe Abschnitt 5.1.1.4) gezeigt, dass das Wärmeleitschweißen (WLS) zum Übergangsbereich (Ü) bzw. bei noch höheren Laserleistungen zum Tiefschweißen (TS) übergeht. Im Bereich 800 W< P < 1400 W ist ein eher horizontaler Verlauf der Luftschallamplitude auf einem mittleren Niveau ($A_{LSE} = 12000$) zu beobachten. Bei Erhöhung der Laserleistung auf $P \geq 1400$ W fällt die Luftschallamplitude im Punkt P = 1400 W nochmals deutlich auf $A_{LSE} \approx 8700$ ab.

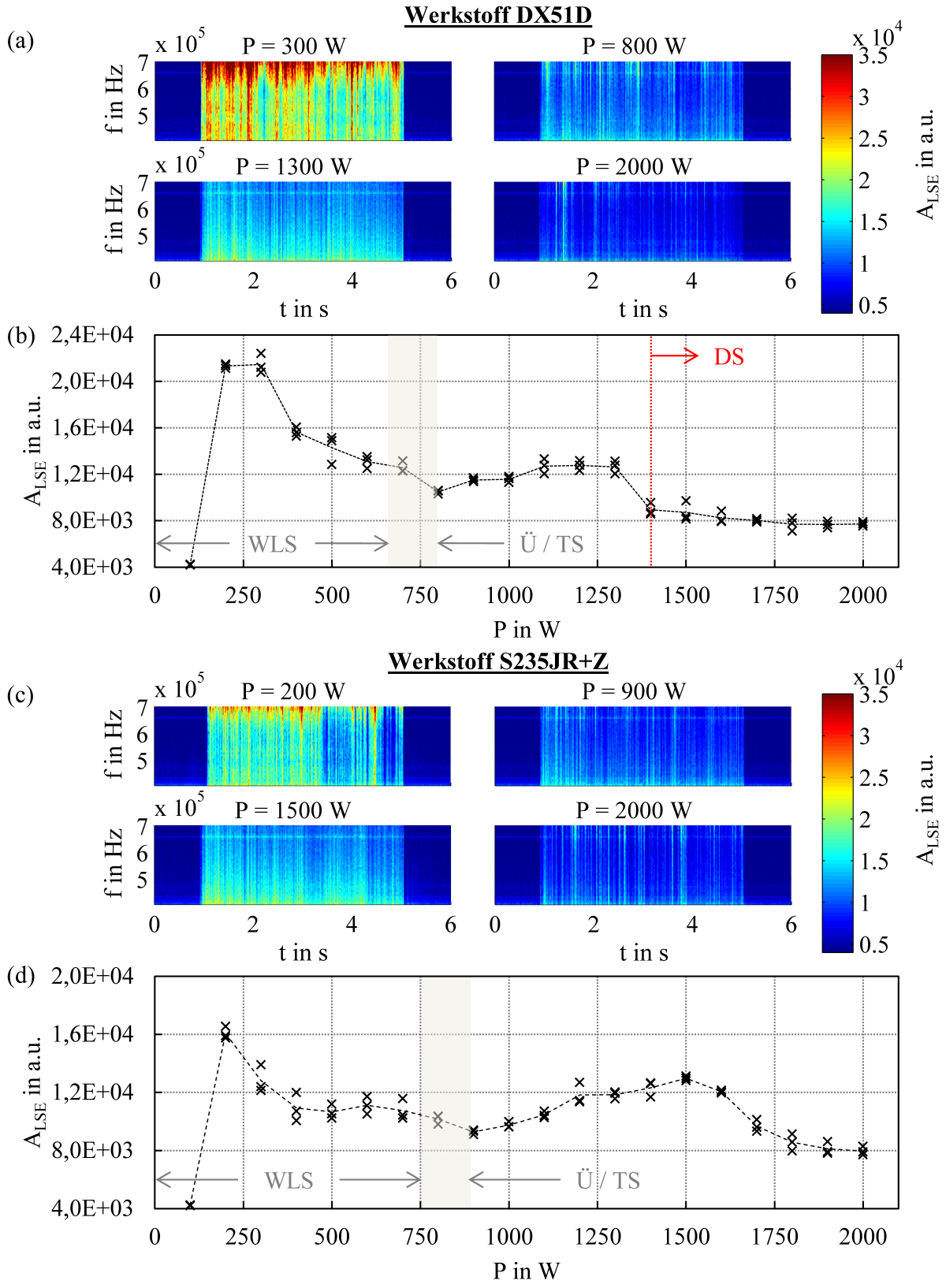



Abbildung 14: Ausgewählte STFT-Diagramme für vier Leistungsstufen, Werkstoffe DX51D (a) und S235JR+Z (c); LSE Amplitude $A_{LSE}$ in Abhängigkeit der Laserleistung P für DX51D (b) und S235JR+Z (d) für Blindschweißungen, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

Dies fällt mit dem Durchschweißen (DS) des Probenquerschnittes (siehe Abschnitt 5.1.1.4) zusammen, welches im Diagramm markiert ist. Bei weiterer Erhöhung der Laserleistung ist eine leichte Abnahme der Amplitude mit steigender Leistung zu beobachten, bis sich ab $P \geq 1700$ W ein eher horizontaler Verlauf auf einem Niveau von $A_{LSE} \approx 7900$ einstellt. Die Streuung der jeweils drei Wiederholungsproben einer Leistungsstufe unterscheidet sich nur wenig über den betrachteten Bereich der Laserleistung.

S235JR+Z (t = 5 mm) – Blindschweißung

Abbildung 14 (c) zeigt die STFT-Diagramme von vier ausgewählten Proben mit unterschiedlichen Laserleistungen der Versuchsreihe beim Blindschweißen des zinkbeschichteten Werkstoffes S235JR+Z. Im Vergleich zu den STFT-Diagrammen des Werkstoffes DX51D (siehe Abbildung 14 (a)) ist lediglich ein Unterschied in den absoluten Schallamplituden ersichtlich. Qualitativ ergibt sich ein vergleichbares Bild. Abbildung 14 (d) zeigt den Verlauf der in der Versuchsreihe betrachteten Luftultraschallemissionen über den betrachteten Laserleistungsbereich für den Werkstoff S235JR+Z mit größerem Probenquerschnitt von t = 5 mm. Im niedrigen Laserleistungsbereich bis hin zur Übergangszone WL zu Ü/TS mit lokalem Minimum der Schallamplitude ergibt sich ein vergleichbarer Verlauf zum Werkstoff DX51D. Bei P = 1500 W liegt mit $A_{LSE} \approx 13000$ ein lokales Maximum. Wird die Laserleistung über diesen Wert hinaus weiter erhöht, so fällt das Schallamplitudensignal kontinuierlich ab, bis es in einen eher horizontalen Verlauf auf einem Niveau von $A_{LSE} \approx 8000$ im hohen Laserleistungsbereich übergeht. Aufgrund der hohen Blechstärke kann keine Durschweißung erfolgen. Die Streuung der drei Wiederholungsproben untereinander bei einer Laserleistungsstufe ist über den betrachteten Laserleistungsbereich relativ konstant.

#### 5.1.1.4 Schweißergebnis, Metallografie

DC04 (t = 2 mm) – Blindschweißung

Abbildung 15 (a) zeigt den Verlauf der Einschweißtiefe für den gesamten betrachteten Laserleistungsbereich aller Schweißproben. Die entsprechenden Bilder je einer Probe pro Leistungsstufe sind im Anhang dargestellt. Im niedrigen Laserleistungsbereich $100 \text{ W} \leq P \leq 900$ W steigt die Einschweißtiefe mit zunehmender Laserleistung relativ flach an. Hier dominiert das Wärmeleitschweißen (WLS). Bei weiterer Leistungssteigerung des Lasers auf $P \geq 900$ W knickt die Kurve nach oben ab, die Einschweißtiefe steigt steiler mit zunehmender Laserleistung an. Dies kennzeichnet den Übergangsbereich (Ü) bzw. das Tiefschweißen (TS). Im Bereich $1300 \text{ W} \leq P \leq 1500$ W ist nochmals eine Zunahme der Steigung der s(P)-Kurve sowie eine deutlich höhere Streuung der je drei Wiederholungswerte einer Laserleistungsstufe festzustellen, bis

schließlich bei P = 1500 W die vollständige Durchschweißung (DS) des Probenquerschnittes erfolgt.

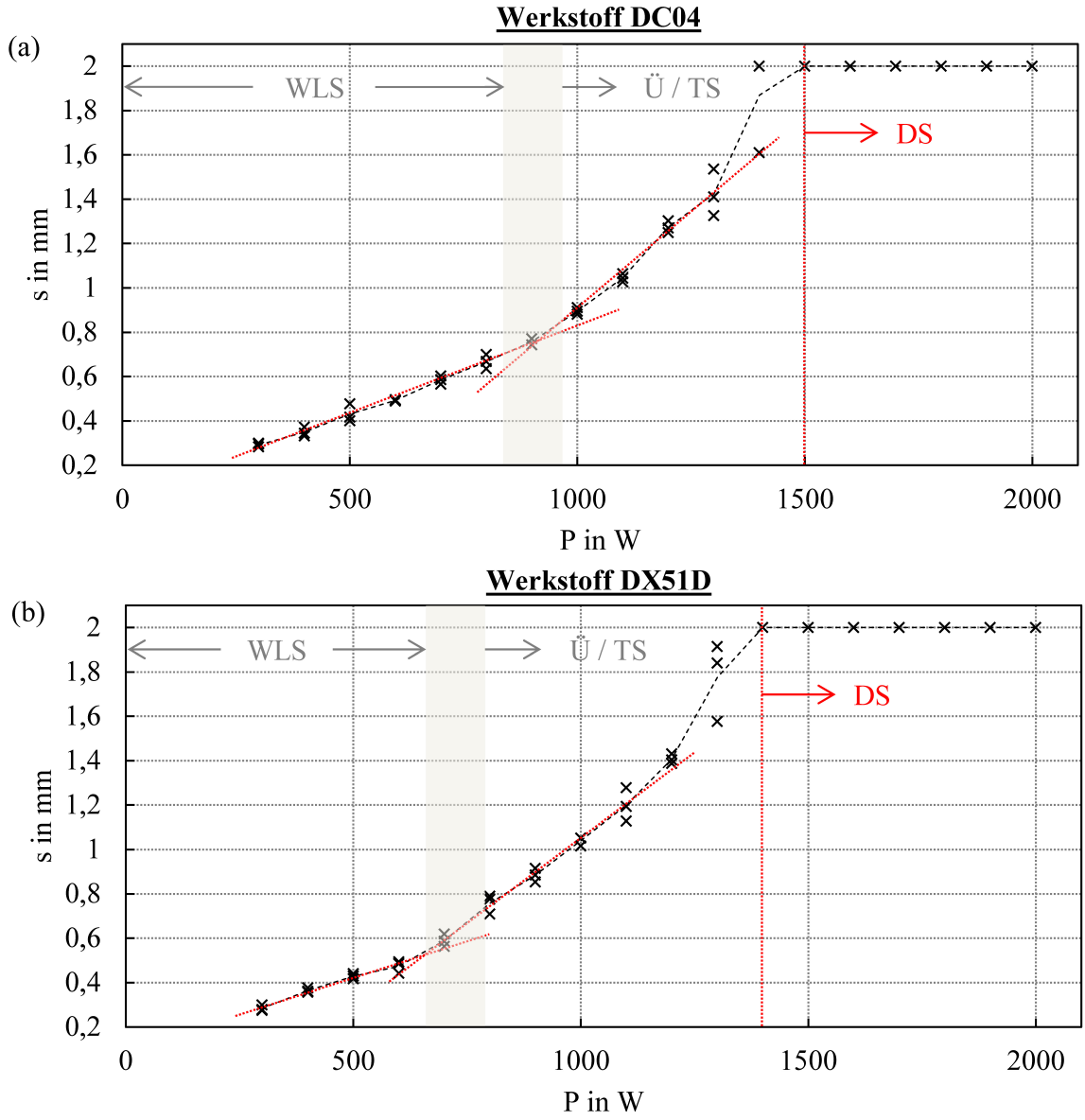



Abbildung 15: Gemessene Einschweißtiefe s im Querschliff in Abhängigkeit der eingestrahlten Laserleistung P, Werkstoffe DC04 (a) DX51D (b) bei konstanter Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

DX51D (t = 2 mm) – Blindschweißung

Abbildung 15 (b) zeigt den Verlauf der Einschweißtiefe s in Abhängigkeit der Laserleistung für Blindschweißungen am Werkstoff DX51D. Der Verlauf ist vergleichbar mit dem Werkstoff DC04, welcher in Abbildung 15 (a) dargestellt ist. Lediglich der Übergangsbereich zwischen WLS und Ü / TS sowie die Grenzleistung zum Durchschweißen (DS) sind in Richtung niedrigerer

Leistungen verschoben. Die entsprechenden Bilder der Querschliffe von einer Probe je Laserleistungsstufe sind im Anhang abgebildet.

S235JR+Z (t = 5 mm) – Blindschweißung

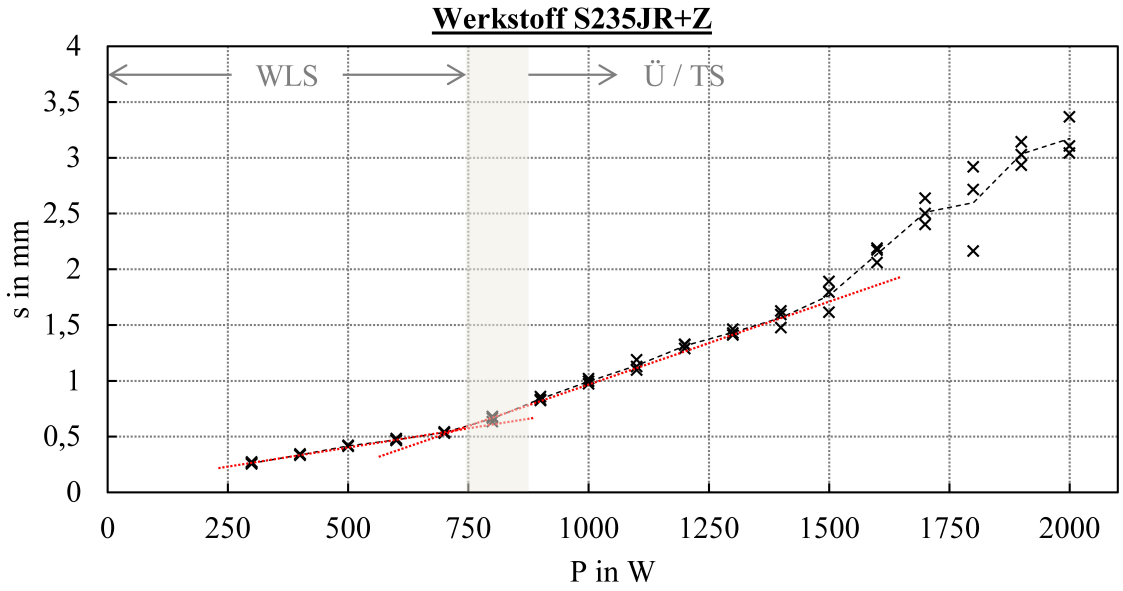



Abbildung 16: Gemessene Einschweißtiefe s im Querschliff in Abhängigkeit der eingestrahlten Laserleistung P, Werkstoff S235JR+Z bei konstanter Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

Abbildung 16 zeigt den Verlauf der Einschweißtiefe s bei Blindschweißungen am Werkstoff S235JR+Z in Abhängigkeit der eingestrahlten Laserleistung P. Die zugehörigen Querschliffe für eine Probe je Leistungsstufe sind im Anhang abgebildet. Im Bereich niedriger Laserleistungen ist ersichtlich, dass die Einschweißtiefe s nur langsam mit steigender Laserleistung P zunimmt. Die Steigung der linearen Regression der Datenpunkte im Bereich $100\ W \leq P \leq 700\ W$ ist relativ flach. In diesem Bereich dominiert das Wärmeleitschweißen (WLS). Wird die Laserleistung auf Werte von $P > 700\ W$ erhöht, so wächst die Einschweißtiefe mit zunehmender Laserleistung schneller an, was an der zunehmenden Steigung der Regressionsgeraden der Datenpunkte im Bereich $800\ W \leq P \leq 1500\ W$ zu erkennen ist. Hier beginnt der Übergangsbereich (Ü) bzw. das Tiefenschweißen (TS). Bei noch höheren Laserleistungen im Bereich $1500\ W < P \leq 2000\ W$ steigen die Einschweißtiefenwerte nochmals stärker mit zunehmender Laserleistung an. Die Streuung der drei Wiederholungsmessungen je Laserleistungsstufe nimmt deutlich zu. Eine vollständige Durchschweißung des Probenquerschnittes von t = 5 mm kann nicht erreicht werden.

#### 5.1.1.5 Zwischenfazit

In den vorherigen Abschnitten konnte gezeigt werden, dass hochfrequente Körper- und Luftschallemissionen beim Laserstrahlschweißen nachgewiesen werden konnten. Diese korrelieren mit charakteristischen Prozessmerkmalen wie der Schwelle zwischen dem Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich bzw. dem Tiefschweißen sowie der Durchschweißung. Die Schallursachen der Körper- und Luftschallemissionen scheinen sich teilweise zu unterscheiden. Vor allem die Zinkbeschichtung hat einen Einfluss auf die Luftschallemissionen, wohingegen die Körperschallemissionen vorwiegend auf den Bereich des Tiefschweißens vor dem Erreichen der Durchschweißung konzentriert sind. Diese Vermutungen werden im Folgenden verifiziert.

### 5.1.2 Blindschweißungen mit modulierter Laserleistung

#### 5.1.2.1 Versuchsbeschreibung

Zur Verifikation der im vorherigen Kapitel dargestellten Ergebnisse beim Schweißen mit Konstantleistung auf einer Probe, werden in diesem Kapitel Versuche mit modulierter Laserleistung dargestellt. Es wird eine sägezahnförmige Laserleistungskurve durchfahren, wobei die Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s konstant gehalten wird. Um auch eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, werden alle Proben mit Leistungsmodulation insgesamt fünf Mal mit gleichen Parametern wiederholt. Es werden Blindschweißungen an den Werkstoffen DX51D und DC04 (siehe Kapitel 4.3) in dieser Versuchsreihe betrachtet. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt nach der in Kapitel 4.5 beschriebenen Vorgehensweise für den Frequenzbereich 400 kHz bis 700 kHz.

#### 5.1.2.2 Körperschallemissionen

<u>DC04 (t = 2 mm) – Blindschweißung</u>

Abbildung 17 (a) zeigt den Verlauf der Laserleistung P über der Zeit t, welcher die Grundlage dieses Versuches beim Blindschweißen am Werkstoff DC04 (Probe 1702) bildet. Es wird ein Sägezahnprofil durchlaufen im Leistungsbereich zwischen P = 80 W und P = 2000 W. Insgesamt wird der komplette Leistungsbereich drei Mal durchfahren. Der Prozessstart liegt bei t = 2,19 s, das Prozessende bei t = 6,20 s.

Das STFT-Diagramm des Körperschallsignals (Abbildung 17 (b)) lässt in vier Bereichen breitbandige Schallemissionen erkennen. Wird gemäß der anfangs erläuterten Vorgehensweise das Amplituden-Zeit-Diagramm (Abbildung 17 (c)) aus den STFT-Daten erzeugt, so ergeben sich insgesamt fünf ausgeprägte lokale Maxima. Für die Erläuterungen werden jedoch nur die Bereiche betrachtet, in denen die komplette Laserleistungsspanne zwischen 80 W und 2000 W durchfahren wird. In diesen Bereichen (siehe Markierungen 1, 2, 3 in Abbildung 17) wird ein Körper-

schallsignal erzeugt. Die Markierungen im Diagramm beziehen sich auf die Bereiche, in denen Körperschallsignale gemessen werden können. Beim Übertrag dieser Bereiche in die Laserleistungskurve fällt auf, dass nicht das Durchfahren des gesamten Laserleistungsbereichs Schall im Bauteil erzeugt. Um dies zu verdeutlichen, wurden die Körperschallamplituden für die drei markierten Bereiche über der eingestellten Laserleistung dargestellt (siehe Abbildung 18).

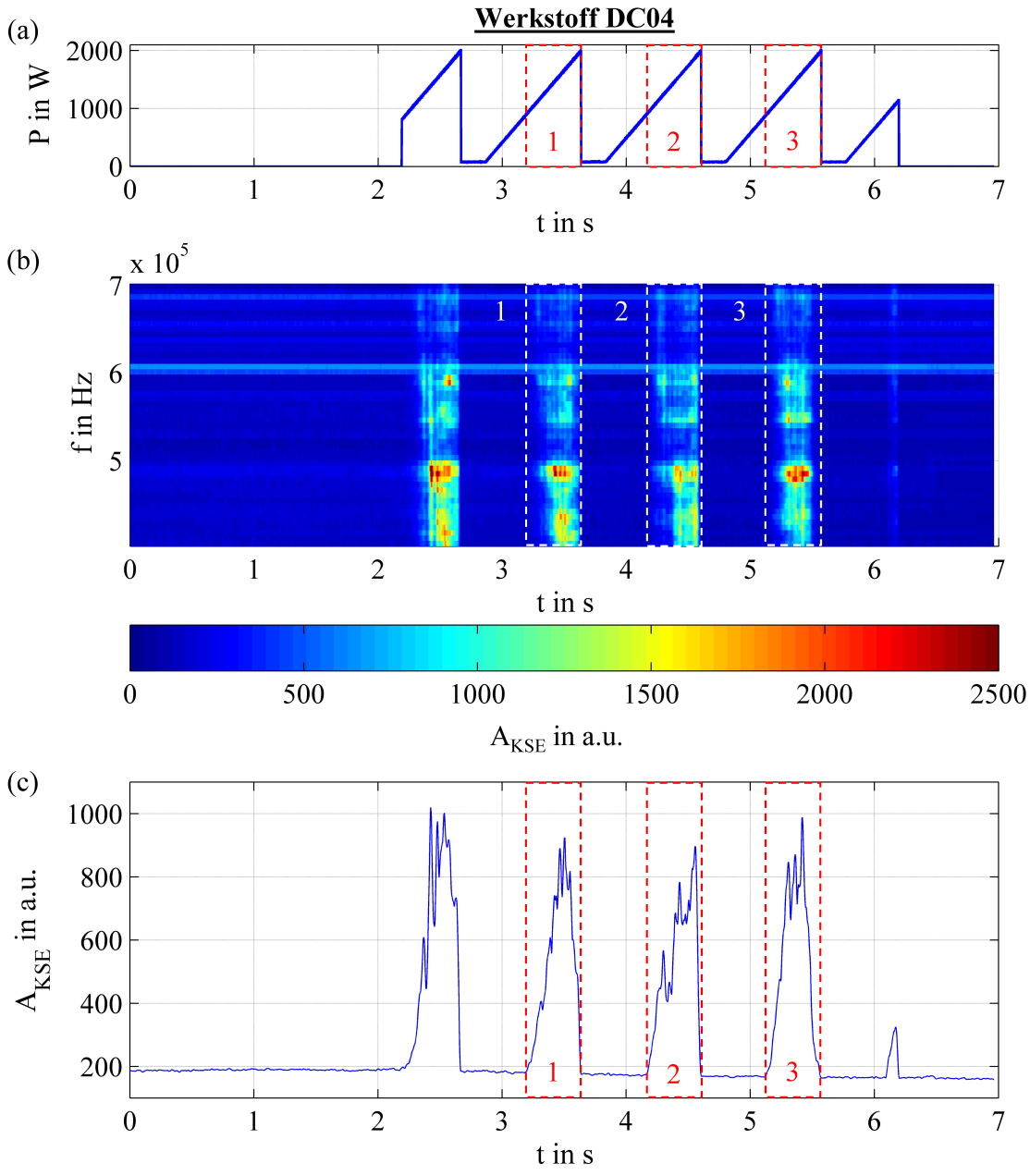



Abbildung 17: Laserleistung P über der Zeit t (a); STFT Diagramm des KSE-Signals (b); KSE-Amplitude $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (c) für Blindschweißungen am Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1702

In Abbildung 18 ist ersichtlich, dass das Grundrauschen auf einem Niveau von $A_{KSE} \approx 190$ liegt. Steigt die Leistung über einen Wert von P = 900 W für alle drei betrachteten Bereiche (1-3) an, so

steigt das Körperschallsignal über das Grundrauschniveau an. Hier liegt auch die metallografisch ermittelte Schwelle zwischen dem Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich bzw. dem Tiefschweißen (siehe Kapitel 5.1.2.4), welche im Diagramm markiert ist.

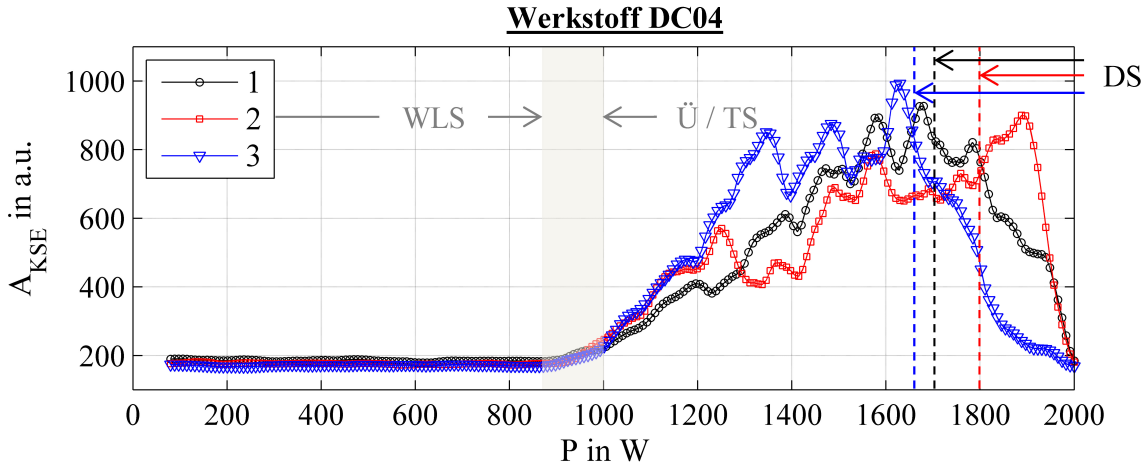



Abbildung 18: Körperschallamplitude $A_{KSE}$ über der Laserleistung P für die Intervalle 1, 2 und 3 aus Abbildung 17

Für den Bereich 1 ist ersichtlich, dass das Körperschallsignal kontinuierlich bis auf einen Maximalwert von $A_{KSE} \approx 950$ bei $P = 1680$ W ansteigt und bei höheren Leistungen wieder bis auf Grundrauschniveau abfällt. Der metallografische Längsschliff (siehe Kapitel 5.1.2.4) hat gezeigt, dass ab einer Laserleistung von $P > 1700$W die Probe durchgeschweißt werden kann. Der Signalabfall und die Durchschweißung liegen also im gleichen Leistungsbereich. Ein ähnlicher Verlauf ist für den Bereich 2 für niedrige Laserleistungen festzustellen. Im Unterschied zu Bereich 1 fällt das Körperschallsignal erst im sehr hohen Laserleistungsbereich $P > 1900$ W ab. Die metallografischen Untersuchungen haben eine Durchschweißung im Bereich 2 bei Laserleistungen von $P > 1800$ W gezeigt. Hier tritt also erst nach dem Durchschweißen ein Signalabfall der Körperschallamplitude auf. Der Verlauf des Bereiches 3 ist bei niedrigeren Laserleistungen auch ähnlich den Bereichen 1 und 2. Bei höheren Laserleistungen ist jedoch festzustellen, dass das Signal im Bereich 3 bereits bei niedrigeren Laserleistungen ($P > 1620$ W) abfällt und sich im Bereich $P > 1900$ W auf Grundrauschniveau einpendelt. Der Längsschliff der Probe im Bereich 3 macht deutlich, dass eine Durchschweißung ab einer Laserleistung von $P > 1650$ W erfolgen kann. Dies korreliert mit dem Abfall der Körperschallamplitude.

Um die Reproduzierbarkeit der Körperschallergebnisse bei dieser Art der Leistungsmodulation zu überprüfen, wurden insgesamt fünf Proben mit exakt gleicher Modulation der Laserleistung geschweißt und ausgewertet. Der zeitliche Verlauf von $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Laserleistung P ist in Abbildung 19 dargestellt. Hier ist ersichtlich, dass für alle fünf Proben der qualitative Verlauf

der Körperschallamplitude $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t gleich ist. Die Zeitpunkte für Signalanstieg, lokales Maximum und Signalabfall variieren leicht. Dies betrifft auch den absoluten Wert der Amplitude. Die Ursache der Variation liegt vermutlich im jeweils leicht unterschiedlichen Prozessverlauf, welcher sich ja bereits auf einer Probe bei mehrmaligem Durchfahren des gleichen Leistungsverlaufes zeigt (siehe Abbildung 17(c)).

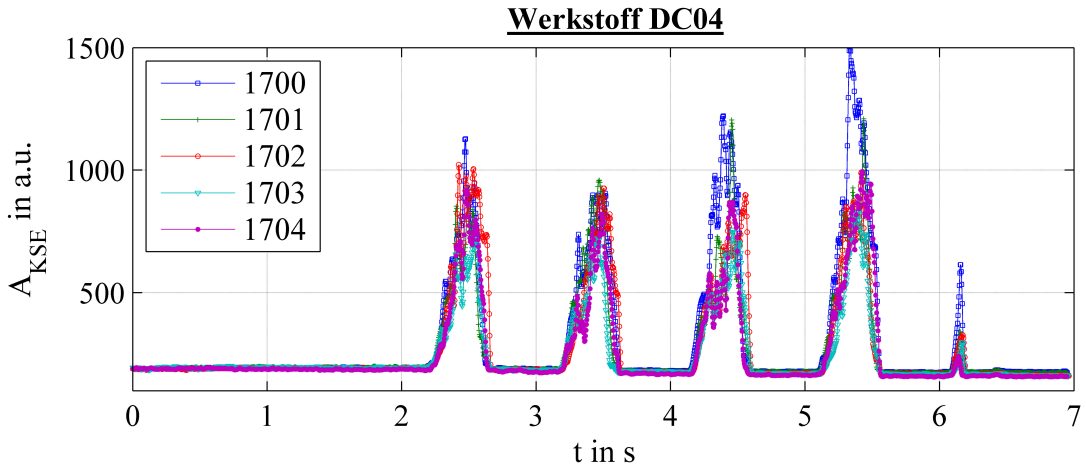



Abbildung 19: KSE-Amplitude $A_{KSE}$ für fünf Wiederholungsproben in Abhängigkeit der Zeit t für Blindschweißungen am Werkstoff DC04 mit in Abbildung 17 (a) dargestellter Laserleistungsmodulation, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Proben 1700 - 1704

DX51D (t = 2 mm) – Blindschweißung

Der gleiche Versuch, wie zuvor am Werkstoff DC04 beschrieben, wurde auch mit dem zinkbeschichteten Werkstoff DX51D durchgeführt. Wie auch schon bei den Versuchsreihen mit konstanter Laserleistung, zeigt der Werkstoff DX51D ein ähnliches Verhalten im Vergleich zum DC04, auch bei Versuchen mit modulierter Laserleistung. Die verwendete Leistungsmodulation ist, wie in Abbildung 20 (a) ersichtlich, identisch mit dem zuvor beschriebenen Versuch. Die entstehenden Körperschallsignale zeigen auch im STFT-Diagramm (siehe Abbildung 20 (b)) ähnliche Signaturen. Der Unterschied liegt in der zeitlichen Ausdehnung der akustischen Signale und dementsprechend auch den zugehörigen Laserleistungen auf die sie sich beziehen. In Abbildung 20 (b) wird deutlich, dass die hier betrachteten Bereiche 1, 2 und 3 zeitlich deutlich kürzer sind im Vergleich zum Werkstoff DC04. Das bedeutet, dass der zugehörige Laserleistungsbereich zwischen 950 W und 1750 W liegt.

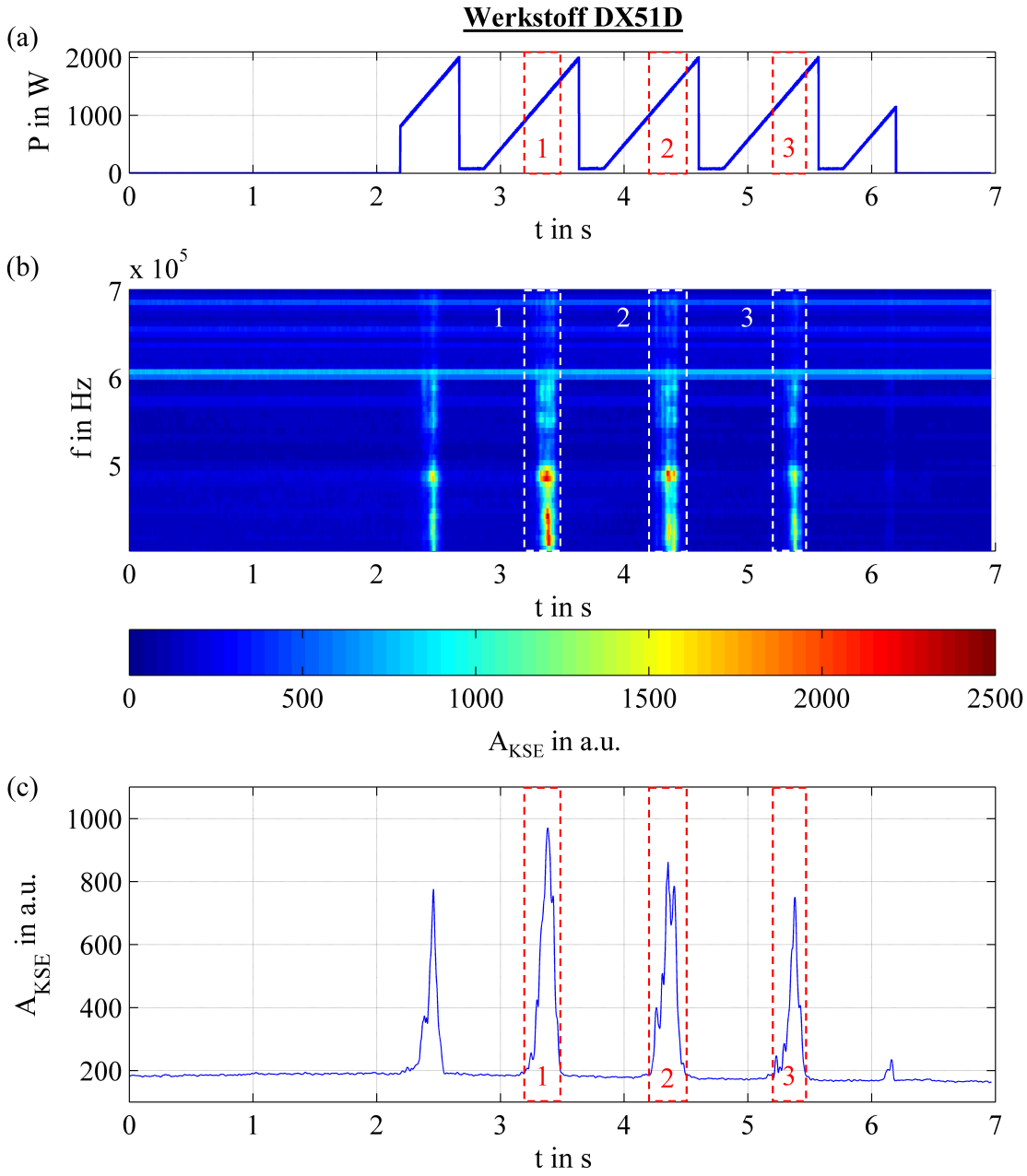



Abbildung 20: Laserleistung P über der Zeit t (a); STFT Diagramm des KSE-Signals (b); KSE-Amplitude $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (c) für Blindschweißungen am Werkstoff DX51D, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1856

Zur besseren Analyse wurden die drei markierten Bereiche wiederum über die eingestellte Laserleistung anstelle der Zeit dargestellt (siehe Abbildung 21). Die akustischen Signale aus diesen Bereichen zeigen qualitativ alle einen ähnlichen Verlauf, welcher auch mit dem Werkstoff DC04 vergleichbar ist. Das Signal steigt im Bereich der Veränderung vom Wärmeleitschweißen zum Übergangsbereich und zum Tiefschweißen an und fällt ab, sobald eine Durchschweißung erreicht ist. Die Bereiche 1, 2 und 3 zeigen hierzu jedoch einen teilweise instabilen Signalverlauf mit jeweils anderen Grenzwerten.

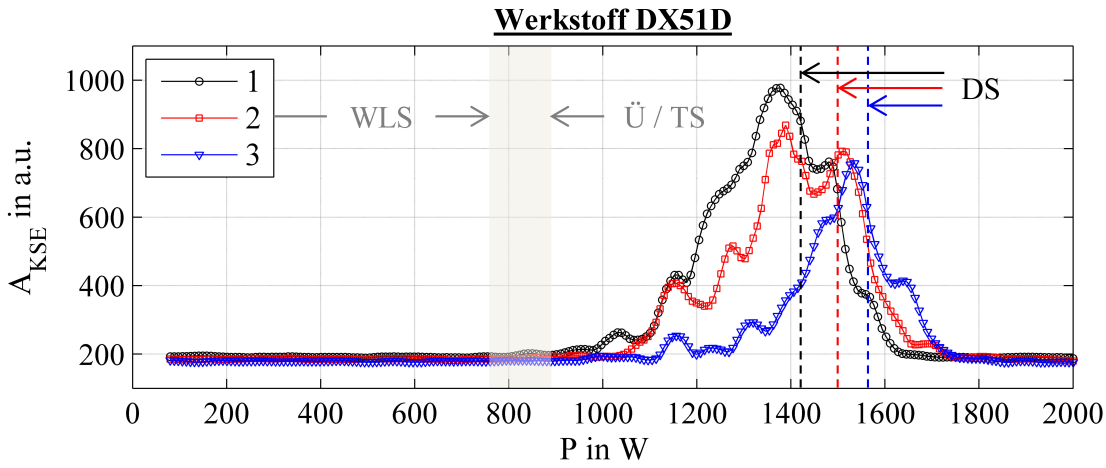



Abbildung 21: Körperschallamplitude $A_{KSE}$ über der Laserleistung P für die Intervalle 1, 2 und 3 aus Abbildung 20

Der Bereich 1 aus Abbildung 21 zeigt ansteigende Körperschallamplituden im Leistungsbereich ab P ≈ 820 W. Der Abfall auf Grundrauschniveau ist ab ca. 1650 W erreicht. Der metallografische Längsschliff dieser Schweißprobe (siehe Kapitel 5.1.2.4) zeigt, dass der Übergang vom Wärmeleitschweißen im Bereich des Beginns der Körperschallentstehung liegt (siehe markierter Bereich im Diagramm). Die Durchschweißung kann vollständig erfolgen, bevor die Maximalleistung erreicht ist. Sie liegt für den Bereich 1 bei ca. 1420 W vor. Hier liegt auch in etwa der Abfall des korrespondierenden Körperschallsignals. Der Bereich 2 zeigt ansteigende Körperschallsignale ab ca. 900 W, was auch im markierten Bereich liegt, im dem metallografisch der Wechsel vom Wärmeleitschweißen zur Übergangszone bzw. zum Tiefschweißen ermittelt wurde. Jedoch ist dieser Übergang im Bereich 2 nicht so klar definiert, da die Einschweißtiefe hier relativ inhomogen verläuft. Die Durchschweißung in diesem Bereich der modulierten Laserleistung kann bei P ≈ 1500 W erreicht werden. Das Körperschallsignal fällt auch hier auch bereits nach dem absoluten Hochpunkt bei P = 1380 W ab. Das Körperschallsignal erreicht bei P = 1750 W wieder das Grundrauschniveau. Im dritten Bereich der modulierten Laserleistung beginnt das Körperschallsignal erst bei P ≈ 950 W signifikant zu steigen. Dies fällt nicht in den metallografisch ermittelten Laserleistungsbereich der Übergangszone. Bei genauer Betrachtung des Längsschliffes fällt auf, dass die Einschweißtiefe hier sehr inhomogen verläuft. Dies deutet auf einen instabilen Übergang zwischen dem Wärmeleitschweißen und dem Tiefschweißen hin. Das zugehörige Körperschallsignal verläuft im niedrigen Laserleistungsbereich ebenfalls nicht stetig. Die Durchschweißung wird bei P ≈ 1550 W erreicht. Dies korreliert mit der fallenden Flanke des Körperschallsignals nach dem absoluten Hochpunkt.

Abbildung 22 zeigt den Verlauf der Körperschallamplituden $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t beim Blindschweißen von insgesamt fünf Widerholungsproben mit der in Abbildung 20 (a) dargestellten Leistungsmodulation. Wie auch schon beim Werkstoff DC04 ergeben sich qualitativ nur geringfügige Abweichungen der Signalverläufe beim Schweißen des Werkstoffes DX51D. Die steigenden und fallenden Flanken der einzelnen Proben sind teilweise zeitlich etwas verschoben. Dies kann ursächlich vom Prozess selbst her rühren, welcher trotz gleicher Stellparameter nicht immer identisch verläuft. Auch der Unterschied in den absoluten Amplitudenwerten kann auf unterschiedlich verlaufende Prozesse hindeuten. Auffallend ist z.B. der Prozess mit der Nummer 1857. Hier verläuft der Signalabfall nach dem Peak zwischen t = 4 s und t = 5 s im Vergleich zu den anderen Prozessen zunächst identisch. Dann steigt das Signal jedoch wieder zu einem zweiten lokalen Maximum an, bevor es wieder auf Grundrauschniveau zurückgeht. Eine Betrachtung des Schweißergebnisses (siehe Abschnitt 5.1.2.4) dieser Probe zeigt, dass in diesem Bereich eine instabile Durchweißung vorliegt. Es sind zwei Bereiche erkennbar, in denen die Probe ansatzweise durchgeschweißt werden konnte.

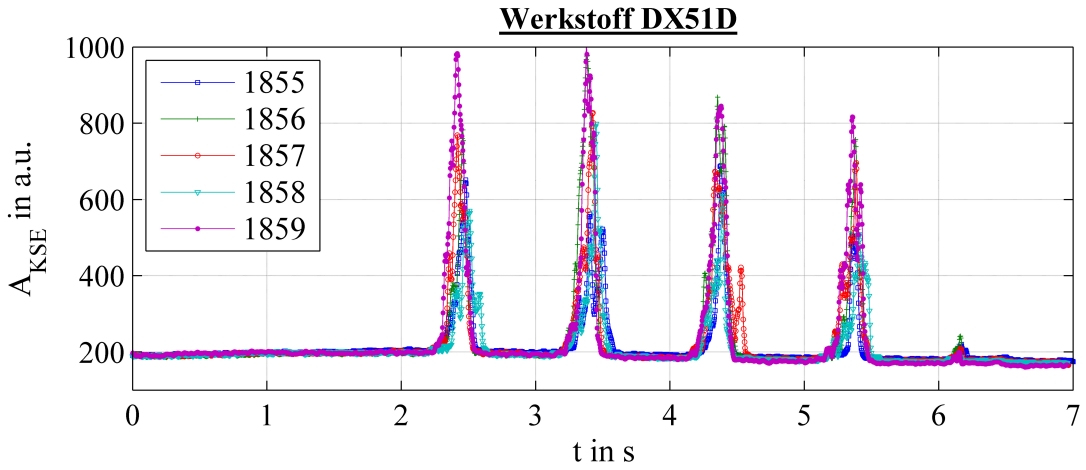



Abbildung 22: KSE-Amplitude $A_{KSE}$ für fünf Wiederholungsproben in Abhängigkeit der Zeit t für Blindschweißungen am Werkstoff DX51D mit in Abbildung 20 (a) dargestellter Laserleistungsmodulation, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Proben 1855 - 1859

#### 5.1.2.3 Luftschallemissionen

DC04 (t = 2 mm) – Blindschweißung

Abbildung 23 (a) zeigt den Laserleistungsverlauf, welcher bereits im vorherigen Kapitel diskutiert wurde. Dieser ist für die Luftschallemissionen identisch mit den Körperschallversuchen, da es sich um eine simultane Messung handelt. Auch hier sind die Bereiche mit den Ziffern von 1 bis 3 markiert, in denen die lineare Laserleistungsrampe vollständig durchfahren wird. In Abbildung 23

(b) ist das STFT-Diagramm der Luftschallemissionen dargestellt. Es sind, ähnlich wie bei den Körperschallemissionen, breitbandige Signale mit unterschiedlicher Amplitude erkennbar.

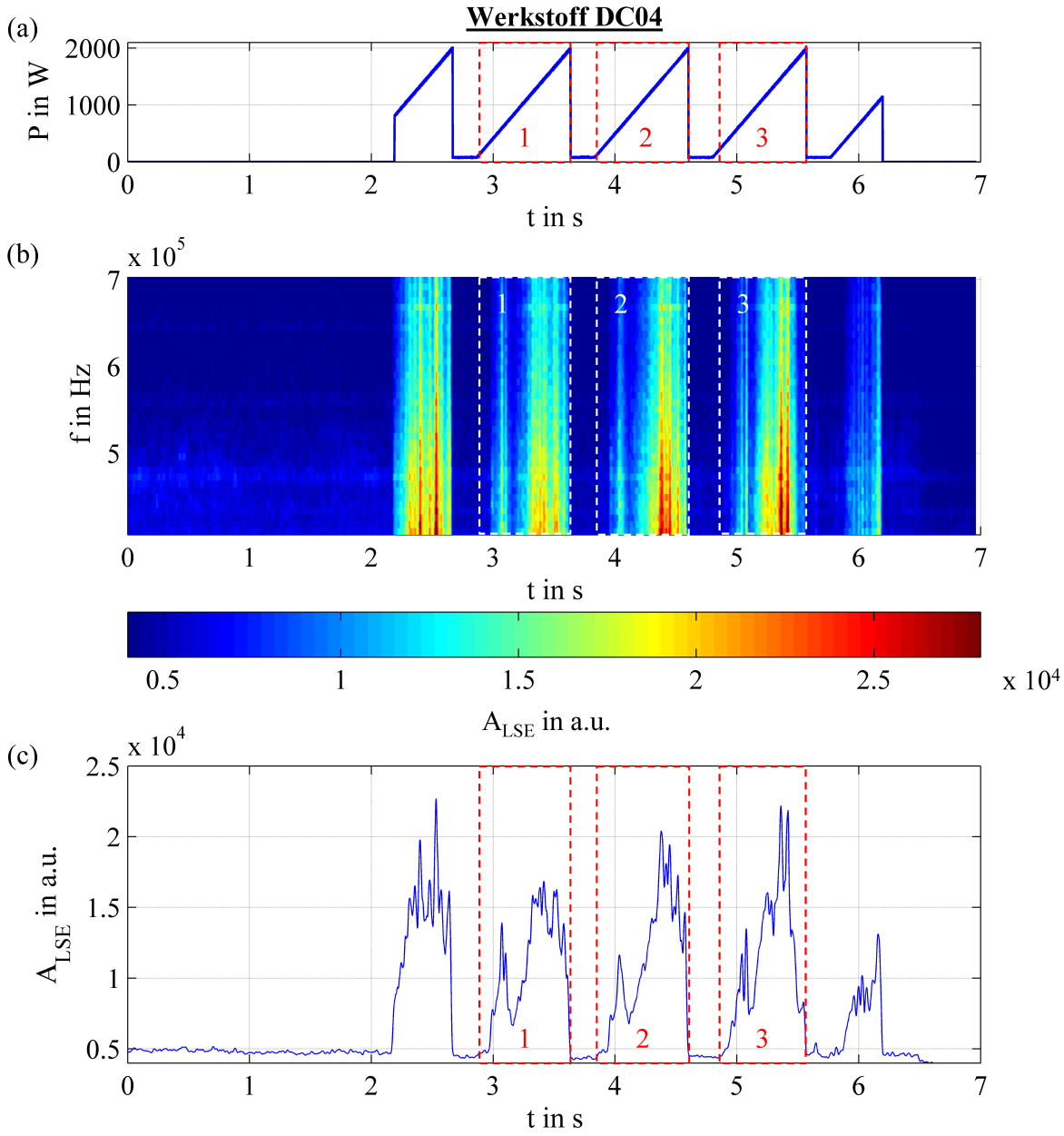



Abbildung 23: Laserleistung P über die Zeit t (a); STFT-Diagramm des LSE Signals (b); LSE-Amplitude $A_{LSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (c) für Blindschweißungen am Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1702

Die aus dem STFT-Diagramm extrahierte Luftschallamplitude $A_{LSE}$ (siehe Abbildung 23 (c)) zeigt, dass fast über den gesamten linearen Anstieg der Laserleistung in den Bereichen 1, 2 und 3 signifikante Luftschallamplituden auftreten. Der qualitative Verlauf von $A_{LSE}$ in diesen Bereichen ist vergleichbar. Es ist zunächst ein Anstieg auf ein lokales Maximum erkennbar, gefolgt von einem lokalen Minimum bei weiterer Leistungssteigerung. Wird die Laserleistung weiter erhöht, so

steigt die Luftschallamplitude wieder auf ein lokales Maximum an. Wird die Leistung nach Erreichen der Maximalleistung von P = 2000 W abgeschaltet, so sinkt auch $A_{LSE}$ direkt auf Grundrauschniveau ab. Um nun die markierten Bereiche mit linearem Leistungsanstieg näher zu betrachten und mit den Ergebnissen der Versuche mit konstanter Leistung zu vergleichen, werden für die Bereiche 1, 2 und 3 die Luftschallamplitude $A_{LSE}$ über der jeweils anliegenden Laserleistung P dargestellt (siehe Abbildung 24).

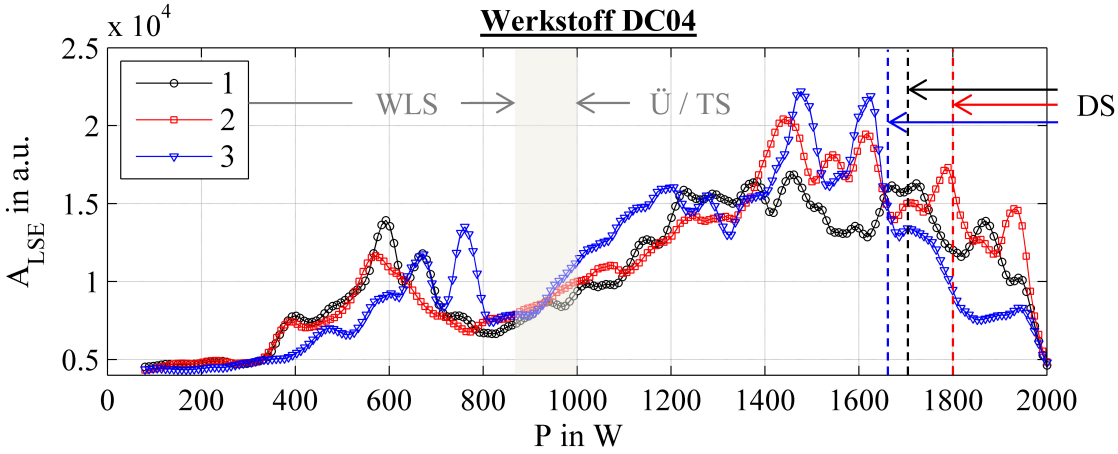



Abbildung 24: Luftschallamplitude $A_{LSE}$ über der Laserleistung P für die Intervalle 1, 2 und 3 aus Abbildung 23

Der Verlauf der Luftschallamplituden $A_{LSE}$ bei linearer Leistungsmodulation auf einer Probe in Abhängigkeit der anliegenden Laserleistung ist in Abbildung 24 abgebildet. Er ist in den Bereichen 1, 2 und 3 vergleichbar. $A_{LSE}$ steigt vom Grundrauschniveau bereits ab Laserleistungen von P > 300 W für alle drei Bereiche an. Die lokalen Maxima werden bei Leistungen von P ≈ 600 W (Bereich 1), P ≈ 580 W (Bereich 2) und P ≈ 750 W (Bereich 3) erreicht. Eine Steigerung der Laserleistung führt zum Signalabfall der Luftschallamplitude auf ein lokales Minium. Diese Minima liegen für alle drei Bereich bei P ≈ 850 W. Im Bereich des Signalanstieges bei weiterer Erhöhung der Laserleistung wird die metallografisch ermittelte Schwelle zwischen dem Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich bzw. dem Tiefschweißen (siehe Kapitel 5.1.2.4) überschritten. Die Luftschallamplituden steigen nun mit Erhöhung der Laserleistung an, bis sich ab P > 1300 W ein annähernd horizontaler Verlauf mit recht großen Schwankungen einstellt. Für den Bereich 1 und 2 fällt die Luftschallamplitude $A_{LSE}$ erst bei Laserleistungen von P > 1900 W signifikant und kontinuierlich ab bis bei Maximalleistung wieder das Grundrauschniveau von P = 100 W erreicht wird. Die Durchschweißung wurde ab P > 1700 W für den Bereich 1 und ab P > 1800 W für den Bereich 2 ermittelt. Im Bereich 3 ist bereits ab Laserleistungen von P > 1650 W ein signifikanter Abfall der Luftschallamplitude erkennbar. Die Grenze zur Durchschweißung liegt ebenfalls in diesem Leistungsbereich.

Um eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse bezüglich der Prozessüberwachung beim Laserschweißen mittels Luftschallemissionen treffen zu können, wurden fünf Wiederholungsproben mit gleichen Parametern geschweißt. Die zu Grunde liegende Leistungsmodulation ist in Abbildung 23 (a) abgebildet. Die in Abbildung 25 dargestellten Luftschallamplituden $A_{LSE}$ sind für die Proben 1700 – 1704 im zeitlichen Verlauf qualitativ identisch. Die zuvor betrachteten drei Bereiche, in denen die Leistungsrampe von Minimal- bis Maximalleistung vollständig durchfahren wird, sind von besonderem Interesse. Hier ist für alle fünf Proben ein ähnlicher zeitlicher Verlauf erkennbar. Es tritt jeweils zunächst ein erstes lokales Maximum auf, gefolgt von einem zweiten lokalen Maximum. Ein Absenken der Laserleistung auf Minimalleistung führt zu einer direkten Abnahme der Luftschallamplitude. Die leichte zeitliche Variation der Punkte von Signalanstieg und Signalabfall ist mit Variationen des Schweißprozesses trotz gleicher Stellparameter der fünf Wiederholungsproben erklärbar.

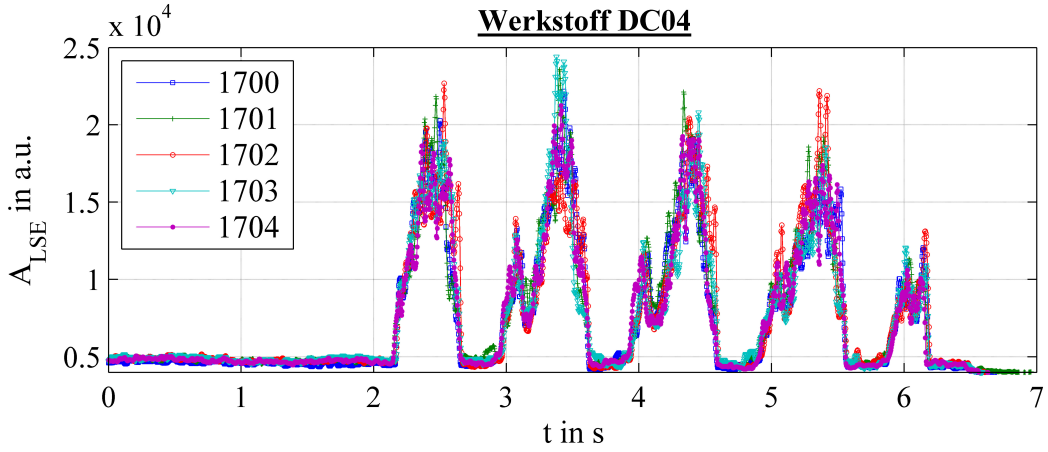



Abbildung 25: LSE-Amplitude $A_{LSE}$ für fünf Wiederholungsproben in Abhängigkeit der Zeit t für Blindschweißungen am Werkstoff DC04 mit in Abbildung 23 (a) dargestellter Laserleistungsmodulation, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Proben 1700 - 1704

DX51D (t = 2 mm) – Blindschweißung

Im Vergleich zu der zuvor dargestellten Versuchsreihe (DC04) stellen sich die in Abbildung 26 dargestellten Luftschallemissionen im STFT-Diagramm (siehe Abbildung 26 (b)) unterschiedlich dar. Der Frequenzinhalt ist, wie auch bereits schon beim Schweißen mit konstanter Laserleistung je Probe (siehe Kapitel 5.1.1.1), bei niedrigen Laserleistungen eher hochfrequent und bei hohen Laserleistungen niederfrequent bzw. breitbandig. Die markierten Bereiche, in denen signifikante Luftschallemissionen auftreten, sind wiederum mit 1, 2 und 3 markiert. Der Übertrag dieser Bereiche in den Laserleistungsverlauf zeigt im Gegensatz zum Werkstoff DC04, dass beim Schweißen von DX51D Luftschallemissionen über den gesamten Laserleistungsbereich auftreten. Um die

Luftschallemissionen in den markierten Bereichen in Abhängigkeit der Laserleistung zu untersuchen, wurden diese separat in Abbildung 27 dargestellt.

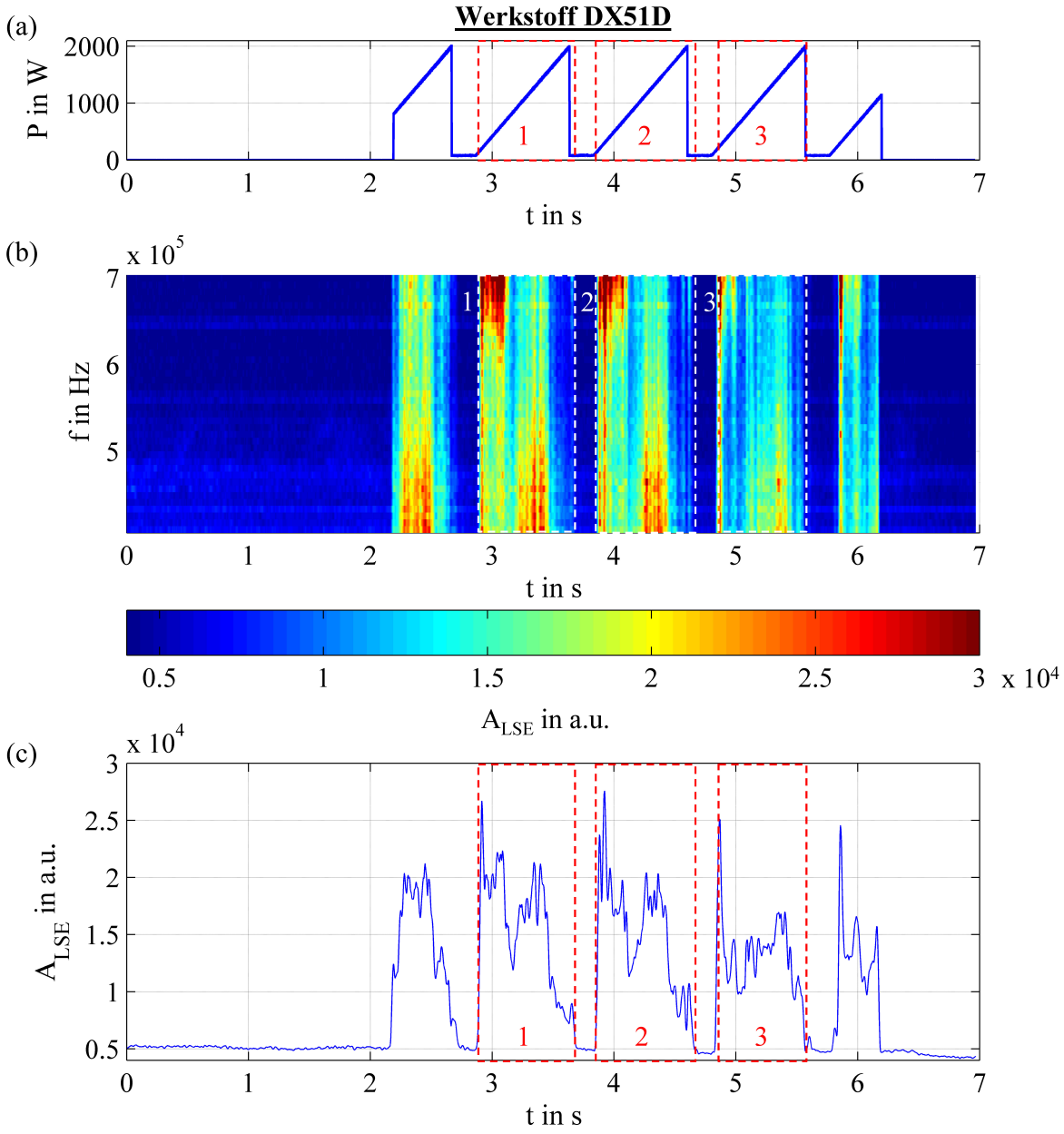



Abbildung 26: Laserleistung P über der Zeit t (a); STFT Diagramm des LSE-Signals (b); LSE-Amplitude $A_{LSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (c) für Blindschweißungen am Werkstoff DX51D, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1856

Der Verlauf der Luftschallemissionen in den Bereichen 1, 2 und 3 in Abhängigkeit der Laserleistung P (siehe Abbildung 27) unterscheidet sich deutlich vom Werkstoff DC04. Dies wurde bereits beim Schweißen mit konstanter Laserleistung je Probe (siehe Kapitel 5.1.1.3) festgestellt. Bei sehr niedrigen Laserleistungen (P > 100 W) steigen die Schallemissionen in allen drei Bereichen stark auf ein lokales Maximum an. Bei weiterer Erhöhung fällt $A_{LSE}$ wieder ab. Dieser Abfall ist in Be-

reich 3 deutlich stärker im Vergleich zu den Bereichen 1 und 2. Bereich 3 zeigt einen eher horizontalen Verlauf bei steigenden Laserleistungen, wohingegen in den Bereichen 1 und 2 ein lokales Minimum bei P ≈ 800 W feststellbar ist. Hier liegt auch die metallografisch ermittelte Schwelle zwischen dem Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich bzw. dem Tiefschweißen. Bei weiterer Leistungserhöhung steigen die Luftschallemissionen wieder an. Zwischen P = 1400 W und P = 1600 W erfolgt die Durchschweißung der Proben in den betrachteten Bereichen 1, 2 und 3. Die Luftschallamplituden $A_{LSE}$ fallen, nachdem die Durchschweißung erreicht ist, in allen Bereichen ab.

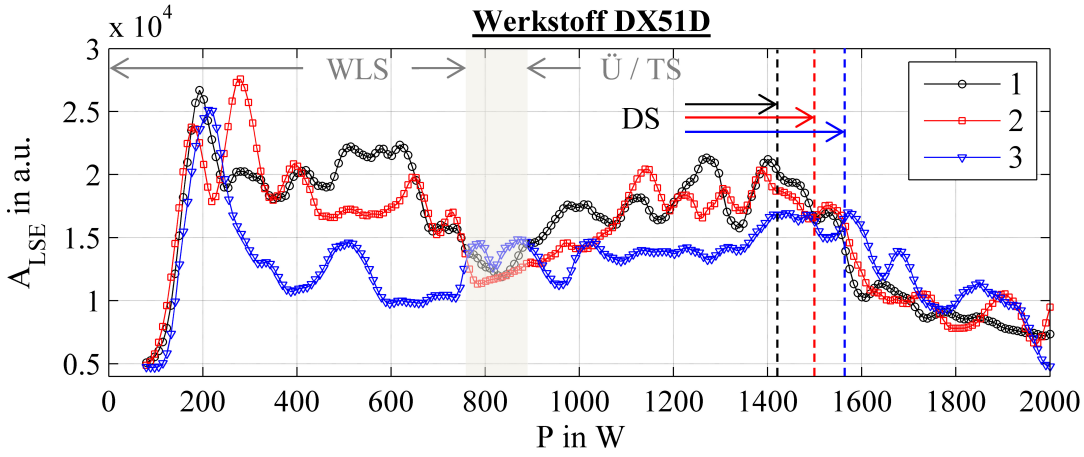



Abbildung 27: Luftschallamplitude $A_{LSE}$ über der Laserleistung P für die Intervalle 1, 2 und 3 aus Abbildung 26

Auch hier soll die Reproduzierbarkeit der Messung der Luftschallemissionen bei Laserleistungsmodulation überprüft werden. Dazu sind in Abbildung 28 die Luftschallamplituden $A_{LSE}$ über der Zeit t für fünf Wiederholproben mit gleichen Parametern dargestellt. Alle fünf Proben zeigen einen vergleichbaren Verlauf. Dieser ist auch mit dem in den letzten Abschnitten diskutierten Verlauf der Probe 1856 vergleichbar. Die leichten zeitlichen Verschiebungen der Wiederholungsproben untereinander bezüglich Signalanstieg und Signalabfall lassen sich mit den leicht unterschiedlichen Prozessverläufen trotz gleicher Stellparameter erklären. Wie auch in Abschnitt 5.1.1.2 bereits bei den Körperschallemissionen festgestellt, fällt die Probe 1857 im Bereich 2 (zwischen t = 4 s und t = 5 s) auf, da hier auch die Luftschallamplitude nicht dem Verlauf der anderen vier Proben entspricht. Die Luftschallamplitude fällt nicht bei höheren Laserleistungen ab. Die Schweißprobe zeigt hier eine inhomogene Durchschweißung (siehe Kapitel 5.1.2.4).

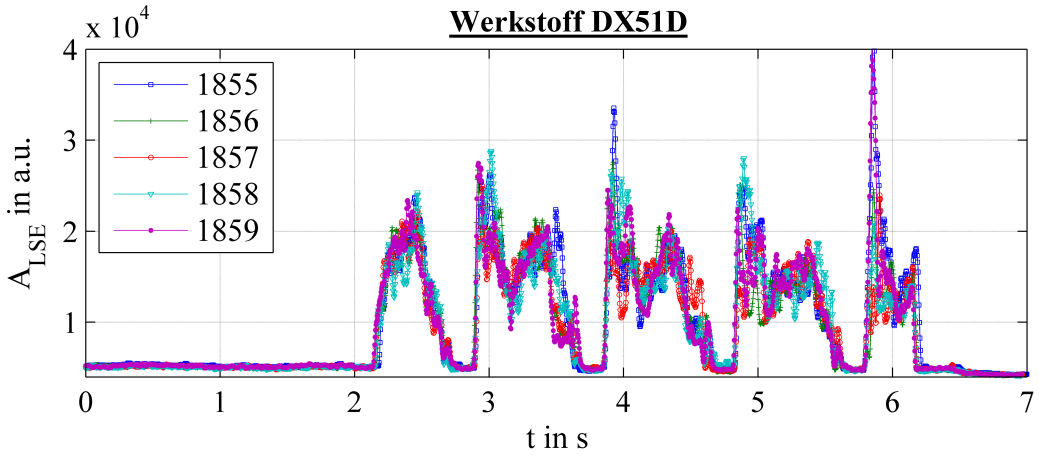



Abbildung 28: LSE-Amplitude $A_{LSE}$ für fünf Wiederholungsproben in Abhängigkeit der Zeit t für Blindschweißungen am Werkstoff DX51D mit in Abbildung 26 (a) dargestellter Laserleistungsmodulation, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Proben 1855 - 1859

#### 5.1.2.4 Schweißergebnis, Metallografie

DC04 (t = 2 mm) – Blindschweißung

Die Schweißergebnisse, welche bei Modulation der Laserleistung erzielt werden, sind in Abbildung 29 dargestellt. In Teil (a) der Abbildung ist nochmals die in diesem Kapitel betrachtete Art der Laserleistungsmodulation im zeitlichen Verlauf abgebildet. Die Ober- und Unterseite der Schweißprobe 1702 des Werkstoffes DC04 sind in Abbildung 29 (b) zu sehen. Es wurden unterschiedliche Skalierungen für die Längs- und Querrichtung verwendet, da die Schweißnaht relativ schmal im Verhältnis zur Länge ist. Deutlich erkennbar ist der Einfluss der Leistungsmodulation auf beiden Probenseiten. Speziell auf der Probenunterseite ist die Durchschweißung (DS) erkennbar, sobald die Laserleistung ein ausreichendes Niveau erreicht hat. In Teil (c) der Abbildung 29 ist zwei Mal der Längsschliff der Probe dargestellt. Die Skalierung für die Tiefenrichtung ist unterschiedlich zur Längenskalierung, damit der Einschweißtiefenverlauf besser erkennbar wird. Es werden wiederum nur die Bereiche betrachtet, in denen die lineare Laserleistungsrampe den kompletten Bereich (80 W – 2000 W) durchläuft. Diese sind bereits als Bereiche 1, 2 und 3 aus den vorherigen Abschnitten bekannt. Im oberen Teil ist der Längsschliff ohne zusätzliche Markierungen abgebildet. Im unteren Teil wurde der Einschweißtiefenverlauf mit einer Linie markiert. Die abgebildeten Tangenten verdeutlichen die verschiedenen Bereiche anhand des Einschweißtiefenverlaufes. Das Wärmeleitschweißen ist geprägt durch einen flachen, linearen Anstieg der Einschweißtiefe mit zunehmender Laserleistung. Sobald die Schwelle (S) zum Übergangsbereich bzw. zum Tiefschweißen überschritten wird, steigt die Einschweißtiefe durch die Bildung der

Dampfkapillare schneller an. Dies ist jeweils durch die zweite Tangente mit steilerer Steigung angedeutet. Im Schnittpunkt der jeweils eingezeichneten Tangenten liegt die Schwelle.

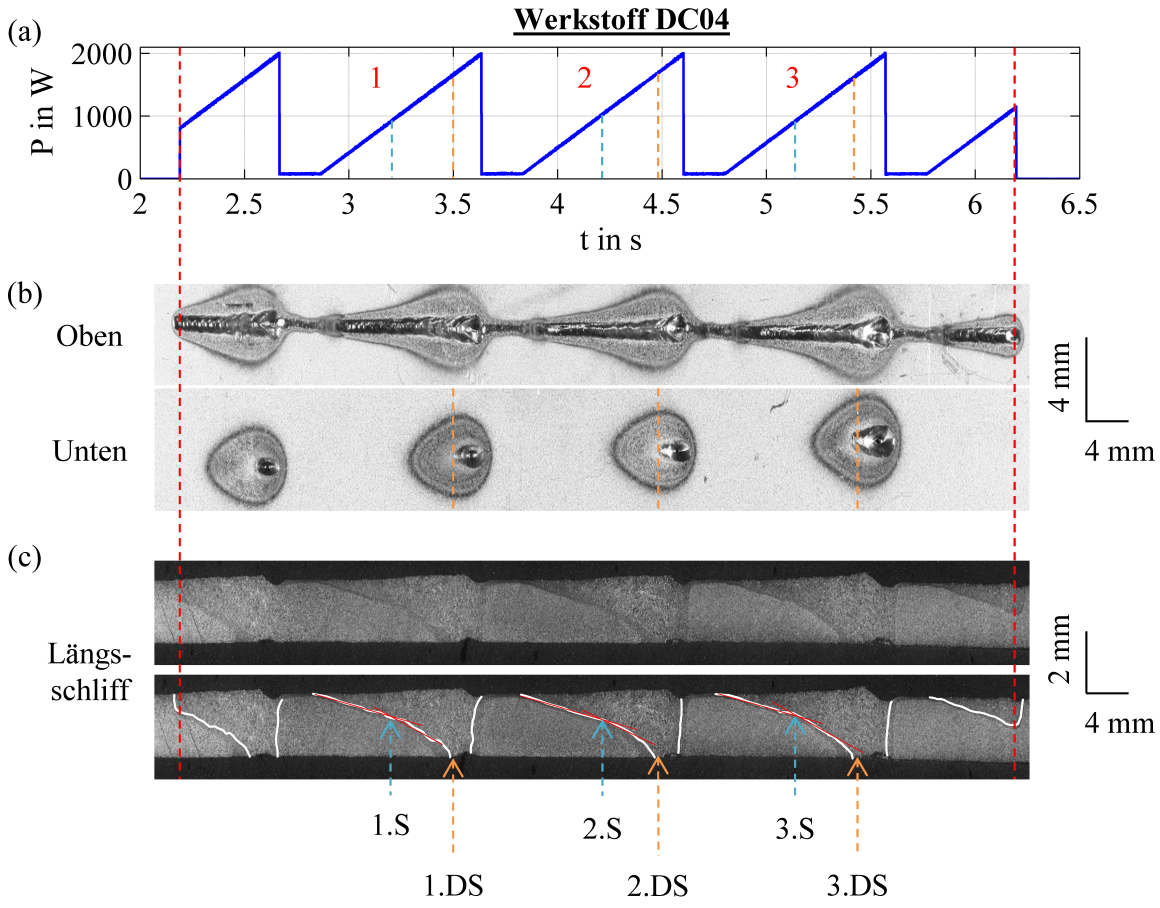



Abbildung 29: Schweißergebnis Probe 1702; Werkstoff: DC04; Laserleistungsmodulation (a); Bilder von Ober- und Unterseite (b); Längsschliff mit Markierung der Schwelle (S) zwischen Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich bzw. dem Tiefschweißen sowie der Durchschweißung (DS) (c); Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

Für den Bereich 1 liegt die Schwelle bei P ≈ 950W, für den Bereich 2 bei P ≈ 1000W und für den Bereich 3 bei P ≈ 900W. Der Übergang zwischen dem Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich zum Tiefschweißen liegt also für die Probe 1702 zwischen 900 W und 1000 W. Die Durchschweißung kann für Bereich 1 bei P ≈ 1700W, für Bereich 2 bei P ≈ 1800W und für Bereich 3 bei P ≈ 1650W erzielt werden. Diese Bereiche wurden in den Diagrammen der akustischen Emissionen, welche in den vorherigen Kapiteln dargestellt sind, bereits eingetragen.

Im Versuchsprogramm wurden auch fünf Wiederholungsproben mit gleichen Stellparametern geschweißt um eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der akustischen Emissionen zu erhalten. Abbildung 30 zeigt die Probenober- und -unterseiten der Wiederholungsproben. Die Breiten- und Längenrichtung sind unterschiedlich skaliert dargestellt, da die Schweißnähte relativ schmal im Verhältnis zur Schweißnahtlänge sind.

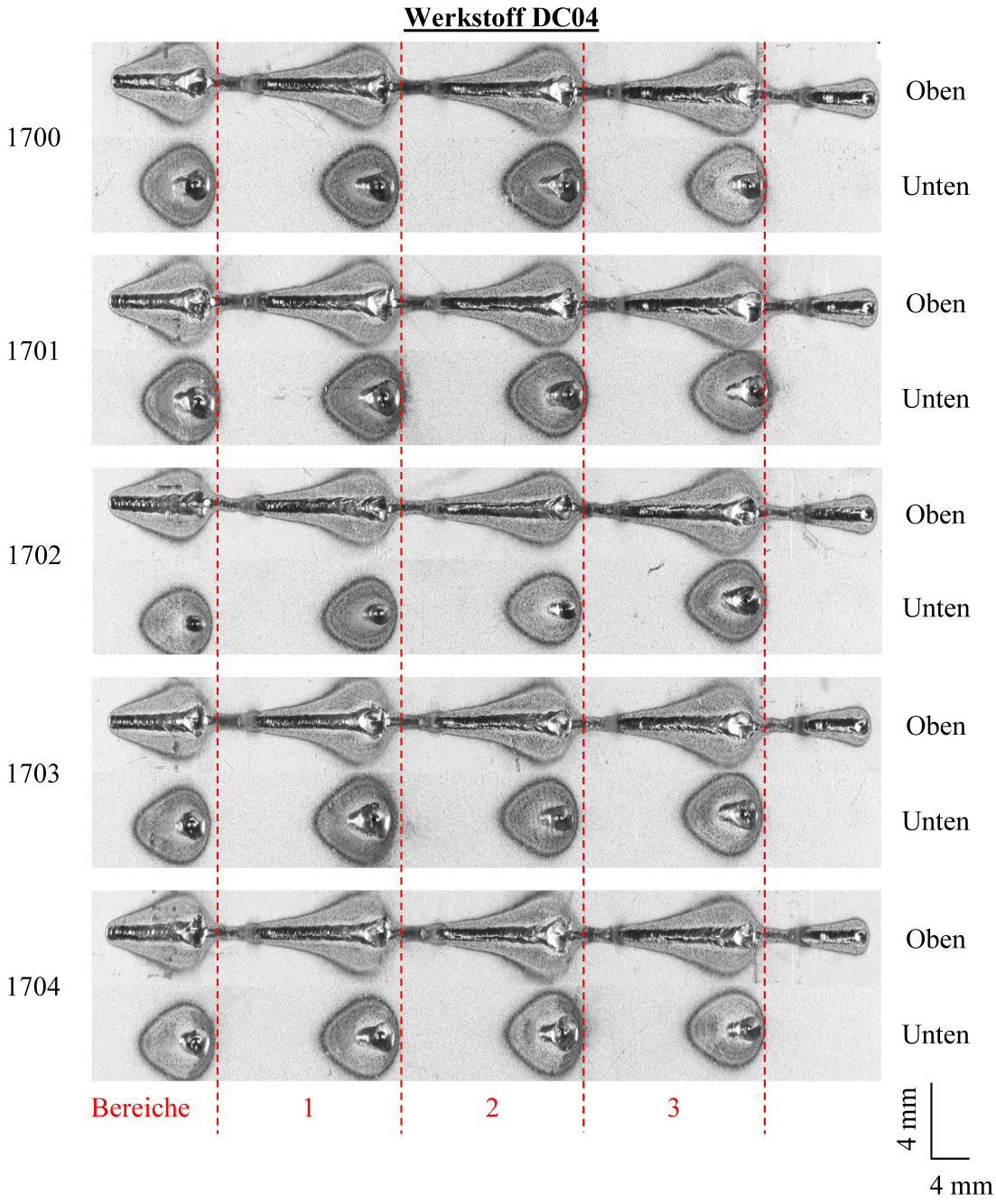



Abbildung 30: Schweißergebnis der Wiederholproben 1700 – 1704 mit Leistungsmodulation (siehe Abbildung 29 (a)); Werkstoff DC04, Blindschweißungen; Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

Im Prinzip sind die in Abbildung 30 dargestellten Schweißergebnisse aller Proben identisch. Auf der Probenunterseite sind leichte Variationen erkennbar, welche auf Prozessschwankungen trotz gleicher Stellparameter zurückzuführen sind. Je nachdem ergeben sich unterschiedliche Zeitpunkte für den Beginn der Durchschweißung. Entsprechend finden die Durchschweißungen bei unterschiedlichen zugeordneten Laserleistungen statt. Auch die geometrische Länge der Durchschweißung variiert aus dem gleichen Grund leicht von Bereich zu Bereich und von Probe zu Probe. Ins-

gesamt verlaufen aber alle Prozesse qualitativ gleich, eine Durchschweißung wird in allen drei Bereichen und bei allen Proben erreicht.

DX51D (t = 2 mm) – Blindschweißung

Analog zu den Schweißergebnissen am Werkstoff DC04 sind in Abbildung 31 die Ergebnisse der Blindschweißungen am Werkstoff DX51D (Probe 1856) dargestellt. Für die jeweils markierten Bereiche wurden die Leistungswerte für die Schwelle (S) zwischen dem Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich bzw. dem Tiefschweißen ermittelt. Diese betragen für den Bereich 1 $P \approx 750$ W, für den Bereich 2 $P \approx 850$ W und für den Bereich 3 $P \approx 900$ W. Somit liegen alle Schwellwerte im Intervall zwischen 750 W und 900 W. Auch die Grenzwerte der Laserleistung für die Durchschweißung (DS) wurden bestimmt. Für den Bereich 1 beträgt dieser Grenzwert $P \approx 1400$ W, für Bereich 2 $P \approx 1500$ W und für Bereich 3 $P \approx 1550$ W. Diese Ergebnisse wurden bereits in den vorherigen Kapiteln in den Diagrammen der akustischen Emissionen berücksichtigt.

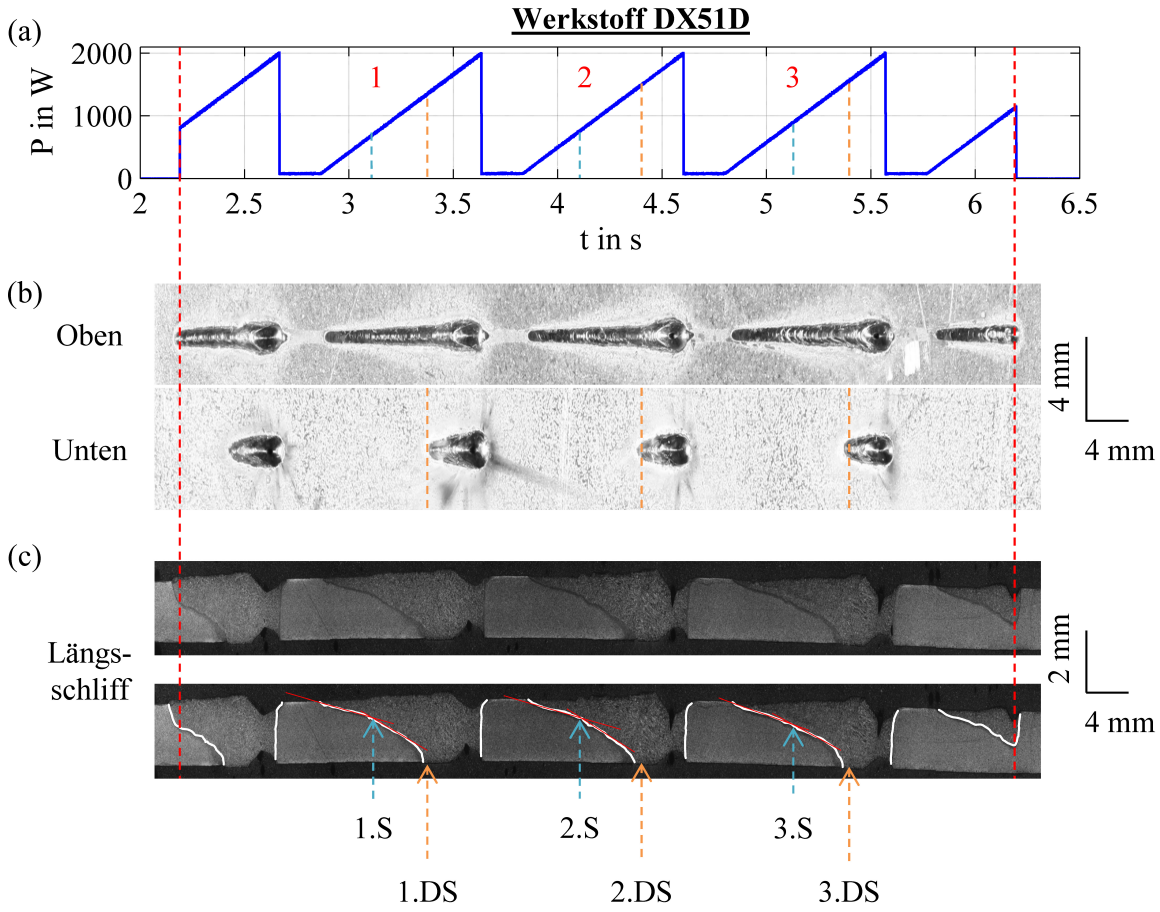



Abbildung 31: Schweißergebnis Probe 1856; Werkstoff: DX51D; Laserleistungsmodulation (a); Bilder von Ober- und Unterseite (b); Längsschliff mit Markierung der Schwelle (S) zwischen Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich bzw. dem Tiefschweißen sowie der Durchschweißung (DS) (c); Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

Abbildung 32 zeigt die Probenober- und Probenunterseiten der fünf Wiederholungsproben 1855 - 1859 des Werkstoffes DX51D.

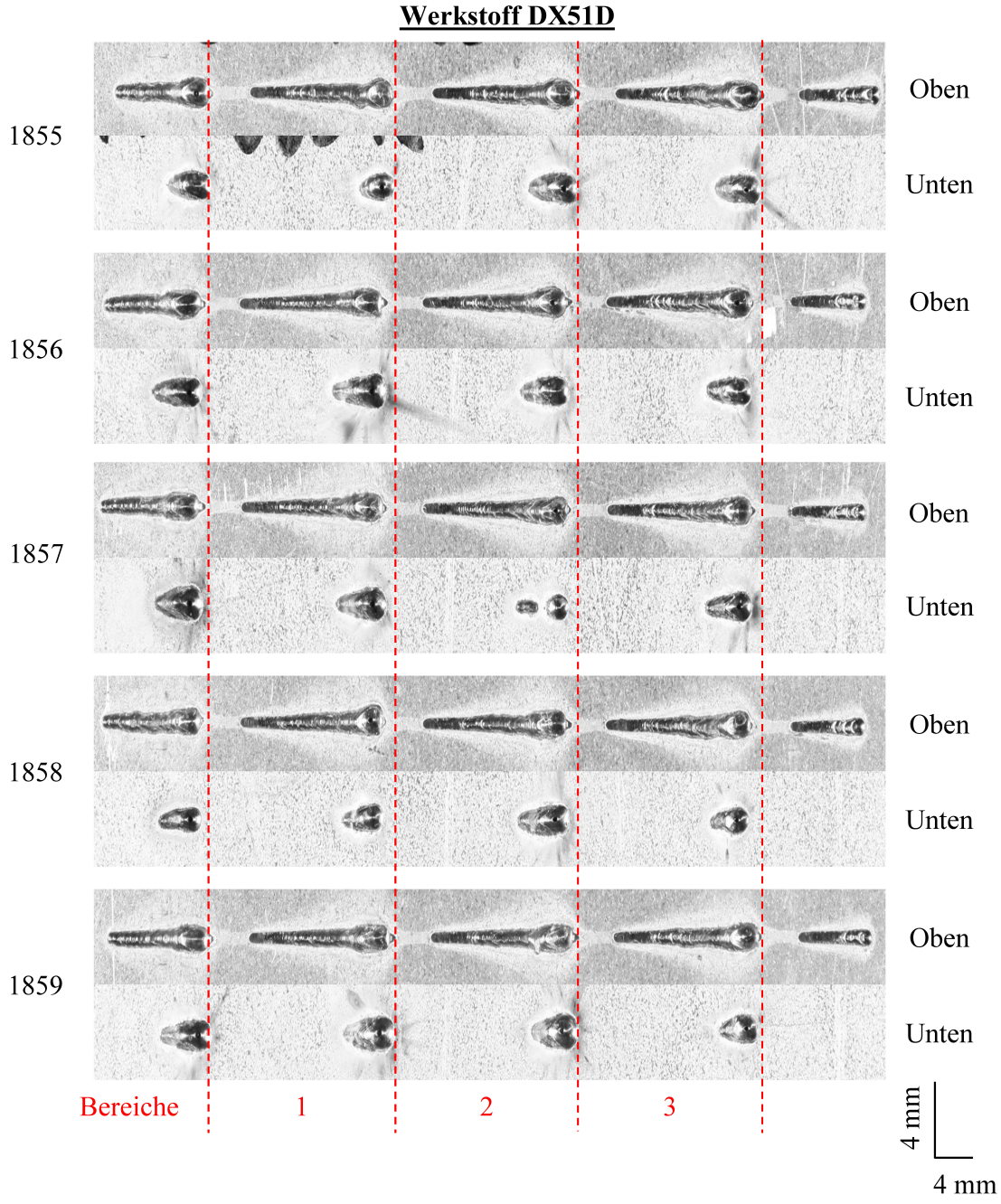



Abbildung 32: Schweißergebnis der Wiederholproben 1855 – 1859 mit Leistungsmodulation (siehe Abbildung 31 (a)); Werkstoff DX51D, Blindschweißungen; Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

Die Schweißungen sind für alle Proben und die markierten Bereiche 1 – 3 qualitativ identisch. Eine Unregelmäßigkeit ist bei Probe 1857 im Bereich 2 (Probenunterseite) erkennbar. Hier ist die Durchschweißung nicht mit zunehmender Laserleistung breiter ausgeprägt, sondern fällt im Ver-

lauf aus, was auf einen zufälligen Fehler hindeutet. Dies kann sowohl in den zugehörigen Körperschalldaten (Abschnitt 5.1.2.2, Abbildung 22) und den Luftschalldaten (Abschnitt 5.1.2.3, Abbildung 28) erkannt werden. Analog zum Werkstoff DC04 sind die Zeitpunkte des Beginns und des Endes der Durchschweißung und die entsprechenden Laserleistungsniveaus leicht unterschiedlich. Dies ist mit der Streuung des Prozesses und den Instabilitäten zu erklären.

#### 5.1.2.5 Zwischenfazit

Es konnte gezeigt werden, dass die hochfrequenten Körper- und die hochfrequenten Luftschallemissionen mit unterschiedlichen Schweißarten (Wärmeleit-, Tiefschweißen) korrelieren. Die Ergebnisse, welche beim Schweißen mit konstanter Laserleistung erzielt wurden, sind auch durch Laserleistungsmodulation reproduzierbar. Sowohl beim Erreichen der Schwellleistung also auch beim Erzielen der Durchschweißung konnten gleiche Effekte beobachtet werden.

### 5.1.3 Versuche zur Zinkverdampfung

#### 5.1.3.1 Versuchsbeschreibung

Zur Untersuchung des Einflusses der Zinkverdampfung auf hochfrequente Schallemissionen wurden Versuche am Werkstoff DX51D gefahren. Dazu wurden Blindschweißproben teilweise durch Abschleifen entschichtet (Abbildung 33) und mit verschiedenen Laserleistungen ($P_1$ = 400 W; $P_2$ = 2000 W) und Schweißgeschwindigkeiten ($v_{S,1}$ = 20 mm/s; $v_{S,2}$ = 50 mm/s) geschweißt.

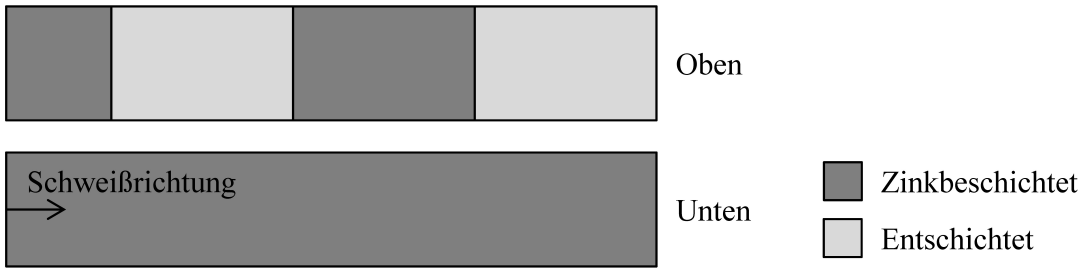



Abbildung 33: Probenpräparation der teilweise entschichteten Bleche aus dem Werkstoff DX51D

Diese Versuche sollen den Zusammenhang zwischen entstehenden Schallemissionen und der Verdampfung der Zinkbeschichtung klären. Die zinkbeschichteten Bereiche sind in den folgenden Diagrammen jeweils markiert. Die Luft- und Körperschallemissionen wurden dazu nach dem in Kapitel 4.5.2 beschriebenen Vorgehen im Frequenzbereich 400 kHz ≤ f ≤ 1200 kHz ausgewertet.

#### 5.1.3.2 Körperschallemissionen

<u>P = 400 W; $v_S$ = 20 mm/s</u>

Beim Blindschweißen der teilweise entschichteten Proben sind keine signifikanten Körperschallemissionen messbar. Dies entspricht den Ergebnissen aus Kapitel 5.1.1.2.

P = 2000 W; $v_S$ = 20 mm/s

Beim Schweißen der partiell entschichteten Proben ist mit den o.g. Stellparametern kein Körperschallsignal messbar. Dies korreliert mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.1.1.2.

P = 2000 W; $v_S$ = 50 mm/s

In Abbildung 34 sind die Körperschallemissionen beim Blindschweißen mit einer Laserleistung von P = 2000 W und einer Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 50 mm/s (Abbildung 34 (a)) dargestellt.

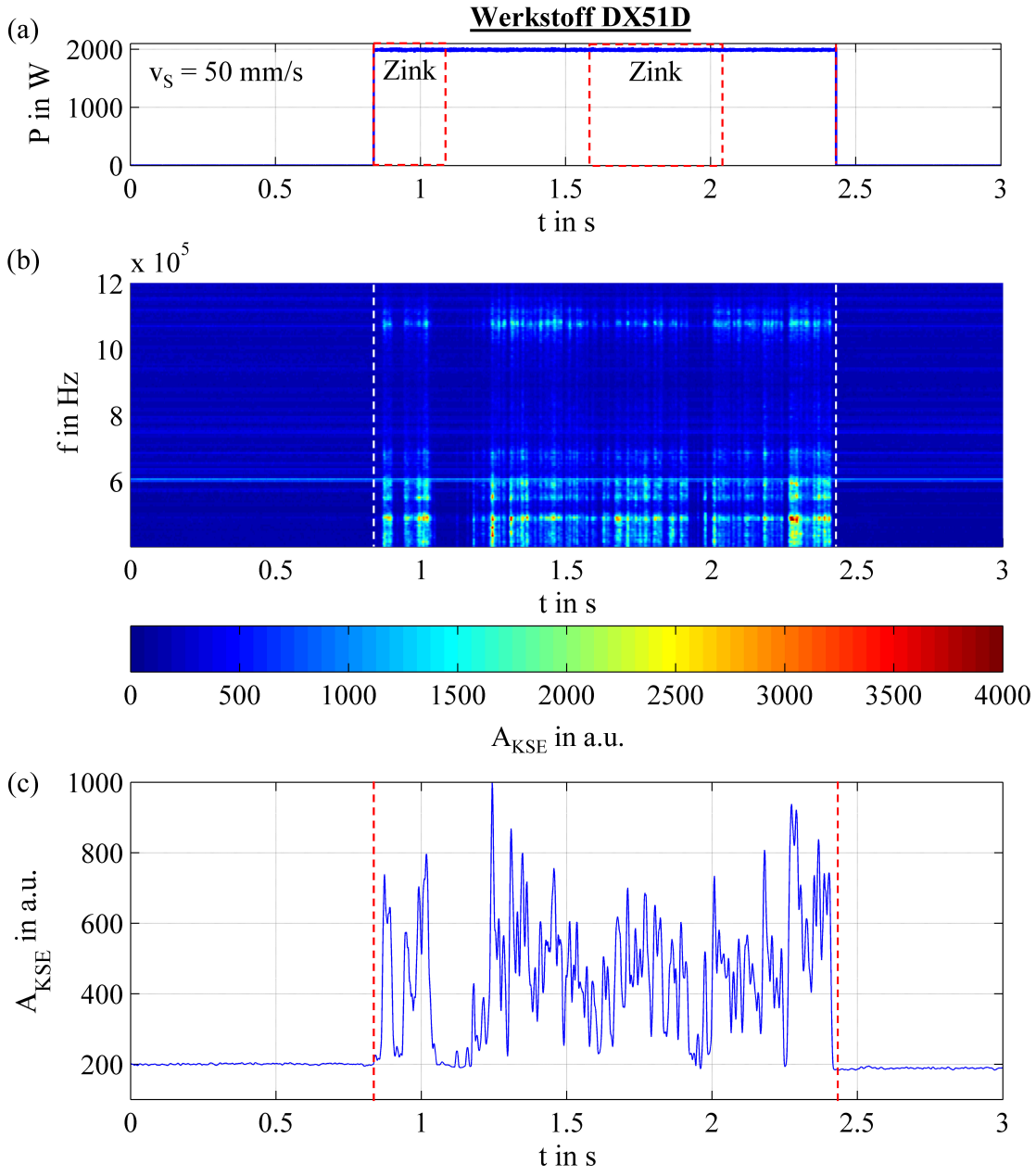



Abbildung 34: Körperschallemissionen beim Schweißen teilweise entschichteter Proben des Werkstoffes DX51D, P = 2000 W; $v_S$ = 50 mm/s; Probe 1988

Im STFT-Diagramm (siehe Abbildung 34 (b)) ist der breitbandige Charakter der Körperschallemissionen bis in den MHz-Bereich erkennbar. Es sind fast über den gesamten Schweißbereich deutliche Körperschallamplituden trotz teilweiser Entschichtung messbar. Der zeitliche Verlauf von $A_{KSE}$ in Abbildung 34 (c) verdeutlicht dies. Eine Betrachtung des Schweißergebnisses (siehe Kapitel 5.1.3.4) zeigt, dass die Probe nicht vollständig durchgeschweißt werden konnte. In diesem Bereich knapp vor bzw. knapp hinter der Grenze zur Durchschweißung konnten bereits bei allen in den vorherigen Kapiteln diskutierten Versuchen, Körperschallemissionen detektiert werden.

#### 5.1.3.3 Luftschallemissionen

$P = 400$ W; $v_S = 20$ mm/s

Im Gegensatz zu den im vorherigen Kapitel diskutierten Körperschallemissionen zeigen die Luftschallemissionen (Abbildung 35) deutliche Amplituden im Bereich der zinkbeschichteten Stellen. Die Laserleistung wurde bei $P = 400$ W (siehe Abbildung 35 (a)) konstant über den gesamten Prozess gehalten. Die Schweißgeschwindigkeit lag bei einem konstanten Wert von $v_S = 20$ mm/s. Die STFT der Luftschallemissionen (siehe Abbildung 35 (b)) zeigt deutliche Schallsignale bei der Mittenfrequenz des Luftschallsensors von ca. 870 kHz. Im Gegensatz zu den bisher diskutierten Luftschallsignalen sind die akustischen Emissionen bei dieser Probe schmalbandiger. Deutlich heben sich die zinkbeschichteten Probenbereiche von den entschichteten Bereichen in der STFT ab. Der zeitliche Amplitudenverlauf $A_{LSE}(s)$ in Abbildung 35 (c) zeigt beim Einschalten der Laserleistung im Bereich der Zinkbeschichtung einen deutlichen Signalanstieg auf eine Amplitude $A_{LSE} > 3 \cdot 10^4$. Das Luftschallsignal schwankt zwar im Bereich der Zinkbeschichtung recht stark, jedoch mit sehr großem Signal-Rausch-Abstand zum Grundrauschen. Sobald der Schweißprozess von der Zinkbeschichtung zum entschichteten Probenbereich übergeht, fällt das $A_{LSE}$ Signal deutlich ab. Trotz weiterhin stattfindendem Schweißprozess mit einer Laserleistung von $P = 400$ W ist kaum noch ein signifikanter Unterschied zum Grundrauschen erkennbar. Bei $t \approx 4$ s findet wiederum ein Übergang vom entschichteten zum zinkbeschichteten Bereich statt. Die Luftschallamplitude steigt sprunghaft auf ein ähnliches Niveau wie am Anfang des Schweißprozesses an. Im weiteren zeitlichen Verlauf sind wiederum recht stark fluktuierende Luftschallamplituden messbar bis die Laserleistung abgeschaltet wird. Bei einer Laserleistung von $P = 400$ W dominiert das Wärmeleitschweißen. Die Verdampfung der Zinkbeschichtung erfolgt geometrisch im Bereich des Fokusfleckes der Laseroptik. Da der Luftschallsensor ebenfalls auf diesen Bereich ausgerichtet ist, kann er die hochfrequenten Luftschallemissionen empfangen.

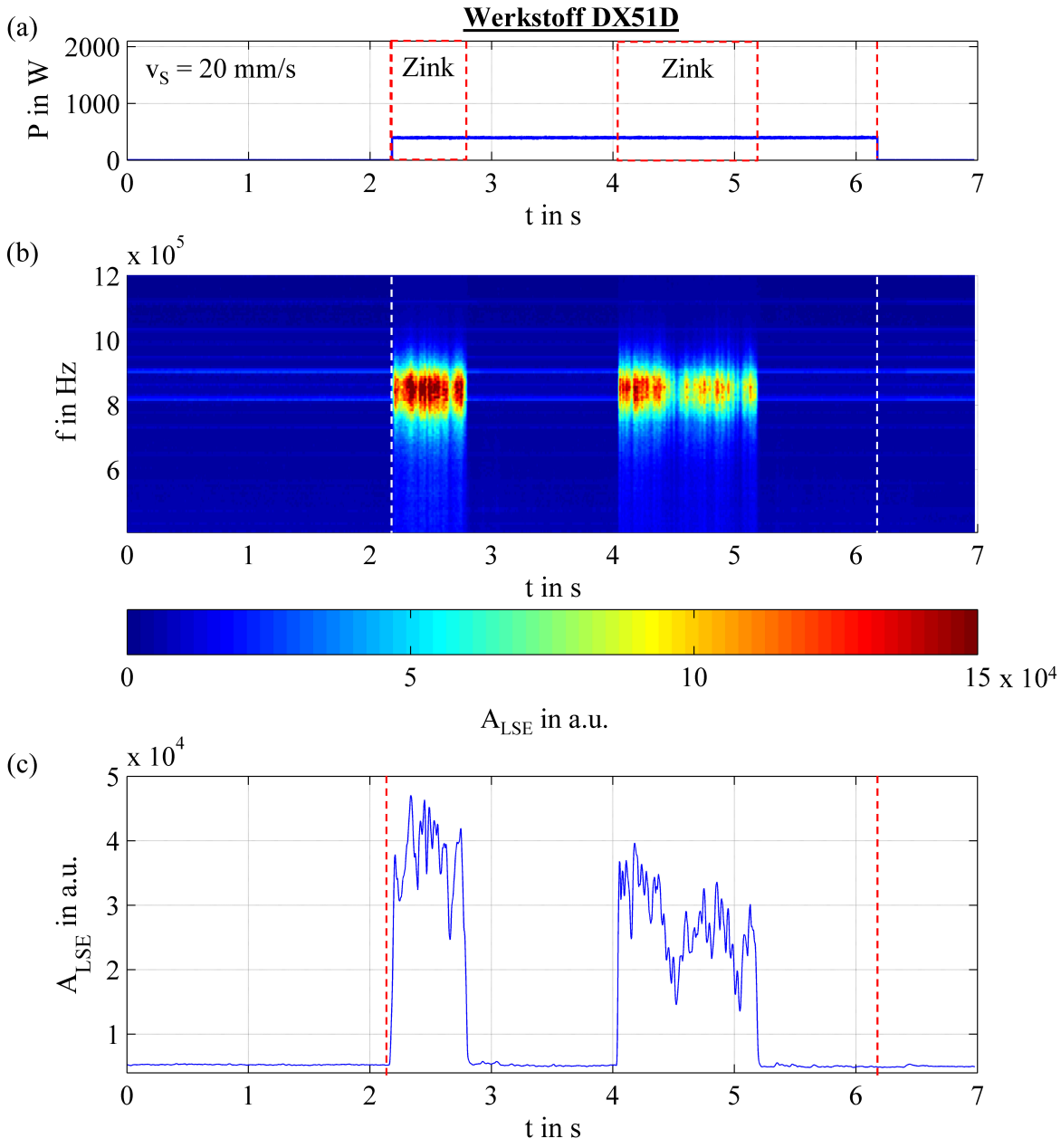



Abbildung 35: Luftschallemissionen beim Schweißen teilweise entschichteter Proben des Werkstoffes DX51D, P = 400 W; $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1981

P = 2000 W; $v_S$ = 20 mm/s

Beim Schweißen der Probe 1991 wurde die Laserleistung auf P = 2000 W (siehe Abbildung 36 (a)) bei einer Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s erhöht. Im STFT-Diagramm (siehe Abbildung 36 (b)) sind kaum signifikante Luftschallamplituden erkennbar. Gleiches zeigt sich im zeitlichen Verlauf von $A_{LSE}$, welcher in Abbildung 36 (c) dargestellt ist. Es sind lediglich im Anfangsbereich des Schweißprozesses, zwischen t = 2,2 s und t = 2,8 s, Luftschallemissionen messbar. Diese liegen im Vergleich zum Schweißen mit P = 400 W (siehe Abbildung 35) auf einem

deutlich niedrigeren Niveau von max. $A_{LSE} = 2 \cdot 10^4$. Der Übergang vom zinkbeschichteten Bereich zum entschichteten Bereich ist nicht mehr deutlich erkennbar. Das Gleiche gilt für den Übergang vom entschichteten zum zinkbeschichteten Bereich.

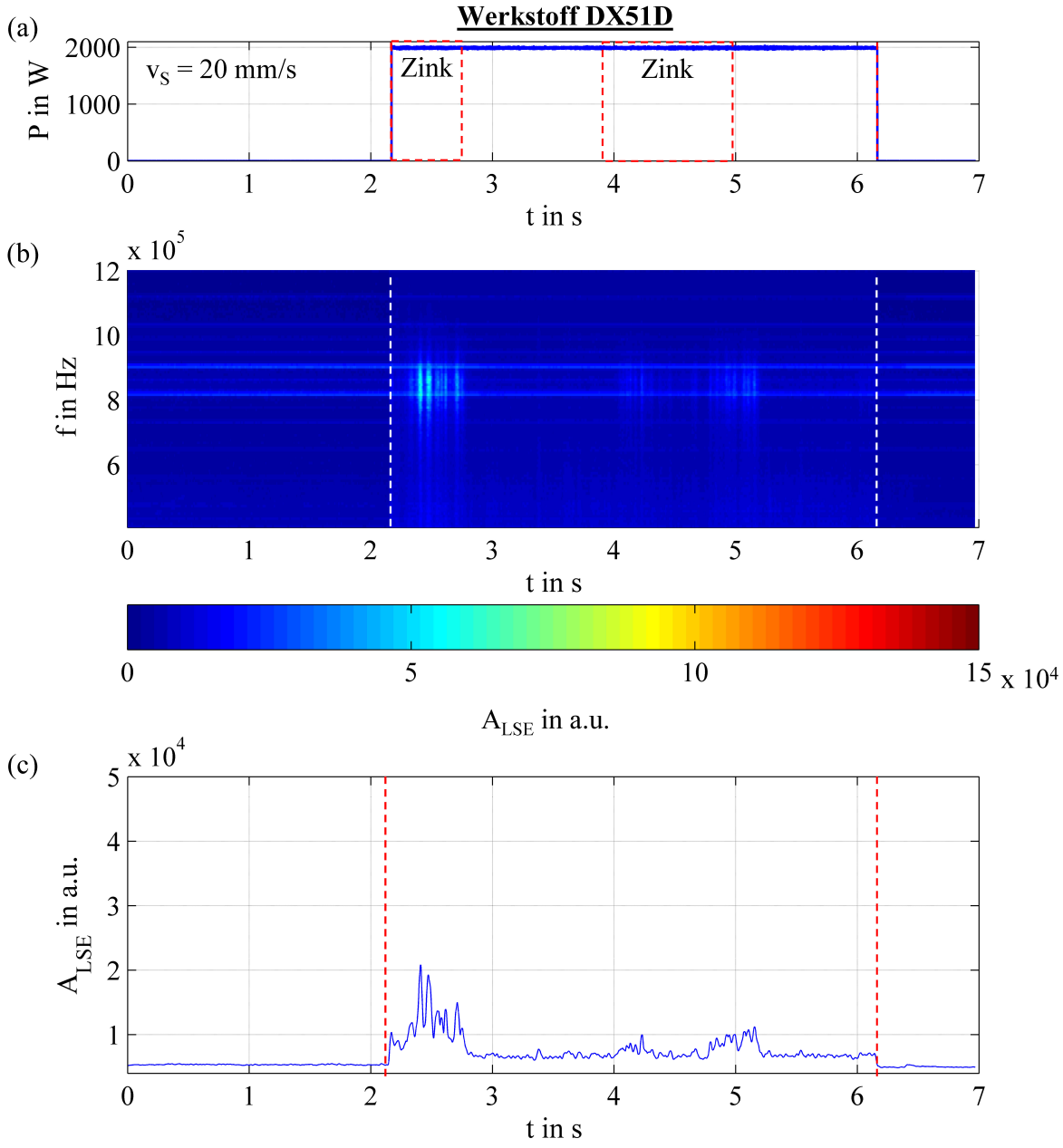



Abbildung 36: Luftschallemissionen beim Schweißen teilweise entschichteter Proben des Werkstoffes DX51D, P = 2000 W; $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1991

Aufgrund der hohen Laserleistung bildet sich eine Dampfkapillare, welche den Probenquerschnitt vollständig durchzieht (siehe Kapitel 5.1.3.4). Dadurch und durch das umgebende Schmelzbad findet die Verdampfung der Zinkbeschichtung nicht mehr im Bereich des Fokusfleckes, sondern in den Randbereichen um das Schmelzbad statt. Da die Wärmefront aufgrund der niedrigen

Schweißgeschwindigkeit deutlich der Position der Dampfkapillare vorausläuft, verdampft die Zinkbeschichtung vor dem Fokusfleck. Da der Luftschallsensor aber auf den Fokusfleck der Laseroptik ausgerichtet ist, sind die daraus resultierenden Luftschallemissionen nicht mehr bzw. nur mit sehr geringer Amplitude detektierbar. Aus gleichem Grund sind die Signale der Verdampfung der Zinkbeschichtung in den Randbereichen des Schmelzbades nicht mehr messbar.

P = 2000 W; $v_S$ = 50 mm/s

Abbildung 37 zeigt den Verlauf der Luftschallemissionen beim Schweißen von Probe 1986.

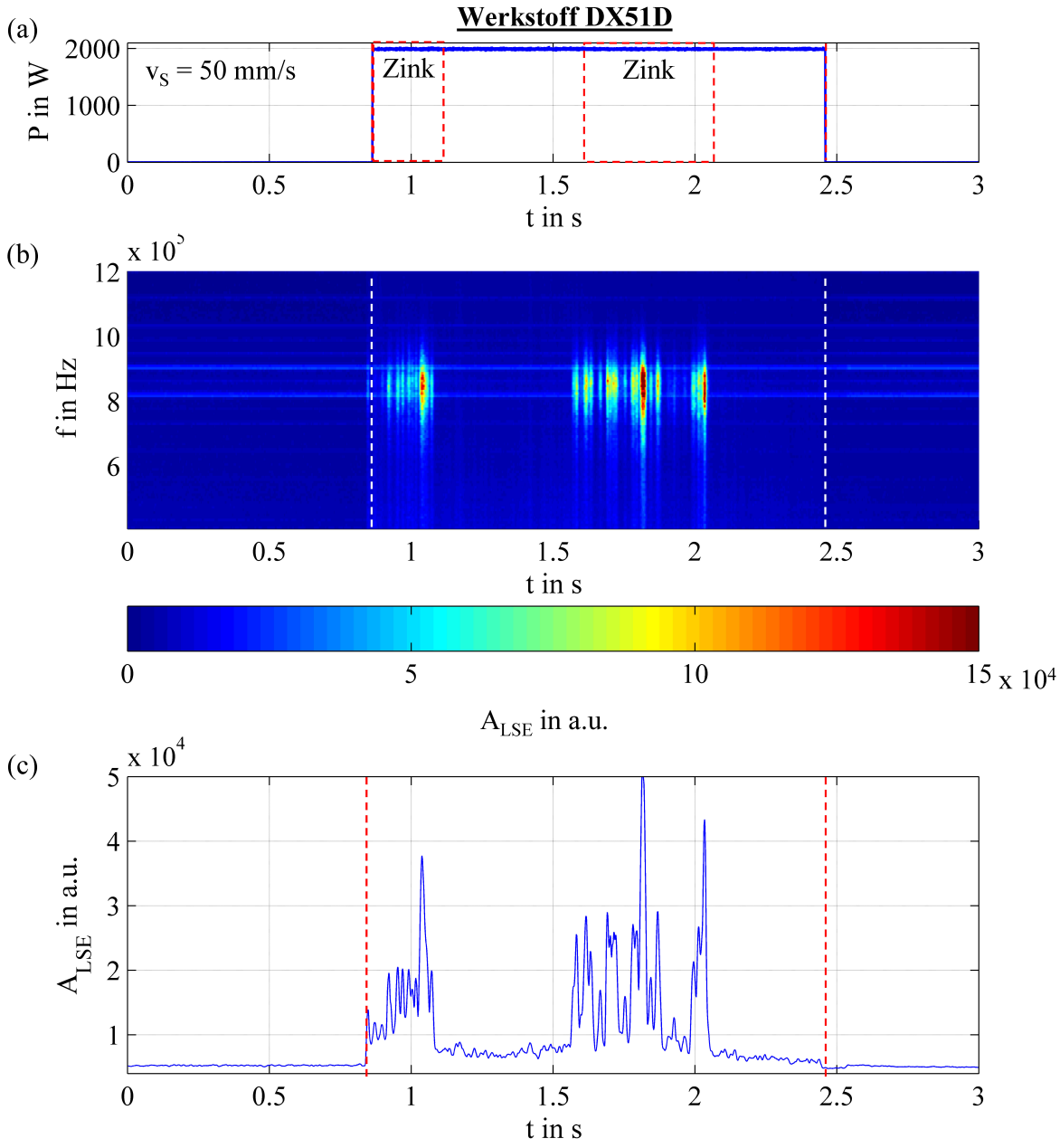



Abbildung 37: Luftschallemissionen beim Schweißen teilweise entschichteter Proben des Werkstoffes DX51D, P = 2000 W; $v_S$ = 50 mm/s; Probe 1986

Beim Schweißen von Probe 1986 (siehe Abbildung 37) wurde im Gegensatz zur Probe 1991 (siehe Abbildung 35) die Schweißgeschwindigkeit ($v_S$ = 50 mm/s) erhöht, wobei die Laserleistung (P = 2000 W) konstant gehalten wurde (vgl. Abbildung 37 (a)). Wie im STFT-Diagramm in Abbildung 37 (b) zu sehen ist, sind nun Luftschallemissionen im hochfrequenten Bereich messbar. Diese sind nur den Probenbereichen mit Zinkbeschichtung zuzuordnen, im entschichteten Bereich sind keine signifikanten Luftschallemissionen messbar. Der zeitliche Verlauf von $A_{LSE}$ in Abbildung 37 (c) zeigt schwankende Amplitudenwerte, welche aber im Vergleich zum Schweißen mit niedrigerer Schweißgeschwindigkeit auf höherem Amplitudenniveau liegen. Aufgrund der Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit bei hoher Laserleistung, kann nun die Wärmefront dem Schweißprozess bzw. der Position der Dampfkapillare nicht mehr so weit vorauslaufen. Dadurch findet die Verdampfung des Zinkes wieder geometrisch näher zum Fokusfleck der Laseroptik und damit zum Fokusbereich des Luftschallwandlers statt. Die Luftschallemissionen sind daher mit höherer Amplitude messbar, als beim Schweißen mit niedriger Schweißgeschwindigkeit.

#### 5.1.3.4 Schweißergebnis, Metallografie

P = 400 W; $v_S$ = 20 mm/s

Abbildung 38 zeigt die Ober- und die Unterseite der Probe 1981, welche mit P = 400 W und $v_S$ = 20 mm/s geschweißt wurde. Die Oberseite wurde teilweise entschichtet und die Unterseite ist vollständig mit Zink beschichtet. Die Schweißnaht ist deutlich als Wärmeleitschweißnaht ausgeprägt. Die Einschweißtiefe ist relativ gering im Verhältnis zur Schweißnahtbreite. Im Bereich der Zinkbeschichtung hat die Laserleistung ausgereicht, um im Schweißnahtbereich zu einer Verdampfung der Zinkbeschichtung zu führen. Die schwarzen Stellen in den entschichteten Bereichen können auf Rückstände des Schleifprozesses zurückzuführen sein.

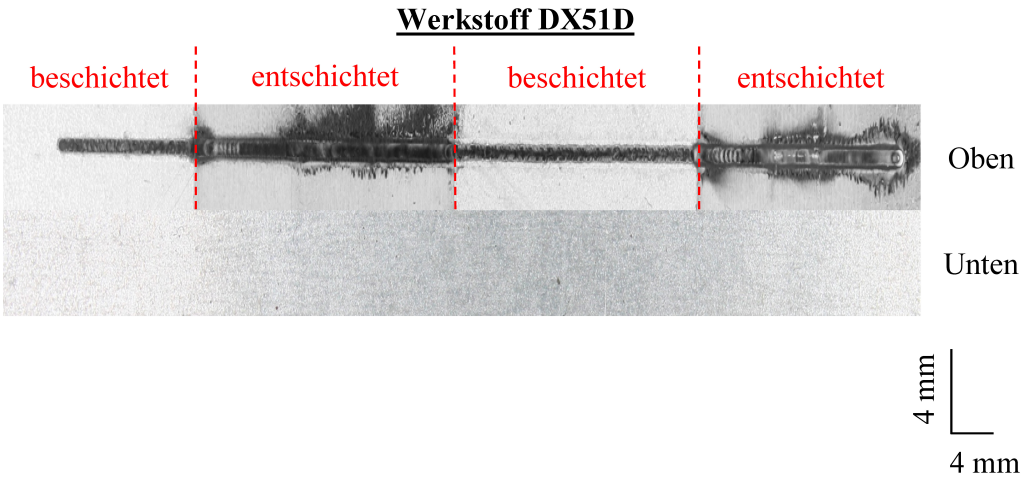



Abbildung 38: Schweißergebnis beim Schweißen teilweise entschichteter Proben des Werkstoffes DX51D, P = 400 W; $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1981

P = 2000 W; $v_S$ = 20 mm/s

Im Vergleich zum Schweißen mit geringerer Laserleistung, ist in Abbildung 39 die Ober- und Unterseite beim Laserschweißen der teilweise entschichteten Probe 1991 zu sehen. Mit diesen Parametern konnte der Probenquerschnitt vollständig durchgeschweißt werden. Im Bereich der Nahtober- und Unterseite ist die Zinkbeschichtung im kompletten Nahtbereich und auch in den Seitenbereichen der Schweißnaht verdampft.

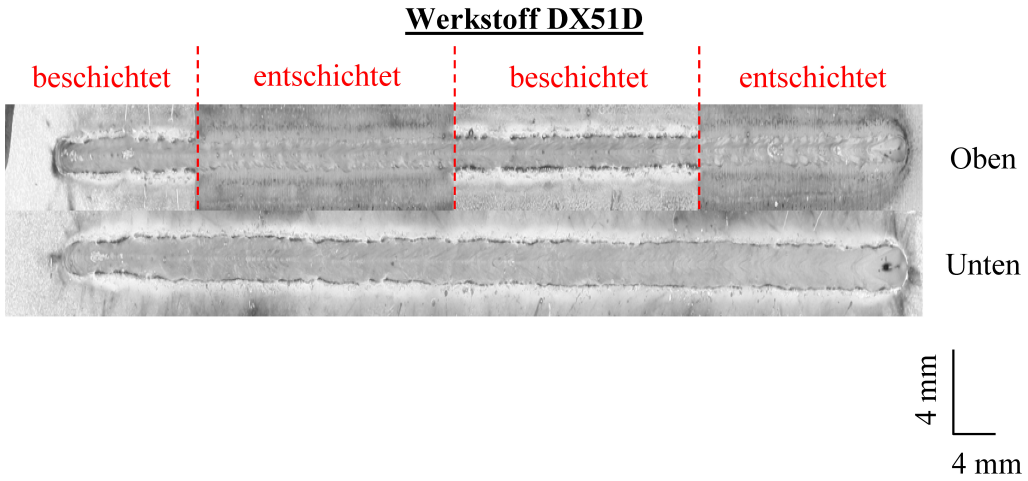



Abbildung 39: Schweißergebnis beim Schweißen teilweise entschichteter Proben des Werkstoffes DX51D, P = 2000 W; $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1991

P = 2000 W; $v_S$ = 50 mm/s

Abbildung 40 zeigt das Schweißergebnis der teilweise entschichteten Probe 1986 beim Schweißen mit P = 2000 W und $v_S$ = 50 mm/s.

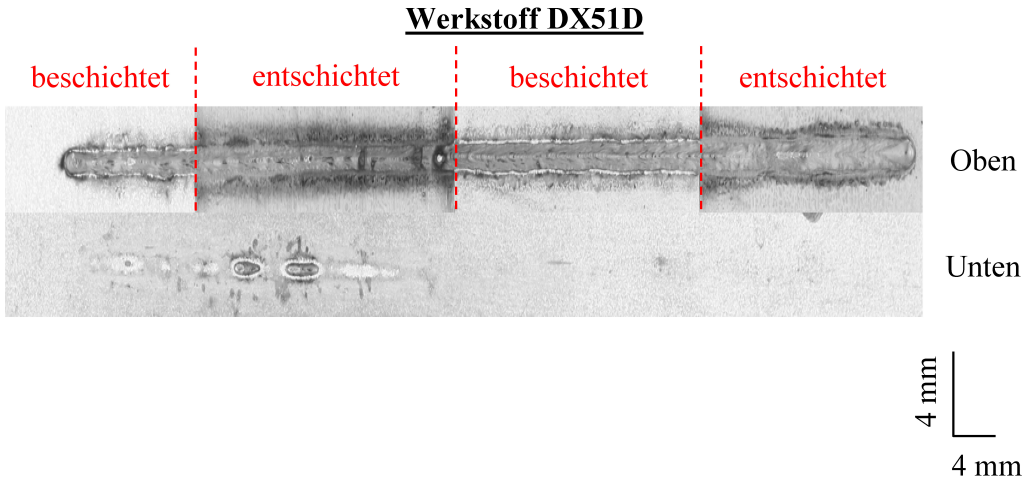



Abbildung 40: Schweißergebnis beim Schweißen teilweise entschichteter Proben des Werkstoffes DX51D, P = 2000 W; $v_S$ = 50 mm/s; Probe 1986

Im Vergleich zur vorher dargestellten Probe 1991 ist deutlich erkennbar, dass durch die höhere Schweißgeschwindigkeit nur ein sehr kleiner Probenbereich überhaupt ansatzweise durchgeschweißt werden konnte. Auch die Breite der Nahtoberseite ist relativ starken Schwankungen unterlegen. Die Entschichtung infolge des Wärmeeintrags beim Schweißen ist im kompletten Schweißnahtbereich erfolgt. Jedoch sind die Randbereiche im Vergleich der zuvor dargestellten Probe 1991 weniger breit entschichtet. Dies liegt an der höheren Schweißgeschwindigkeit, welche dazu führt, dass in den Randbereichen die für die Zinkverdampfung nötige Temperatur nicht in einem so breiten Bereich überschritten wird.

#### 5.1.3.5 Zwischenfazit

In den vorherigen Abschnitten konnte gezeigt werden, dass die Zinkbeschichtung keinen direkten Einfluss auf die Entstehung von hochfrequenten Körperschallemissionen hat. Die Entstehung von hochfrequenten Luftschallemissionen wird dahingegen sehr stark von den Verdampfungsprozessen der Zinkbeschichtung beeinflusst. Im Gegensatz zu den beobachteten Luftschallemissionen beim Laserschweißen unbeschichteter Werkstoffe haben die Schallemissionen bei zinkbeschichteten Werkstoffen einen anderen Frequenzinhalt. Es konnte auch gezeigt werden, dass je nach Stellparametern des Schweißprozesses der Ort der Zinkverdampfung variiert. Ein fest auf den Fokuspunkt des Lasers ausgerichteter Luftschallsensor mit sehr stark ausgeprägter Richtcharakteristik liefert dabei entsprechend unterschiedliche Ergebnisse.

### 5.1.4 Modell zur Schallentstehung

Zur Diskussion und Erklärung der Messeffekte, welche in den beiden vorherigen Kapiteln dargestellt sind, soll in diesem Abschnitt ein Modell zur Schallentstehung aufgestellt werden. Dies muss für die Körperschallemissionen und die Luftschallemissionen getrennt betrachtet werden, da teilweise andere Schallursachen für die akustischen Emissionen vorliegen. Nach dem aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft existieren keine theoretischen Grundlagen zu Schallemissionen beim Laserstrahlschweißen in dem betrachteten Frequenzbereich. Daher ist das vorgeschlagene Modell zunächst als Arbeitshypothese anzusehen, wobei die im Rahmen der Dissertation gemachten Untersuchungen und die vorliegenden Ergebnisse die Basis hierfür bilden. Für das Modell soll ausschließlich der qualitative Signalverlauf analysiert werden und in die Modellbildung einfließen. Die absoluten Schallamplituden liefern u.U. eine zusätzliche Information zum Schweißprozessverlauf, sollen jedoch in diesem Modell nicht betrachtet werden, da sie stark vom jeweiligen Versuchsaufbau, Sensorposition, Sensoranordnung, etc. abhängen. Das Modell beinhaltet den qualitativen Zusammenhang zwischen den akustischen Amplituden A und der eingestellten Laserleistung P unter Berücksichtigung des Einschweißtiefenverlaufes mit seinen charak-

teristischen Punkten. Zu diesen gehören die Schwelle zwischen dem Wärmeleitschweißen und dem Übergangsbereich bzw. dem Tiefschweißen sowie die Durchschweißung.

#### 5.1.4.1 Körperultraschallemissionen

Die Messungen haben gezeigt, dass der qualitative Signalverlauf der Körperschallemissionen beim Schweißen ohne Zinkbeschichtung (DC04) und mit Zinkbeschichtung (DX51D, S235JR+Z) vergleichbar ist. Auch eine teilweise Entfernung der Zinkbeschichtung der Schweißproben hat keinen Einfluss auf das Körperschallsignal gezeigt. Daher spielt für die Modellbildung nur der Zusammenhang zwischen Körperschallamplitude $A_{KSE}$ und der eingestellten Laserleistung P eine Rolle. Der schematische Verlauf der Körperschallamplituden $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Laserleistung P ist in Abbildung 41 dargestellt. Hier sind auch die verschiedenen Prozessbereiche markiert. Dies sind die Schwelle vom Wärmeleitschweißen (WLS) zum Übergangsbereich bzw. zum Tiefschweißen (Ü / TS) sowie die Durchschweißung (DS) des kompletten Probenquerschnittes. Dieser Verlauf bildet die Grundlage des Modells zur Klärung der Körperschallursachen beim Laserstrahlschweißen. Der gesamte Laserleistungsbereich wurde in drei Abschnitte (I, II, III) untergliedert.

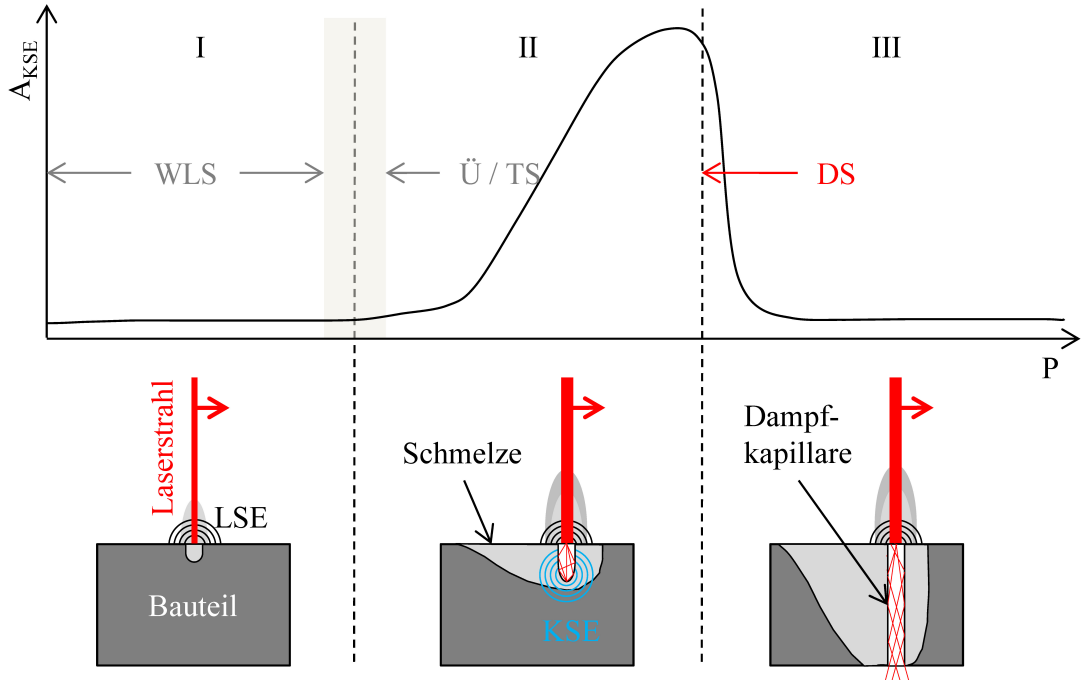



Abbildung 41: Modell zu Entstehung von Körperultraschallemissionen beim Laserstrahlschweißen

In Abschnitt I dominiert das WLS. Der Werkstoff wird durch die einfallende Laserstrahlung bei niedrigen Laserleistungen zunächst oberflächlich erwärmt. Die Wärme verteilt sich vorwiegend durch den Effekt der Wärmeleitung im Bauteil. Wird die Laserleistung erhöht, so wird, je nach Werkstoff, die Schmelztemperatur überschritten. Ein linsenförmiges Schmelzbad bildet sich. Bei

beschichteten Blechen erfolgt, je nach Beschichtungswerkstoff, auch die Aufschmelzung und die Verdampfung der Beschichtung. Gerade bei zinkbeschichteten Blechen erfolgt dies bereits bei relativ niedrigen Laserleistungen, da die Siedetemperatur von Zink mit ca. 900 °C deutlich unter der Siedetemperatur von Stahl liegt. Je nach Laserleistungsdichte erfolgt auch schon eine Verdampfung des Grundwerkstoffes. In diesem Bereich I ist kein Körperschall messbar.

In Abschnitt II (siehe Abbildung 41) reicht die Laserleistung zur oberflächlichen Verdampfung des Grundwerkstoffes mit höheren Verdampfungsdrücken aus. Ist der Dampfdruck hoch genug, kann sich die Dampfkapillare bilden. Dies ist der Übergangsbereich zum Tiefschweißen hin. Im Tiefschweißen ist die gebildete Dampfkapillare stabil und die Einschweißtiefe steigt nun durch die Mehrfachreflexionen der einfallenden Laserstrahlung an den Wänden der Dampfkapillare stark mit weiterer Erhöhung der Laserleistung an. Dies ist darin begründet, dass die Laserstrahlung durch diese Mehrfachreflexionen am Boden der Dampfkapillare konzentriert wird. Diese Konzentration führt hier zu dynamischen Verdampfungsprozessen, welche ein breitbandiges Körperschallsignal erzeugen. Aus dem Charakter der Breitbandigkeit lässt sich schließen, dass es sich hierbei um impulsartige Vorgänge handelt, wie z.B. Kavitationen. Wird die Laserleistung weiter gesteigert, so steigt die Einschweißtiefe an. Die Amplitude des Körperschallsignals steigt ebenfalls an, da durch die Erhöhung der Laserleistung noch mehr Energie zum Boden der Dampfkapillare gelangen kann. Dadurch werden die dort ablaufenden Verdampfungsprozesse intensiviert.

In Abschnitt III (siehe Abbildung 41) erfolgt die Durchschweißung der Probe. Die Dampfkapillare öffnet sich nach unten. Bei anfänglichen Laserleistungen im Bereich III ist zunächst nur ein Teil des Dampfkapillarbodens nach unten geöffnet. Dadurch gelangt nur noch ein Teil der an den Wänden mehrfach reflektierten Laserstrahlen zum verbleibenden Rest des Bodens der Dampfkapillare. Der restliche Teil tritt nach unten hin aus der Probe aus. Aufgrund dessen sinkt die Körperschallamplitude trotz Erhöhung der Laserleistung ab, sobald die Probe teilweise durchgeschweißt wird. Bei weiterer Erhöhung der Laserleistung, kann die Dampfkapillare die Probe in vollem Durchmesser durchziehen. Es findet keine Interaktion der einfallenden Laserleistung mit dem Dampfkapillarboden mehr statt, wodurch das akustische Signal vollständig auf Grundrauschniveau absinkt.

Die hauptsächliche Schallquelle von hochfrequenten, breitbandigen Körperschallemissionen ist also die Interaktion der einfallenden Laserstrahlung mit dem Dampfkapillarboden. Hier werden breitbandige Schallsignale erzeugt, welche dem Tiefschweißprozess zugeordnet werden können. Sobald eine Durchschweißung der Probe erfolgt, sinkt die Amplitude der Körperschallemissionen. Hat die Dampfkapillare die Probe vollständig durchzogen, so ist das Körperschallsignal in diesem Frequenzbereich nicht mehr messbar.

#### 5.1.4.2 Luftultraschallemissionen

Da der Verlauf der Luftultraschallemissionen zum Teil deutlich von den Körperschallemissionen abweicht, ist es notwendig, die hier auftretenden Effekte separat zu beschreiben. Es ist zu vermuten, dass die Schallursachen von Körper- und Luftschallemissionen teilweise unterschiedlich sind. Die Messungen haben gezeigt, dass im Speziellen die Zinkbeschichtung der Proben einen erheblichen Einfluss auf den qualitativen Signalverlauf der Luftschallamplituden $A_{LSE}$ in Abhängigkeit der Laserleistung P hat. Das hier vorgestellte Modell zur Luftschallentstehung soll sowohl für unbeschichtete als auch für zinkbeschichtete Werkstoffe dienen. Als Basis werden dafür die durchgeführten Schweißversuche an den Werkstoffen DC04 (unbeschichtet) sowie DX51D und S235JR+Z (beide zinkbeschichtet) herangezogen.

Abbildung 42 zeigt den schematischen Verlauf der Amplitude der Luftschallemissionen $A_{LSE}$ in Abhängigkeit der Laserleistung P für niedrige Schweißgeschwindigkeiten. Analog zum vorherigen Kapitel in Bezug auf die Körperschallemissionen sind auch hier die charakteristischen Bereiche WLS, Ü/TS sowie DS eingezeichnet. Die Einteilung in die Abschnitte I, II und III ist ebenfalls analog zum vorherigen Kapitel.

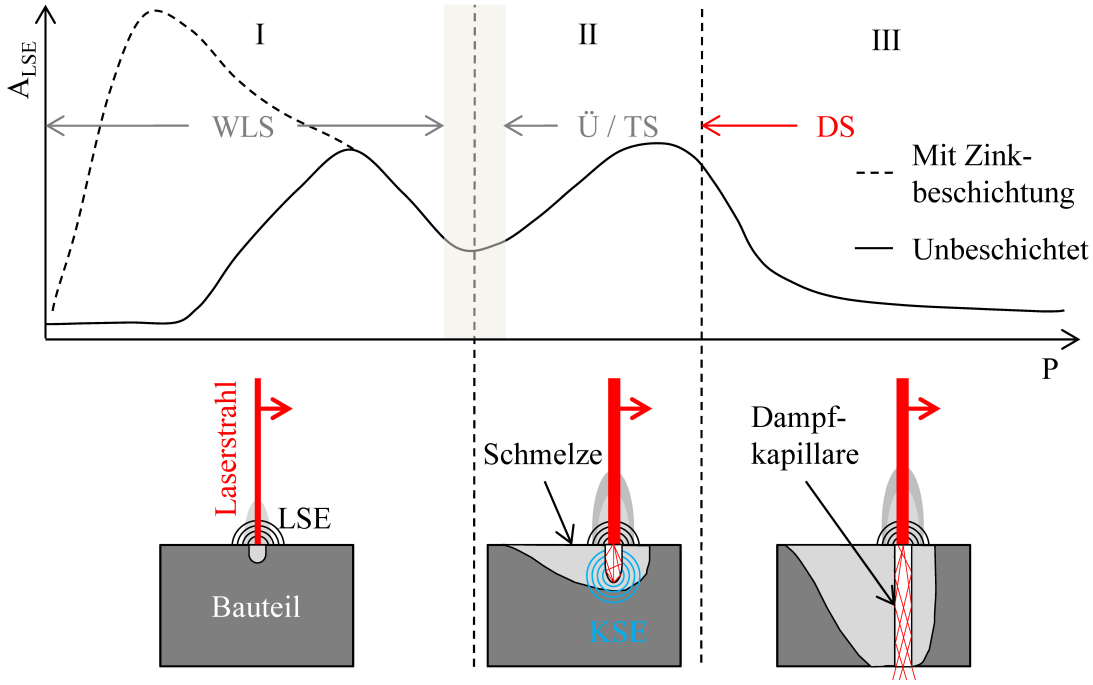



Abbildung 42: Modell zu Entstehung von Luftultraschallemissionen beim Laserstrahlschweißen für niedrige Schweißgeschwindigkeiten

Vor allem im niedrigen Laserleistungsbereich (Abschnitt I, Abbildung 42) ist der Verlauf von $A_{LSE}$ bei unbeschichteten Proben deutlich vom Verlauf zinkbeschichteter Proben zu unterscheiden. Bei Proben mit Zinkbeschichtung steigt das Signal bereits bei sehr niedrigen Laserleistungen

auf ein lokales Maximum an, wohingegen bei unbeschichteten Proben das Signal bei deutlich höheren Laserleistungen erst ansteigt. Das lokale Maximum liegt dann bei noch höheren Leistungswerten, aber auf einem deutlich niedrigeren Amplitudenniveau. Das Wärmeleitschweißen ist in diesem Bereich der dominierende Prozess. Das Bauteil wird mit steigender Laserleistung immer mehr erwärmt und aufgeschmolzen. Es kommt auch zum oberflächlichen Verdampfen der Bauteilwerkstoffe. Dies trifft sowohl auf die evtl. vorhandene Beschichtung als auch auf den Grundwerkstoff zu. In Abhängigkeit der Schmelz- und Siedetemperaturen der jeweiligen Werkstoffe ist die Reihenfolge unterschiedlich. Im Falle der Zinkbeschichtung beträgt der Schmelzpunkt ca. 420°C und der Siedepunkt ca. 910°C. Je nach Legierungsbestandteilen liegen der Schmelzpunkt von Stahl bei zwischen 1200°C und 1500°C und der Siedepunkt im Bereich zwischen 2500°C und 3000°C. Die Größenordnungen beider Temperaturen von Zink und Stahl sind also deutlich unterschiedlich. Damit kann die Schallursache und die Verschiebung auf der Laserleistungsachse begründet werden. Zuerst erfolgen die Zinkabdampfung und danach das Aufschmelzen des Stahlgrundwerkstoffes. Das lokale Maximum im Verlauf bei zinkbeschichteten Blechen beruht ursächlich auf dem Verdampfen der Zinkbeschichtung und der damit gekoppelten Verdrängung der umgebenden Luft. Dies führt zu Druckwellen mit unterschiedlichen Amplituden, welche der Luftschallsensor detektiert. Dieser hat einen sehr feinen Fokusfleck mit einem Durchmesser von 3 - 4 mm. Da die Verdampfung des Zinks beim Wärmeleitschweißen im Bereich des Fokusfleckes der Laseroptik stattfindet und Luftschallsensor und Laseroptik auf den gleichen Punkt fokussiert sind, kann eine Detektion stattfinden. Wird die Laserleistung weiter erhöht, so beginnt die Aufschmelzung des Grundwerkstoffes. Die Verdampfung der Zinkbeschichtung erfolgt nun bereits dem Schweißprozess vorlaufend, da die Schweißgeschwindigkeit im Rahmen der Versuche auf einen sehr niedrigen Wert von $v_s = 20$ mm/s eingestellt werden musste und die Wärmefront dem Laserspot vorausläuft. Der Luftschallsensor kann also das Signal nicht erfassen, da er auf den Fokusfleck der Laseroptik eingestellt ist und der Verdampfungsprozess der Zinkbeschichtung bei höheren Leistungen bereits vor diesem Fokusfleck stattfindet. Dadurch sinkt die Luftschallamplitude trotz größerer Mengen an verdampfendem Zink ab. Bei höheren Laserleistungen wird nun auch der Grundwerkstoff verdampft. Es entsteht durch diese Verdampfung, welche zunächst im Bereich des Fokusfleckes der Laseroptik stattfindet, ebenfalls ein Luftschallsignal analog zur Luftschallentstehung durch die Zinkverdampfung. Beide akustischen Signale aus der Verdampfung der Zinkbeschichtung und des Grundwerkstoffes überlagern sich am Ende des Abschnittes I. Hier sinkt die Amplitude $A_{LSE}$ auf ein lokales Minimum ab. Dieses Absinken trotz wiederum höherer abströmender Dämpfe aus Zinkbeschichtung und Grundwerkstoff kann geometrisch begründet werden. Die Fokussierung des Luftschallsensors erfolgt auf den Spot der Laseroptik, wo

sich nun die Dampfkapillare bildet. Dies bedingt eine nun mehr oder weniger gerichtete Abströmung der Dämpfe in gleicher Achse zur Dampfkapillare. Der Luftschallsensor ist jedoch dem Schweißprozess vorlaufend positioniert.

In Abschnitt II (siehe Abbildung 42) ist der Verlauf unabhängig von der Beschichtung der Proben identisch. Hier dominiert nach dem Übergangsbereich bei höheren Laserleistungen das Tiefschweißen. Es kommt, wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, zu Mehrfachreflexionen der einfallenden Laserstrahlung an den Wänden der Dampfkapillare. Somit erfolgt eine Konzentration der Energie am Boden der Dampfkapillare. Analog zur Entstehung der Körperschallemissionen sind auch im Luftschall breitbandige Schallemissionen messbar. Hier ist die Schallursache von Körper- und Luftschall identisch (siehe Kapitel 5.1.4.1).

Abschnitt III in Abbildung 42 ist ebenfalls analog zu den Körperschallemissionen zu sehen. Die Strahlungsintensität reicht nun aus, um die Proben durchzuschweißen. Zu Beginn genügt die Laserleistung nicht, damit die Dampfkapillare das Werkstück in vollem Umfang durchziehen kann. Das Luftschallsignal, welches hier auch die gleiche Ursache wie das Körperschallsignal hat (siehe Kapitel 5.1.4.1), sinkt bei steigender Laserleistung. Durchzieht die Dampfkapillare die Probe vollständig, so pendelt sich das Luftschallsignal $A_{LSE}$ auf einem niedrigen Niveau ein.

## 5.2 Übertragung der Ergebnisse auf Fügeverbindungen

Nachdem im vorherigen Kapitel die grundlegenden Korrelationen der Ultraschallemissionen mit der Laserleistung sowie der Einschweißtiefe erläutert wurden, soll die Übertragung der Ergebnisse von Blindschweißungen auf Überlapp- und Stumpfstoßverbindungen überprüft werden. Zunächst wird eine Beschreibung der Versuche hinsichtlich der wichtigen Paramater vorgenommen. Anschließend werden die Ergebnisse der Schallemissionsmessung für die Körper- und Luftschallemissionen dargestellt und mit dem Schweißergebnis bzw. der Metallografie verglichen.

### 5.2.1 Überlappverbindung

#### 5.2.1.1 Versuchsbeschreibung

Die Überlappschweißverbindung wird aus Blechen des Werkstoffes DC04 hergestellt, welche eine Blechstärke von t = 2 mm aufweisen (siehe Kapitel 4.3). Die Luft- und Körperschallemissionen werden nach dem in Kapitel 4.5.2 dargestellten Verfahren ausgewertet. Dafür wurden die Bereiche 400 kHz ≤ f ≤580 kHz für den Körperschall und der Bereich 400 kHz ≤ f ≤700 kHz für den Luftschall ausgewertet. Es wurden je ein Körperschallsensor auf der Spannvorrichtung für das Oberblech und ein Körperschallsensor auf der Spannvorrichtung für das Unterblech befestigt. Die Ausrichtung des Luftschallsensors ist identisch zu den vorherigen Versuchen. Die Laserleistung wird über eine lineare Rampe von Nullleistung auf P = 2000 W gesteigert (vgl. Abbildung 43 (a)).

#### 5.2.1.2 Körperschallemissionen, KSE

Oberblech (OB)

Abbildung 43 (a) zeigt den Verlauf der Laserleistung über der Zeit. Es handelt sich um eine lineare Rampe von minimaler Leistung von P ≈ 80 W auf maximale Laserleistung von P = 2000 W. Der Beginn und das Ende der Rampe sind in allen Diagrammen markiert.

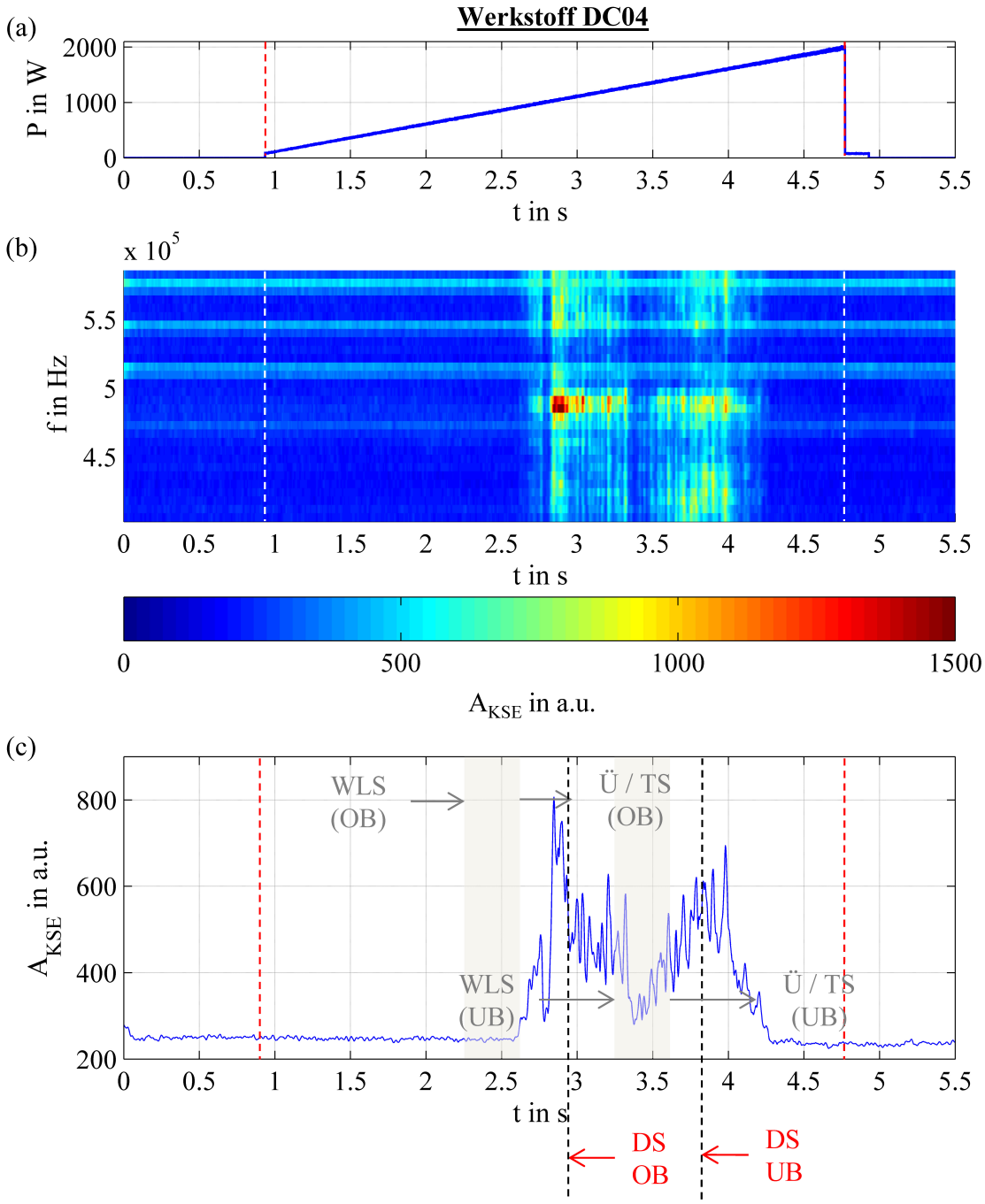



Abbildung 43: Laserleistung P über der Zeit t (a); STFT-Diagramm des KSE-Signals des Oberblechs (b); KSE-Amplitude $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (c) für Überlappschweißungen am Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1972

Das STFT-Diagramm der Körperschallemissionen in Abbildung 43 (b) zeigt breitbandige Signale im betrachteten Frequenzbereich, welche nicht über den gesamten Zeitraum der Laserleistungsrampe konstant sind. Eine Auswertung der Körperschallamplituden $A_{KSE}(t)$ ist in Abbildung 43 (c) abgebildet. Im Diagramm sind jeweils die metallografisch ermittelten charakteristischen Punkte des Einschweißtiefenverlaufes markiert (siehe Kapitel 5.2.1.4). Nachdem die Schwelle vom Wärmeleitschweißen zum Übergangsbereich bzw. zum Tiefschweißen überschritten wird, sind signifikante Körperschallemissionen messbar. Diese steigen auf einen lokalen Maximalwert von ca. $A_{KSE} \approx 500$ bei $t = 2{,}7$ s an. Danach erfolgt ein abrupter Signalabfall auf ein lokales Minimum bei $t = 2{,}75$ s. Bei weiterer Leistungssteigerung steigt auch das Körperschallsignal wieder rasch auf ein höheres lokales Maximum mit $A_{KSE} \approx 800$ bei $t = 2{,}85$ s an. Hier liegen auch die ermittelte Durchschweißung des Oberblechs (DS OB) und der Beginn der Einschweißung in das Unterblech und damit die Herstellung der eigentlichen Fügeverbindung der beiden Fügepartner. Bei weiterer Laserleistungssteigerung fällt das Signal auf ein lokales Minimum bei $t = 3{,}4$ s ab. Hier liegt die Schwelle des Wärmeleitschweißens zum Übergangsbereich bzw. zum Tiefschweißen für das Unterblech. Bei weiterer Laserleistungssteigerung wiederholt sich der Signalverlauf wieder. Es folgt wiederum ein Anstieg auf ein lokales Maximum bei $t = 4$ s gefolgt von einem Signalabfall auf Grundrauschniveau. Im Bereich des Ausschaltens des Lasers ist kein Signalabfall erkennbar. Die Durchschweißung des Unterbleches (DS UB) und damit des gesamten Fügequerschnittes erfolgt bei $t = 3{,}8$ s und daher unmittelbar vor dem Signalabfall des Körperschallsignals.

Die bisher erzielten Ergebnisse beim Schweißen von Blindproben sind also bezüglich der Körperschallsignale auf den Verlauf im Oberblech bei einer Überlappschweißung übertragbar. Sowohl der Signalanstieg beim Überschreiten der Schwelle vom WLS hin zum TS ist reproduzierbar als auch der Signalabfall nach der Durchschweißung des Oberbleches.

Unterblech (UB)

Der in Abbildung 44 dargestellte Signalverlauf des Unterblechkörperschallsensors unterscheidet sich deutlich vom im vorherigen Kapitel diskutierten Verlauf des Oberblechsensors. Der Bereich der Einschweißung in das Oberblech ist nur sehr schwach ausgeprägt. Signifikante Körperschallsignale sind im Unterblech erst ab $t = 3{,}5$ s messbar. Hier liegt die metallografisch ermittelte Schwelle zwischen dem Wärmeleitschweißen und dem Tiefschweißen im Unterblech. Von hier aus steigt das Körperschallsignal auf ein lokales Maximum von $A_{KSE} \approx 810$ bei $t = 4$ s. Die metallografisch ermittelte Durchschweißung des Unterbleches erfolgt schon kurz vorher bei $t = 3{,}8$ s. Der unterschiedliche Signalverlauf des Körperschalls im Unterblech ist mit dem Verlauf der Einschweißung zu erklären. Zu Beginn liegen die Fügepartner mehr oder weniger lose aufeinander, lediglich durch die Spannkraft der Spanner aufeinander gedrückt. Daher kann kaum Körperschall

von den Ereignissen im Oberblech in das Unterblech gelangen und vom Sensor detektiert werden. Erst die Herstellung der Fügeverbindung zum Unterblech erlaubt auch eine bessere Schallleitung. Darüber hinaus liegt nun die Schallquelle im Unterblech, da hier gleichzeitig der Einschweißvorgang startet. Die Übertragung der bisher gesammelten Erkenntnisse bezüglich des Verlaufs der Körperschallemissionen auf das Unterblech einer Überlappverbindung ist ähnlich wie beim Oberblech durchaus zulässig. Hier sind vor allem der Übergang zum Tiefschweißen im Unterblech und die Durchschweißung des Gesamtquerschnittes der Fügeverbindung reproduzierbar.

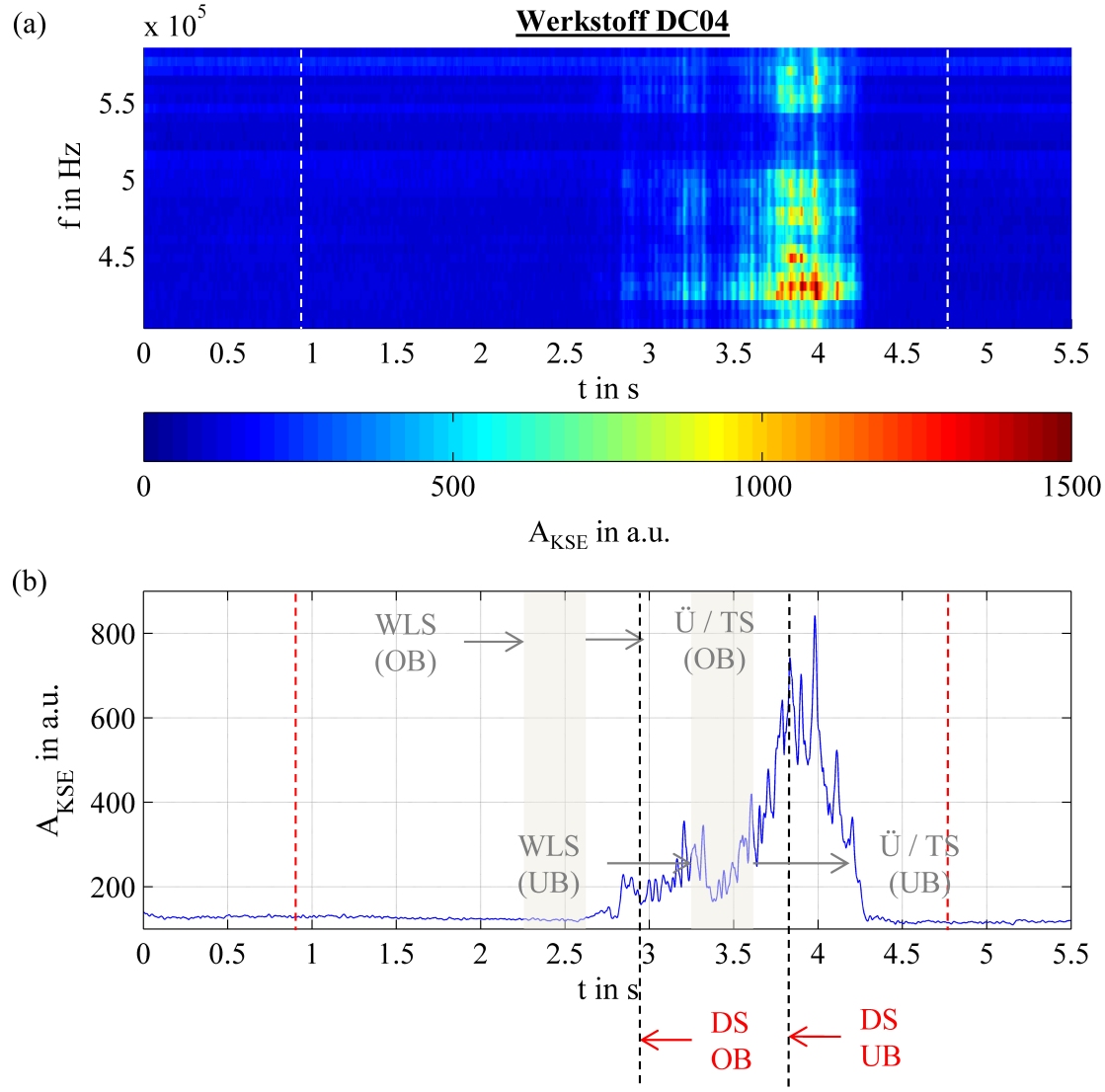



Abbildung 44: Diagramm des KSE-Signals des Unterblechs (a); KSE-Amplitude $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (b) für Überlappschweißungen am Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1972

#### 5.2.1.3 Luftschallemissionen, LSE

Das in Abbildung 45 dargestellte Luftschallsignal unterscheidet sich deutlich von den Körperschallsignalen. Bereits bei geringen Laserleistungen (t = 1,4 s) beginnt die Luftschallamplitude

auf ein lokales Maximum bei t = 1,8 s mit $A_{LSE} \approx 13000$ zu steigen. Wird die Laserleistung weiter gesteigert, sinkt das Luftschallsignal auf ein lokales Minimum bei t = 2,5 s ab. In diesem Bereich liegt auch die Schwelle vom Wärmeleitschweißen zum Übergangsbereich bzw. zum Tiefschweißen im Oberblech. Wird die Leistung weiter angehoben, so steigen die Luftschallamplituden wiederum an. Die Durchschweißung des Oberbleches bei t = 2,95 s führt nicht zu einem signifikanten Signalabfall des Luftschallsignals. Auch die Überschreitung der Schwelle vom Wärmeleitschweißen zum Übergangsbereich bzw. zum Tiefschweißen ist nicht von einem deutlichen Anstieg der Luftschallamplituden gefolgt. Die Durchschweißung des gesamten Fügequerschnittes bei t = 3,8 s hingegen führt auch bei der Überlappprobe zu einem deutlichen Abfall des Luftschallsignals.

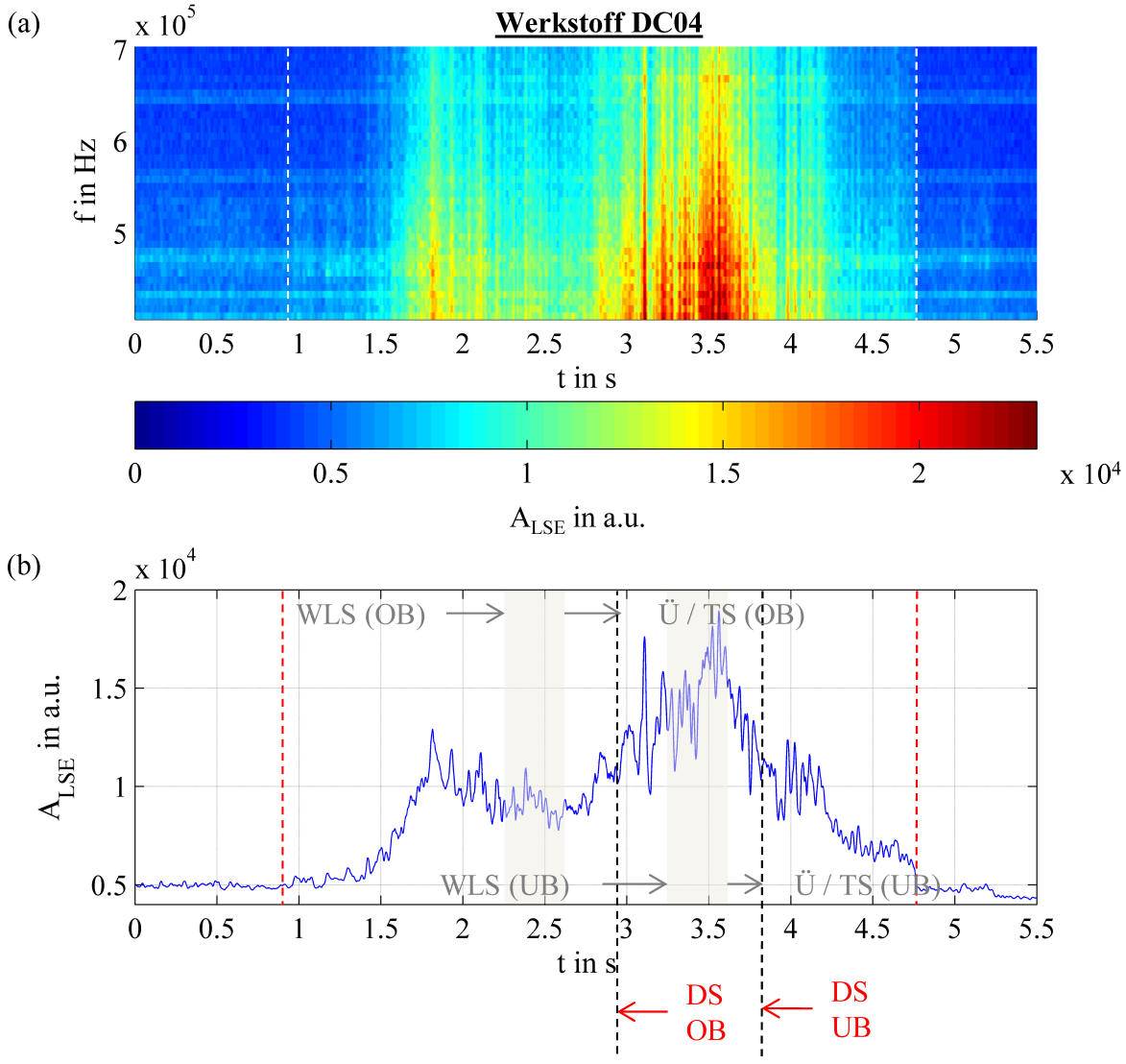



Abbildung 45: STFT-Diagramm des LSE-Signals (a); LSE-Amplitude $A_{LSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (b) für Überlappschweißungen am Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1972

Der bisher an den Blindschweißproben ermittelte Signalverlauf und das daraus aufgestellte Modell sind also nur bedingt auf Überlappschweißungen übertragbar. Die Überschreitung der Schwelle vom WLS zum TS ist an einem Signalabfall erkennbar. Auch die Durchschweißung des Gesamtquerschnittes führt zu einem vergleichbaren Signalabfall wie bei den Blindschweißungen.

#### 5.2.1.4 Schweißergebnis, Metallografie

Abbildung 46 zeigt den Laserleistungsverlauf (a), die Probenober- und –unterseite (b) sowie den Längsschliff (c) der Schweißprobe 1972 aus dem Werkstoff DC04, welche im Überlappstoß geschweißt wurde.

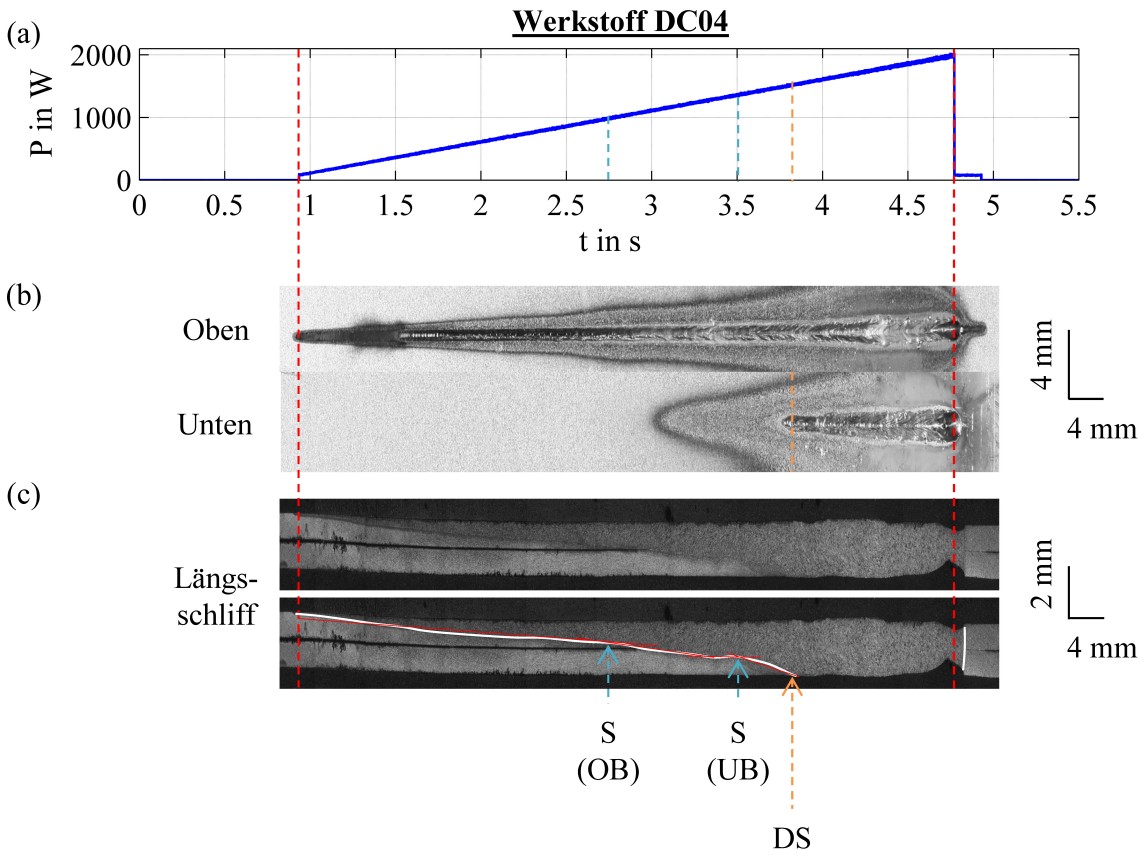



Abbildung 46: Schweißergebnis; Überlappprobe des Werkstoffes DC04, $v_S$ = 20 mm/s; Probe 1972

Deutlich ist sowohl an der Probenoberseite als auch an der Probenunterseite der Einfluss der linearen Leistungsrampe erkennbar. Die Schwelle vom Wärmeleitschweißen zum Übergangsbereich bzw. zum Tiefschweißen wird im Oberblech bei t = 2,7 s überschritten, was an der Veränderung der Steigung des Einschweißtiefenverlaufes erkennbar ist. Im Unterblech ist wiederum eine deutliche Veränderung der flachen Steigung der Einschweißtiefe hin zu einer steileren Einschweißtiefe erkennbar, was darauf schließen lässt, dass durch den Übergang vom Oberblech in das Unter-

blech für kurze Zeit das Wärmeleitschweißen der dominierende Prozess ist. Die Schwelle wird bei t = 3,5 s überschritten. Die Einschweißung in das Unterblech beginnt bei t = 2,9 s. Die Durchschweißung der gesamten Überlappverbindung findet bei t = 3,8 s statt.

### 5.2.2 Stumpfstoßverbindung

#### 5.2.2.1 Versuchsbeschreibung

Ähnlich wie im vorherigen Kapitel soll nun die Übertragbarkeit der Ergebnisse zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen mittels Schallemissionen überprüft werden. Die Laserleistung wurde ebenfalls einer sägezahnförmigen Modulation unterzogen, um die verschiedenen Prozessbereiche wie Ein- und Durchschweißen untersuchen zu können. Der Laserleistung wird dabei im Intervall zwischen P = 80 W und P = 2000 W linear variiert. Die Schweißgeschwindigkeit beträgt bei allen Versuche konstant $v_S$ = 20 mm/s. Die Datenauswertung ist nach dem im Kapitel 4.5.2 beschriebenen Vorgehen durchgeführt worden, wobei die Frequenzbereiche 400 kHz ≤ f ≤ 580 kHz für die Körperschallemissionen und das Intervall 400 kHz ≤ f ≤ 700 kHz für den Luftschallemissionen ausgewertet wurden. Als Werkstoff wurde der in Kapitel 4.3 aufgeführte Stahl DC04 in einer Blechstärke von t = 2 mm im Stumpfstoß verschweißt. Die beiden Fügepartner werden im Folgenden als Fügepartner 1 und Fügepartner 2 bezeichnet. Dabei wird je ein Körperschallsensor auf jeder Fügepartnerseite platziert, um eine Aussage über die Vergleichbarkeit der Signale beider Bleche zu erhalten. Simultan werden ebenfalls die Luftschallemissionen, wie im Kapitel 4.4 beschrieben, erfasst.

#### 5.2.2.2 Körperschallemissionen, KSE

Fügepartner 1

Die in Abbildung 47 gezeigten Körperschallemissionen von Fügepartner 1 einer Stumpfstoßverbindung sind mit den Körperschallemissionen bei gleicher Laserleistungsmodulation beim Blindschweißen des gleichen Werkstoffes (siehe Kapitel 5.1.2.2) vergleichbar. Der in Teil (a) der Abbildung 47 dargestellte Laserleistungsverlauf enthält die Markierungen der Bereiche 1-3. Hier ist der Laserleistungsverlauf von Minimal- bis Maximalleistung vollständig linear. Die STFT des Körperschallsignals in Abbildung 47 (b) zeigt breitbandige Schallemissionen über den gesamten Frequenzbereich. Werden die Körperschallamplituden $A_{KSE}$ daraus extrahiert, ergibt sich der in Abbildung 47 (c) dargestellte zeitliche Verlauf. Hier sind die Bereiche 1-3 markiert, in denen signifikante Körperschallemissionen detektierbar sind. Ebenfalls markiert sind die in Abschnitt 5.2.2.4 ermittelten Zeitpunkte, ab denen die beiden Fügepartner der Stumpfstoßverbindung durchgeschweißt werden konnten. Wie auch schon bei den Blindschweißungen ermittelt, fallen die Zeitpunkte, ab der die Probe auch im Stumpfstoß durchgeschweißt werden kann, mit dem Abfall

der Körperschallamplitude $A_{KSE}$ zusammen. Für den markierten Bereich 1 beginnt die Durchschweißung im Bereich des lokalen Maximums von $A_{KSE}$ bei t = 3,2 s. Für den Bereich 2 liegt der Beginn der Durchschweißung bei t = 4,2 s. Hier ist das lokale Maximum von $A_{KSE}$ bereits überschritten, das Körperschallsignal ist schon am Abfallen. Im Bereich 3 ist das Körperschallsignal im Vergleich zu den Bereichen 1 und 2 deutlich geringer in Bezug auf die absolute Amplitude ausgeprägt. Es sind zwei nacheinander folgende lokale Maxima im Verlauf von $A_{KSE}$ erkennbar. Der Durchschweißungsbeginn liegt zwischen diesen beiden Maxima.

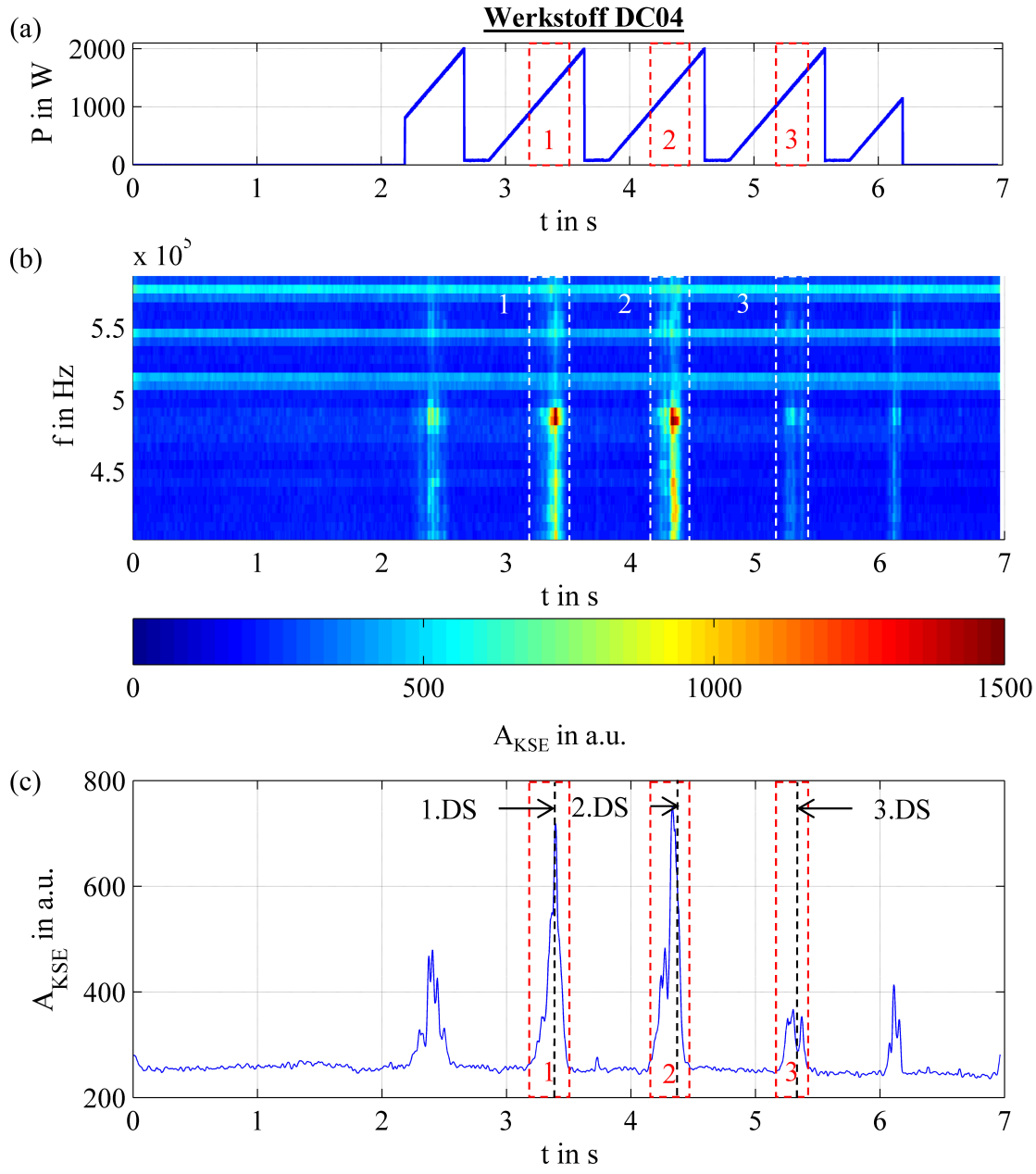



Abbildung 47: Laserleistung P über der Zeit t (a); STFT-Diagramm des KSE-Signals von Fügepartner 1 der Stumpfstoßverbindung (b); KSE-Amplitude $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (c); Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 2027

Fügepartner 2

Für den Fügepartner 2 der Stumpfstoßverbindung ist das Körperschallsignal in Abbildung 48 dargestellt.

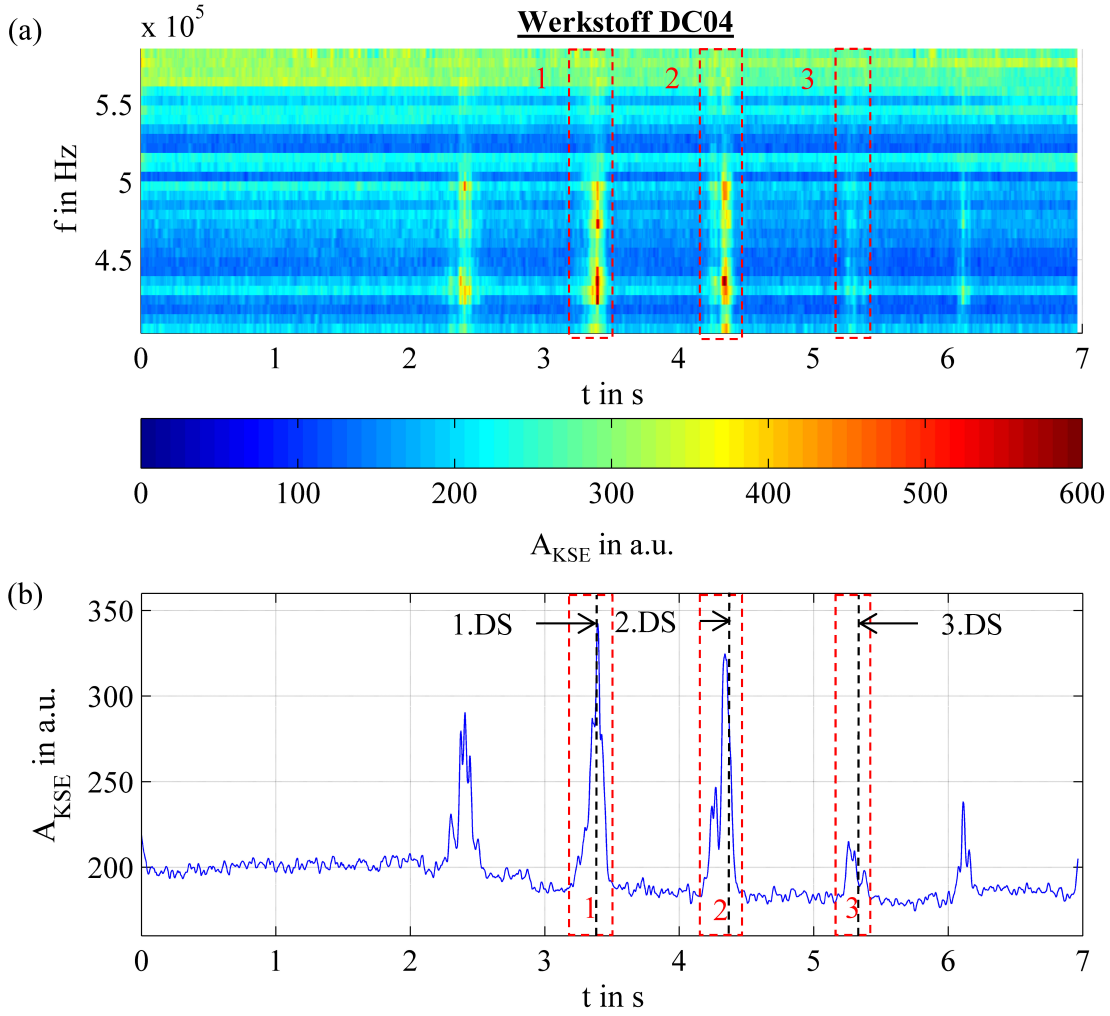



Abbildung 48: STFT-Diagramm des KSE-Signals von Fügepartner 2 der Stumpfstoßverbindung (a); KSE-Amplitude $A_{KSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (b); Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 2027

Aus dem STFT-Diagramm (siehe Abbildung 48 (a)) ist erkennbar, dass der Signal-Rausch Abstand im Vergleich zu Fügepartner 1 deutlich schlechter ist. Qualitativ ist jedoch im zeitlichen Verlauf, sowohl im STFT-Diagramm als auch im abgeleiteten Verlauf der Körperschallamplitude $A_{KSE}$, kein Unterschied zum Fügepartner 1 erkennbar. Für den Bereich 1 liegt die zeitliche Durchschweißung der Fügepartner im Bereich des Signalmaximums von $A_{KSE}$. Für den Bereich 2 liegt die Durchschweißung in einem Bereich, im dem das Körperschallsignal bereits nach dem Erreichen des lokalen Maximums wieder abfällt. Die Körperschallamplitude im Bereich 3 ist auch bei Fügepartner 2 in Bezug auf die Amplituden deutlich geringer ausgeprägt als in den Bereichen 1

und 2. Hier sind jedoch keine zwei ausgeprägten Maxima im Gegensatz zu Fügepartner 1 erkennbar. Die Durchschweißung findet statt, kurz nachdem das Körperschallsignal das lokale Maximum überschritten hat.

#### 5.2.2.3 Luftschallemissionen, LSE

Auch der Verlauf der Luftschallemissionen beim Schweißen einer Stumpfstoßprobe ist mit Blindschweißungen vergleichbar. Dies zeigt Abbildung 49.

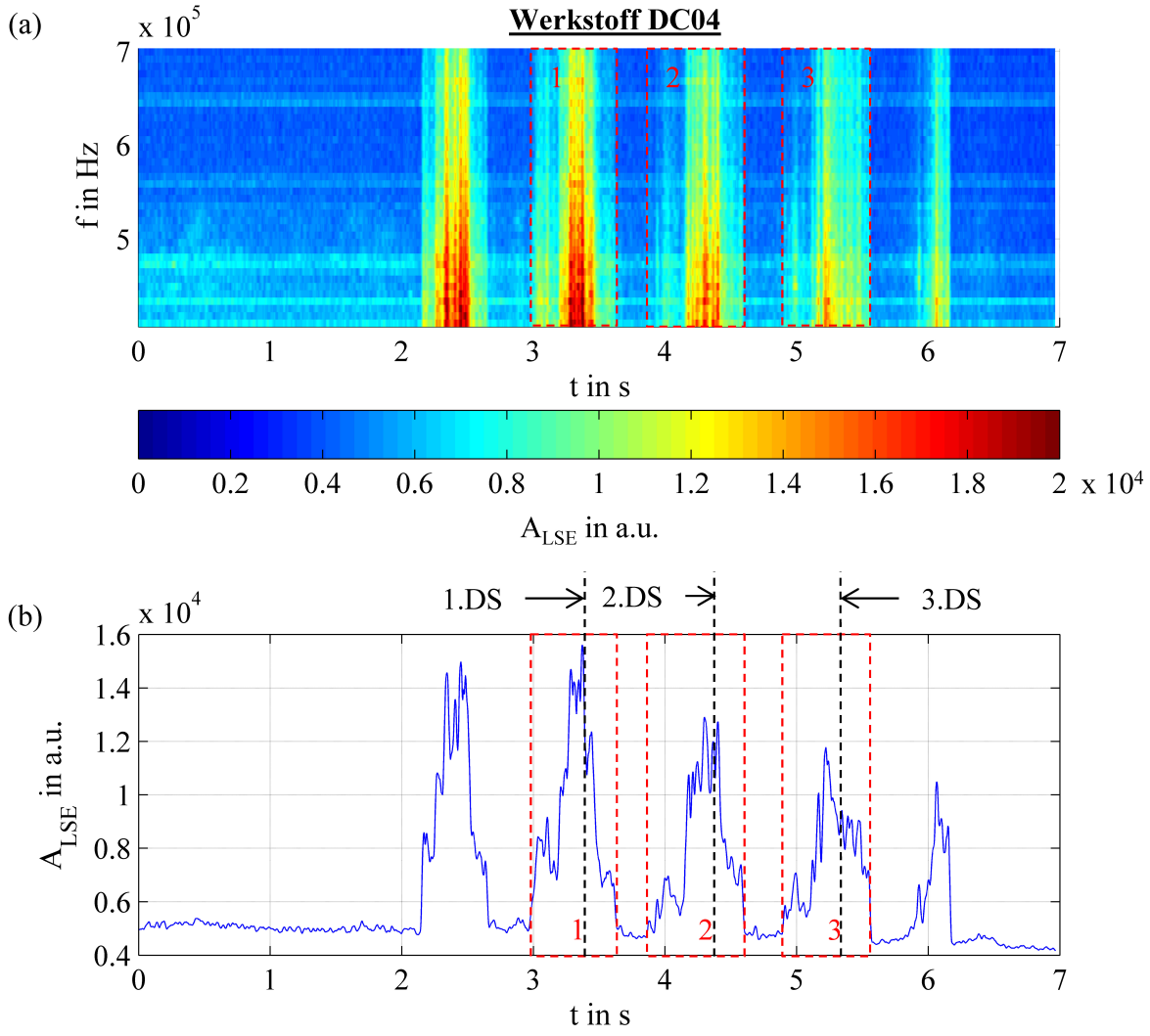



Abbildung 49: STFT-Diagramm des LSE-Signals der Stumpfstoßverbindung (a); LSE-Amplitude $A_{LSE}$ in Abhängigkeit der Zeit t (b) Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Probe 2027

Das in Abbildung 49 (a) dargestellte STFT-Diagramm zeigt breitbandige Luftschallemissionen über einen breiten Teil der modulierten Laserleistung in den Bereichen 1-3. Der daraus abgeleitete Verlauf der Luftschallamplituden $A_{LSE}(t)$ in Abbildung 49 (b) macht deutlich, dass für alle drei betrachteten Bereiche ein ähnlicher Verlauf wie bei Blindschweißungen nachgewiesen werden

kann (siehe Kapitel 5.1.2.3). Es sind auch bei Stumpfstoßschweißungen in jedem der drei betrachteten Bereiche zwei ausgeprägte lokale Maxima erkennbar. Nach Erreichen des zweiten lokalen Maximums erfolgt in allen drei Bereichen bei weiterer Laserleistungssteigerung die Durchschweißung der Stumpfstoßfügeverbindung.

#### 5.2.2.4 Schweißergebnis, Metallografie

Abbildung 50 zeigt in Teil (a) nochmals den zeitlichen Verlauf der modulierten Laserleistung beim Schweißen von Stumpfstoßprobe 2027 inklusive der Markierungen der in den beiden vorherigen Abschnitten betrachteten drei Bereiche. In Abbildung 50 (b) sind die Ober- und Unterseite dieser Probe dargestellt. Deutlich ist der Einfluss der Laserleistungsmodulation auf das Schweißergebnis erkennbar. Auf der Probenunterseite ist jeweils der Beginn der Durchschweißung in den zuvor betrachteten drei Bereichen markiert. Diese Markierung wurde in den in Teil (a) der Abbildung 50 dargestellten Laserleistungsverlauf übertragen. Es können somit die jeweiligen Zeitpunkte des Beginns der Durchschweißung bestimmt werden. Diese liegen für den Bereich 1 bei t = 3,25 s, für den Bereich 2 bei t = 4,25 s und für den Bereich 3 bei t = 5,2 s. Diese Werte wurden in die in den vorherigen Abschnitten diskutierten Verläufe der Luft- und Körperschallemissionen übertragen. Eine gesonderte Ermittlung der Schwelle zwischen dem Wärmeleitschweißen sowie dem Übergangsbereich bzw. zum Tiefschweißen konnte aufgrund der schlechten Schnittkantenqualität (Schlagscherenschnitt) nicht durchgeführt werden.

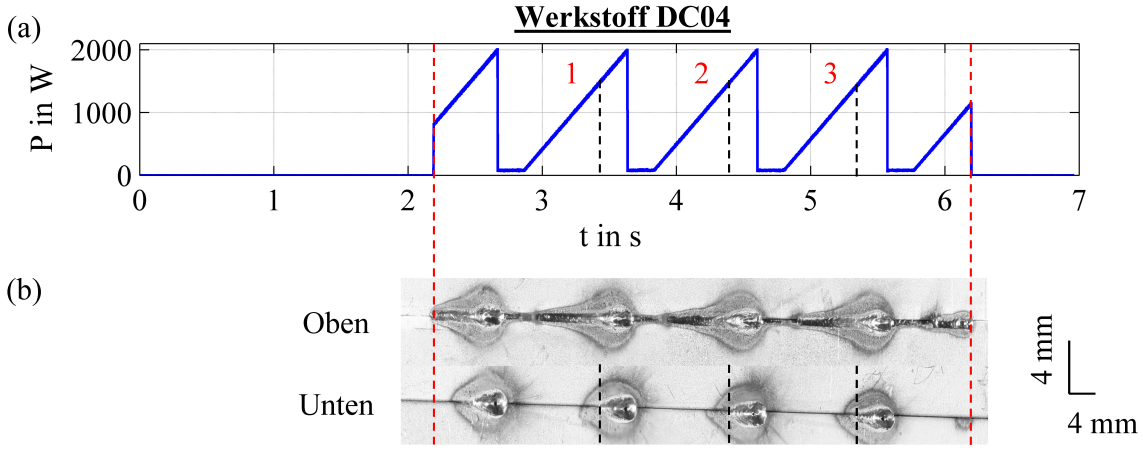



Abbildung 50: Schweißergebnis beim Schweißen von Stumpfstoßproben des Werkstoffes DC04, $v_S$ = 20 mm/s; Probe 2027

### 5.2.3 Zwischenfazit

In den beiden vorherigen Abschnitten konnte gezeigt werden, dass die mittels Blindschweißungen erzielten charakteristischen Amplitudenverläufe der Körper- und Luftschallemissionen auf reale Fügeverbindungen (Überlapp- und Stumpfstoß) übertragen werden können.

## 5.3 Nutzung der Schallemission zur Fehlerdetektion

### 5.3.1 Blindschweißungen

#### 5.3.1.1 Versuchsbeschreibung

In diesem Kapitel soll die Überprüfung des Informationsgehaltes von hochfrequenten Luft- und Körperschallemissionen bezüglich der Auffindung von Fehlern beim Laserschweißen erfolgen. Dazu ist es notwendig, zunächst einmal die aufzufindenden Fehler zu definieren. Ein Fehler in dieser Versuchsreihe liegt dann vor, wenn die Blindschweißprobe nicht oder nur mit inhomogener Wurzelbreite durchgeschweißt ist, d.h. wenn sich auf der Probenrückseite keine bzw. eine in der Breite stark schwankende Schweißnahtwurzel ausbildet. Gerade im Bereich der Durchschweißung des Probenquerschnittes war sowohl für die Körper- als auch für die Luftschallemissionen ein starker Signalabfall in den vorherigen Abschnitten erkennbar.

Es werden Blindschweißungen an den Werkstoffen DC04 (unbeschichtet) und DX51D (zinkbeschichtet) gemäß Kapitel 4.3 durchgeführt. Die Auswertung der Körper- und Luftschallsignale erfolgt nach dem in Abschnitt 4.5.2 beschriebenen Verfahren. Für die Körper- und Luftschallemissionen wird ein Frequenzbereich zwischen 400 kHz $\leq$ f $\leq$ 700 kHz ausgewertet.

Als objektives Entscheidungskriterium, ob ein Fehler vorliegt oder nicht, wird mit einem Toleranzbandverfahren gearbeitet. Dazu werden zunächst 30 Gutschweißungen durchgeführt. Der Amplitudenmittelwert wird ermittelt. Der Mittelwert wird anschließend prozentual nach oben und unten verschoben, um ein Toleranzband zu erhalten. Die prozentuale Verschiebung für die Ober- und Untergrenze wird so gewählt, dass 100% der Datenpunkte der Gutschweißungen innerhalb des gewählten Toleranzbandes liegen. Der Prozessbeginn und das Prozessende werden hierbei nicht betrachtet, da hier prozessbedingt die Einschweißtiefe inhomogen ist. Anschließend werden Fehlerschweißungen mit dem erstellten Toleranzband bewertet. Bricht der Amplitudenverlauf aus dem Toleranzband nach oben oder unten aus, so liegt ein Fehler vor. Dazu werden Fehler provoziert und auch zufällig auftretende Fehler berücksichtigt. Ein optischer Vergleich mit dem erzielten Schweißergebnis (vgl. Kapitel 5.3.1.4) zeigt, ob ein auf diesem Wege fehlerhafter Bereich tatsächlich Fehler enthält.

#### 5.3.1.2 Körperschallemissionen, KSE

Toleranzband (TB)

Die zur Ermittlung der Toleranzbänder geschweißten Referenzproben wurden für den Werkstoff DC04 mit den Schweißparametern, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s und Laserleistung P = 2000 W, hergestellt. Für den Werkstoff DX51D wurde mit einer Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s und einer Laserleistung P = 1800 W gearbeitet.

In Abbildung 51 (a) sind die 30 Referenzproben für den Werkstoff DC04 im zeitlichen Verlauf der Amplituden $A_{KSE}$ für den genannten Frequenzbereich dargestellt. Der Beginn und das Ende des Schweißprozesses sind mit gestrichelten Linien markiert. Die ermittelten oberen und unteren Grenzen des Toleranzbandes basieren auf einer Verschiebung des gemittelten Amplitudenverlaufes über alle Referenzproben. Bei einer Verschiebung um ±15% des Gesamtmittelwertes liegen alle Referenzproben innerhalb des dargestellten Toleranzbandes. Die gleiche Vorgehensweise wurde für die 30 Referenzproben des Werkstoffes DX51D (siehe Abbildung 51 (b)) durchgeführt. Hier wurde für die Körperschallemissionen ebenfalls eine Verschiebung des Gesamtmittelwertes um ±15% ermittelt. Damit liegen alle Proben innerhalb des Toleranzbandes.

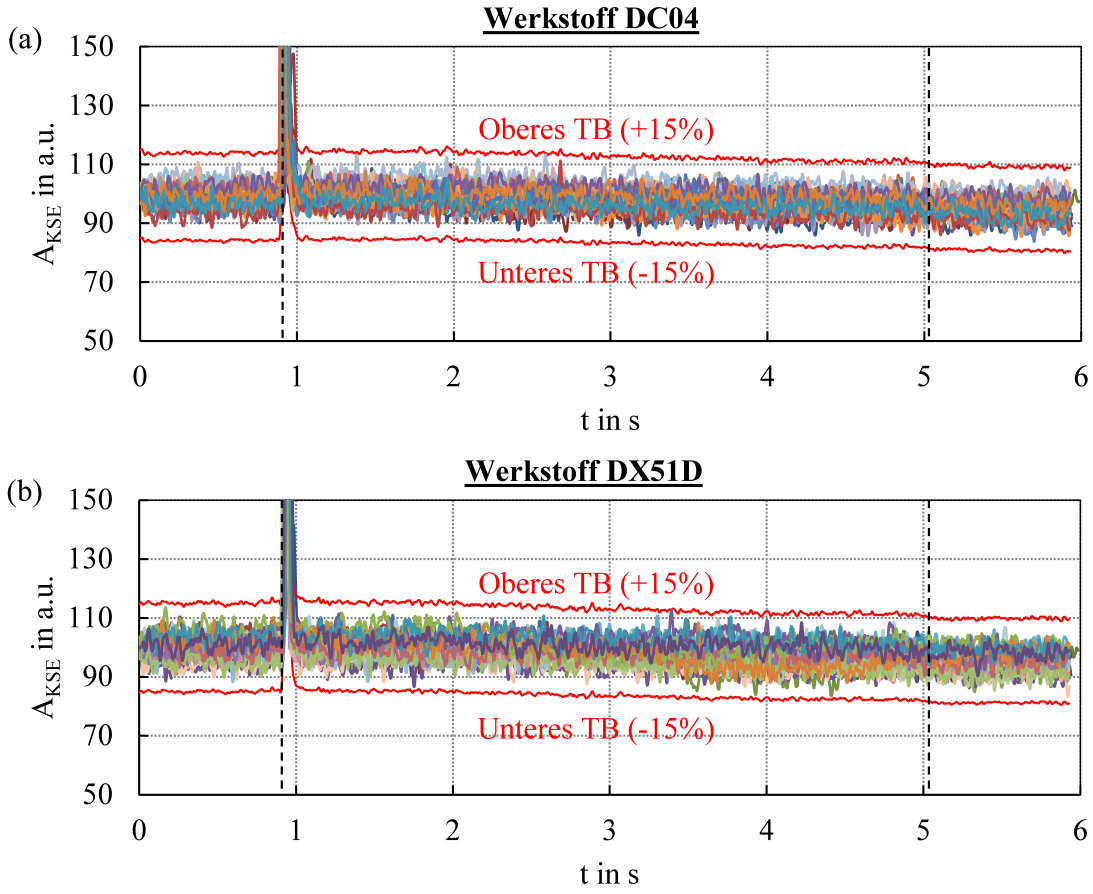



Abbildung 51: KSE-Amplituden $A_{KSE}$ der 30 Referenzproben inklusive ermittelter Toleranzbänder in Abhängigkeit der Zeit t für Blindschweißungen am Werkstoff DC04 (a) und DX51D (b), Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s, Laserleistung P = 2000 W für DC04 und P = 1800 W für DX51D

Fehlerschweißungen (FS)

Zur Provokation von Schweißfehlern, d.h. einer ausfallenden oder stark inhomogenen Durchschweißung der Probe, kann die Laserleistung moduliert werden. Dieses Vorgehen wurde bei der

Blindschweißprobe 2157 (DC04) gewählt. Der in Abbildung 52 (a) dargestellte Laserleistungsverlauf zeigt die Form der Laserleistungsmodulation. Es wurden immer wieder Leistungseinbrüche in den Verlauf einprogrammiert, welche zu inhomogenen Durchschweißungen führen. Bei der Untersuchung des Schweißergebnisses (siehe Kapitel 5.3.1.4) konnten die Fehlerbereiche lokalisiert werden. Diese wurden im Laserleistungsverlauf mit den Zahlen 1 – 3 markiert. Sie haben eine unterschiedlich große örtliche Ausbreitung, liegen aber immer im Bereich des Laserleistungseinbruches. Abbildung 52 zeigt in Teil (b) die gemessenen Körperschallamplituden $A_{KSE}$ im zeitlichen Verlauf. Das zugehörige Toleranzband wurde im vorherigen Abschnitt bereits diskutiert. Es wurde ebenfalls dem Verlauf von $A_{KSE}(t)$ überlagert. Ein Ausbruch des Körperschallsignals aus dem Toleranzband ist im Diagramm grau hinterlegt. Zusätzlich sind die Bereiche 1 – 3, in denen tatsächliche Schweißfehler gefunden werden konnten, auch in den Verlauf von $A_{KSE}(t)$ übertragen. Ein Vergleich der tatsächlich auftretenden Fehler mit dem Ausbruch des Körperschallsignals aus dem Toleranzband zeigt eine gute Übereinstimmung. Lediglich bei t = 1,1 s ist ein Toleranzbandausbruch detektiert worden, welcher sich nicht mit einem tatsächlichen Schweißfehler korrelieren lässt. Dies könnte an einer zu engen Definition der Toleranzbandgrenzen liegen.

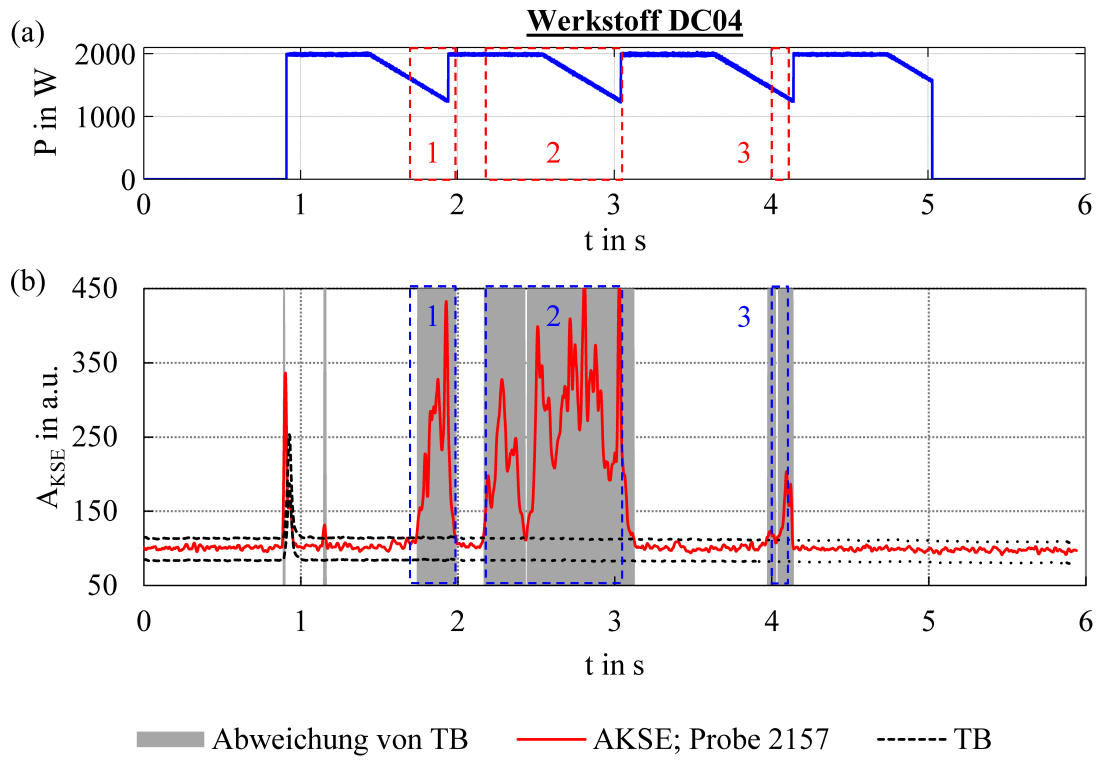



Abbildung 52: Laserleistung P über der Zeit t (a); KSE-Amplituden $A_{KSE}$ der Fehlerprobe 2157 inklusive ermittelter Toleranzbänder in Abhängigkeit der Zeit t (b) für Blindschweißungen am Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

Zur Beurteilung von zufällig auftretenden, d.h. nicht durch Laserleistungsmodulation oder auf andere Weise provozierten, Fehlern wird die Blindschweißprobe 2211 aus dem Werkstoff DX51D betrachtet. Diese wurde mit einer Konstantleistung von P = 1400 W (siehe Abbildung 53 (a)) bei einer Geschwindigkeit von $v_S$ = 20 mm/s geschweißt. Die Betrachtung des Schweißergebnisses (siehe 5.3.1.4) zeigt Fehler zu Beginn und am Ende des Schweißprozesses, welche mit den Zahlen 1 und 2 im Laserleistungsverlauf markiert wurden. Der Verlauf der Körperschallemissionen $A_{KSE}(t)$ wurde wiederum mit dem zugehörigen Toleranzband überlagert. Der Ausbruch des Körperschallsignals ist grau hinterlegt. Die tatsächlichen Fehlstellen 1 und 2 sind ebenfalls im Amplitudenverlauf markiert. Der Vergleich zwischen dem Ausbruch des Körperschallsignals mit den Stellen, an denen tatsächlich Schweißfehler gefunden werden konnten, zeigt eine gute Übereinstimmung. Es ist zu erkennen, dass die durch das Körperschallsignal angezeigten Fehlerbereiche breiter sind, als die tatsächlich feststellbaren Fehlstellen. Im Bereich 1 liegt das Körperschallsignal noch bis ca. t = 1,2 s außerhalb des Toleranzbandes, obwohl der tatsächliche Fehler bereits bei t = 1,05 s endet. Für den Bereich 2 überschreitet das Körperschallsignal schon bei t = 4,0 s das Toleranzband, wobei der reale Fehler erst bei t = 4,2 s feststellbar ist. Im Zwischenbereich der beiden Fehlstellen liegt das Körperschallsignal innerhalb des Toleranzbandes, hier sind auch keine Fehler an der Schweißprobe erkennbar.

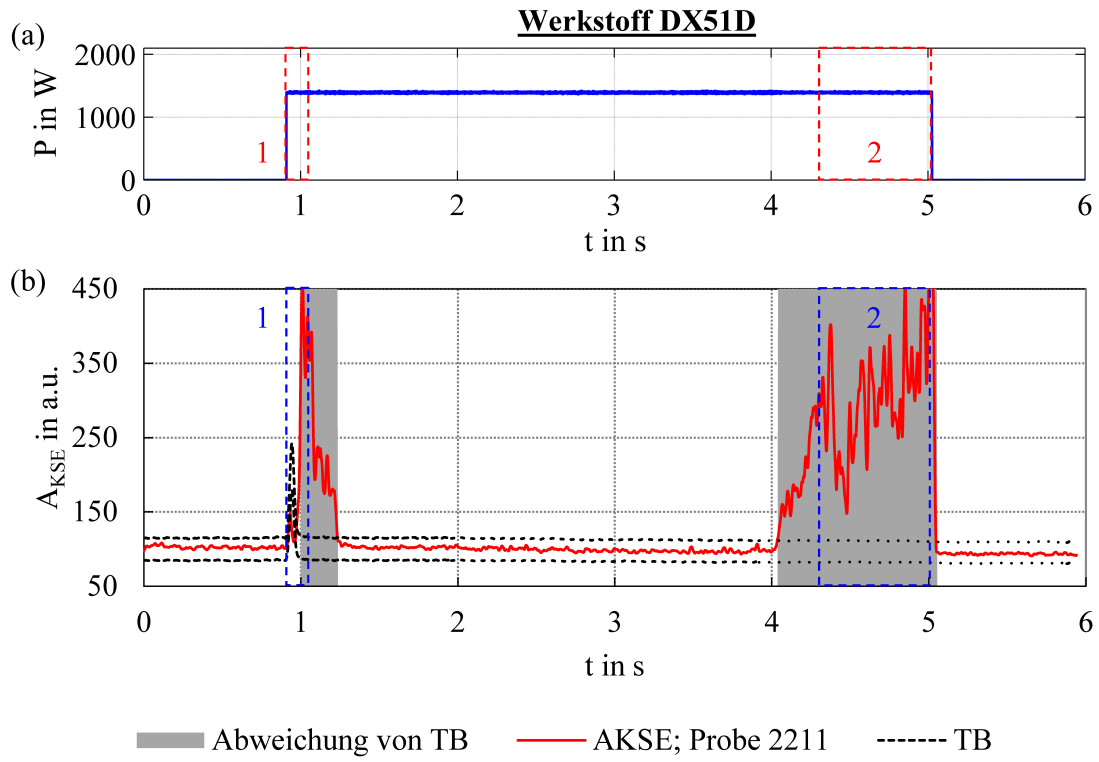



Abbildung 53: Laserleistung P über die Zeit t (a); KSE-Amplituden $A_{KSE}$ der Fehlerprobe 2211 inklusive ermittelter Toleranzbänder in Abhängigkeit der Zeit t (b) für Blindschweißungen am Werkstoff DX51D, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

#### 5.3.1.3 Luftschallemissionen, LSE

Toleranzband (TB)

In Abbildung 54 sind die Luftschallamplituden der Referenzschweißungen inklusive des ermittelten Toleranzbandes für Werkstoffe DC04 (a) und DX51D (b) dargestellt.

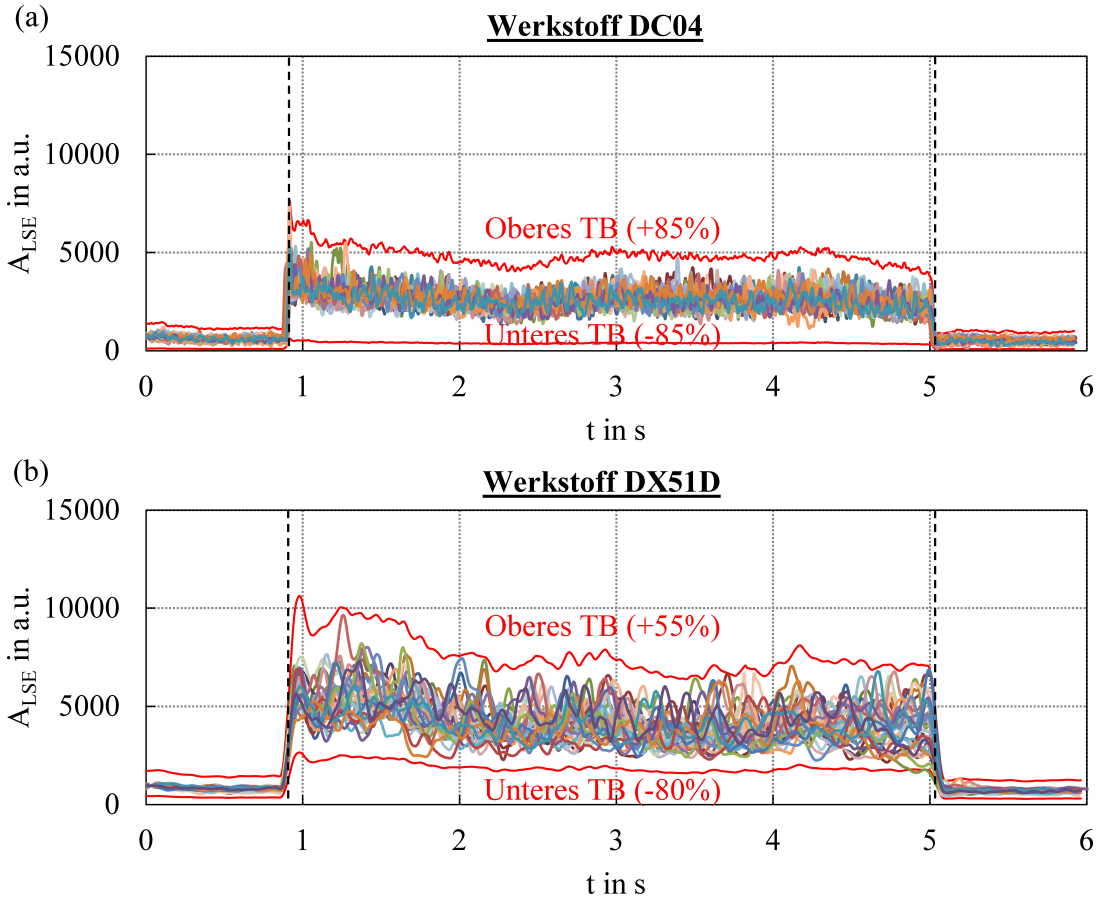



Abbildung 54: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der 30 Referenzproben inklusive ermittelter Toleranzbänder in Abhängigkeit der Zeit t für Blindschweißungen am Werkstoff DC04 (a) und DX51D (b), Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s, Laserleistung P = 2000 W für DC04 und P = 1800 W für DX51D

Den dargestellten Verläufen liegen die gleichen Parameter, wie bereits im vorherigen Kapitel zu den Körperschallemissionen beschrieben, zu Grunde. Das Toleranzband für den Werkstoff DC04 (Abbildung 54 (a)) wurde mittels Verschiebung des Gesamtmittelwertes aller 30 Referenzschweißungen um einen Wert von 85% nach oben und nach unten erstellt. Damit liegen alle Referenzschweißungen innerhalb des Bandes. Für den Werkstoff DX51D (Abbildung 54 (b)) hat die Verwendung der gleichen Parameter zur Datenauswertung (siehe Kapitel 4.5.2) dazu geführt, dass das Toleranzband sehr breit geworden wäre, um zu erreichen, dass alle 30 Referenzschweißungen innerhalb liegen. Daher wurde hier vom in Kapitel 4.5.2 beschriebenen Verfahren abgewichen. Für

den zweiten Schritt der Datenauswertung wurde nicht mit einer Fenstergröße von 0,05% der Gesamtsignallänge zur Bildung des gleitenden Medianes gearbeitet, sondern mit einem größeren Fenster von 0,2% der Gesamtsignallänge. Damit wird der starken Fluktuation des Luftschallsignals beim Schweißen des zinkbeschichteten Werkstoffes DX51D Rechnung getragen. Das Signal wird damit stärker geglättet, wodurch aber die zeitliche sowie die Amplitudenauflösung schlechter werden.

Fehlerschweißungen (FS)

Bei den Fehlerschweißungen werden die gleichen Proben, wie im Kapitel zuvor bei den Körperschallemissionen betrachtet. Dementsprechend ist auch die Vorgehensweise zur Provokation der Fehler identisch und wird an dieser Stelle nicht mehr gesondert beschrieben.

Für die in Abbildung 55 dargestellte Probe 2157 ist der Verlauf der gemessenen Luftschallamplitude dargestellt. Die Markierung der Bereiche 1 – 3 entspricht den tatsächlich festgestellten Fehlerstellen am Schweißergebnis. Das dargestellte Toleranzband für den Werkostoff DC04 ist aus dem vorherigen Abschnitt übernommen worden. Ein Ausbruch aus dem Toleranzband ist grau unterlegt im Diagramm dargestellt. Für den Bereich 1 ist erkennbar, dass der tatsächliche Schweißfehler sich über einen zeitlichen Bereich von 1,8 s < t < 2,0 s erstreckt. Das Verlassen des Luftschallsignals aus dem Toleranzband erstreckt sich auf einen deutlich geringeren Bereich von 1,9 s < t < 2,0 s. Für den Bereich 2 stimmt die Lage des tatsächlichen Fehlers mit dem im Luftschallsignal detektierten Ausbruches aus dem Toleranzband gut überein. Für den Bereich 3 ist im Luftschallsignal kein Verlassen des Toleranzbandes feststellbar.

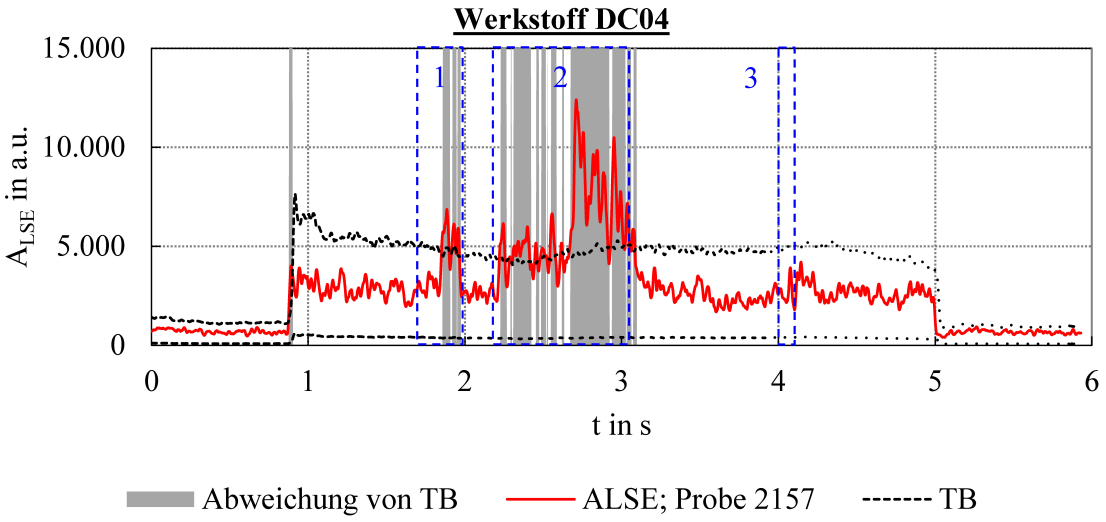



Abbildung 55: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der Fehlerprobe 2157 inklusive ermittelter Toleranzbänder in Abhängigkeit der Zeit t für Blindschweißungen am Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

Zur Untersuchung von zufällig auftretenden Fehlern wurde in Bezug auf die Luftschallemissionen ebenfalls die gleiche Probe 2211 wie im vorherigen Abschnitt (Körperschallemissionen) gewählt (siehe Abbildung 56). Die tatsächlich gefundenen Schweißnahtfehler sind in Abbildung 56 markiert und mit den Nummern 1 bzw. 2 beschriftet.

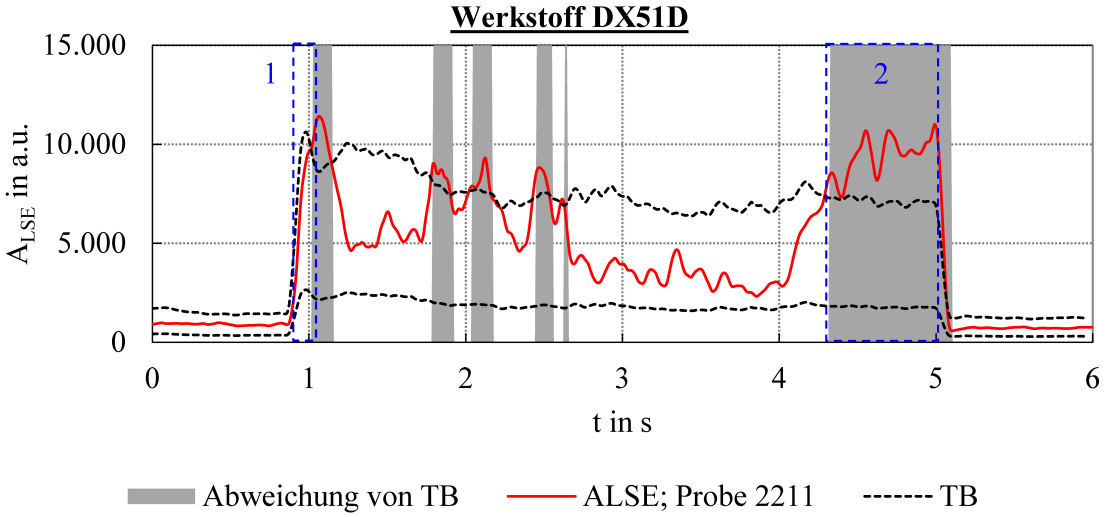



Abbildung 56: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der Fehlerprobe 2211 inklusive ermittelter Toleranzbänder in Abhängigkeit der Zeit t für Blindschweißungen am Werkstoff DX51D, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

Für den Bereich 1 ist nahezu kein Ausbruch des ermittelten Luftschallsignals aus dem Toleranzband erkennbar. Lediglich direkt im Anschluss an den Fehlerbereich 1 überschreitet der Verlauf von $A_{LSE}$ das Toleranzband. Im Zwischenbereich zwischen Bereich 1 und 2 sind insgesamt vier Ausbrüche des Luftschallsignals aus dem Toleranzband feststellbar, wobei keine Schweißnahtfehler gefunden werden konnten. Der Bereich 2 stimmt, was die Lage des tatsächlich existierenden Schweißnahtfehlers angeht, gut mit dem dort auftretenden Ausbruch der Luftschallamplituden aus dem Toleranzband überein.

#### 5.3.1.4 Schweißergebnis

Das Schweißergebnis von Probe 2157, mit der in Abbildung 52 (a) dargestellten Laserleistungsmodulation zur Provokation von Fehlstellen, ist in Abbildung 57 dargestellt. Die Leistungsmodulation führt zu inhomogenen oder ganz ausfallenden Durchschweißungen. Im markierten Bereich 1 führt der Leistungseinbruch zum vollständigen Ausfall der Durchschweißung. Im Fehlerbereich 2 ist zunächst nur eine inhomogene, d.h. in der Breite stark schwankende Durchschweißung festzustellen. Im weiteren Verlauf fällt die Durchschweißung auch hier komplett aus. Dieser Bereich ist der breiteste, in dem Fehler existieren für diese Probe. Der Fehlerbereich 3 ist relativ kurz in Richtung des Schweißnahtverlaufes. Auch hier führt der provozierte Einbruch der Laserleistung

zu einer ausfallenden Durchschweißung. Auf der Probenoberseite sind ebenfalls stark schwankende Schweißnahtbreiten vor allem in den Fehlerbereichen 1 und 2 feststellbar. Die auf der Probenunterseite markierten Fehlstellenbereiche wurden in die zeitlichen Verläufe der Schallemissionen übertragen, welche in den vorherigen Abschnitten diskutiert wurden. Auf die Anfertigung von Längs- oder Querschliffen wurde hier verzichtet.

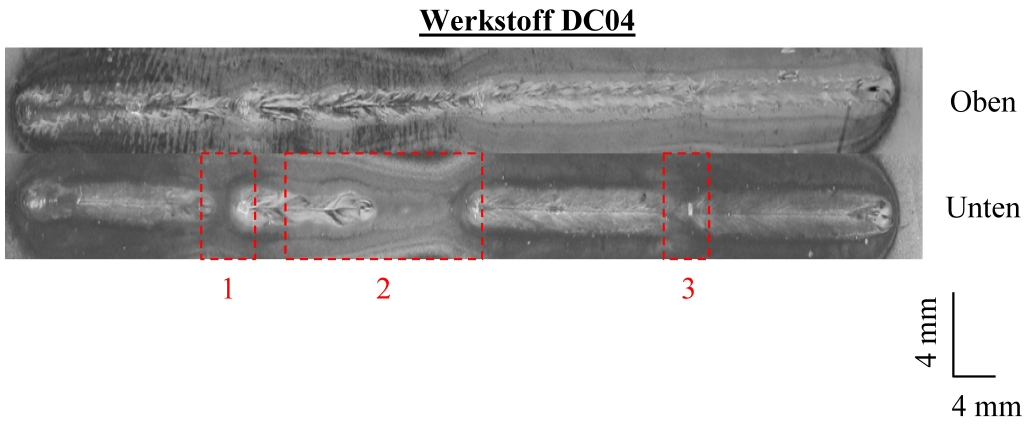



Abbildung 57: Schweißergebnis von provozierten Fehlerproben mit markierten Fehlerbereichen 1 - 3 des Werkstoffes DC04, $v_S$ = 20 mm/s; Probe 2157

Zur Untersuchung von zufällig auftretenden Fehlstellen wird die Schweißprobe 2211 aus dem Werkstoff DX51D (zinkbeschichtet) betrachtet. Diese zufälligen Fehler entstehen beim Laserschweißen aufgrund der sehr engen Prozessfenster für Gutschweißungen auch im realen Produktionsumfeld. Das Schweißergebnis ist in Abbildung 58 dargestellt. Diese Probe wurde mit einer Konstantleistung von $P = 1400$ W bei einer Schweißgeschwindigkeit von $v_S = 20$ mm/s geschweißt. Auf der Probenunterseite ist die ausfallende Durchschweißung im Anfangsbereich der Schweißnaht (Bereich 1) erkennbar. Im weiteren Verlauf der Schweißung stabilisiert sich der Prozess, so dass die Durchschweißung hier homogen verläuft. Erst gegen Ende des Schweißprozesses, Bereich 2, wird der Schweißprozess wieder instabil. Dies führt zu einer vollständig ausfallenden Durchschweißung über einen größeren Bereich. Auf der Probenoberseite ist in den Fehlerbereichen eine deutlich schmälere Nahtbreite feststellbar. Die markierten Bereiche 1 und 2, in denen die Durchschweißung ausfällt, wurden in die im vorherigen Abschnitt dargestellten Diagramme der Luft- und Körperschallemissionen übertragen. Aufgrund des eindeutigen Fehlerbildes wurde auch bei Probe 2211 auf Längs- und Querschliffe verzichtet.

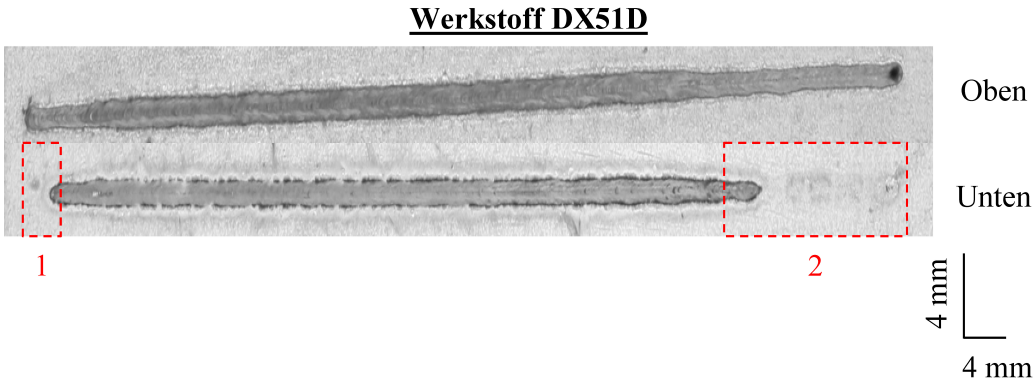



Abbildung 58: Schweißergebnis von zufälligen Fehlerproben mit markierten Fehlerbereichen 1 und 2 des Werkstoffes DX51D, P = 1400 W; $v_S$ = 20 mm/s; Probe 2211

## 5.3.2 Überlappschweißungen

### 5.3.2.1 Versuchsbeschreibung

Das im vorherigen Abschnitt beschriebene Toleranzbandverfahren wurde auf Überlappschweißungen übertragen. Die Toleranzbänder werden nicht für Überlappschweißungen neu erstellt, sondern werden aus den Blindschweißungen übernommen. Die Überlappschweißungen werden aus dem Werkstoff DC04 (siehe Kapitel 4.3) hergestellt. Die Datenauswertung erfolgt nach dem in Abschnitt 4.5.2 beschriebenen Verfahren für die Frequenzbereiche 400 kHz ≤ f ≤ 700 kHz, sowohl für den Körper- als auch für den Luftschall. Es werden insgesamt zwei Körperschallsensoren verbaut. Ein Sensor am Oberblech und ein Sensor am Unterblech der Überlappverbindung. Zusätzlich werden die Luftschallsignale parallel aufgezeichnet. Die Fehlerdefinition ist identisch mit der des vorherigen Kapitels (siehe Abschnitt 5.2.1.1). Als Referenz wird die Durchschweißung des Unterbleches der Überlappverbindung herangezogen. Zusätzlich werden bei Überlappschweißungen auch Durchschüsse und Anbindefehler („falsche Freunde“) betrachtet.

Zur Provokation von Fehlstellen, wurden die Überlappverbindungen mit linear wachsendem Spaltmaß geschweißt. Zu Beginn der Schweißung liegt ein technischer Nullspalt vor. Dieser wird im Verlauf der Schweißung bis auf ein Spaltmaß von 1 mm gesteigert. Die Schweißung erfolgt mit einer konstanten Laserleistung von P = 1800 W bei $v_S$ = 20 mm/s.

### 5.3.2.2 Körperschallemissionen, KSE

Die bei der provozierten fehlerhaften Überlappschweißverbindung (Probe 1965) gemessenen Körperschallamplituden sind im zeitlichen Verlauf in Abbildung 59 dargestellt.

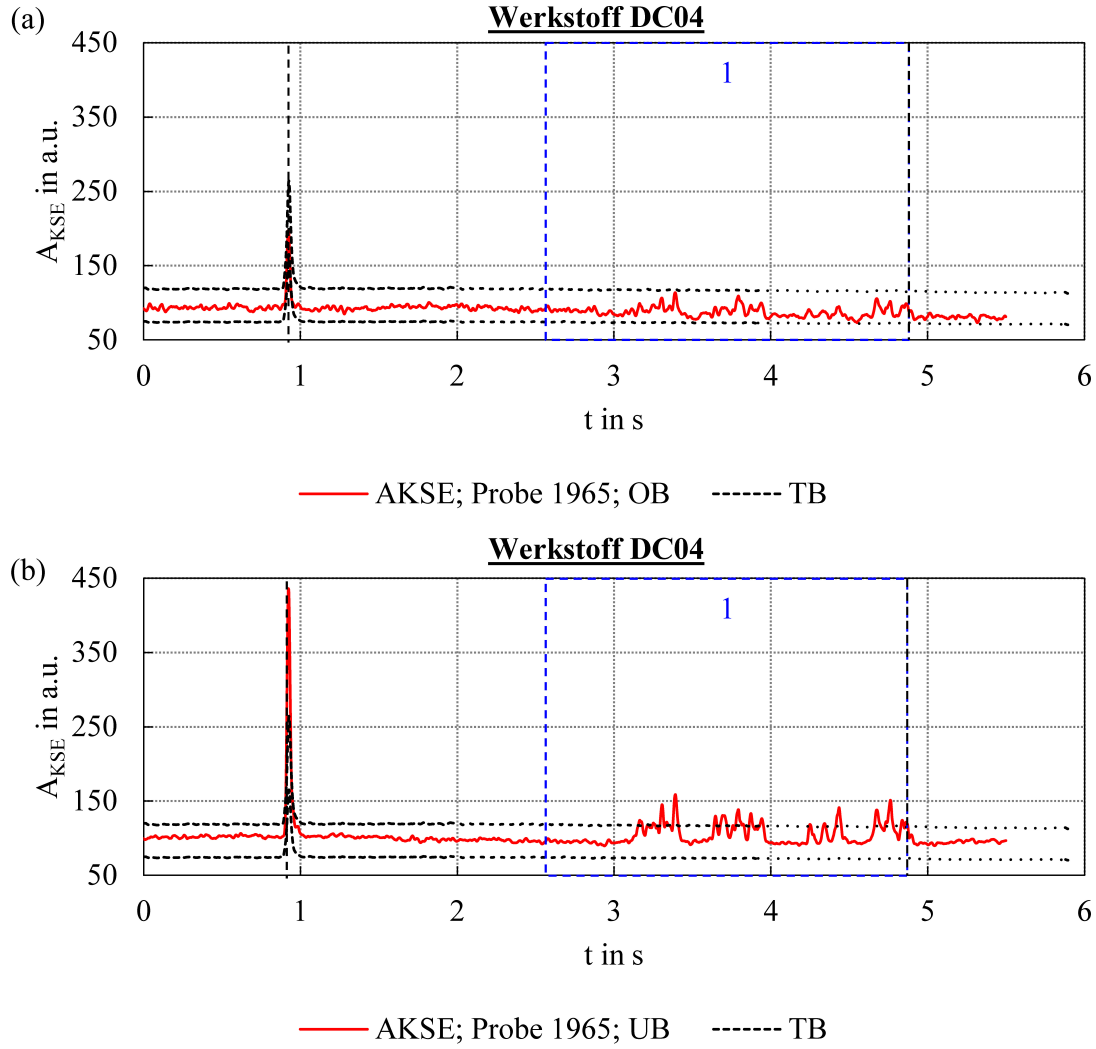



Abbildung 59: KSE-Amplituden $A_{KSE}$ der Fehlerprobe 1965 inklusive ermittelter Toleranzbänder aus Blindschweißungen in Abhängigkeit der Zeit t für Überlappschweißungen am Werkstoff DC04, Oberblechsignal (a); Unterblechsignal (b); Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Laserleistung P = 1800 W; linear ansteigendes Spaltmaß von Nullspalt auf 1 mm zwischen den Fügepartnern

In Teil (a) ist das Körperschallsignal des Oberbleches und in Teil (b) das Signal des Unterbleches mit jeweils markiertem Beginn und Ende des Schweißvorganges zu sehen. Der Verlauf von $A_{KSE}(t)$ ist mit dem beim Blindschweißen des Werkstoffes DC04 ermittelten Toleranzband überlagert. Die in Abschnitt 5.3.2.4 festgestellten Schweißnahtfehler sind im Diagramm mit der Nummer 1 markiert. Für das Oberblech (siehe Abbildung 59 (a)) liegt der gesamte Verlauf der Körperschallamplituden innerhalb des Toleranzbandes. Auch im markierten Fehlerbereich 1 ist kein Ausbruch des Oberblechsignals aus dem Toleranzband feststellbar. Für das Unterblechsignal liegt der Verlauf von $A_{KSE}$ anfangs innerhalb des Toleranzbandes. Bei t = 3,1 s wird zum ersten Mal das Toleranzband nach oben hin durchbrochen. Im weiteren Verlauf sind jeweils vier Bereiche im Signal erkennbar, welche mehr oder weniger konstant außerhalb des Toleranzbandes lie-

gen. Im Vergleich zum tatsächlich ermittelten Fehlerbereich 1 fällt auf, dass dieser bereits bei t = 2,6 s beginnt, d.h. das Unterblechsignal liefert eine verzögerte Fehlererkennung.

Im Vergleich zu den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Fehlerstellen bei Blindschweißungen ist der Signal-Rausch-Abstand bei einer Fehlerentstehung bei Überlappschweißungen deutlich geringer. Dies kann auch daran erkannt werden, dass die Überschreitung des Toleranzbandes beim Unterblechsignal nicht so deutlich ausfällt wie bei den Blindschweißungen. Beim Oberblech ist der Signal-Rausch-Abstand so schlecht, dass kein Verlassen des Toleranzbandes feststellbar ist.

#### 5.3.2.3 Luftschallemissionen, LSE

Zur Untersuchung der Luftschallemissionen im Hinblick auf die provozierte Fehlerentstehung beim Schweißen der Überlappprobe 1965, ist in Abbildung 60 der Verlauf der Luftschallamplituden $A_{LSE}$ über der Zeit t dargestellt.

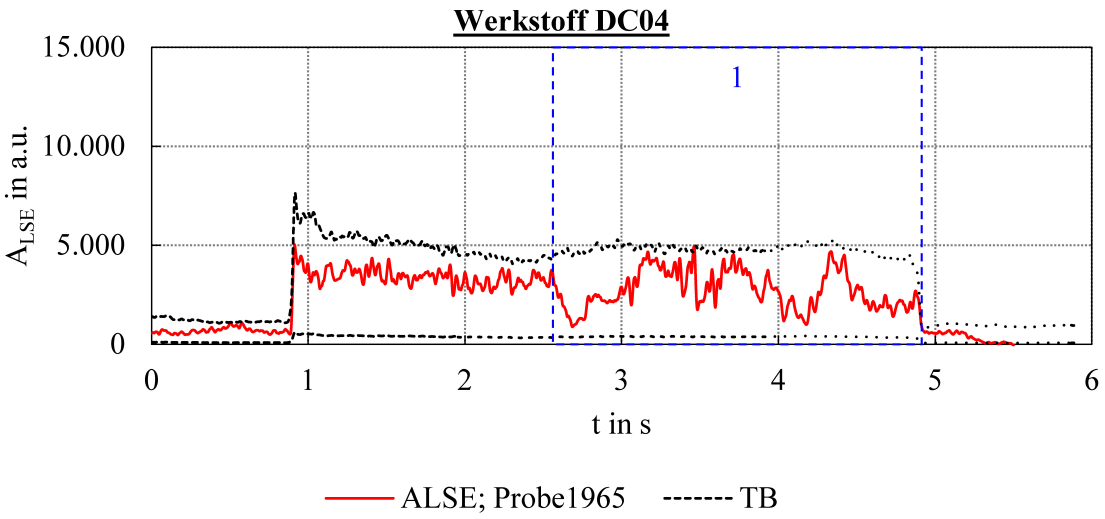



Abbildung 60: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der Fehlerprobe 1965 inklusive ermittelter Toleranzbänder aus Blindschweißungen in Abhängigkeit der Zeit t für Überlappschweißungen am Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Laserleistung P = 1800 W; linear ansteigendes Spaltmaß von Nullspalt auf 1 mm zwischen den Fügepartnern

Das im Rahmen der Blindschweißversuche des Werkstoffes DC04 ermittelte Toleranzband (siehe Abschnitt 5.3.1.3) ist dem Luftschallsignal überlagert dargestellt. Der Bereich der realen Schweißfehler der Überlappprobe wurde im Diagramm mit der Nummer 1 markiert. Der Verlauf von $A_{LSE}(t)$ bricht zu keinem Zeitpunkt aus dem Toleranzband aus. Im Bereich 1 der Fehlerentstehung ist zwar am Luftschallsignal eine recht große Schwankung bzw. Instabilität erkennbar, welche sich jedoch in Bezug auf die Schallamplituden nicht so stark auswirkt, dass das Toleranzband nach oben oder unten durchdrungen wird.

#### 5.3.2.4 Schweißergebnis, Metallografie

Das Schweißergebnis der Überlappprobe 1965 ist in Abbildung 61 dargestellt. Deutlich ist der Einfluss des von links nach rechts zunehmenden Spalts zwischen den Fügepartnern zu erkennen. Im linken Teil der Schweißprobe liegt ein technischer Nullspalt vor. Das Schweißergebnis ist gut. Mit dem zum Ende des Schweißprozesses ansteigenden Spaltmaßes auf maximal 1,0 mm sind ab etwa der Hälfte des Schweißprozesses Fehlstellen erkennbar. Anfangs ist dies lediglich ein starker Nahteinfall, wobei auf der Probenunterseite keine direkte Auswirkung erkennbar ist. Im weiteren Verlauf sind auch auf der Probenunterseite stark schwankende Wurzelbreiten zu sehen. Nimmt das Spaltmaß noch weiter zu, so ist der Nahteinfall so groß, dass keine Anbindung des Ober- und des Unterbleches mehr existiert. Der komplette Fehlerbereich ist mit der Nummer 1 gekennzeichnet. Dieser Bereich wurde in die Schallamplitudenverläufe des Körper- und Luftschallsignals (siehe Abschnitte 5.3.2.2 und 5.3.2.3) übertragen.

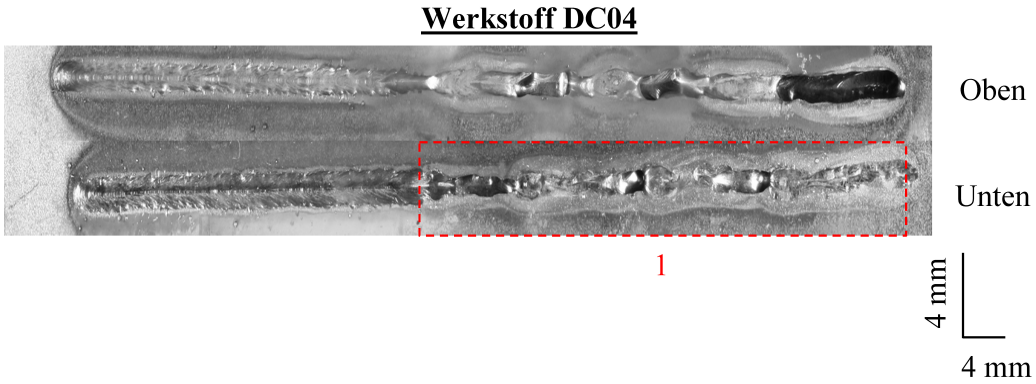



Abbildung 61: Schweißergebnis von provozierten Fehlerproben im Überlappstoß mit markiertem Fehlerbereich 1 des Werkstoffes DC04, $v_S$ = 20 mm/s; P = 1800 W; Probe 1965

### 5.3.3 Stumpfstoßschweißungen

#### 5.3.3.1 Versuchsbeschreibung

Entsprechend dem Vorgehen bei der Übertragung der Toleranzbänder der Blindschweißungen auf Überlappschweißungen, soll auch die Übertragung auf Stumpfstoßverbindungen zur Fehlerdetektion überprüft werden. Die Stumpfstoßverbindung wird aus zwei Fügepartnern mit der Blechstärke t = 2 mm (Werkstoff DC04) wie in Kapitel 4.3 beschrieben, hergestellt.

Die Auswertung der Körper- und Luftschalldaten erfolgt analog zu Kapitel 4.5.2 für einen Frequenzbereich 400 kHz ≤ f ≤ 700 kHz, welcher für Luft- und Körperschall identisch ist. Es befindet sich ein Sensor auf der Seite eines Fügepartners (Blech 1; Blech 2). Damit wird auf zwei Körperschallkanälen und einem Luftschallkanal parallel gemessen. Die Toleranzbänder wurden von den hergestellten Blindschweißproben (siehe Kapitel 5.3.1) übernommen.

Zur Provokation von Fehlstellen, welche realistisch für Stumpfstoßverbindungen sind, wurden die beiden Fügepartner mit einem variablen Höhenversatz verschweißt. Zu Beginn der Schweißung beträgt der Höhenversatz beider Fügepartner 0,8 mm. Am Ende der Schweißung liegt ein Höhenversatz von 0 mm zwischen den Stumpfstoßpartnern vor. Damit wird ein linearer Übergang von 0,8 mm auf 0 mm Höhenversatz eingestellt.

#### 5.3.3.2 Körperschallemissionen, KSE

Der Körperschallsignalverlauf, überlagert mit den Toleranzbändern aus den Blindschweißungen, ist in Abbildung 62 dargestellt.

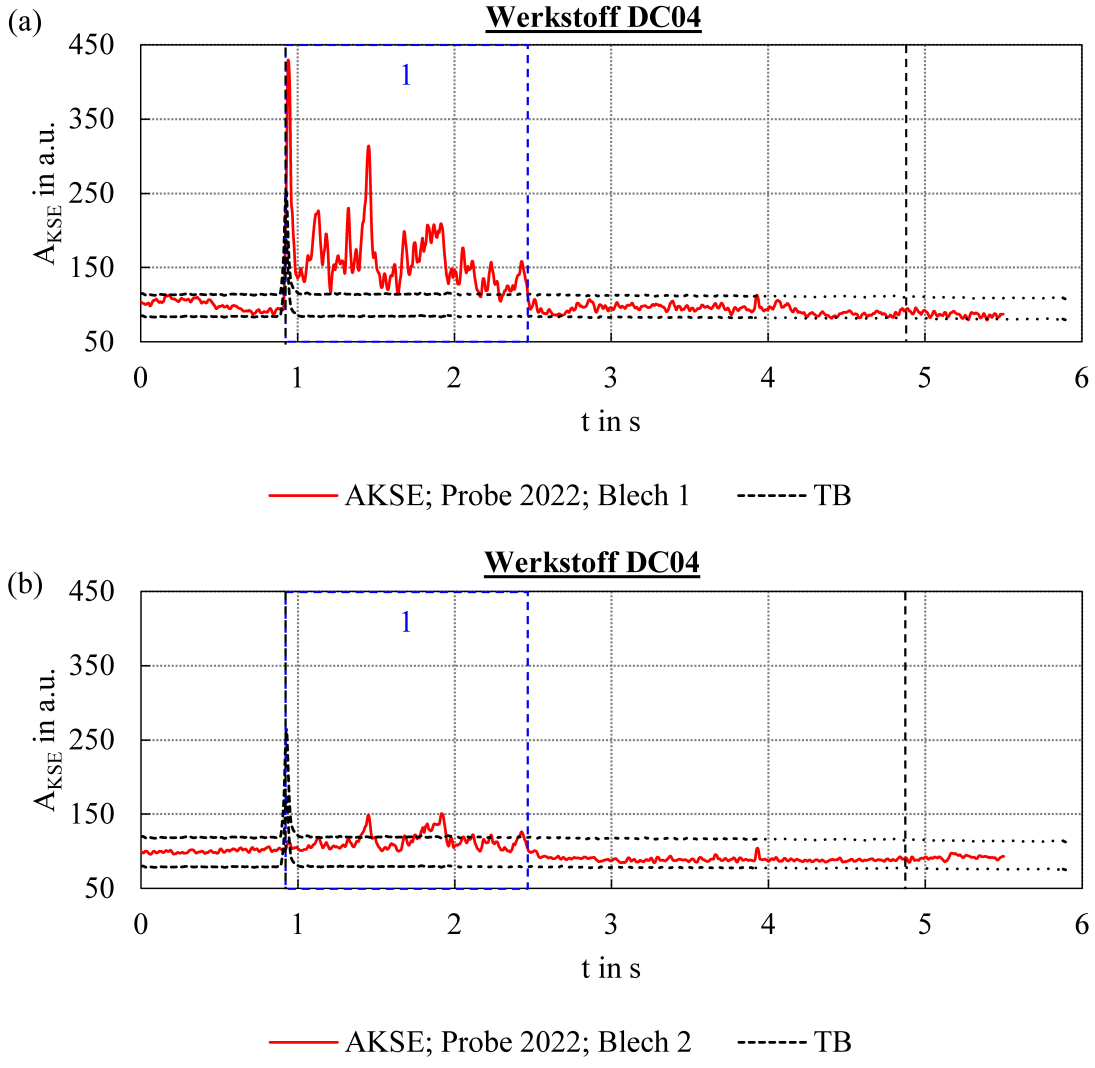



Abbildung 62: KSE Amplituden $A_{KSE}$ der Fehlerprobe 2022 inklusive ermittelter Toleranzbänder aus Blindschweißungen in Abhängigkeit der Zeit t für Stumpfstoßschweißungen am Werkstoff DC04, Signal Blech 1 (a); Signal Blech 2 (b) Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Laserleistung P = 1800 W; linear abnehmender Höhenversatz von 0,8 mm auf 0 mm zwischen den Fügepartnern

Der in Kapitel 5.3.3.4 ermittelte Fehlerbereich der Stumpfstoßverbindung ist mit der Zahl 1 in beiden Diagrammen markiert. Der Schweißprozessstart und das -ende sind ebenfalls im Diagramm mit schwarzen Linien hervorgehoben. Für Blech 1 (Abbildung 62 (a)) bricht der Verlauf der Körperschallamplituden $A_{KSE}(t)$ direkt nach dem Schweißbeginn bis zu einer Zeit von t = 2,4 s aus dem Toleranzband aus. Dies stimmt sehr gut mit dem tatsächlichen Fehlerbereich überein. Im weiteren Verlauf liegt das Körperschallsignal von Blech 1 innerhalb des Toleranzbandes. Gegen Ende des Schweißprozesses, im zeitlichen Intervall 4 s ≤ t ≤ 5 s verläuft $A_{KSE}(t)$ sehr nahe am unteren Toleranzband entlang. Für Blech 2 der Stumpfstoßverbindung ist in Abbildung 62 (b) ein nahezu identischer Verlauf zu beobachten. Jedoch sind die Körperschallamplituden im Fehlerbereich nicht so stark ausgeprägt und verlassen das Toleranzband nur teilweise. Hier ist der Signal-Rausch-Abstand der Fehlersignale nicht ausreichend hoch, um eine verlässliche Detektion zu gewährleisten.

#### 5.3.3.3 Luftschallemissionen, LSE

Der Verlauf der Luftschallemissionen beim Schweißen der Fehlerprobe 2022 im Stumpfstoß (siehe Abbildung 63) liegt nahezu für den gesamten Schweißprozessverlauf innerhalb des Toleranzbandes. Lediglich im zeitlichen Intervall 2,2 s ≤ t ≤ 2,3 s sind leichte Überschreitungen des oberen Toleranzbandes feststellbar. Beim Vergleich mit dem tatsächlichen Fehlerbereich (siehe Markierung 1 in Abbildung 63) fällt auf, dass dieser fast vollständig unerkannt bleibt.

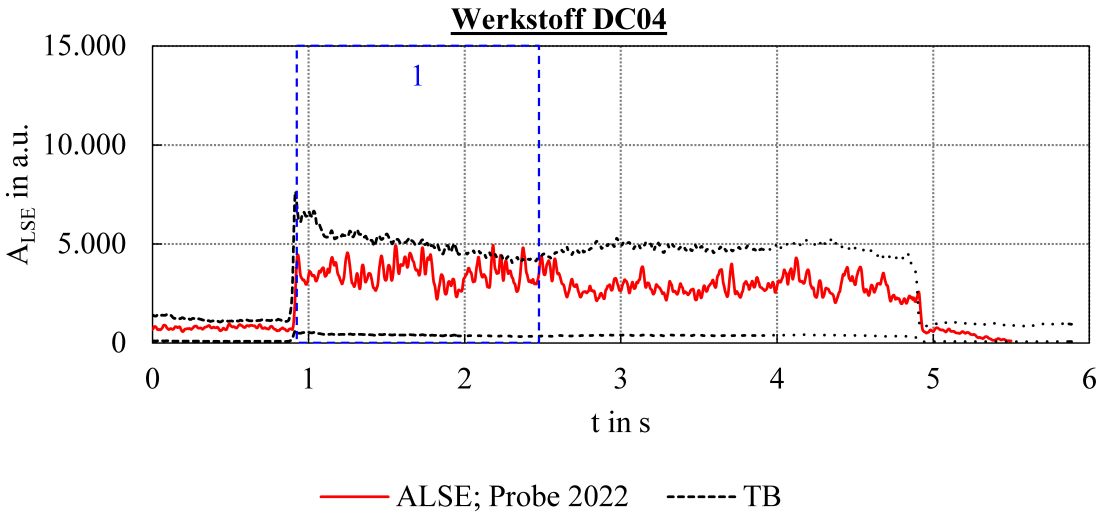



Abbildung 63: LSE-Amplituden $A_{LSE}$ der Fehlerprobe 2022 inklusive ermittelter Toleranzbänder aus Blindschweißungen in Abhängigkeit der Zeit t für Stumpfstoßschweißungen am Werkstoff DC04, Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s; Laserleistung P = 1800 W; linear abnehmender Höhenversatz von 0,8 mm auf 0 mm zwischen den Fügepartnern

#### 5.3.3.4 Schweißergebnis, Metallografie

Das in Abbildung 64 dargestellte Schweißergebnis zeigt deutlich den Einfluss des von links nach rechts abnehmenden Höhenversatzes der Fügepartner des Stumpfstoßes.

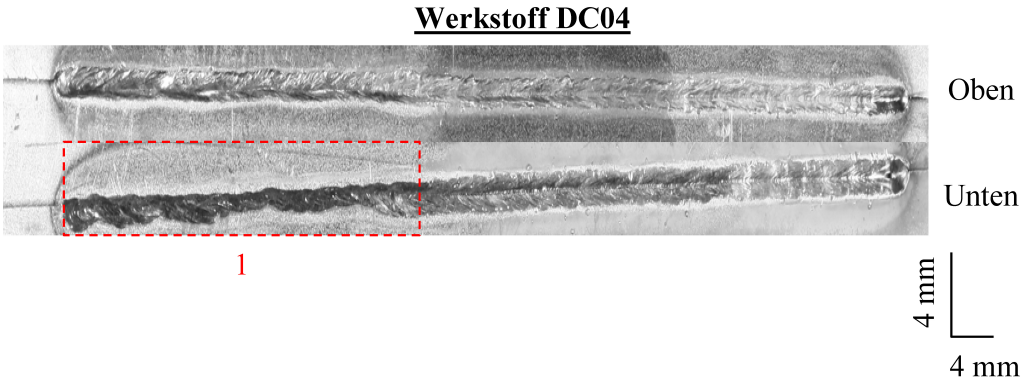



Abbildung 64: Schweißergebnis von provozierten Fehlerproben im Stumpfstoß mit markiertem Fehlerbereich 1 des Werkstoffes DC04, $v_S$ = 20 mm/s; P = 1800 W; Probe 2022

Im Anfangsbereich der Schweißung liegt der Höhenversatz von Blech 1 und Blech 2 der Stumpfstoßverbindung bei 0,8 mm und nimmt linear zum rechten Rand der Schweißnaht hin auf 0 mm ab. Der sich dadurch ergebende Schweißprozess stellt zwar eine Verbindung der Fügepartner her, läuft jedoch instabil. Dies ist an der stark schwankenden Naht- und Wurzelbreite auf der Blechober- bzw. Blechunterseite erkennbar. Der Fehlerbereich ist mit der Nummer 1 in der Abbildung 64 gekennzeichnet. Dieser Bereich wurde in die Schallemissionsdiagramme der beiden vorherigen Kapitel übertragen.

### 5.3.4 Zwischenfazit

Im vorherigen Kapitel konnte gezeigt werden, dass sich hochfrequente Körperschallemissionen gut dazu eignen, bei Blindschweißungen eine mangelnde Durchschweißung zu detektieren. Dies liegt an der Schallursache der Körperschallemissionen, welche in den vorherigen Kapiteln erarbeitet wurde. Es konnte gezeigt werden, dass die Körperschallemissionen ausschließlich dem Tiefschweißprozess bei nicht ausgeprägter Durchschweißung zuzuordnen sind. Fällt nun die Durchschweißung aus, führt dies im Umkehrschluss zu hohen Körperschallamplituden, welche eine Fehlerdetektion ermöglichen. Diese kann mittels Toleranzbandverfahren durchgeführt werden.

Der Signal-Rausch-Abstand der Fehlersignale ist bei den gleichen Fehlern im Luftschallsignal jedoch deutlich geringer. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Luftschallemissionen nachweislich nicht ausschließlich dem Tiefschweißprozess zuzuordnen sind. Sie werden u.a. von der Dampfabströmung beeinflusst, welche zur teilweisen Überdeckung der eigentlichen Fehlersignale führt.

Die Übertragung der an Blindschweißungen ermittelten Toleranzbänder auf Überlapp- und Stumpfstoßverbindungen ist grundsätzlich sowohl für den Körper- als auch für den Luftschall möglich. Jedoch sinkt damit die Wahrscheinlichkeit, die auftretenden Fehler zu detektieren, da der Signal-Rausch-Abstand bei der Fehlerentstehung geringer ist als bei Blindschweißen. Hier scheint es notwendig zu sein, für die Stoßarten Überlapp- und Stumpfstoß jeweils eigene Toleranzbänder zu erzeugen. In der Bewertung bzw. dem Ausblick wird auf mögliche Ansätze eingegangen.

# 6 KONZEPT FÜR DIE FERTIGUNG

Auf Basis der im vorherigen Kapitel diskutierten Ergebnisse kann ein Vergleich gezogen werden, um die Leistungsfähigkeit der Prozessüberwachung mittels hochfrequenter Luft- und Körperschallemissionen zu beurteilen. Es hat sich gezeigt, dass die Schallursachen für die Luft- und Körperschallemissionen teilweise identisch und teilweise unterschiedlich sind. Damit ergeben sich auch unterschiedliche Einsatzgebiete für beide sensorische Verfahren. In Abhängigkeit dieser kann ein Konzept für die Fertigung aufgestellt werden.

## 6.1 Luftschallemissionen, LSE

Im direkten Vergleich zu den Ergebnissen zur Fehlerdetektion mittels Toleranzbandverfahren hat die Überwachung von hochfrequenten Luftschallemissionen bei Blindschweißungen zwar auch gute Ergebnisse erzielt, jedoch liefert der Körperschall ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis (siehe Abschnitte 5.1.1 und 5.1.2). Es hat sich gezeigt, dass die hochfrequenten Luftschallemissionen deutlich von der Verdampfung der Zinkbeschichtung beeinflusst werden (siehe Kapitel 5.1.3). Dies wurde auch bei der Aufstellung des Modells zu den Schallursachen berücksichtigt (siehe Abschnitt 5.1.4). Die hochfrequente Luftschallemissionsüberwachung eignet sich also weniger gut zur Fehlerdetektion beim Laserstrahlschweißen. Dies haben auch die Versuche mit realen Fügeverbindungen im Überlapp- und Stumpfstoß bestätigt (siehe Kapitel 5.3.2, 5.3.3).

Jedoch eignet sich die Überwachung der hochfrequenten Luftschallemissionen sehr gut für die Überwachung von Entschichtungsprozessen. Diese sind von besonderer Bedeutung in der Automobilindustrie, da hier oft mit verzinkten Bauteilen gearbeitet wird. Werden diese mittels Laserstrahlschweißen gefügt, so entstehen schwerwiegende Fehlstellen, sofern keine vorbeugenden Maßnahmen getroffen werden. Ein gängiger Weg ist die Entfernung der Zinkbeschichtung mit dem gleichen Laser, welcher im Anschluss auch die Schweißverbindung herstellt. Dieser wird dazu mit niedriger Laserleistung und/oder höherer Geschwindigkeit über den zu entschichtenden Bereich geführt. Wie in Kapitel 5.1.3 deutlich wird, kann dieser Entschichtungsvorgang sehr gut mittels hochfrequenter Luftschallemissionen überwacht werden. Ein Konzept zur Überwachung

ist in Abbildung 65 beispielhaft anhand einer Stumpfstoßschweißung von zinkbeschichteten Fügepartnern dargestellt. Dieses Konzept ist auch auf Überlappschweißungen übertragbar.

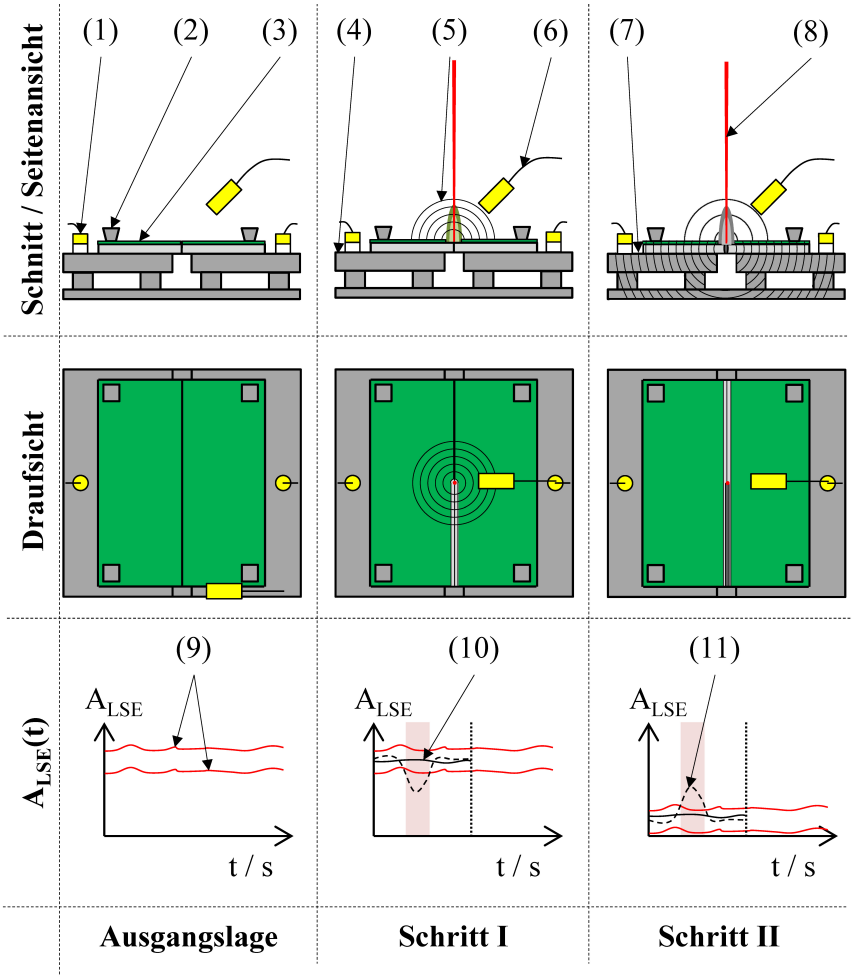



Abbildung 65: Überwachung der Zinkentschichtung mittels hochfrequenter Luftschallemissionen vor dem eigentlichen Laserschweißprozess

Der Körperschallwandler (1) in Abbildung 65 ist direkt an die Schweißvorrichtung (4) montiert. Die zinkbeschichteten Fügepartner (3) werden mittels Spanner (2) vor dem Schweißprozess fixiert. Der Luftschallsensor (6) ist offaxial zum einfallenden Laserstrahl (8) auf dessen Fokusfleck ausgerichtet. Das für diese Art der Fügeverbindung ermittelte Toleranzband (9) ist im Messcomputer hinterlegt. Der Schweißprozess wird nun zweistufig ausgeführt. In Schritt I wird der Laser mit niedriger Streckenenergie, d.h. niedriger Laserleistung und/oder hoher Schweißgeschwindigkeit über den Fügebereich geführt. Die Streckenenergie muss so eingestellt werden, dass die Zinkbeschichtung verdampft ohne dass ein Schmelzbad des Grundmaterials erzeugt wird. Das Verdampfen der Zinkbeschichtung kann nun mit Hilfe der Luftschallsensoren (6) zur Erfassung der hochfrequenten Luftschallemissionen (5) durchgeführt werden. Läuft der Entschichtungsprozess wie vorgesehen ab, so äußert sich dies in dem Verlauf der hochfrequenten Luftschallamplitu-

den (10) innerhalb des Toleranzbandes (9). Läuft der Prozess nicht wie vorgesehen, so bricht der Amplitudenverlauf aus dem Toleranzband aus. In jedem Fall, d.h. sowohl bei unvollständiger Entschichtung als auch beim Einschweißen in das Grundmaterial sinkt die Luftschallamplitude ab und durchbricht somit das Toleranzband nach unten. Diese Abweichung kann automatisiert ermittelt und zunächst zeitlich zugeordnet werden. Über die Kenntnis der Schweißgeschwindigkeit kann auch eine örtliche Lokalisierung stattfinden und eine Nacharbeit entsprechend durchgeführt werden.

Ist der Entschichtungsprozess abgeschlossen, wird die Laserleistung erhöht und/oder die Schweißgeschwindigkeit gesenkt und in Schritt II die eigentliche Fügeverbindung hergestellt. Die Luftschallsensoren erfassen nun die hochfrequenten Schallemissionen des eigentlichen Schweißprozesses. Wird ein Bereich verschweißt, in dem eine zuvor unvollständige Entschichtung stattgefunden hat und keine Nacharbeit erfolgt ist, so kann dies wiederum über ein weiteres Toleranzband ermittelt werden (11). Somit kann auch die eventuell durchgeführte Nacharbeit nochmals überwacht werden.

Mit dem oben vorgestellten Konzept für die Fertigung ist die Entschichtungskontrolle zweistufig möglich. Zum einen wird der eigentliche Entschichtungsvorgang mittels hochfrequenter Luftschallemissionen überwacht. Zum anderen werden auch die hochfrequenten Luftschallemissionen des eigentlichen Schweißprozesses detektiert. Eine zuvor unvollständige Entschichtung und/oder nicht erfolgreich durchgeführte Nacharbeit kann überwacht werden und auffällige Teile können gefunden und aus dem Fertigungsprozess ausgeschleust werden.

## 6.2 Körperschallemissionen, KSE

Es konnte gezeigt werden, dass das Körperschallsignal mehr oder weniger schlagartig abfällt, wenn die Durchschweißung des Fügequerschnittes erreicht ist (siehe Kapitel 5.1.1, 5.1.2). Das im Abschnitt 5.1.4 aufgestellte Modell besagt, dass die Ursache hierfür die wegfallende Interaktion der einfallenden Laserstrahlung mit dem Dampfkapillarboden ist. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass eine ausfallende Durchschweißung bei Blindschweißungen mittels Toleranzbandverfahren gut überwacht werden kann (siehe Kapitel 5.3.1).

Bei der Übertragung der Toleranzbänder auf reale Fügeverbindungen wurde deutlich, dass der Signal-Rausch-Abstand bei Überlappschweißungen (siehe Kapitel 5.2.1) und bei Stumpfstoßschweißungen (siehe Kapitel 5.2.2) nicht ausreichend ist, um die entstehenden Fehlstellen in ihrem vollen Ausmaße zu detektieren. Hier wurde jedoch auf die Verwendung des bei den Blindschweißungen erstellten Toleranzbandes zurückgegriffen. Eine Erstellung eines Toleranzbandes

speziell für Überlapp- sowie Stumpfstoßschweißungen könnte hier schon eine Verbesserung bringen, wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Im Hinblick auf ein Konzept für die Fertigung kann eine Verbesserung des Signal-Rausch Abstandes auch mit veränderter Position der Körperschallwandler realisiert werden. In allen bisher dargestellten Versuchen befinden sich die Körperschallwandler an der Spannvorrichtung (siehe Kapitel 4.4). Um den Schalllaufweg zu verkürzen, wurden in vergleichenden Versuchen die Körperschallwandler direkt auf die Spanner montiert. Dies hat jedoch nicht zu einer signifikanten Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes geführt. Bei Sägezahnmodulation der Laserleistung wurden nahezu vergleichbare Werte wie bei der Montage des Sensors an die Vorrichtung erzielt. Da eine Spannvorrichtung in jedem Fall in einem Fertigungsumfeld vorhanden ist, empfiehlt sich daher die Anbringung der Körperschallsensoren an die Spannvorrichtung.

Eine schematische Umsetzung der Überwachung von Schweißprozessen mittels Körperschallemissionen ist in Abbildung 65 (siehe vorheriges Kapitel) bereits enthalten. Der zugehörige Signalverlauf des dort diskutierten zweistufigen Schweißprozesses von zinkbeschichteten Fügepartnern ist Abbildung 66 zu entnehmen.

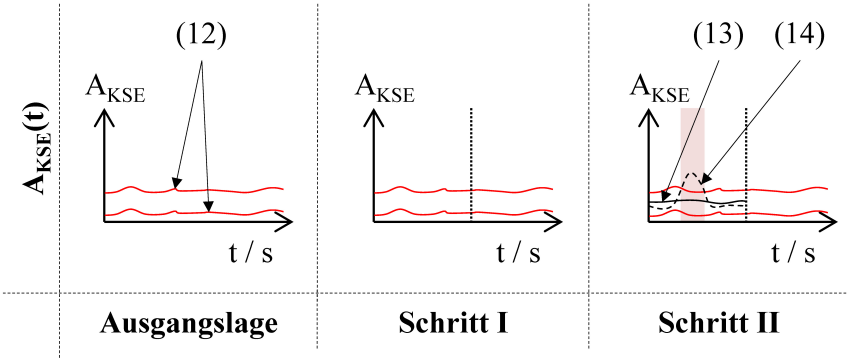



Abbildung 66: Signalverlauf bei Überwachung des Laserschweißprozesses mittels hochfrequenten Körperschallemissionen (Konzept siehe Abbildung 65)

Analog zu den im vorherigen Kapitel diskutierten hochfrequenten Luftschallemissionen, wurde im Vorfeld ein Toleranzband für die Körperschallemissionen (12) ermittelt und im Messcomputer hinterlegt. Bei der Durchführung von Schritt I, der Entfernung der Zinkbeschichtung, sind keine signifikanten Körperschallemissionen messbar. Daher kommt hier die Überwachung mittels hochfrequenten Körperschalls nicht zum Einsatz. Ist die Entschichtung abgeschlossen, beginnt der eigentliche Laserschweißprozess (Schritt II). Hier kann die Durchschweißung der Fügeverbindung mit Hilfe des Toleranzbandes (12) überwacht werden. Liegt ein Gutschweißprozess vor, so liegt der zeitliche Verlauf der Amplituden der hochfrequenten Körperschallemissionen innerhalb des Toleranzbandes (13). Fällt die Durchschweißung aus, wird das Toleranzband nach oben verlassen

(14). Über den zeitlichen Verlauf kann mit Hilfe der Schweißgeschwindigkeit auch eine Lokalisierung der Fehlstelle für die anschließende Nacharbeit erfolgen. Die Nacharbeit kann, sofern sie mit der gleichen Laserschweißanlage durchgeführt wird, ebenfalls mittels hochfrequenter Körperschallemissionen überwacht werden.

## 6.3 Bewertung und Grenzen

Die Bewertung des im vorherigen Abschnitt vorgestellten Konzeptes ist wichtig, um den möglichen Einsatzbereich zu beleuchten. Daraus ergeben sich die Grenzen des vorgestellten Konzeptes, woraus sich weitere Entwicklungspotentiale ableiten lassen. Diese Bewertung erfolgt für die Körper- und Luftschallemissionen im Folgenden in getrennten Kapiteln.

### 6.3.1 Körperultraschallemissionen

Eine großserientaugliche Einbindung von Körperschallsensoren ist durch Integration der Sensorik in die Spannvorrichtung möglich. Damit ist sichergestellt, dass die Sensorposition reproduzierbar ist und auch die Anpresskraft des Bauteils, welches gefügt werden soll, konstant ist. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Anbringung der Körperschallsensoren möglichst nahe am Schweißprozess durchgeführt wird. Da die Schalldämpfung im Festkörper im Vergleich zur Schalldämpfung von Schnittstellen relativ gering ist, ist darauf zu achten, dass möglichst wenige Schnittstellen zwischen dem Schweißprozess und dem Körperschallsensor liegen.

Piezokeramiken, welche zur Umwandlung des Schallsignals in ein elektrisches Signal bei der Erfassung von Körperschallemissionen beim Laserschweißen dienen, haben eine relativ niedrige Curie-Temperatur im Bereich von ca. 200°C. Wird diese Temperatur erreicht oder sogar überschritten, sind die elektrischen Signale nicht mehr reproduzierbar oder es können keine Körperschallsignale mehr gemessen werden. Dies ist auch bei der Auswahl des Anbringungsortes des Sensors entscheidend. Eventuell wird es notwendig, den Sensor zu kühlen um gleichbleibende Temperaturbedingungen zu schaffen.

Beim Laserstrahlschweißen von Karosseriebauteilen kommt es häufig vor, dass mehrere einzelne Laserschweißnähte verwendet werden, um die Fügepartner zu verbinden anstelle einer langen Laserschweißnaht. Da es vermutlich zu aufwendig wäre, für jede einzelne Schweißnaht einen Körperschallsensor zu installieren, müssen mit einem Sensor mehrere Schweißnähte überwacht werden. Dies führt dazu, dass der Schalllaufweg von jeder Schweißung bis zum Sensor unterschiedlich ist. Hier gilt es noch zu untersuchen, welcher maximale Schalllaufweg realisierbar ist und welchen Einfluss dieser auf die Bestimmung von Toleranzbändern hat. Unter Umständen muss für jedes Bauteil und für jeden Sensor ein eigenes Toleranzband im Rahmen von Kalibrierversuchen erstellt werden, da eine absolute Messung des Körperschalls nicht möglich sein wird. Zusätzlich

stellt sich die Frage, welche Varianz Körperschallsensoren vom gleichen Typ aufweisen. Dies ist vor allem in Bezug auf den Austausch eines defekten Sensors wichtig. Wenn die Körperschallsignale von verschiedenen Sensoren des gleichen Typs reproduzierbare Ergebnisse liefern, kann ein defekter Sensor einfach ersetzt werden. Falls dies nicht der Fall ist, kann es notwendig werden nach jedem Sensoraustausch eine neue Kalibrierung durchzuführen.

Eine weitere offene Frage ist der Einfluss von verschiedenen Fügequerschnitten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jeweils ein Fügequerschnitt von t = 2 mm betrachtet. Dies liegt im Bereich der gängigen Fügequerschnitte im automobilen Karosseriebau. Es müssen jedoch weitere Versuche durchgeführt werden um zu untersuchen, inwieweit sich kleinere bzw. größere Fügequerschnitte auf die Körperschallemissionen auswirken.

In verschiedenen Anwendungen werden Mehrblechverbindungen mittels Laser verschweißt. Spannvorrichtungen können hierbei so konstruiert sein, dass jeweils nur der untere Fügepartner direkten Kontakt mit der Spannvorrichtung hat. Die Versuche haben jedoch gezeigt, dass beim Schweißen von Überlappverbindungen im oberen Fügepartner das beste Signal-Rausch-Verhältnis zur Fehlerdetektion erreicht werden kann. Hier kann es notwendig sein, die Körperschallsensoren in den Spanner an sich zu integrieren, um bessere Ergebnisse zu erzielen. Damit schließt sich die Frage nach der Integrierbarkeit von piezoelektrischen Sensoren in die Spanner und die damit verbundene Haltbarkeit der Sensoren an. Auch die oben diskutierte Problematik in Bezug auf die Einsatztemperatur muss hier noch geklärt werden.

Im Versuchsprogramm wurden jeweils Kaltumformstähle verschweißt. Aufgrund der chemischen Zusammensetzung dieser Stähle kommt es beim Abkühlen der Laserschweißnaht nicht oder zu einem vernachlässigbar geringen Anteil zu einer Umwandlung des ferritischen Ausgangsgefüges über ein austenitisches in ein martensitisches Gefüge. Gerade im Karosseriebau im Bereich der Strukturbauteile werden vermehrt pressgehärtete Stähle eingesetzt, welche ebenfalls mittels Schmelzschweißverfahren verbunden werden. Infolge des Schweißprozesses wandelt sich das ganz oder teilweise vorhandene martensitische Ausgangsgefüge beim Abkühlen der Laserschweißnaht wiederum in Martensit um. Diese Umwandlung ist stark impulsartig und ruft bekannter Weise Körperschallemissionen hervor. Es stellt sich also die Frage, inwieweit diese die Körperschallemissionen des Schweißprozesses überlagern und somit unter Umständen zu einer Überlagerung führen.

Aufgrund der Einschränkung, dass die im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehende Laserstrahlquelle eine maximal Laserleistung von P = 2000 W liefert, musste der Bereich der Schweißgeschwindigkeit nach oben begrenzt werden, um noch Fügequerschnitte von t = 2 mm realisieren

zu können. Der betrachtete Bereich der Schweißgeschwindigkeit von $v_S \approx 20$ mm/s ist nicht mit realen Bedingungen einer Großserienfertigung zu vergleichen. Hier werden deutlich höhere Schweißgeschwindigkeiten und Laserleistungen im Bereich von $v_S = 100$ mm/s und P = 6 kW erreicht. Die Übertragbarkeit der hier erzielten Ergebnisse auf diese Produktionsparameter muss also im Rahmen folgender Untersuchungen unter Beweis gestellt werden.

Die örtliche Auflösung in Bezug auf die Fehlerdetektion mittels hochfrequenter Körperschallemissionen hängt ausschließlich von den Samplingraten ab, mit welchen das Körperschallsignal abgetastet wird. Das hier verwendete Gerät zur Datenerfassung liefert eine Samplingrate im Bereich von 25 MHz, was zu einer theoretischen örtlichen Auflösung im Submillimeter-Bereich, auch bei sehr hohen Schweißgeschwindigkeiten, führt. Hier besteht also keine Einschränkung in Bezug auf die praktische Umsetzung.

### 6.3.2 Luftultraschallemissionen

Die im vorherigen Kapitel diskutierten Bewertungen und Grenzen der Prozessüberwachung mittels hochfrequenter Körperschallemissionen sind zum Teil auch auf die Überwachung mittels hochfrequenter Luftschallemissionen übertragbar. Dies betrifft beispielsweise die Untersuchung großseriennaher Laserleistungs- und Schweißgeschwindigkeitsbereiche. Auch die maximale Einsatztemperatur ist für den Luftschallwandler vergleichbar mit den Körperschallsensoren, da beide Piezokeramiken zur Schallerfassung nutzen. Auch die zeitliche und örtliche Auflösung ist nur von der Datenerfassung abhängig und damit für Luft- und Körperschallemissionen gleich. Es gibt jedoch weitere spezifische Einflussfaktoren, welche speziell die Anwendung der Luftschallsensorik zur Überwachung hochfrequenter Luftschallemissionen zur Prozessüberwachung beim Entschichten limitieren. Diese werden im Folgenden diskutiert.

Alle im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Versuche wurden anhand von Laserschweißprozessen ermittelt, welche ohne den Einsatz von Schutzgas durchgeführt wurden. Je nach Anwendung, kann es auch bei einigen Fügeverbindungen notwendig sein, den Laserschweißprozess unter Schutzgasatmosphäre durchzuführen. Damit kann die Schweißnahtqualität gesteigert bzw. der Prozessverlauf stabilisiert werden. Im Rahmen von hier nicht dargestellten Stichversuchen wurde der Einfluss der Verwendung von Schutzgasen (Argon, Helium) auf die hochfrequenten Luftschallemissionen von Laserschweißprozessen untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die Verwendung von Schutzgasen den charakteristischen Verlauf der Luftschallamplituden über die Laserleistung beeinflusst. Hier ist es also notwendig weitergehende Versuche durchzuführen, um den Einfluss der Verwendung von Schutzgasen besser quantifizieren zu können.

Im Laufe der vorliegenden Arbeit ist mehrfach der Einfluss der starken Richtcharakteristik der Luftschallsensoren auf die Detektion von hochfrequenten Luftschallemissionen diskutiert worden. Es ist also zwingend notwendig, den Luftschallsensor immer auf den Fokusfleck oder einen anderen Bereich von Interesse fest auszurichten. Dies ist nur bei Laserschweißoptiken möglich, welche einen festen Fokusfleck im Verhältnis zur Position der Optik im Raum haben. Das gilt nicht für die in der Automobilindustrie häufig verwendeten Scanneroptiken. Hier wird der Laserstrahl zusätzlich zur Bewegung der Optik mit Robotern auch über ein internes Spiegelsystem bewegt. In dieser Art von Optiken kann der Luftschallwandler nicht immer auf die gleiche Position des Schweißprozesses ausgerichtet werden und ist daher nicht einsetzbar zur Überwachung hochfrequenter Luftschallemissionen.

In dieser Arbeit wurde der Einfluss einer Zinkbeschichtung mit konstanter Beschichtungsdicke auf die hochfrequenten Luftschallemissionen untersucht. Es besteht bisher keine Erfahrung des Einflusses der Beschichtungsdicke auf die Luftschallemissionen. Darüber hinaus kann die Zusammensetzung der Zinkbeschichtung, das Zinkbeschichtungsverfahren, etc. auch einen Einfluss auf die hochfrequenten Luftschallemissionen beim Laserschweißen dieser Werkstoffe haben. Eine weitere Fragestellung ist der Einfluss von anderen Beschichtungsarten, welche beispielsweise im automobilen Karosseriebau eingesetzt werden. Hier gibt es noch keine Erfahrungswerte der Generation von hochfrequenten Luftschallemissionen beim Laserschweißen. Zur Klärung müssen noch weitere Versuche zur Untersuchung der oben genannten Einflussparameter durchgeführt werden.

Eine weitere offene Fragestellung ist die Haltbarkeit der Luftschallsensoren in einem Großserienumfeld. Im Rahmen der Versuche, welche in dieser Arbeit durchgeführt wurden, wurden ca. 2500 Schweißproben mit einer durchschnittlichen Schweißnahtlänge von 100 mm angefertigt. Alle Proben wurden bzgl. hochfrequenter Luftschallemissionen untersucht. D.h. der Luftschallsensor wurde für eine gesamte Schweißnahtlänge von 250 m verwendet. Dabei wurden teilweise zinkbeschichtete Werkstoffe und teilweise unbeschichtete Werkstoffe verschweißt. Es ist davon auszugehen, wenn der Luftschallsensor ausschließlich zur Überwachung der Zinkabdampfung beim Laserschweißen eingesetzt wird, dass dieser früher oder später durch die Zinkdämpfe beschädigt wird. Die Zeitspanne, bis die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des Sensors ausfällt, ist derzeit unbekannt und muss noch untersucht werden. Ist es notwendig einen Sensor auszutauschen, stellt sich die gleiche Frage, wie bereits bei den Körperschallsensoren diskutiert. Kann der Sensor einfach ausgetauscht werden, ohne dass eine erneute Kalibrierung durchgeführt wird, oder muss die Aufstellung der Toleranzbänder erneut erfolgen?

Hochfrequente Luftschallemissionen, wie sie von der Zinkverdampfung beim Laserschweißen verursacht werden, werden auf dem Weg von der Entstehungsstelle zum Luftschallsensor in der

Luft stark gedämpft. Diese Dämpfung ist proportional zum Quadrat der Frequenz. Dadurch werden hochfrequente Anteile deutlich stärker gedämpft als niederfrequente Schallsignale. Die Einstellung des Abstandes des Luftschallsensors zum Bauteil ist also ein Kompromiss. Ein zu großer Abstand führt zu einem schlechten Schallsignal und ein zu kleiner Abstand schränkt die Bewegung der Schweißoptik zu stark ein. Damit sind die Größe und der damit verbundene Platzbedarf der Luftschallsensoren ein limitierender Faktor. Je nach Aufbau und Ausrüstung der Laserschweißanlage kann es möglich sein, dass ein piezoelektrischer Luftschallsensor nicht integrierbar ist.

Bei der Entfernung der Zinkbeschichtung ist die Einstellung der richtigen Streckenenergie der entscheidende Parameter. Wird die Streckenenergie zu niedrig gewählt, wird nicht die komplette Zinkschicht abgetragen und der verbleibende Rest kann die spätere Laserschweißnaht im Hinblick auf die Schweißnahtqualität negativ beeinflussen. Wird zu viel Energie zum Entfernen der Zinkbeschichtung eingestellt, so bildet sich bereits ein größeres Schmelzbad des Grundwerkstoffes, welches unter Umständen einen Teil des Zinks aufnimmt, was wiederum zu einer mangelnden Laserschweißnahtqualität beim anschließenden Schweißprozess führen kann. Wird nun ein Luftschallsensor zur Überwachung der Entfernung der Zinkbeschichtung verwendet, so ist der Verlauf der hochfrequenten Schallemissionen in beiden Fällen (zu hohe, zu niedrige Streckenenergie) identisch. Das Signal fällt ab. Es kann also nicht qualitativ unterschieden werden, ob eine zu hohe oder eine zu niedrige Streckenenergie verwendet wurde. Wird diese Information zwingend benötigt, muss in weiteren Untersuchungen geklärt werden, inwiefern aus dem Verlauf des Signalabfalls die Ursache ermittelt werden kann.

# 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zur Realisierung von beherrschbaren Laserschweißprozessen kann eine stabile und zuverlässige In-Process-Überwachung einen wichtigen Beitrag leisten. Daraus können auch Strategien zur Umsetzung einer Prozessregelung abgeleitet werden. Die vorliegende Arbeit hat hierzu einen wichtigen Beitrag geliefert, indem der bekannte Stand der Technik um die Untersuchung von hochfrequenten Körper- und Luftschallemissionen erweitert wurde.

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit konnte erstmalig die Existenz von hochfrequenten und breitbandigen Luftschallemissionen eines Laserschweißprozesses nachgewiesen werden. Basis hierfür ist eine tiefergehende Untersuchung der Dampfabströmung über den bisher bekannten Stand der Technik hinaus. Anhand von Blindschweißungen hat sich gezeigt, dass diese hochfrequenten Luftschallemissionen verschiedenen Schallursachen zugeordnet werden können. Dies ist bei zinkbeschichteten Blechen die Verdampfung der Zinkbeschichtung bei niedrigen Laserleistungen. Bei Steigerung der Laserleistung wird auch das Grundmaterial der Schweißprobe verdampft, was wiederum zu hochfrequenten Luftschallemissionen führt. Bei einer unbeschichteten Probe konnte diese nachgewiesen werden wohingegen bei zinkbeschichteten Proben die Luftschallemissionen der Grundmaterialverdampfung von denjenigen der Zinkverdampfung überlagert werden. Ist die Bildung einer Dampfkapillare erfolgt, führt die Interaktion der mehrfach an den Seitenwänden nach unten reflektierten einfallenden Laserstrahlung mit dem Boden der Dampfkapillare zu breitbandigen und hochfrequenten Luftschallemissionen. Wird eine Durchschweißung erreicht, so fällt die Amplitude der Luftschallemissionen ab. Diese Erkenntnisse wurden in einem Modell zur Entstehung von hochfrequenten Luftschallemissionen beim Laserstrahlschweißen zusammengefasst und über umfangreiche Experimente validiert. Es konnte gezeigt werden, dass diese Ergebnisse und das aufgestellte Modell auf reale Fügeverbindungen (Stumpf- und Überlappstoß) übertragen werden können.

Auch die Existenz von hochfrequenten Körperschallemissionen konnte erstmalig im Rahmen der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden. Hier konnte gezeigt werden, dass es sich um charakteristische breitbandige Körperschallemissionen handelt. Die Untersuchung der Schallursachen anhand von Blindschweißungen hat ergeben, dass die Verdampfung einer evtl. vorhandenen Zinkbe-

schichtung sowie das beginnende Aufschmelzen des Grundmaterials keine signifikanten hochfrequenten Körperschallemissionen hervorrufen. Reicht jedoch die Energiedichte im Fokusfleck des Lasers aus, um eine Dampfkapillare zu erzeugen, so können breitbandige und hochfrequente Körperschallemissionen gemessen werden. Die Ursache dieser Schallemissionen liegt in der Interaktion der einfallenden Laserstrahlung mit dem Boden der Dampfkapillare. Wird die Schweißprobe in ihrem kompletten Querschnitt durchgeschweißt, so fällt das Körperschallsignal auf Grundrauschniveau ab. Diese Erkenntnisse konnten analog zu den Luftschallemissionen, welche über eine Vielzahl experimenteller Untersuchungen validiert wurden, in einem Modell zur Entstehung hochfrequenter Körperschallemissionen zusammengefasst werden. Auch die Übertragung der Ergebnisse der Blindschweißung und des aufgestellten Modells auf reale Fügeverbindungen (Stumpf- und Überlappstoß) war erfolgreich.

Ein weiterer Teil der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich mit der möglichen Korrelation hochfrequenter Schallemissionen (Körper- und Luftschall) mit dem Schweißprozess und der Entstehung von Fehlstellen. Die Untersuchung der Nutzbarkeit von hochfrequenten Körper- und Luftschallemissionen zur Detektion von Fehlern (mangelnde Durchschweißung) zunächst anhand von Blindschweißungen durchgeführt. Hierzu wurde das Toleranzbandverfahren eingesetzt. Die Kalibrierung anhand von Gutschweißungen wurde sowohl für die hochfrequenten Luft- als auch Körperschallemissionen durchgeführt. Die hochfrequenten Körperschallamplituden überschreiten das kalibrierte Toleranzband sehr deutlich, wenn die Durchschweißung ausfällt. Hier konnte gezeigt werden, dass dies ein vielversprechender Ansatz zur Fehlerdetektion ist. Im Vergleich dazu ist die Sensitivität der hochfrequenten Luftschallemissionen zur Fehlerdetektion mittels Toleranzbandverfahren deutlich schlechter. Dies ist nach der Erkenntnis über die dominierenden Schallursachen nachvollziehbar. Da die hochfrequenten Körperschallemissionen ausschließlich im Tiefschweißen und bei nicht vollständig durchgeschweißten Probenquerschnitten auftreten, eigenen sich diese sehr gut zur Überwachung der Fehlerentstehung im Tiefschweißprozess. Die hochfrequenten Luftschallemissionen hingegen sind dominiert von der Dampfabströmung, welche stark von der Schweißgeschwindigkeit und den lokalen Gegebenheiten abhängig ist, was sich als Nachteil im Hinblick auf die Fehlerdetektion herausgestellt hat.

Eine Übertragung der anhand von Blindschweißungen ermittelten Toleranzbänder auf reale Fügeverbindungen (Überlapp- und Stumpfstoß) hat sich nicht als zielführend herausgestellt. Die Wahrscheinlichkeit zum Auffinden von Anbindefehlern ist deutlich schlechter im Vergleich zu den durchgeführten Blindschweißungen.

Im letzten Schwerpunkt der Arbeit wurde untersucht, inwieweit die hochfrequenten Schallemissionen (Körper- und Luftschall) zur Prozessüberwachung verwendet werden können. Aufgrund der

unterschiedlichen dominierenden Schallursachen für hochfrequente Körper- und Luftschallemissionen konnte gezeigt werden, dass diese für unterschiedliche Zwecke der Prozessüberwachung eingesetzt werden können. Da die hochfrequenten Luftschallemissionen sehr stark von schnellen Abdampfprozessen beeinflusst werden, können diese im Rahmen eines Fertigungskonzeptes sehr gut zur Entschichtungsüberwachung eingesetzt werden. Im dazu vorgestellten Konzept ist die Entfernung der erste Schritt zur Herstellung einer Fügeverbindung (Stumpf- oder Überlappstoß) von beschichteten Werkstoffen. Die hochfrequenten Körperschallemissionen eignen sich zur Überwachung des Tiefschweißprozesses bzw. der Durchschweißung. Dies ist vor allem bei Überlappstößen von besonderer Bedeutung, da hier eine Durchschweißung der Fügepartner notwendig ist, um eine tragfähige Fügeverbindung herstellen zu können. In vielen Untersuchungen von In-Process-Überwachungskonzepten hat es sich als zielführend herausgestellt, Sensorkombinationen zu nutzen um einen maximalen Informationsgehalt über den Laserschweißprozess zu erhalten. Dies kann auch auf die Anwendung der Überwachung von hochfrequenten Schallemissionen übertragen werden. Diese können beispielsweise mit der Erfassung von elektromagnetischen Emissionen kombiniert werden.

Ausblickend kann festgehalten werden, dass die mit dieser Arbeit erreichte Erweiterung des Standes der Technik zwar eine Basis für die Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen mittels hochfrequenten Schallemissionen bildet, jedoch in Anlehnung an die dargestellten Grenzen dieser Art der Prozessüberwachung noch weitere Untersuchungen notwendig werden. Dazu gehört die Überwindung der in Kapitel 6.3 dargestellten Grenzen. Da die Übertragung der anhand von Blindschweißungen ermittelten Toleranzbänder auf reale Fügeverbindungen nicht zielführend war, müssen weitere Untersuchungen dieser Toleranzbänder mit Hilfe realer Fügeverbindungen im Produktionsumfeld durchgeführt werden. Erst dann kann eine belastbare Aussage über die Leistungsfähigkeit der Fehlerdetektion mittels hochfrequenter Körperschallemissionen getroffen werden. Darüber hinaus können aus dem Amplitudenverlauf der hochfrequenten Körper- und Luftschallemissionen auch weitere Merkmale extrahiert werden. Dazu gehört beispielsweise die Untersuchung der Korrelation der Variation der Sensorsignale mit Prozessereignissen. Alternativ zur automatisierten Beurteilung von Signalverläufen mit dem Toleranzbandverfahren sollten auch noch weitere Auswerteverfahren (z.B. künstliche neuronale Netze) untersucht werden. Auch die Untersuchung von beim Schweißen umwandelnden Werkstoffen (z.B. martensitisches Ausgangsgefüge) spielt vor allem im Hinblick auf die damit verbundene Körperschallerzeugung eine große Rolle. Der Einfluss anderer Beschichtungen auf die hochfrequenten Luftschallemissionen infolge des Abdampfprozesses ist ein zusätzlicher Aspekt. Vor allem beim Einsatz von hochfrequenten Luftschallsensoren ist die Richtcharakteristik sehr ausgeprägt. Diese könnte durch Aufbau eines

Sensor-Arrays genutzt werden, um die richtungsabhängige Luftschallabstrahlung als weiteres Merkmal im Hinblick auf eine Prozessüberwachung zu nutzen. Darüber hinaus sind mit den optischen Mikrofonen mittlerweile alternative sensorische Verfahren zur Detektion von hochfrequentem Luftschall bekannt. Diese bieten den Vorteil, dass sie keine ausgeprägte Resonanzfrequenz im Vergleich zu piezoelektrischen Sensoren aufweisen, wodurch sie sich sehr gut zur Erfassung von breitbandigen Schallemissionen eignen. Im Hinblick auf die Entstehung von Fehlstellen wurde in dieser Arbeit die mangelnde Durchschweißung untersucht. Darüber hinaus gibt es noch unzählige weitere Ungänzen einer Laserschweißnaht, welche zur Erreichung einer Gutschweißung detektiert werden müssen. Dazu gehört beispielweise die Rissbildung, welche unter Umständen ebenfalls durch die Überwachung von hochfrequenten Körperschallemissionen detektiert werden könnte.

Aus wissenschaftlicher Sicht müssen weitere Arbeiten das hier aufgestellte Modell zu den Schallursachen von hochfrequenten und breitbandigen Körperschallemissionen verifizieren. Dies betrifft insbesondere die Ursache von hochfrequenten Luftschallemissionen bei Verdampfungsprozessen (z.B. der Zinkbeschichtung). Des Weiteren bezieht sich dies auf die Erzeugung von breitbandigen Körperschallemissionen infolge der Interaktion der einfallenden Laserstrahlung mit dem Dampfkapillarboden. Für beide angesprochenen Fragestellungen müssen der Ort und die Prinzipien der Schallentstehung besser verstanden werden.

# LITERATURVERZEICHNIS


Abt, 2011 — Abt, F.; Boley, M.; Weber, R.; Graf, T.; Popko, G.; Nau, S. (2011): Novel X-ray System for in-situ Diagnostics of Laser Based Processes – First Experimental Results. In: Physics Procedia 12, 2011, S. 761–770.

Abt, 2011a — Abt, F.; Heider, A.; Weber, R.; Graf, T.; Blug, A.; Carl, D.; Höfler, H.; Nicolosi, L.; Tetzlaff, R.: Camera Based Closed Loop Control for Partial Penetration Welding of Overlap Joints. Physics Procedia 12, S. 730–738, 2011.

AD 2000 — AD 2000-Merkblatt HP 5/3:2011-05: Herstellung und Prüfung der Verbindungen - Zerstörungsfreie Prüfung der Schweißverbindungen.

Ali, 2000 — Ali, A.; Farson, D.: Statistical Classification of Spectral Data for Laser Weld Quality Monitoring. In: ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 2002, 29.01.2000 (124), S. 323–325, 2000.

Anabitarte, 2012 — Anabitarte, F.; Mirapeix, J.; Portilla, O. M. C.; Lopez-Higuera, J. M.; Cobo, A.: Sensor for the Detection of Protective Coating Traces on Boron Steel With Aluminium–Silicon Covering by Means of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy and Support Vector Machines. In: IEEE Sensors J. 12, 2012 (1), S. 64–70, 2012.

Ancona, 2008 — Ancona, A.; Sibilano, T.; Lugara, P.M.: Optical plasma spectroscopy as a tool for monitoring laser welding processes. In: Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, (Volume 21 Issue 2), S. 402–407, 2008.

Andreev, 2011 — Andreev, A.: Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau - Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte. Dissertation, Universität Stuttgart, IFSW. 2011.

Armbruster, 2011 — Armbruster, B.; Neuschaefer-Rube, S.: Laser light cable. Patent US7978944-B2, 2011.

Artinger, 1990 — Artinger, G.; Hanicke, L.; Timm, K.; Wirth, P.: Untersuchung akustischer und optischer Messverfahren zur Diagnose des Laserstrahlschweißens. In: Schweißen und Schneiden 42 (7), S. 333–337, 1990.

Bae, 2006 — Bae, K.-Y.; Park, J.-H.: A study on development of inductive sensor for automatic weld seam tracking. In: Journal of Materials Processing Technology 176 (1-3), S. 111–116. 2006.

Berndl, 2011 — Berndl, J.; Walter, S.; Kischke, T.; Haschke, I.; Hornig, H.: Joining Device for non-positive joining by means of a filler material using sensors. Patentschrift. WO2011042292.

Birnesser, 2011 — Birnesser, A. J.: Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen. Dissertation, IFSW, Universität Stuttgart, 2011.

Bordatchev, 2006 — Bordatchev, E. V.; Nikumb, S. K.: Effect of focus position on informational properties of acoustic emission generated by laser–material interactions. In: Applied Surface Science 253 (3), S. 1122–1129, 2006.

Crostack, 1998 — Crostack, H.-A.; Reuss, G.; Bach, F.-W.; Honekamp, E.: Non-Destructive Control of the Electron Beam (EB) Welding Process by Means of Acoustic Emission (AE). In: Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, S. 2366–2370, 1998.

Dilger, 2007 — Dilger, K.; Tanasie, G.: Qualifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Charakterisierung laserstrahlgeschweißter Überlappverbindungen an Stahl. Abschlussbericht zum AiF-Projekt Nr. 14.433N. Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs). Braunschweig, 2007.

| | |
|---|---|
| DIN 13919-1 | DIN EN ISO 13919-1:1996-09: Schweißen - Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen; Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten - Teil 1: Stahl. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1996. |
| DIN 54192 | DIN 54192:2010-11: Zerstörungsfreie Prüfung - Aktive Thermografie. |
| DIN 8580 | DIN 8580 DIN 8580: 2003-09: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. |
| DIN 8593-6 | DIN 8593-6:2003-09: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 6: Fügen durch Schweißen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe |
| DIN EN ISO 10675 | DIN EN ISO 10675-2:2013-12: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Zulässigkeitsgrenzen für die Durchstrahlungsprüfung - Teil 2: Aluminium und seine Legierungen. |
| DIN EN ISO 17636 | DIN EN ISO 17636-1: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Durchstrahlungsprüfung. |
| DIN EN ISO 17637 | DIN EN ISO 17637:2011-05: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen. |
| DIN EN ISO 17639 | DIN EN ISO 17639:2013-12: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen von Schweißnähten. |
| DIN EN ISO 23277 | DIN EN ISO 23277:2013-02: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Eindringprüfung von Schweißverbindungen – Zulässigkeitsgrenzen. |
| DIN EN ISO 4136 | DIN EN ISO 4136:2013-02: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Querzugversuch. |
| DIN EN ISO 5173 | DIN EN ISO 5173:2012-02: Zerstörende Prüfungen von Schweißnähten an metallischen Werkstoffen – Biegeprüfungen. |
| DIN EN ISO 5579 | DIN EN ISO 5579:2014-04: Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlungsprüfung von metallischen Werkstoffen mit Film und Röntgen- oder Gammastrahlen – Grundlagen. |

| | |
|---|---|
| DIN EN ISO 9015-1 | DIN EN ISO 9015-1:2011-05: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Härteprüfung - Teil 1: Härteprüfung für Lichtbogenschweißverbindungen. |
| DIN EN ISO 9015-2 | DIN EN ISO 9015-2:2011-05: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Härteprüfung - Teil 2: Mikrohärteprüfung an Schweißverbindungen. |
| DIN EN ISO 9016 | DIN EN ISO 9016:2013-02: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Kerbschlagbiegeversuch - Probenlage, Kerbrichtung und Beurteilung. |
| DIN EN ISO 9017 | DIN EN ISO 9017:2013-12: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Bruchprüfung. |
| DIN EN ISO 9606 | DIN EN ISO 9606-1:2013-12: Prüfung von Schweißern - Schmelzschweißen - Teil 1: Stähle. |
| DIN EN 13018 | DIN EN 13018:2001-07: Zerstörungsfreie Prüfung - Sichtprüfung - Allgemeine Grundlagen. |
| DIN EN 1711 | DIN EN 1711:2000-03: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Wirbelstromprüfung von Schweißverbindungen durch Vektorauswertung. |
| DIN EN ISO 15549 | DIN EN ISO 15549:2011-03: Zerstörungsfreie Prüfung - Wirbelstromprüfung - Allgemeine Grundlagen. |
| DIN EN ISO 16810 | DIN EN ISO 16810:2014-07: Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Allgemeine Grundsätze. |
| DIN EN ISO 17635 | DIN EN ISO 17635:2010-08: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Allgemeine Regeln für metallische Werkstoffe. |
| DIN EN ISO 17640 | DIN EN ISO 17640:2011-04: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Ultraschallprüfung - Techniken, Prüfklassen und Bewertung. |
| DIN EN ISO 3452-1 | DIN EN ISO 3452-1:2014-09: Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen. |

Dorsch, 2012 — Dorsch, F.; Braun, H.; Keßler, S.; Magg, W.; Pfitzner, D.; Plaßwich, S.: Process Sensor Systems for Laser Beam Welding. In: LTJ 9 (3), S. 24-28, 2012

Döttinger, 2007 — Döttinger, C.: Automatische Prüfung von Fügeverbindungen in der Automobilindustrie. 10 Jahre Jubiläumsveranstaltung. Fraunhofer Alianz Vision. Erlangen 2007.

Döttinger, 2009 — Döttinger, C.: Qualitätskontrolle bei Laserschweißnähten. In: LTJ 6 (6), S. 23–25, 2009.

Duley, 1994 — Duley, W. W.; Mao, Y. L.: The effect of surface condition on acoustic emission during welding of aluminum with $CO_2$ laser radiation. In: J. Phys. D: Appl. Phys. 27 (7), S. 1379–1383, 1994.

DVS 3210 — DVS 3210:2007-07: Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Elektronen- und Laserstrahlschweißnähten.

DVS 3214 — DVS 3214:2009-12: Unregelmäßigkeiten an Laserstrahlschweißnähten – Ursachen und Abhilfemaßnahmen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.

DVS 3219 — DVS 3219:2005-11: Qualitätssichernde Sensorik während des Laserstrahlschweißens.

Eriksson, 2011 — Eriksson, I.: Optical monitoring and analysis of laser welding. Licentiate Thesis. Luleå University of Technology, 2011.

Everton, 2016 — Everton, S. K.; Hirsch, M.; Stravroulakis, P.; Leach, R. K.; Clare, A. T.: Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. Materials and Design 95. S. 431 – 445, 2016.

Farson, 1990 — Farson, D. F.; Fang, K. S.; Kern, K. T.: Classification of laser welds by acoustic signature -. In: Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control, S. 1620–1621, 1990.

Farson, 1999 — Farson, D. F.; Kim, K. R.: Generation of optical and acoustic emissions in laser weld plumes. In: J. Appl. Phys. 85, 1999 (3), S. 1329, 1999.

| | |
|---|---|
| Farson, 2000 | Farson, D.; Sang, Y.; Ali, A.: Relationship Between Air-Borne Acoustic and Optical Emissions During Laser Welding. In: Journal of Laser Applications, 9(2), S. 87–94, 2000. |
| Fischer, 2007 | Fischer, B.: TRANSDUCTEUR ÉLECTROACOUSTIQUE. Patent, WO2008000007 (A1), 2007. |
| Gaal, 2014 | Gaal, M.; Bartusch, J.; Dohse, E.; Kreutzbruck, M.; Amos, J.: Air-coupled ultrasonic testing of metal adhesively bonded joints using cellular polypropylene transducers, AIP Conf. Proc. 1581, S. 471–478, 2014. |
| Gao, 2012 | Gao, X.; You, D.; Katayama, S.: Infrared image recognition for seam tracking monitoring during fiber laser welding. In: Mechatronics 22 (4), S. 370–380, 2012. |
| Gatzweiler, 1989 | Gatzweiler, W.; Maischner, D.; Faber, F. J.; Derichs, C.; Beyer, E.: Model Of Dynamic Behaviour In Laser Beam Welding. In: Proc. SPIE 1132, 1989. |
| Giesen, 2007 | Giesen, A.; Speiser, J.: Fifteen Years of Work on Thin-Disk Lasers: Results and Scaling Laws. IEEE Journal of Selected Topics in quantum Electronics, Vol. 13, No. 3 2007. |
| Gu, 1996 | Gu, Hongping; Duley, W. W.: Resonant acoustic emission during laser welding of metals. In: J. Phys. D: Appl. Phys. (29), S. 550–555, 1996. |
| Gu, 1996a | Gu, H.; Duley, W. W.: A statistical approach to acoustic monitoring of laser welding. In: J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (3), S. 556–560, 1996. |
| Hesse, 2009 | Hesse, T.; Pfitzer, D.; Magg, W.: Preparing and Performing of a Laser Welding Process. Patentschrift. US 2009/0145888. |
| Hierl, 2011 | Hierl, T: Laser welding & heat flux thermography. In: LTJ 8, 2011 (3), S. 54–57, 2011. |
| Hillers, 2003 | Hillers, O.: Fehlerklassifizierende Prozesskontrolle mittels multivariater Statistik beim Laserstrahlschweissen. Dissertation. Uni- |

versität Hannover, Hannover. Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, 2003.

Huang, 2009 — Huang, W.; Kovacevic, R.: Feasibility study of using acoustic signals for online monitoring of the depth of weld in the laser welding of high-strength steels. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 223, 2009 (4), S. 343–361, 2009.

Huang, 2010 — Huang, W.: Investigation of sensing, monitoring and control issues in welding process. Dissertation. Southern Methodist University, Dallas. School of Engineering, 2010.

Huang, 2011 — Huang, W.; Kovacevic, R.: A neural network and multiple regression method for the characterization of the depth of weld penetration in laser welding based on acoustic signatures. In: J Intell Manuf 22 (2), S. 131–143, 2011.

Huo, 2009 — Huo, Y.; Zhao, Y.; Zhang, C.; Chen, D.: Laser welding quality of motors inspected by lock-in infrared thermography. In: Proceedings of SPIE, S. 738310-1 – 738310-6, 2009.

Jon, 1982 — Jon, M. C.; Palazzo, V.: Nondestructive real-time method for monitoring the quality of a weld. Veröffentlichungsnr: US4419562 (A), 1982.

Jon, 1985 — Jon, M. C.: Noncontact acoustic emission monitoring of laser beam welding. Welding journal, 64, 43 – 48.

Kaierle, 2008 — Kaierle, S.: Process Monitoring and Control of Laser Beam Welding. Macro Material Processing. LTJ, Volume 5, Issue 3. S. 41- 43, 2008.

Kessler, 2006 — Kessler, R. W.: Prozessanalytik. Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis. Wiley-VCH, Weinheim, 2006.

Kim, 2012 — Kim, C. H.; Ahn, D. C.: Coaxial monitoring of keyhole during Yb:YAG laser welding. In: Optics & Laser Technology 44 (6), S. 1874–1880, 2012.

Koehler, 2008 — Koehler, C.; Vogt, G.: PROline - ultrasonic testing for electron beam and laser weld seams of transmission control gears - Many more Applications in Production. 17th World Conference on Nondestructive Testing. Shanghai 2008.

Kogel-H., 2012 — Kogel-Hollacher, M.: Industrial Application of Quality Control in Laser Materials Processing: From Lab to Serial Production. In: Reinhart Poprawe (Hg.): AKL - International Laser Technology Congress, Aachen, 2012.

Kogel-H., 2014 — Kogel-Hollacher, M.; Schoenleber, M.; Bautze, T.: Inline Coherent Imaging of Laser Processing - a New Sensor Approach heading for Industrial Applications. In: 8th International Conference on Photonic, Fürth, 2014.

Kogel-H., 2015 — Kogel-Hollacher, M.; Bautze, T.; Schoenleber, M.; Moser, R.: Inline Monitoring of Laser Processing - New Industrial Results with the Low Coherence Interferometry Sensor Approach. In: Proceedings ICALEO 2015, paper #407, Atlanta, 2015.

Kong, 2012 — Kong, F.; Ma, J.; Carlson, B.; Kovacevic, R.: Real-time monitoring of laser welding of galvanized high strength steel in lap joint configuration. In: Optics & Laser Technology 44 (7), S. 2186–2196, 2012.

Kratky, 2009 — Kratky, A.; Schuöcker, D.; Liedl, G.: Processing with kW fibre lasers: advantages and limits. XVII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers, S. 7131–7139, 2009.

Kuhl, 2009 — Kuhl, M.: Qualitätsbewertung von Laserschweißnähten auf Grundlage von Pre-, In- und Postprozessmessverfahren. Dissertation. Technische Universität Chemnitz, Chemnitz. Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, 2009.

Kuhl, 2010 — Kuhl, M.: Qualitätsbewertung von Laserschweißnähten auf Grundlage von Pre-, In- und Postprozessmessverfahren. Verlag Wissenschaftliche Scripten, Chemnitz, 2010

Lee, 2014 — Lee, S.; Ahn, S.; Park, C.: Analysis of acoustic emission signals during laser spot welding of SS304 stainless steel. Journal of Materials Engineering and Performance 23, 700–707, 2014.

Lee, 2015 — Lee, C.-J.; Kim, J.-D. Kim, Y.-C.: Study on monitoring of plasma emission signal in lap welding of Zn coated steel sheet using $CO_2$ laser. In: Int. J. Precis. Eng. Manuf. 16 (3), S. 495–500, 2015.

Lerch, 2008 — Lerch, R.; Sessler, G.; Wolf, D.: Technische Akustik. Grundlagen und Anwendungen. 1. Aufl. Berlin: Springer Bln, 2008.

Li, 1996 — Li, L.; Brookfield, D. J.; Steen, W. M.: Plasma charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the laser welding process. In: Meas. Sci. Technol. 7 (4), S. 615–626, 1996.

Li, 2002 — Li, L.: A comparative study of ultrasound emission characteristics in laser processing. In: Applied Surface Science 186 (1-4), S. 604–610, 2002.

Luo, 2005 — Luo, H.; Zeng, H.; Hu, L.; Hu, X.; Zhou, Z.: Application of artificial neural network in laser welding defect diagnosis. In: Journal of Materials Processing Technology 170 (1-2), S. 403–411, 2005.

Müller-B., 2009 — Müller-Borhanian, J.: Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen, Dissertation, IFSW Stuttgart, 2009.

Neubert, 2009 — Neubert, J.; Weilnhammer, G.: Laserstrahlschweissen. Leitfaden für die Praxis. DVS Media, Düsseldorf, 2009.

Nicolay, 2009 — Nicolay, T.; Bayer, V.: Den Schweißpunkt immer im Fokus. Bidirektionale Nahtverfolgung beim Schweißen von Automobil-Dachnähten. In: LTJ 6 (6), S. 33–35, 2009.

Norman, 2008 — Norman, P.: Process monitoring and analysis of laser welding and of milling, Dissertation, Luleå University of Technology, 2008.

Norris, 2011 — Norris, J. T.; Robino, C. V.; Hirschfeld, D. A.; Perricone, M. J.: Effects of Laser Parameters on Porosity Formation: Investigating Millimeter Scale Continuous Wave Nd:YAG Laser Welds. In: Welding Journal, 2011 (Vol. 90, No. 10), S. 198S-203S.

| | |
|---|---|
| O`Connor, 2002 | O'Connor, S.; Clapham, L.; Wild, P.: Magnetic flux leakage inspection of tailor-welded blanks. In: Meas. Sci. Technol. 13, 15.01.2002 (2), S. 157–162. |
| Olsson, 2011 | Olsson, R.; Eriksson, I.; Powell, J.; Langtry, A.V; Kaplan, A.F.H.: Challenges to the interpretation of the electromagnetic feedback from laser welding. In: Optics and Lasers in Engineering 49 (2), S. 188–194, 2011. |
| Palanco, 2003 | Palanco, S.; Laserna, J.: Spectral analysis of the acoustic emission. In: Applied Optics, Vol. 42 No. 30, S. 6078–6084, 2003. |
| Panchenko, 2007 | Panchenko, A.: Prozessüberwachung mit Körperschall in der Zerspanung. Studienarbeit. Hochschule Bremen, 2007. |
| Passini, 2011 | Passini, A.; Oliveira, A. C. de; Riva, R.; Travessa, D. N.; Cardoso, K. R.: Ultrasonic inspection of AA6013 laser welded joints. In: Mat. Res. 14 (3), S. 417–422, 2011. |
| Paura, 2011 | Paura, R.: Laser Weld Quality Monitoring. ASM Handbook. Volume 6A, 2011. |
| Poprawe, 2008 | Poprawe, R.; Gillner, A.; Hoffmann, H.-D; Kaierle, S.; Loosen, P.; Meiners, W. et al. (2008): Disk, fiber, rod, slab: new laser concepts open new application perspectives. Photonics, devices, and systems IV. Prague 2008. |
| PV 6719 | PV 6719: 2008-05: Laser Welding on Steels - Square Butt Weld and Fillet Weld on Lap Joint - 2-Sheet and Multi-Sheet Welding. |
| Reinhart, 2008 | Reinhart, G.; Munzert, U.; Vogt, W.: A programming system for robot-based remote-laser-welding with conventional optics. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57, S. 37–40, 2008. |
| Ruppik, 2012 | Ruppik, S.; Becker, F.; Belke, S.; Neumann, B.; Rath, W.: High-Performance Fiber Lasers. Rofin. AKL - International Laser Technology Congress, Aachen, 2012. |
| Ruß, 2006 | Ruß, A.: Schweißen mit dem Scheibenlaser – Potentiale guter Fokussierbarkeit. Dissertation, Universität Stuttgart, IFSW. Hrsg.: Graf, T. Herbert Utz Verlag, München, 2006. |

| | |
|---|---|
| Salzburger, 2001 | Salzburger, H. J.; Mohrbacher, H.: In-line quality control of laser welds of tailored blanks by couplant free ultrasonic inspection. In: Development of welding and allied processes at the beginning of the new millenium. Proceedings. Zagreb 2001. |
| Salzburger, 2004 | Salzburger, H. J.; Hübchen, G.; Niese, F.: Dry UT by Guided Shear Horizontal Using EMAT's. 16. World Conference on Non-destructive Testing. Montreal 2004. |
| Sansan, 2010 | Sansan, A.; Zhen, L.; Nan, Z.; Rui, W.: Blind Source Separation Based on Principal Component Analysis-Independent Component Analysis for Acoustic Signal During Laser Welding Process. In: Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), S. 336–339, 2010. |
| Shao, 2005 | Shao, J.; Yan, Y.: Review of techniques for on-line monitoring and inspection of laser welding. In: J. Phys.: Conf. Series 15, S. 101–107, 2005. |
| Sibiliano, 2009 | Sibillano, T.; Ancona, A.; Berardi, V.; Lugarà, P. M.: A Real-Time Spectroscopic Sensor for Monitoring Laser Welding Processes. In: Sensors 9, 2009 (5), S. 3376–3385, 2009. |
| Siltanen, 2012 | Siltanen, J.; Maaranen, I.; Nurmela, V. M.: Laser welding train-coach wall panels. In: Industrial Laser Solutions for Manufacturing, 2012 (March/April), S. 14–15. |
| Sovetchenko, 2007 | Sevetchenko, P.: Herstellung beschichteter Mehrblechverbindungen im Karosseriebau mit Hilfe der Hochleistungslasertechnik. Dissertation. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2007. |
| Srajbr, 2009 | Srajbr, C.; Tanasie, G.; Dilger, K.; Böhm, S.: NDT of Laser Beam Welded Single Lap Hoints by Active Thermography. In: Proceedings of the IIW International Conference on Advances in Welding and Allied Technologies, Juli 2009, S. 355–359. |
| Stevens, 1999 | Stevens, D. M.; Maclauchlan, D. T.; Berbakov, P. J.: Edge detection and seam tracking with EMATs. Patentschrift. US6155117. |

| | |
|---|---|
| Stolzenburg, 2010 | Stolzenburg, C.: Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich. Dissertation, Universität Stuttgart, IFSW. 2010. |
| Stork, 2009 | Stork, I.; Schorp, K.; Bautze, T.; Diepold, K.: Multiple Sensors and Artificial Neural Networks in a Cognitive Technical System for Laser Welding. In: S. Marusic (Hg.): Fifth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. Melbourne, 7.-10.12.2009, Piscataway, S. 109–114. |
| Sun, 1999 | Sun, A.; Kannatey-Asibu, E.; Gartner, M.: Sensor systems for real-time monitoring of laser weld quality. In: J. Laser Appl. 11 (4), S. 153, 1999. |
| Sun, 2001 | Sun, A. S.; Kannatey-Asibu, Jr.,E.; Williams, W. J.; Gartner, M.: Time-frequency analysis of laser weld signature, In: Proc. SPIE 4474, S. 103–114, 2001. |
| Takayama, 2011 | Takayama, Y.; Nomoto, R.; Nakajima, H.; Ohkubo, C.: Comparison of joint designs for laser welding of cast metal plates and wrought wires. In: Odontology, 2011. |
| Trbola, 2006 | Trbola, J. F.: Pre-, In- und Post-Process-Verfahren – Die Prozesssicherung fordert verschiedene Verfahren. In: LTJ 3 (4), S. 38–41, 2006. |
| Trumpf, 2015 | TRUMPF GmbH + Co. KG.: Internetseite. Download am 06.11.2015 von www.trumpf-laser.com. |
| Vänskä, 2013 | Vänskä, M.; Abt, F.; Weber, R.; Salminen, A.; Graf, T.: Effects of Welding Parameters Onto Keyhole Geometry for Partial Penetration Laser Welding. In: Physics Procedia 41, S. 199–208, 2013. |
| Vidal, 2011 | Vidal, F.; Pineiro, E.; Mato, J. L.; Besteiro, R.; Varela, R.; Rodriguez, M. J.; Meizoso, F.: Defect characterization in Tailor Welded Blanks using an eddy current and harmonic flux leakage integration. 10th European Conference on NDT, ECNDT Moskau 2010. |

| | |
|---|---|
| Waschkies, 2015 | T. Waschkies, R. Licht, B. Valeske, Luftultraschallprüfung - berührungslose kontaminationsfreie Werkstoffcharakterisierung, Stahl und Eisen, 135, 249-252, 2015. |
| Webber, 2011 | Webber, T.: Laser Beam Delivery Optics and Manufacturing Economics. ASM handbook. Volume 6A, S. 580–586, 2011. |
| Weerasinghe, 1990 | Weerasinghe, V.M; Kamalu, J.N; Hibberd, R.D; Steen, W.M: Acoustic signals from laser back reflections. In: Optics & Laser Technology 22, (6), S. 381–386, 1990. |
| Xu, 2010 | Xu, M.; Zhao, M.; Zhang, C.: Image Processing Method for Weld Quality Inspection System of Tailored Blanks Laser Welding. In: International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Proceedings, S. 422–426, 2010. |
| Zettner, 2003 | Zettner, J.; Hierl, T.; Spellenberg, B.; Haller, M.; Lenzi, T.: Wärmefluss-Prüfung zur Qualitätssicherung von Schweißverbindungen in der Automobilindustrie. Thermografie-Kolloquium. DGZfP. Stuttgart, 2003. |
| Zhang, 1998 | Zhang, S. B.; Zhang, Y. M.; Kovacevic, R.: Non-contact ultrasonic sensing for seam tracking in arc welding processes. In: ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 08/1998 (120(3)), S. 600–608, 1998. |
| Zhang, 2009 | Zhang, L.; Xie, Y.: Development of Automatic Visual Inspection Sensor in Robotic Tailored Blank Welding. International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA). Wuhan, 2009. |
| Zösch, 2006 | Zösch, A.; Seidel, M.: Non destructive testing of laser-welded lap seams by eddy current technique. In: 9th European Conference on NDT. ECNDT Berlin 2006. |
| Zösch, 2008 | Zösch, A.; Seidel, M.; Kuhl, M.; Neugebauer, R.: Zerstörungsfreie in-line - Komplexprüfung von lasergeschweißten Karosseriebauteilen durch ein intelligentes Multisensorsystem. 38. Fachtagung: "Prozesskette Karosserie". Ludwigsburg, 2008. |

# ANHANG

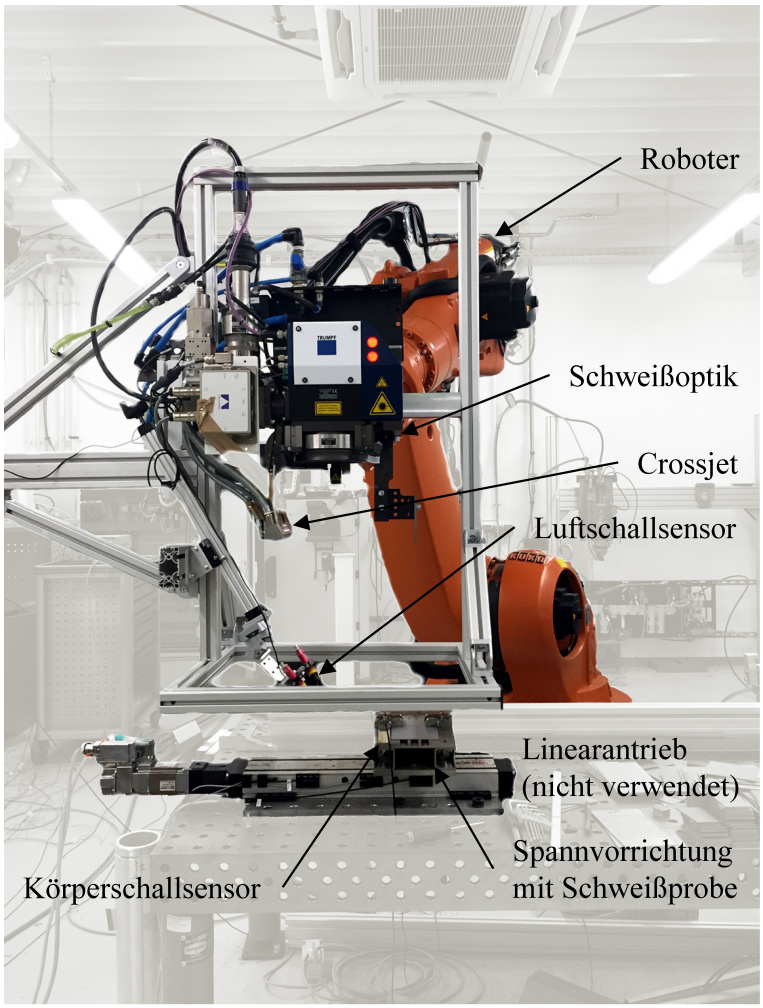



Abbildung 67: Realer Versuchsaufbau

**Werkstoff DC04**

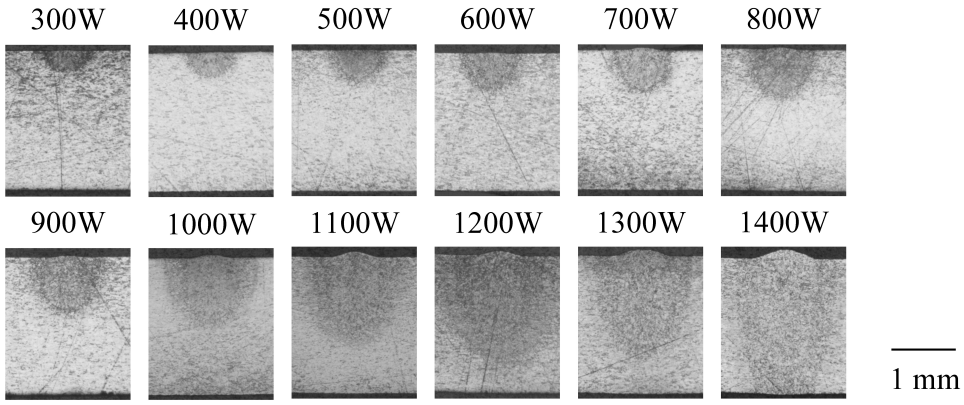



Abbildung 68: Querschliffe ausgewählter nicht durchgeschweißter Blindschweißungen mit konstanter Laserleistung des Werkstoffes DC04; Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

**Werkstoff DX51D**

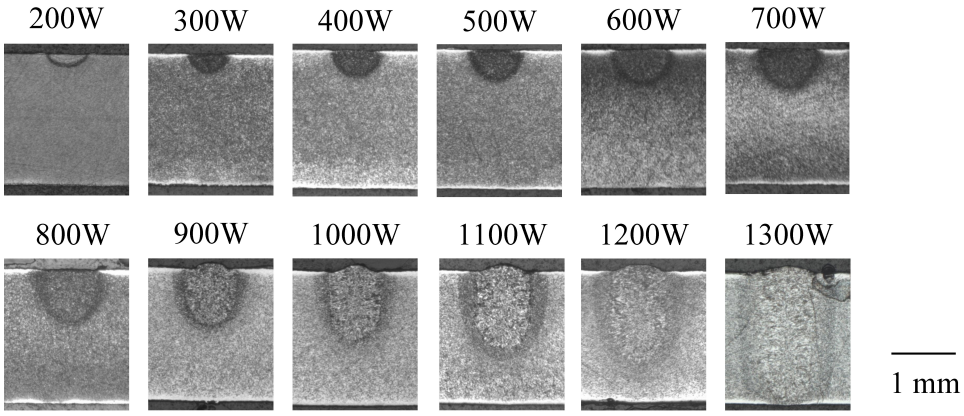



Abbildung 69: Querschliffe ausgewählter nicht durchgeschweißter Blindschweißungen mit konstanter Laserleistung des Werkstoffes DX51D; Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s

**Werkstoff S235JR+Z**

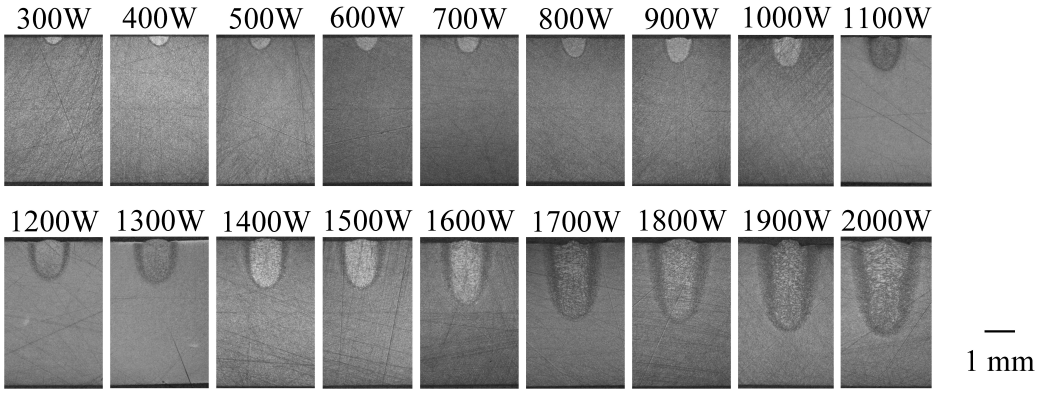



Abbildung 70: Querschliffe ausgewählter nicht durchgeschweißter Blindschweißungen mit konstanter Laserleistung des Werkstoffes S235JR+Z; Schweißgeschwindigkeit $v_S$ = 20 mm/s