

Physikbasierte mechanische Absicherung zur energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von

Dipl.-Ing. Felix Damrath

Saarbrücken

2018

Tag des Kolloquiums:	13.11.2018
Dekan:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick
Mitglieder des Prüfungsausschusses	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
	Univ.-Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova
	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel
	Dr.-Ing. Lutwin Klein

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis meiner Tätigkeit als Doktorand am Forschungszentrum der Daimler AG in Ulm in Zusammenarbeit mit der Montageplanung des Mercedes-Benz Werk Sindelfingen und dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität des Saarlandes.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber für seine wissenschaftliche Betreuung und die vielen Anregungen und wertvollen Ratschläge. Ebenso danke ich Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jivka Ovtcharova für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Weiterhin danke ich meinen zahlreichen Kollegen der Daimler AG am Forschungszentrum Ulm und am Produktionsstandort Sindelfingen für die kollegiale Zusammenarbeit, die vielen wertvollen fachlichen Diskussionen und das entgegengebrachte Vertrauen. Hierbei möchte ich mich insbesondere bei meinem Teamleiter Dr.-Ing. Thomas Bär bedanken, der mir die Anfertigung einer anwendungsorientierten Dissertation in einem industriellen Forschungsumfeld ermöglicht hat. Weiterhin danke ich meinen Kollegen und Freunden im Team Produktionsbezogene Produktabsicherung Dr.-Ing. Michaël Prieur, Andrés Arteaga, Stefan Mengel, Sebastian Süß, Michael Otto und Andreas Schlag für die vielen gemeinsam verbrachten Stunden in und außerhalb des Büros. Mein ganz besonderer Dank gilt meinem ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Anton Strahilov für die herausragende Unterstützung in allen Phasen meiner Promotion und als guter Freund. Darüber hinaus danke ich allen Studenten, die an dieser Arbeit mitgewirkt haben, für ihre fachlichen Beiträge und gewinnbringenden Anregungen.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie für Ihre kontinuierliche Unterstützung, Ihr aufgebrachtes Verständnis, die wertvolle gemeinsame Zeit und Ihren Ansporn. Ganz besonders danke ich meinen Eltern, die mir diesen Bildungsweg überhaupt erst ermöglicht haben.

Kurzfassung

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode soll einen Beitrag zu einer energieeffizienzorientierten Produktionsplanung der Automobilmontage leisten. Dafür werden automatisierte Montageanlagen der Automobilproduktion und deren Entwicklungs- bzw. Planungsprozess im Hinblick einer ganzheitlichen produktlebenszyklusphasenübergreifenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung fokussiert. Im Kontext des digitalen Anlagenabsicherungsprozesses werden die produktionsprozessbezogenen Energieverbräuche automatisierter Montageanlagen mit Hilfe der physikbasierten Simulation komponentenbasiert modelliert und in Form einer Energiesignatur für einen Montageprozess abgebildet.

Energieeffizienzsteigernde Maßnahmen werden unter Beibehaltung produktionstechnischer Rahmenbedingungen in das digitale Anlagenmodell eingepflegt, wodurch eine Reduzierung der Betriebskosten (Energiekosten) bei konstanter Ausbringung angestrebt wird. Die Kapitalwertmethode wird dabei zur Feststellung der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit der energieeffizienzsteigernden Maßnahme verwendet, um dem erhöhten Aufwand der Entwicklungsphase den Nutzen der geringeren Betriebskosten der Nutzungsphase gegenüberzustellen.

Damit stellt die vorgestellte Methode eine Erweiterung der bisherigen Vorgehensweise der mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen im Vorfeld der Virtuellen Inbetriebnahme dar und soll Anlagenentwicklern als Entscheidungsunterstützung bei der Gestaltung eines energieeffizienten Anlagendesigns dienen.

Abstract

This work introduces a novel methodology to promote energy-efficient manufacturing in production planning of automobile assembly. Digital design and production planning processes of automated assembly systems for automobile production are considered, complemented by holistic economic analyses encompassing the entire product lifecycle. Energy demands of assembly system components are projected by the use of physics-based modeling capabilities in virtual validation procedures, yielding an energy-signature of assembly operations.

Measures for increasing energy efficiency are implemented in the virtual model of the automated assembly system while retaining significant production parameters, thus aiming to reduce operating cost in terms of energy cost while maintaining constant output. Net present value (NPV) determines measures' economic sense and balances monetary benefits gained through energy savings in the assembly system's operating phase in comparison to higher investment costs for increased design efforts in its development phase.

The novel methodology enhances the state-of-the-art procedure of mechanical design validation preceding virtual commissioning of automated assembly systems for automobile production. The methodology aims to support design decisions facilitating energy-efficient designs of automated assembly systems in early system development phases.

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem Verfahren zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Verfassers.....	I
Kurzfassung	II
Abstract	III
Eidesstattliche Versicherung.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
KAPITEL 1: EINLEITUNG UND MOTIVATION.....	1
1.1. Herausforderungen für die Automobilproduktion in Deutschland.....	1
1.2. Zielsetzung	3
1.3. Forschungsdesign	4
1.4. Struktur und Aufbau der Arbeit.....	5
TEIL 1: STATE OF THE ART.....	7
KAPITEL 2: GRUNDLAGEN UND EINFÜHRUNG IN DIE PROBLEMSTELLUNG	8
2.1. Produktionsstrukturen im Automobilbau	8
2.1.1. Produktionsprozess in der Automobilindustrie	8
2.1.2. Anlagenentstehungsprozess für automatisierte Montageanlagen	11
2.2. Energieeffizienz im Kontext der Automobilproduktion	17
2.3. Problemformulierung	19
2.3.1. Darstellung der Ausgangssituation	20
2.3.2. Modellbasierte Betrachtung	23
2.3.3. Forschungsfragen und wissenschaftliche Hypothese	24

KAPITEL 3: STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG	27
3.1. Aufbau, Absicherung und Betrieb automatisierter Montageanlagen.....	27
3.1.1. Funktionsweise und Struktur automatisierter Montageanlagen	27
3.1.2. Prozess der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen	32
3.1.3. Ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung automatisierter Produktionsanlagen	36
3.2. Energiebetrachtungen bei automatisierten Montageanlagen.....	42
3.2.1. Energieverbrauch automatisierter Montageanlagen	43
3.2.2. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz automatisierter Produktionsanlagen	53
3.2.3. Digitale Tools zur Energieverbrauchsanalyse automatisierter Produktionsanlagen	56
3.3. Physikbasierte Simulation von Produktionsanlagen	59
3.3.1. Grundlagen der starrkörperbasierten Mehrkörpersimulation	59
3.3.2. Einführung in die physikbasierte Simulationsmethodik	63
3.3.3. Physikbasierte Simulation im Maschinen– und Anlagenbau	66
3.4. Abschließende Bewertung des Stand der Technik und Forschung	69
 TEIL 2: CONCEPT DEVELOPMENT	76
KAPITEL 4: HANDLUNGSBEDARF UND ANFORDERUNGSANALYSE	77
4.1. Defizite und Ableitung von Handlungsfeldern	77
4.1.1. Empirische Untersuchung zur Konkretisierung des Forschungsbedarfs.....	77
4.1.2. Identifikation von Handlungsfeldern	83
4.2. Formulierung von Anforderungen.....	84

KAPITEL 5: METHODISCHER KONZEPTENTWURF.....	88
5.1. Einführung und Gesamtüberblick.....	88
5.2. Modellierung energieverbrauchender Anlagenkomponenten	89
5.2.1. Datenimport in die physikbasierte Simulationsumgebung.....	90
5.2.2. Komponentenidentifikation und Datenakquise.....	91
5.2.3. Modellierung des Energieverbrauchs einer Anlagenkomponente	92
5.3. Modellierung des Gesamtsystems	93
5.3.1. Physikbasierte Modellierung der Gesamtanlage	94
5.3.2. Modellierung des Montageprozesses	94
5.3.3. Modellierung des Energieverbrauchs der Montageanlage.....	96
5.4. Analyse energieeffizienzsteigernder Maßnahmen	97
5.4.1. Energetische Analyse des Systemmodells	98
5.4.2. Untersuchung der Anwendbarkeit energieeffizienzsteigernder Maßnahmen..	99
5.4.3. Erstellung einer Liste anwendbarer energieeffizienzsteigernder Maßnahmen	
	102
5.5. Implementierung energieeffizienzsteigernder Maßnahmen.....	103
5.5.1. Implementierung energieeffizienzsteigernder Maßnahmen auf Komponenten– und Systemmodellebene	103
5.5.2. Wirtschaftliche Bewertung der energieeffizienzsteigernden Maßnahme	104
5.5.3. Erstellung des energieeffizienten Anlagendesigns	106
5.6. Ökonomische Bewertung	106
KAPITEL 6: SOFTWARETECHNISCHE IMPLEMENTIERUNG	109
6.1. Physikbasierte Modellierung energieverbrauchender Aktoren.....	109
6.1.1. Erweiterung des physikbasierten Modells für pneumatische Aktoren	109
6.1.2. Sechsachsiger Industrieroboter	113
6.1.3. Drehstromasynchronmaschine mit Getriebe und Frequenzumrichter	118

6.2. Umsetzung der ökonomischen Bewertungsumfänge	120
6.2.1. LCC-Umsetzung	120
6.2.2. Analyse und Bewertung energieeffizienzsteigernder Maßnahmen	123
TEIL 3: APPLICATION	128
KAPITEL 7: EVALUIERUNG DER ANWENDBARKEIT DER METHODE	129
7.1. Prototypischer Anwendungsfall 1: Wendestation	129
7.2. Prototypischer Anwendungsfall 2: Dachmontage.....	135
7.3. Validierung der Simulationsergebnisse	143
7.3.1. Validierung des physikbasierten Modells für pneumatische Aktoren.....	144
7.3.2. Validierung des physikbasierten Modells des sechsachsen Industrieroboters	
147	
KAPITEL 8: BEWERTUNG DER INDUSTRIELEN RELEVANZ.....	151
8.1. Technisch-wirtschaftliche Bewertung	151
8.2. Konzeptioneller Ansatz zur industriellen Nutzbarmachung.....	152
8.2.1. Konzeptioneller Ansatz einer softwaretechnischen Umsetzung	152
8.2.2. Konzeptioneller Ansatz einer organisatorischen Umsetzung im	
Entwicklungsprojekt.....	155
8.3. Abschließende Bewertung des Forschungsvorhabens.....	158
KAPITEL 9: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	161
9.1. Zusammenfassung.....	161
9.2. Ausblick.....	162
Abbildungsverzeichnis	164
Tabellenverzeichnis.....	169

Abkürzungsverzeichnis.....	171
Verzeichnis der Formelzeichen	173
Anhang	181
Anhang A: Online-Formular zur empirischen Untersuchung des Forschungsbedarfs	181
Anhang B: Potentielle EEIMs für Elektromotoren und Roboter mit Umsetzungsvorschriften	183
Literaturverzeichnis	184

KAPITEL 1: EINLEITUNG UND MOTIVATION

Das erste Kapitel umfasst eine Beschreibung der derzeitigen und zukünftigen Herausforderungen der Automobilproduktion in Deutschland und leitet basierend auf einigen ausgewählten Aspekten die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ab. Das methodische Vorgehen bei der Durchführung des Forschungsvorhabens wird erläutert und durch einen Überblick über den inhaltlichen Aufbau der Arbeit konkretisiert.

1.1. Herausforderungen für die Automobilproduktion in Deutschland

Automobilhersteller am Produktionsstandort Deutschland stehen vor einer Vielzahl unterschiedlicher Herausforderungen. Diese ergeben sich durch die kontinuierliche Veränderung gesellschaftlicher und politischer Rahmenbedingungen, strategischen Paradigmenwechseln in der Ausrichtung global agierender Automobilkonzerne sowie die Integration von Produkt- und Produktionsinnovationen in den automobilen Herstellungsprozess (vgl. Abbildung 1-1).



Abbildung 1-1: Herausforderungen für die Automobilproduktion in Deutschland und ein daraus resultierendes Umsetzungsziel für die Produktionsplanung eines Automobilherstellers

Gesellschaftliche Trends mit Einfluss auf die Automobilproduktion in Deutschland sind mitunter die fortschreitende Globalisierung, die weitreichende Digitalisierung vieler Lebensbereiche oder die zunehmende Verknappung natürlicher Ressourcen [1], [2], [3]. In einer industrialisierten Gesellschaft ist zudem u.a. der Bedarf nach der Individualisierung von Produkten sowie ein gesteigertes ökologisches Verantwortungsbewusstsein bei einer

demographisch alternden Wissensgesellschaft erkennbar [4], [5]. *Politische Rahmenbedingungen* wie die strenge Reglementierung des flottenweiten Emissionsausstoßes sowie die auf die Nutzung erneuerbarer Energien ausgerichtete Energiewende haben zudem einen direkten Einfluss auf die Automobilherstellung in Deutschland [6], [7], [8].

Diese gesellschaftlichen Trends und wechselnde politische Rahmenbedingungen wirken sich unmittelbar auf die strategische Ausrichtung und die betrieblichen Ziele in Deutschland produzierender Automobilhersteller aus. Eine steigende Kundenorientierung schlägt sich in einer großen Anzahl unterschiedlicher Fahrzeugmodelle und -derivate sowie einer Vielzahl an Konfigurationsmöglichkeiten für deren Ausstattung nieder [9]. Weitere *strategische Implikationen* entstehen durch die Wandlung traditioneller Geschäftsmodelle: innovative, servicebasierte Mobilitätskonzepte für den individuellen Personenverkehr konkurrieren mit traditionellen Pkw-Absatzkonzepten. Aufgrund des in den vergangenen Jahren stagnierenden Marktwachstums in den Triade-Märkten steigt darüber hinaus die Bedeutung der Absatzmärkte in den BRIC-Staaten und hierbei insbesondere Chinas. Die Erschließung dieser Märkte wird durch den Aufbau lokaler Produktionskapazitäten, die kontinuierliche Vergrößerung des Produktpportfolios sowie die Etablierung strategischer Kooperationen und Joint Ventures in den Absatziellländern realisiert [10]. Darüber hinaus führt eine zunehmende Reduzierung der Fertigungstiefe bei den Automobilherstellern zu Veränderungen in der Wertschöpfungskette, die sich durch die wachsende Bedeutung von Elektrofahrzeugen in Zukunft noch verstärken könnten [11], [12].

Die kontinuierliche *Veränderung der Produktcharakteristika* bedingt zudem weitere Herausforderungen für die Automobilproduktion: die hohe Anzahl an Produktvarianten, steigende Produktkomplexität, neue Produktbestandteile, neue Antriebstechnologien sowie die fortschreitende Produktmodularisierung müssen in den Produktionsprozessen berücksichtigt werden [13], [14]. Dadurch entsteht in der Produktion eine hohe Produktionsvarianz bei einer hohen Anzahl rasch aufeinander folgender Produktanläufe. Produktionsstrukturen in der Automobilindustrie müssen sich dadurch von traditionellen starren Produktionseinrichtungen hin zu *flexiblen, wandlungsfähigen Produktionssystemen* transformieren [15], [16], [17]. In diesem Zusammenhang wird unter dem Begriff Industrie 4.0 im industriellen Kontext die Verbindung der digitalen Welt des Internets mit den konventionellen Prozessen und Diensten der produzierenden Wirtschaft verstanden [18]. Das Ziel besteht hierbei in der Etablierung einer intelligenten Fabrik, die sich neben Wandlungsfähigkeit und einer ergonomischen Gestaltung auch durch Ressourceneffizienz auszeichnet. Verschiedene Studien heben ebenfalls die Bedeutung einer energieeffizienten Automobilproduktion für den Produktionsstandort Deutschland hervor [19], [20].

Eine umweltschonende Automobilproduktion wurde von vielen Herstellern als zukünftige Schlüsselkompetenz identifiziert und in den strategischen Unternehmenszielen verankert [21], [22], [23]. So gibt Daimler bei den produktionsbedingten CO₂-Emissionen pro Fahrzeug

eine Senkung um 20% in 2015 gegenüber den Werten von 2007 als strategische Zielsetzung vor [24]. Zudem sind unter ökonomischen Aspekten die Energiekosten als Produktionsfaktor nicht zu vernachlässigen: durch die in den vergangenen Jahren gestiegenen Energiepreise für industrielle Kunden kann unter Automobilherstellern mit Produktionsstandorten in Deutschland eine steigende Bedeutung der Energiekosten als Kostentreiber für die Herstellungskosten festgestellt werden [25], [26], [27]. Obwohl die Automobilproduktion nicht zu den energieintensiven Industrien des verarbeitenden Gewerbes gehört, trägt der Anteil der Energiekosten signifikant zu den Herstellungskosten bei [28], [29], [30].

Die Produktionsplanung eines Automobilherstellers ist verantwortlich für die Überführung der entwickelten Produkte in eine rationelle Produktion [31]. Für die Produktionsplanung ergibt sich aus den genannten Einflussfaktoren ein Spannungsfeld mit dem Ziel der Erhöhung der Planungsergebnisqualität bei gleichzeitiger Reduktion der Planungszeit und -kosten [32]. Konkurrierende Zielstellungen wie die Sicherstellung einer hohen Produktivität bei gleichzeitiger Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Produktvarianten sowie Nachfrageschwankungen müssen bewältigt werden. Die zunehmende Vermeidung kostenintensiver physikalischer Fahrzeugprototypen erfordert eine hohe Genauigkeit der Planungsergebnisse und bedingt die vermehrte Durchführung von Absicherungsprozessen anhand virtueller Prototypen und Modellen mit Methoden der Digitalen Fabrik [14], [33]. Darüber hinaus muss der Informationsrückfluss von Erfahrungswerten aus der Produktionsplanung in die Produktentwicklung im Sinne einer produktionsgerechten Produktgestaltung sowie bei der Neuplanung bzw. Wieder- oder Weiterverwendung von Produktionsanlagen gewährleistet werden.

Gesellschaftliche Trends und politische Rahmenbedingungen, strategische Zielsetzungen der Automobilunternehmen sowie Trends und Innovationen im Bereich der Produktionstechnologie stellen Automobilhersteller in Deutschland vor vielfältige Herausforderungen. Ein zentrales Umsetzungsziel, das aus diesen Herausforderungen abgeleitet werden kann, besteht in der Realisierung einer umweltschonenden, energieeffizienten Automobilproduktion. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, eine energieeffiziente Automobilproduktion bereits in den frühen Phasen der Produktionsplanung sicherzustellen.

1.2. Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Integration von Energieverbrauchsbetrachtungen in die frühen Phasen des Anlagenentstehungsprozesses automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion. Das Ziel besteht hierbei in der Entwicklung einer Methode für eine energieeffizienzorientierte Planung und Auslegung der Anlagen hinsichtlich ihrer zukünftigen Energieverbräuche in der Nutzungsphase. Dabei soll die zu entwickelnde Methode die Befähigung folgender Teilziele umfassen:

- Produktionsprozessbezogene Energieverbräuche sollen auf der Basis eines frühen digitalen Planungsstands analysiert werden können.
- Produktionsprozessbezogene energetische Optimierungspotentiale sollen auf Basis eines frühen digitalen Planungsstands identifiziert und evaluiert werden können.
- Konstruktive und auslegungstechnische Maßnahmen zur Erschließung dieser produktionsprozessbezogenen energetischen Optimierungspotentiale sollen in den frühen digitalen Planungsstand implementiert werden können.

Dabei werden in der Arbeit sowohl informationstechnisch-mechatronische Fragestellungen als auch organisatorisch-prozessuale bzw. wirtschaftliche Fragestellungen adressiert. Zum einen muss hierbei zunächst eine softwarebasierte Anwendung entwickelt werden, die energetische Betrachtungen in den frühen Phasen des Anlagenentstehungsprozesses mit einer hinreichenden Genauigkeit ermöglicht. Des Weiteren ist zu untersuchen, welche konstruktiven und auslegungstechnischen Ansätze zu einer Reduktion des Energieverbrauchs einer automatisierten Montageanlage zur Laufzeit beitragen können und in welcher Form diese Vorgehensweisen in den bestehenden Anlagenentstehungsprozess automatisierter Montageanlagen integriert werden können. Zudem sollen im Rahmen dieser Arbeit wirtschaftliche Gesichtspunkte betrachtet werden, um den entstehenden Mehraufwand in der Entwicklungsphase der Anlage gegenüber den Einsparungen in der Nutzungsphase ökonomisch zu bewerten. Eine Konkretisierung des Forschungsziels mit der Aufstellung einer wissenschaftlichen Hypothese und der Formulierung von Forschungsfragen wird in Kapitel 2.3.3 vorgenommen.

Die Eingrenzung des thematischen Schwerpunkts dieser Arbeit auf die deutsche Automobilproduktion erfolgt dabei vor dem Hintergrund der herausragenden Bedeutung der Automobilindustrie für den Standort Deutschland. Im Kontext einer zunehmenden Automatisierung der Produktionsprozesse nimmt der Bereich der Montage hierbei als finales Glied der komplexen Wertschöpfungskette der Automobilproduktion eine Schlüsselrolle ein. Durch eine möglichst neutrale und herstellerunabhängige Formulierung der Methode soll allerdings die Übertragbarkeit der Methode auf andere Industriezweige sowie Anwendungsgebiete gewährleistet werden.

1.3. Forschungsdesign

Der wissenschaftliche Mehrwert dieser Arbeit besteht in dem Aufzeigen einer Lösung zur Integration von Energieverbrauchsbetrachtungen in den Prozess der mechanischen Absicherung einer automatisierten Montageanlage während des Anlagenentstehungsprozesses. Dabei handelt es sich in erster Linie um die Erweiterung einer bestehenden Methode für die digitale mechanische Absicherung automatisierter Produktionsanlagen in dem Gewerk Montage im Automobilbau.

Der Anlagenentstehungsprozess einer automatisierten Produktionsanlage kann hierbei als ein Produktentstehungsprozess aufgefasst werden. Für die Formulierung und Durchführung des Forschungsansatzes soll daher das Design Research Methodology (DRM) Framework zur Anwendung kommen, das verschiedene Möglichkeiten für eine strukturierte Durchführung von Forschungsvorhaben im Bereich der Produktentwicklung aufzeigt (vgl. Abbildung 1-2). Der Ansatz des DRM-Frameworks ist zielorientiert und dient der Optimierung von Produktentwicklungsprozessen [34].

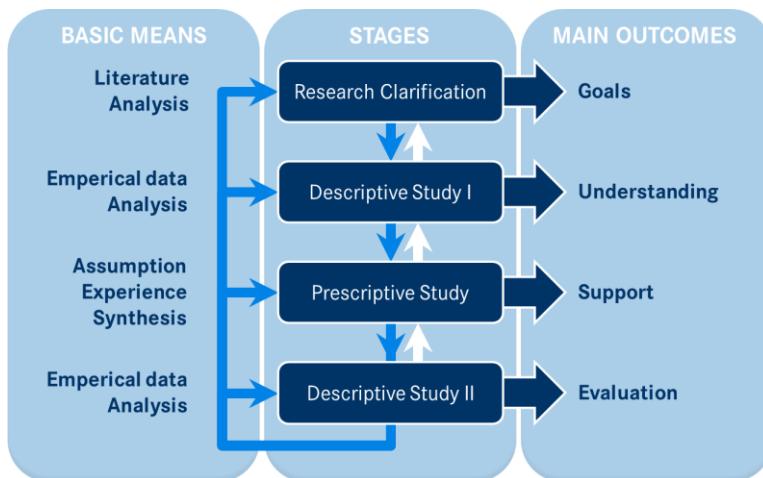


Abbildung 1-2: DRM Framework (nach [35])

Zudem lehnt sich das Forschungsvorhaben an die Strategie der angewandten Forschung an [36]. Hierbei werden durch eine Analyse bestehender Vorgänge und Begebenheiten relevante Probleme aus der industriellen Praxis identifiziert und typisiert [37]. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden Methoden und Lösungen abgeleitet und nach erfolgreicher Prüfung in der Praxis angewendet [38], [39].

1.4. Struktur und Aufbau der Arbeit

Das DRM-Framework dient der Strukturierung und Beschreibung von Forschungsvorhaben im Bereich der Produktentwicklung und ermöglicht somit einen Vergleich unterschiedlicher Forschungstätigkeiten untereinander [40]. Die vorliegende Arbeit ist in drei Teile (*State of the art, Concept development und Application*) strukturiert. Der inhaltliche Aufbau der Arbeit unter Bezugnahme auf das DRM-Framework ist folgendermaßen gestaltet (vgl. Abbildung 1-3).

In der ersten Phase *Research Clarification (RC)* wird eine grobe Einführung in die Problematik gegeben sowie der Handlungsrahmen und die Ziele der vorliegenden Arbeit spezifiziert (Kapitel 2). Das für die Durchführung des Vorhabens notwendige Verständnis sowie der Stand der Technik werden mit Hilfe einer umfassenden Literaturstudie und von Praxisberichten in der zweiten Phase *Descriptive Study I (DS I)* erarbeitet (Kapitel 3). In den Kapiteln 4, 5 und 6

erfolgt die Entwicklung der Methodik sowie einer softwarebasierten Anwendung für energetische Betrachtungen für eine energieeffizienzorientierte Anlagenplanung und -auslegung im Rahmen der *Prescriptive Study (PS)*.

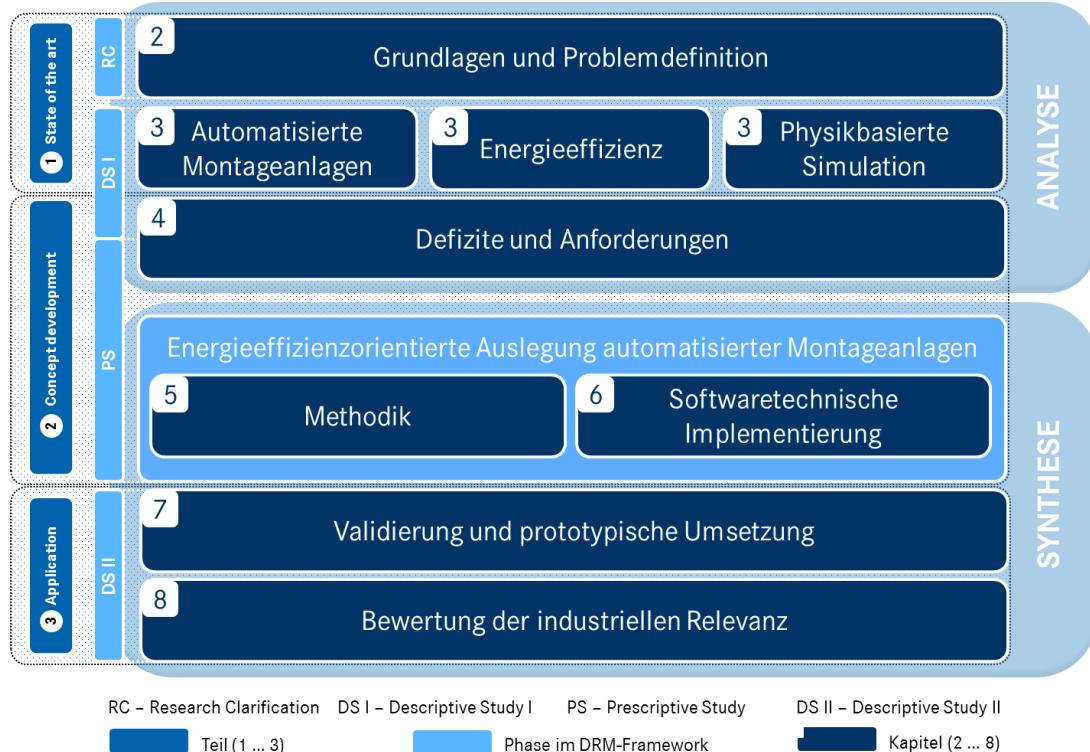


Abbildung 1-3: Inhaltlicher Aufbau der Arbeit

Im Rahmen der abschließenden *Descriptive Study II (DS II)* werden die Simulationsergebnisse der softwarebasierten Anwendung validiert und die entwickelte Methode an zwei Praxisbeispielen prototypisch verifiziert. Zudem erfolgt eine finale Bewertung der industriellen Umsetzbarkeit der Methodik.

TEIL 1: STATE OF THE ART

Grundlagen und Einführung in die Problemstellung
Stand der Technik und Forschung

KAPITEL 2: GRUNDLAGEN UND EINFÜHRUNG IN DIE PROBLEMSTELLUNG

Dieses Kapitel entspricht im DRM-Framework der Phase *Research Clarification* und dient somit der Eingrenzung des Forschungsbereichs sowie der Spezifikation der Forschungsziele. Neben der Vorstellung der übergeordneten Themengebiete liegt der Fokus insbesondere auf der Strukturierung und Formulierung der wissenschaftlichen Aufgabenstellung.

2.1. Produktionsstrukturen im Automobilbau

Folgend werden die übergeordneten Themengebiete eingeführt, die zentrale Bestandteile der Arbeit darstellen und somit von vorrangiger Relevanz sind. Hierfür wird zunächst der automobile Produktionsprozess vorgestellt, anschließend wird der Prozess der Anlagenentstehung für Produktionsanlagen der Automobilindustrie mit Fokus auf die Gewerke Rohbau und Montage erläutert. Abschließend wird auf das Themengebiet der Energieeffizienz im Bereich der Automobilproduktion eingegangen.

2.1.1. Produktionsprozess in der Automobilindustrie

Der Prozessablauf der Automobilproduktion lässt sich in verschiedene Phasen mit unterschiedlichen Teilbereichen gliedern (vgl. Abbildung 2-1). Diese fünf unterschiedlichen Gewerke Presswerk, Rohbau, Oberfläche (Lackierung), Powertrain und Endmontage sind durch Lagerstätten (Puffer) separiert und können individuell betrachtet werden. Üblicherweise ist das Gewerk Powertrain von den anderen Gewerken lokal getrennt [11]. Pro Gewerk können mehrere Produktionslinien existieren, auf denen Folgen von überwiegend zeitlich synchronisierten Stationen sequentiell durchlaufen werden. Jeder Station (Zelle) wird dabei eine Menge von (Fertigungs-)Operationen zugeordnet, die innerhalb einer definierten Zeitspanne (Taktzeit) durchgeführt werden müssen [41], [42]. Üblicherweise werden auf einer Produktionslinie mehrere Fahrzeugmodelle in Form einer getakteten Variantenfließproduktion (Mehrproduktfließproduktion) hergestellt [43], [44]. Die Zwischenlagerung der Halbzeuge in den Puffern bewirkt eine Entkopplung der Gewerke voneinander und bedient die divergierenden Sequenzanforderungen der einzelnen Gewerke [45].

An dem Produktionsprozess in der Automobilindustrie sind neben dem Automobilhersteller eine Vielzahl unterschiedlicher Zulieferer in Form globaler Produktions- oder Wertschöpfungsnetzwerke beteiligt. Die Entwicklung und Herstellung von Komponenten und Modulen wird zunehmend an die Zuliefererindustrie ausgelagert, wodurch die Fertigungstiefe beim Automobilhersteller reduziert wird [46], [47]. Hierarchisch erstreckt sich ein Produktionsnetzwerk in der Automobilindustrie üblicherweise von den vorgelagerten Stufen der Teile- und Komponentenzulieferer (3rd & 2nd tier) über die erste Vorstufe der Modullieferanten (1st tier) bis hin zum Produktionswerk des Automobilherstellers [48].

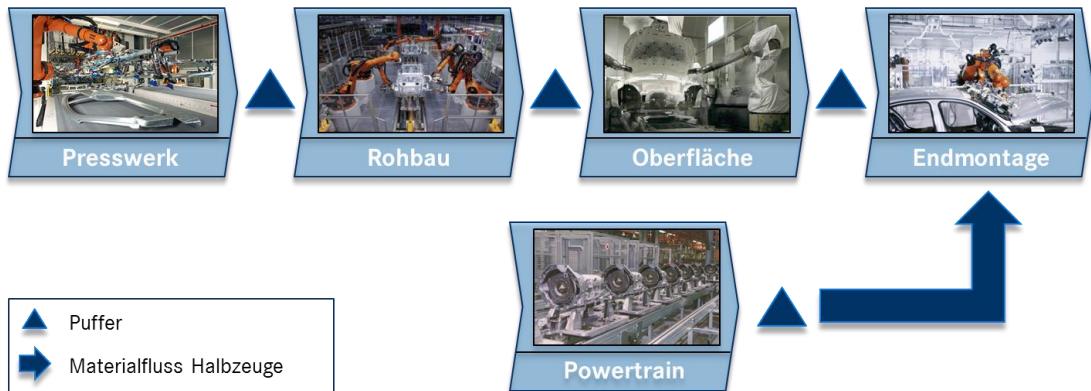


Abbildung 2-1: Produktionsprozess in der Automobilindustrie

Der sequentielle Produktionsprozess eines Automobils ist schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt. Im *Presswerk* werden die Einzelbestandteile der Karosserie (Seitenrahmen, Tür, Dach, Motorhaube, etc.) aus zugeschnittenen Rohblechteilen mit unterschiedlichen Blechdicken der zugelieferten Blechrollen (Coils) unter Verwendung großer Kräfte der Presswerkzeuge durch Umformung (bspw. Tiefziehen) erzeugt [32]. Im *Rohbau* werden anschließend die aus dem Presswerk stammenden Einzelbestandteile zu einer Gesamtkarosserie gefügt. Hierbei kommen unterschiedliche Fügetechnologien wie Schweißen, Clinchen oder Kleben zum Einsatz. Eine Pkw-Karosserie besteht heute in der Regel aus 300 - 500 Einzelbestandteilen, die durch 3500 - 5000 Schweißpunkte sowie einer Vielzahl von Löt- und Schutzgassschweißnähten nicht lösbar miteinander verbunden werden [49]. Für die spätere Aufnahme von Aggregaten und Anbauteilen in der Montage ist hier zudem die zahlreiche Einbringung von Gewindegewinden erforderlich.

Aufgrund dieser großen Fertigungskomplexität wird im *Rohbau* üblicherweise zwischen Haupt- und Nebenlinien unterschieden. Die auf den Nebenlinien vorgefügten Baugruppen und Module werden der in unterschiedliche Aufbaugruppen (Z1, Z2, Z3) gegliederten Hauptlinie zugeführt. Die Bodengruppe, bestehend aus Vorbau, Haupt- und Heckboden, wird mit den Seitenwänden und dem Dach zuerst zum Karosseriegerippe gefügt und abschließend mit den Türen, dem Heckdeckel und der Motorhaube zur finalen Karosserie komplettiert. Der

Rohbau gilt als kostenintensiver Produktionsbereich und ist durch einen hohen Automatisierungsgrad gekennzeichnet.

Im Gewerk *Oberfläche (Lackierung)* wird die Karosserie zunächst gereinigt, entfettet und durch Phosphatierung vorbehandelt, bevor durch das Aufbringen unterschiedlicher Lackschichten (Korrosionsschutzschicht, Funktionsschicht, Basis- und Decklack) die finale Oberfläche des Fahrzeugs erzeugt wird [50]. Hierbei kommen vorwiegend Verfahren der Elektrotauchlackierung und Spritzlackierung zum Einsatz [51]. Die Oberflächenbehandlung ist durch den hohen Automatisierungsgrad und verschiedene Lüftungs- und Trocknungsvorgänge ein energieintensiver Produktionsbereich.

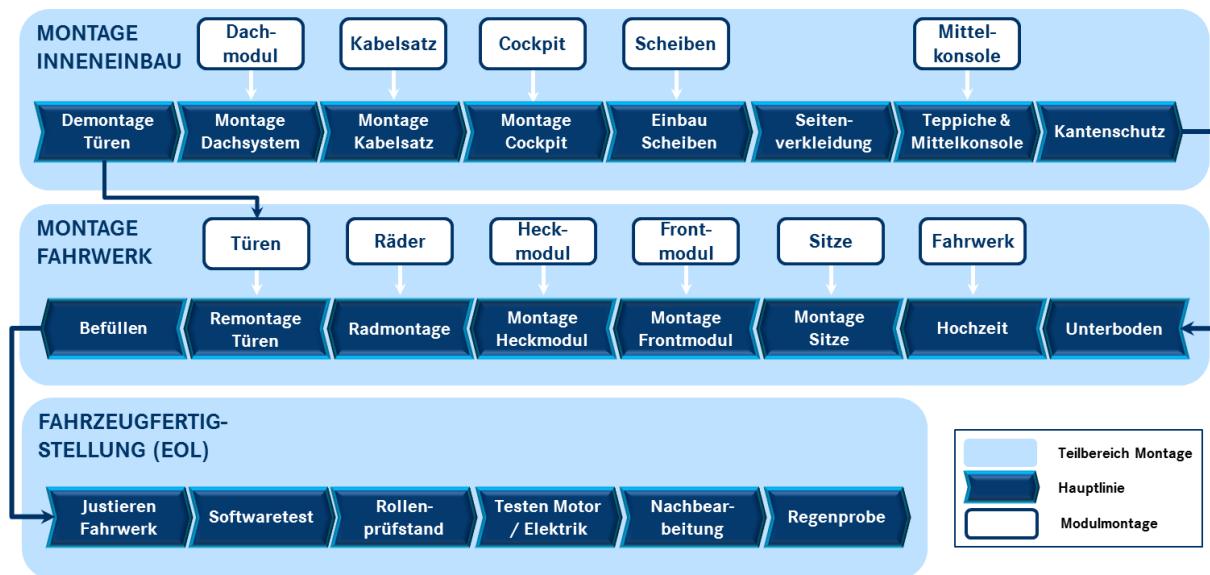


Abbildung 2-2: Exemplarische Montagelinie in der Automobilproduktion

(eigene Darstellung in Anlehnung an [52])

In der *Endmontage* wird die gefügte und lackierte Karosserie mit Scheiben und Inneneinbaukomponenten (bspw. Cockpit, Interieur) versehen. Analog zum Rohbau wird in der Endmontage ebenfalls eine Untergliederung in Haupt- und Nebenlinien vorgenommen, wobei auf den Nebenlinien Baugruppen vormontiert werden und im Anschluss der Hauptlinie zugeführt werden (vgl. Abbildung 2-2) [11]. Der in dem Gewerk *Powertrain* vormontierte Antriebsstrang bestehend aus Motor-, Getriebe- und Fahrwerkskomponenten wird im Rahmen der Fahrzeughochzeit mit der Karosserie durch Verschraubungen formschlüssig verbunden. Nach zusätzlichen Montagevorgängen separat vorgefertigter Baugruppen und Komponenten (Türen, Stoßfänger) erfolgt die Einfüllung der Betriebsmittel sowie finale Abnahme- und Justievorgänge [53]. Die Endmontage ist durch einen geringen Automatisierungsgrad gekennzeichnet, typische Fügeverfahren wie Schrauben, Nieten oder Klemmen werden häufig manuell oder mit der Unterstützung von Handlingsgeräten durchgeführt. Mit jedem Gewerk entlang des Produktionsprozesses steigt die Anzahl der

möglichen herzustellenden Produktvarianten. Bei der Endmontage können bis zu 10^{32} finale Produktvarianten unterschieden werden [54], [55], [56].

Der Produktionsprozess der Automobilindustrie soll im Kontext dieser Arbeit im Wesentlichen aus der Perspektive der Produktionsplanung aufgefasst werden. Die Produktionsplanung in der Automobilproduktion ist hierbei als Bindeglied zwischen der Produktentwicklung, also der Entwicklung eines neuen oder überarbeiteten Fahrzeugmodells, und des korrespondierenden Herstellungsprozesses zu verstehen. Dabei können sich die Planungsumfänge von einzelnen Maschinen, über Produktionssysteme bis zu gesamten Produktionsstätten erstrecken [57]. In der Automobilindustrie bestehen weitestgehend unabhängige gewerkespezifische Planungsbereiche mit unterschiedlich großen Planungsspielräumen [58].

Die Hauptaufgabe der Produktionsplanung besteht somit in der Überführung der entwickelten Produkte in eine rationelle Produktion [31]. Hierarchisch kann die Produktionsplanung auf Basis der Fristigkeit der Planungsentscheidungen in eine strategische, taktische und operative Planung gegliedert werden [59]. Die langfristige *strategische Produktionsplanung* dient der Schaffung und Erhaltung einer wettbewerbsfähigen Produktion durch eine Desensibilisierung gegenüber variablen Umfeldbedingungen. Hierunter fallen unter anderem Standortentscheidungen, Kapazitätsentscheidungen über Produktionslinien und die Zuordnung der zu produzierenden Fahrzeugtypen und Baureihen zu den einzelnen Produktionslinien [60]. Die wesentliche Aufgaben der mittelfristigen *taktischen Produktionsplanung* besteht in der Festlegung der Personal- und Betriebsmittelkapazitäten, der Produktionsorganisation, sowie Entscheidungsfindung bzgl. Produkten, deren Gestalt und die erforderliche Ausbringung. Basierend auf diesen beiden Planungsstufen wird in der kurz- bis mittelfristigen *operativen Produktionsplanung* der Einsatz der verfügbaren Produktionsfaktoren detailliert ausgeplant [61]. Hierzu gehören unter anderem die Reihenfolgeplanung der zu produzierenden Fahrzeuge, Materialbereitstellungskonzepte oder die Zuordnung von Arbeitskräften zu einzelnen Stationen. Die operative Produktionsplanung stellt somit das Bindeglied zwischen der Ressourcenbereitstellung aus der taktischen Produktionsplanung und dem eigentlichen Produktionsgeschehen dar und geht der unmittelbaren Produktionsveranlassung voraus [41].

Auf Basis obiger Ausführungen wird das Gewerk Endmontage, und hierbei speziell die automatisierte Montage, im Kontext der Produktionsplanung als Anwendungsgebiet des Forschungsvorhabens im Rahmen des DRM-Frameworks definiert.

2.1.2. Anlagenentstehungsprozess für automatisierte Montageanlagen

Eine Produktionsanlage kann analog zu einem Produkt in ihrem Lebenszyklus verschiedene Phasen durchlaufen, die vereinfacht als sequentiell angenommen werden können [62]. Nach der *Entstehung* der Anlage erfolgt ihr Einsatz in der *Nutzungsphase (Betrieb)*, nach deren Abschluss entweder das *Recycling* oder eine Umrüstung der Anlage oder einzelner

Anlagenbaugruppen für die Wieder- oder Weiterverwendung im Rahmen einer neuen Produktionsaufgabe steht (*Re-Use*). Die vorliegende Arbeit befasst sich im Wesentlichen mit den ersten beiden Phasen des Anlagenlebenszyklus.

Neben der Begrenzung des Betrachtungshorizonts auf die ersten beiden Phasen des Lebenszyklus wird folgend die Phase der Anlagenentstehung spezifiziert, auf die sich das Forschungsvorhaben konzentrieren wird. Hierfür wird das derzeit vorherrschende Paradigma der Entstehung automatisierter Montageanlagen der Automobilindustrie sowie die einzelnen Abschnitte des Anlagenentstehungsprozesses kurz vorgestellt.

Die Entwicklung von Produktionssystemen ist ein stark iterativer Prozess, der aus projektorganisatorischer Sicht durch ein hohes Maß an Arbeitsteilung gekennzeichnet ist [63], [64], [65]. Insbesondere bei der Projektierung und Entwicklung von automatisierten Produktionsanlagen für die Automobilindustrie hat sich eine organisatorische Konstellation bestehend aus Anlagenbetreiber (OEM), Anlagenlieferant (i.e. Generalunternehmer, GU) sowie spezialisierte Subunternehmer und Komponentenhersteller etabliert. Somit handelt es sich hierbei um einen verteilten, unternehmensübergreifenden Entwicklungsprozess.

Die Anlagenausschreibung umfasst eine Leistungsspezifikation der Anlage, die auf einer groben Vorplanung (Produktionskonzept) des OEMs basiert: hier werden neben dem Fabrikhallenlayout, das Stationslayout (Zellenlayout), die Fertigungstechnologien, Fügefolgen, Taktzeiten und die Materialflüsse bzw. -bereitstellung der Halbzeuge und Fügeteile grob spezifiziert. Auf Basis digitaler Produktmodelle, physikalischer Prototypen und der Produktstückliste (Produkt-BOM) wird ein Mengengerüst für den Produktionsprozess erstellt, in dem die Prozessdurchführung notwendigen Ressourcen dokumentiert werden [66], [67]. Dem Mengengerüst kann durch die Einbeziehung von Faktorpreisen (u.a. Preise für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe) ein Wertgerüst angegliedert sein, auf dessen Basis die Produktionskosten a priori überschlagen werden können [68].

Nach der Anlagenausschreibung des Auftraggebers (OEM) wird von potentiellen Auftragnehmern (Anlagenlieferanten) ein Angebot entsprechend des in einem Lastenheft spezifizierten Leistungsumfangs abgegeben. Die Angebote werden durch die Produktionsplanung des OEMs technisch begutachtet und mit einem Entscheidungsvorschlag an den Einkauf des OEMs weitergeleitet. Neben den Angebotsinhalten des potentiellen Auftragnehmers werden zudem Faktoren wie Zertifizierungen oder Referenzen im Rahmen einer Gesamtbewertung berücksichtigt. Nach abschließenden Verhandlungen zwischen dem OEM und dem GU erfolgt die Auftragsvergabe, die den Start des essentiellen Entwicklungsprozesses der Anlage markiert.

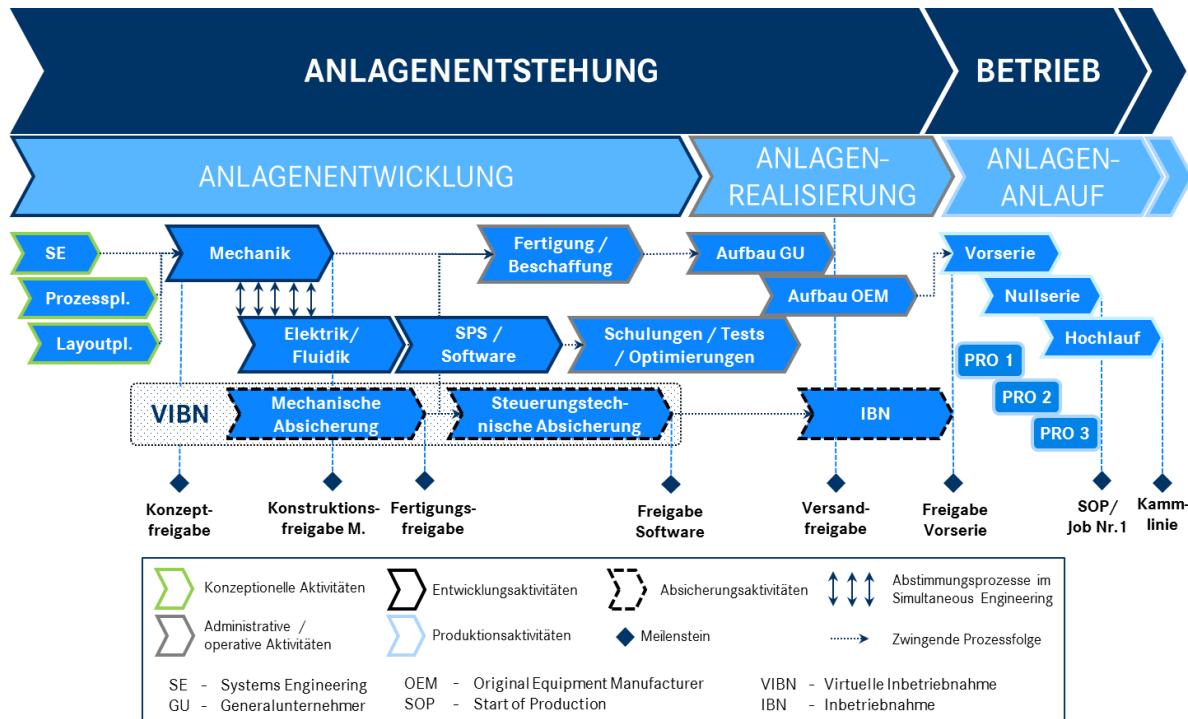


Abbildung 2-3: Anlagenentstehungsprozess automatisierter Montageanlagen
(eigene Darstellung basierend auf [57], [69])

Eine automatisierte Montageanlage wird bei der Entwicklung als mechatronisches System aufgefasst, bei dem die Systemfunktionalität durch das synergetische Zusammenwirken mechanischer und elektrischer Funktionsgruppen unter Verwendung softwarebasierter Informationstechnik erzielt wird. Strukturell besteht ein mechatronisches System aus Sensorik zur Erfassung der Zustandsgrößen, Aktorik zur Systemsteuerung bzw. -regelung und Prozessorik zur Informationsverarbeitung [70]. Die vernetzte Interaktion verschiedener Wissensdomänen stellt hohe Anforderungen an den integrativen Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme [71], [72], [73].

Zur Konzipierung des Produktionssystems als initialer Schritt des Entwicklungsprozesses automatisierter Montageanlagen (vgl. Abbildung 2-3) wird häufig der Ansatz des *Systems Engineering* (SE) verwendet [74], [75], [76], [77]. Auf Systementwurfsebene erfolgt hierbei basierend auf einer funktionalen Abstraktion des Produktionssystems eine Gliederung in Subsysteme und Funktionseinheiten mit steigendem Detaillierungsgrad. Neben Methoden, Verfahren und Hilfsmitteln zur Analyse, Planung, Auswahl und optimalen Gestaltung der Subsysteme und Funktionseinheiten stellt das Systems Engineering zusätzlich Leitlinien für das Management komplexer Projekte bereit [78]. Durch die Verwendung des Systems Engineering wird der Komplexität bei der Entwicklung eines Produktionssystems begegnet, die aufgrund der integrierten Produktstruktur insbesondere in einem erhöhten Abstimmungs- und Koordinationsbedarf zwischen den Entwicklungssträngen der einzelnen Fachdisziplinen *Mechanik*, *Elektronik/Fluidik* und *SPS/Software* besteht. Neben dem SE

werden die grobe Layout- und Prozessplanung des OEMs aufgegriffen, ausdetailliert und in einem Pflichtenheft zur Dokumentation der geplanten Anlagenausgestaltung zusammengefasst [57]. Hierbei kann allerdings festgestellt werden, dass die Systemeigenschaften einer Anlage, die in der Betriebsphase zu unterschiedlichen Kosten für den Betreiber führen können, im Pflichtenheft häufig nur unzureichend berücksichtigt werden [79]. Die Konzeptfreigabe durch den OEM markiert das Ende der konzeptionellen Entwicklungsaktivitäten und initiiert die parallelen Entwicklungsstränge der individuellen Fachdisziplinen.

Bei der Intensivierung der Entwicklungsaktivitäten beim GU und den spezialisierten Unteraufnehmern zur Anlagenentwicklung werden aufgrund der integrierten Produktstruktur des Produktionssystems in der Regel parallele Entwicklungsmethodiken wie Concurrent Engineering oder Simultaneous Engineering verfolgt [80], [81], [82]. Im Rahmen der mechanischen Entwicklungsaktivitäten werden die Eigenschaften der Bearbeitungsprozesse (Materialabgriff, Positionierung, etc.) aus den groben Fügefolge- und Materialflussvorgaben ausdetailliert und als Prozessablauf in Form eines Taktzeitdiagramms spezifiziert [83]. Digitale 3D-Modelle der einzelnen Anlagenkomponenten und -bauteile werden erzeugt und in 2D-Konstruktionsplänen, einer Stückliste (BOM), einer Werkzeugübersicht sowie einer Beschaffungs- und Fertigungsliste (Fertigungs-BOM) dokumentiert [84]. Bei den elektrischen und pneumatischen Entwicklungsaktivitäten erfolgt der Entwurf von elektrischen Schaltplänen und Pneumatikplänen auf Basis des mechanischen Anlagenlayouts. Neben der Allokation der Versorgungseinrichtungen erfolgt die Planung und Auslegung der elektrischen und pneumatischen Infrastruktur (Schaltschränke, Ventilinseln, etc.). Stromlauf-, Signalfluss- und Sicherheitskonzept dienen als Grundlage für die Entwicklung des Steuerungsprogramms bei den softwarebasierten Entwicklungsaktivitäten, die neben der SPS-Programmentwicklung auch die Entwicklung von Roboterprogrammen in Form von OLP-Programmen umfasst [85].

Komplementär zu den parallelen Entwicklungssträngen erfolgt die Durchführung *virtueller Absicherungsprozesse*, die der frühzeitigen Fehleraufdeckung im Planungsprozess dienen und somit zu reduzierten Planungskosten und einer erhöhten Planungsqualität führen. Hierbei werden parallel zu den Entwicklungstätigkeiten virtuelle Absicherungstätigkeiten zur Überprüfung der Erreichbarkeit, Ergonomie und des Materialflusses durchgeführt [58]. Die virtuelle Anlagenabsicherung erfolgt nicht nur zur Sicherstellung der Durchführbarkeit des geplanten Produktionsprozesses sondern auch zur Sicherstellung eines adäquaten Anlagenverhaltens im Fall des Auftretens einer Störung oder eines Fehlers. Anlagenbedingte Störungen können u.a. durch Ablauffehler, defekte Anlagenkomponenten oder fehlerbehaftete Positionierung der Fügeteile hervorgerufen werden [13]. Absicherungsaktivitäten auf der Basis virtueller Modelle haben in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen und können auch der Detailphase der Produktionsplanung zugeordnet

werden [11], [86]. Im Entwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen dienen virtuelle Modelle bei Konstruktionsbesprechungen häufig als Diskussionsgrundlage, fördern die Kommunikation und vereinfachen die Abstimmung zwischen den beteiligten Entwicklungspartnern. Für automatisierte Produktionsanlagen im Automobilbau hat die VDA Arbeitsgruppe Virtuelle Inbetriebnahme einen Standardprozess erarbeitet, der die Gemeinsamkeiten aller OEMs bei der Durchführung von virtuellen Absicherungsprozessen dokumentiert. Im Rahmen des Anlagenentwicklungsprozesses dienen die Ergebnisse aus den einzelnen Entwicklungssträngen zum Aufbau der virtuellen Modelle für einen begleitenden virtuellen Absicherungsprozess [87]. Die Methodik der Virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) fand im Automobilbau zunächst breite Anwendung für Produktionsanlagen aus dem Gewerk Rohbau und wird zunehmend für Montageanlagen verwendet [88], [89], [90].

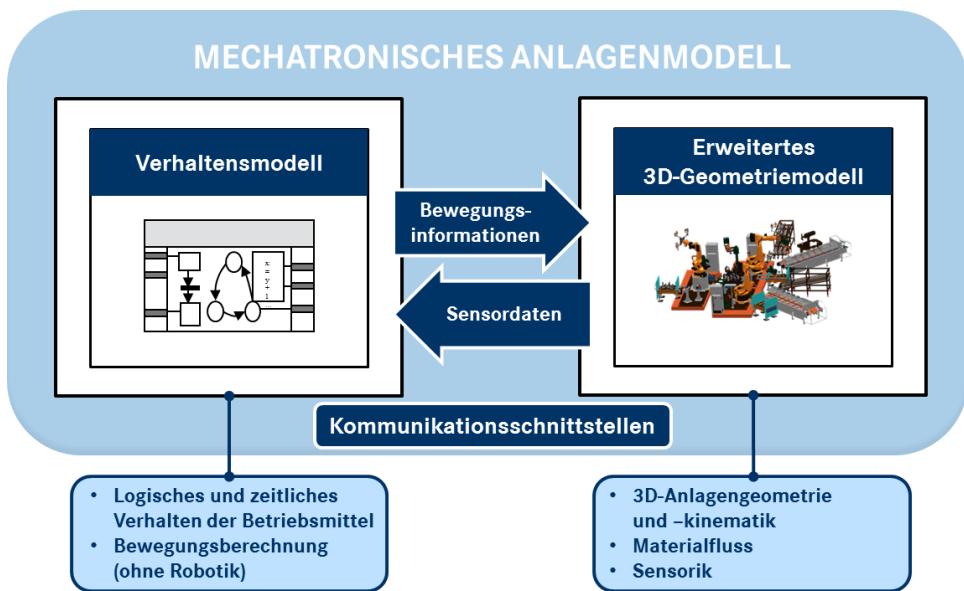


Abbildung 2-4: Mechatronisches Anlagenmodell für die Virtuelle Inbetriebnahme

(eigene Darstellung basierend auf [91])

Bei der Virtuellen Inbetriebnahme kann zwischen der *mechanischen Absicherung* und der *steuerungstechnischen Absicherung* unterschieden werden (vgl. Abbildung 2-3) [84], [92]. Bei der mechanischen Absicherung von Produktionsanlagen, auch als Virtual Engineering bezeichnet, erfolgt die Visualisierung und Absicherung von Anlagenabläufen, Taktzeiten und Kollisionen unter Berücksichtigung beliebiger Produktvarianten basierend auf einem *erweiterten 3D-Geometriemodell* der Produktionsanlage (vgl. Abbildung 2-4) [93], [94]. Weit verbreitete Werkzeuge zur Erstellung erweiterter 3D-Geometriemodelle für die Virtuelle Inbetriebnahme im Automobilbau sind DELMIA oder Tecnomatix Process Simulate [95], [91]. Im Kontext der virtuellen Produktentstehung ermöglicht das Virtual Engineering eine frühzeitige, vernetzte und integrierte Unterstützung des Anlagenlebenszyklus hinsichtlich Abstimmung, Bewertung, Konkretisierung und Validierung von Anlagenkomponenten und -prozessen unter Beteiligung aller Entwicklungspartner auf der Basis virtueller Prototypen

[96], [97], [98]. Die mechanische Absicherung mündet in der Freigabeerteilung des OEMs für den GU zur *Fertigung und Beschaffung* der Anlagenkomponenten und -teile.

Die steuerungstechnische Absicherung im Rahmen der Virtuellen Inbetriebnahme erfolgt auf der Basis eines mechatronischen Anlagenmodells nach dem Prinzip der Hardware-in-the-loop Simulation (HIL). Hierbei beinhaltet das *mechatronische Anlagenmodell* neben dem erweiterten Geometriemodell das *Verhaltensmodell* der Anlage, das das logische und zeitliche Verhalten der variablen Zustandsgrößen individueller Anlagenkomponenten gegenüber den Steuerungseinheiten in Form logischer Signalfolgen repräsentiert. Weit verbreitete Tools zur Verhaltensmodellierung für die Virtuelle Inbetriebnahme sind bspw. WinMOD und SIMIT [95], [99]. Die Anlagenkomponenten und -peripherie wird dabei in Echtzeit simuliert und die Steuerungstechnik als reale, physisch vorhandene Hardware eingebunden [98], [100]. Hierdurch werden die Steuerungsprogramme ohne Vorhandensein der realen Produktionssysteme im Rahmen der Produktionsplanung unter Verwendung digitaler Produkt-, Ressourcen- und Prozessdaten abgesichert [49]. Die Virtuelle Inbetriebnahme endet mit der Softwarefreigabe des OEMs gegenüber dem GU.

Eine besondere Ausprägung der VIBN verwendet für die Simulation des erweiterten Geometriemodells den Simulationsansatz der physikbasierten Simulation (vgl. Kapitel 3.3). Statt einer reinen Simulation der Anlagenkinematik werden bei dieser dynamischen Mehrkörpersimulation physikalische Produkt- und Anlageneigenschaften berücksichtigt, was zu einer erhöhten Abbildungsgüte des Systems führt. Die Verwendung dieses Simulationsansatzes im Rahmen der VIBN wurde bereits erfolgreich auf unterschiedliche Anlagentypen angewendet [101], [102]. Im Kontext der VIBN automatisierter Montageanlagen ist dieser Ansatz derzeit noch nicht vollständig in die industrielle Anwendung integriert sondern Gegenstand verschiedener Forschungsaktivitäten. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Ansatz der physikbasierten Simulation im Kontext der VIBN vertieft und erweitert werden und somit zu einer Weiterentwicklung der physikbasierten VIBN beitragen.

Die virtuellen Absicherungsprozesse führen zu einer Steigerung der Effizienz im gesamten Anlagenentstehungsprozess, zu einer signifikanten Reduktion der Inbetriebnahmekosten und -dauer und somit zu einer Senkung der Anlagenentstehungskosten. Weiterhin kann durch die virtuelle Absicherung eine frühzeitige Beurteilung und Optimierung des gesamten Anlagenverhaltens unter Verwendung digitaler Produkt- und Ressourcen- sowie realer Steuerungsdaten erfolgen [103]. Darüber hinaus bietet sich im Kontext der Anlagenabsicherung die Möglichkeit zur Optimierung des Gesamtsystems der Anlage unter verschiedenen Gesichtspunkten, bspw. der Kinematik und der Prozessabläufe auf Basis virtueller Anlagenmodelle.

Nach der Anlageninstallation beim GU oder direkt beim OEM wird die Anlage erstmalig *in Betrieb genommen* (vgl. Abbildung 2-3). Bei der Erstinbetriebnahme erfolgt die Überführung

der Anlage aus dem Ruhezustand nach mechanischer Fertigstellung in den Dauerbetriebszustand [104]. Neben dem Einmessen von Robotern und Werkzeugen werden die Roboter-Offline-Programme (OLP) in die Online-Programme auf den realen Robotersteuerungen überführt. Nach Abschluss der realen Inbetriebnahme startet mit der Vorserienfreigabe die Anlagenanlaufphase, die sich aus der *Vor-* und *Nullserie*, den einzelnen Produktionstests (*PRO 1/2/3*) und dem *Hochlauf* zusammensetzt. Hierbei dienen die drei Produktionstests zur Bestätigung der Anlagen-, Produkt- und Qualifizierungsqualität [105]. Mit dem SOP (Start of Production/Job Nr.1) wird erstmals unter Serienbedingungen, aus Serienteilen und Serienwerkzeugen produziert. Der Hochlauf besteht in der stufenweisen, qualitätsorientierten Steigerung der kundenfähigen Produktstückzahl und mündet in die Erreichung der geplanten Soll-Stückzahl (Kammlinie) [106], [107], [108].

Unter Bezug auf das DRM-Framework wird der Abschnitt der physikbasierten mechanischen Absicherung als vorlaufender Prozess im Kontext der Virtuellen Inbetriebnahme als Aktivität (*activity stage*) im Produktentwicklungsprozess festgelegt, auf den sich das Forschungsvorhaben fokussiert.

2.2. Energieeffizienz im Kontext der Automobilproduktion

Für eine Annäherung an das Thema Energieeffizienz in Bezug auf den Produktionsprozess in der Automobilindustrie wird zunächst der Begriff Energieeffizienz eingeführt, bevor die Bedeutung des Themenkomplexes anhand der Darstellung interner und externer Treiber zur Steigerung der Energieeffizienz aus Sicht eines OEMs veranschaulicht wird. Somit wird die Energieeffizienz im Produktentwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion als zu betrachtender Aspekt im Rahmen des DRM-Frameworks spezifiziert.

Das ökonomische Prinzip beruht auf der Annahme, dass beim wirtschaftlichen Handeln aufgrund der Knappheit von Ressourcen der Mitteleinsatz mit dem Ergebnis der Handlung ins Verhältnis gesetzt werden muss und die Wirtschaftseinheit nach individuellen Präferenzen eine Nutzen- oder Gewinnmaximierung anstrebt [109]. Hierbei kann basierend auf den herrschenden Rahmenbedingungen zwischen Minimal- und Maximalprinzip unterschieden werden: während beim Maximalprinzip für einen vorgegebenen Mitteleinsatz der maximale Output angestrebt werden soll, wird beim Minimalprinzip für einen festgelegten Output der Mitteleinsatz minimiert. Eine Mischform beider Prinzipien stellt das Extremumprinzip dar, bei dem ohne vorgegebene Rahmenbedingungen ein möglichst günstiges Verhältnis zwischen Mitteleinsatz und Output realisiert werden soll [110]. Effizienz behandelt somit den Prozess des Zustandekommens einer bestimmten Wirkung unter Berücksichtigung des verhältnismäßigen Einsatzes der Mittel. Hierbei muss Effizienz von Effektivität abgegrenzt werden: während Effektivität die Wirksamkeit einer Handlung charakterisiert, beschreibt

Effizienz die Wirtschaftlichkeit bzw. Leistungsfähigkeit einer Zielerreichung. Somit setzt Effizienz die Effektivität als Maß für die Zielerreichung voraus und geht über sie hinaus [111].

Ressourceneffizienz kann in diesem Zusammenhang also die Erreichung eines definierten Nutzens (Produkt- oder Dienstleistung) mit einem geringeren Verbrauch an Ressourcen (Personal, Zeit, Rohstoffe, etc.) oder die Steigerung des Nutzens bei gleichbleibenden Ressourcenverbrauch bezeichnen. Effizienz im Kontext der industriellen Produktion lässt sich als Verringerung des outputspezifischen Ressourceneinsatzes durch optimierte Verfahren und Techniken beschreiben [112]. Am Produktionsstandort Sindelfingen betrug der Jahresenergieverbrauch 2014 (Strom, Erdgas, Heizöl) nach Abzug der Kraftwerkseigenerzeugung und der Wärmelieferung an die Stadtwerke 1151335 MWh [113]. Im Rahmen dieser Arbeit ist das Hauptaugenmerk auf die Ressource Energie und dessen Einsatz im automobilen Produktionsprozess gerichtet. Der erforderliche Energiedurchsatz für die Produktion eines Fahrzeugs sowie der Gesamtenergieverbrauch deutscher Automobilhersteller pro Fahrzeug ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

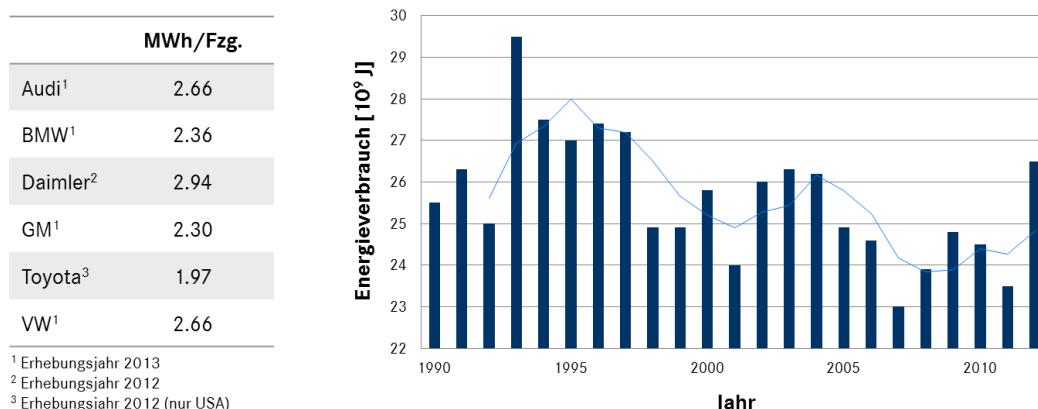


Abbildung 2-5: Energieverbrauch zur Produktion eines Fahrzeugs bei unterschiedlichen Herstellern (links) und zeitliche Entwicklung des Gesamtenergieverbrauchs deutscher Fahrzeughersteller pro Fahrzeug (rechts)

Wird als Ressource nun der Energiedurchsatz betrachtet, so bedeutet Energieeffizienz nach dem Minimalprinzip die Herstellung eines definierten Nutzens mit dem geringstmöglichen Energiedurchsatz. Produktionssysteme können somit als energieeffizient bezeichnet werden, wenn sie bei einer definierten Produktionsleistung einen geringstmöglichen Energiedurchsatz erfordern [114], [115].

$$[Stck./kWh] \text{Energieeffizienz}_{\text{Produktionssystem}} = \frac{\text{Produktionsleistung}}{\text{Energiedurchsatz}} \quad (1)$$

Es existiert eine Vielzahl von Treibern für die Berücksichtigung der Energieeffizienz in den Produktionsprozess der Automobilindustrie, die aus Sicht eines OEMs als intern oder extern charakterisiert werden können. Aus *unternehmensinterner Perspektive* sind hier zuerst die

Energiekosten als Teil der Betriebskosten einer Produktionsanlage als entscheidende Größe zu nennen. In den Metall verarbeitenden Industriezweigen besitzt die Herstellung von Kraftwagen(-teilen) die größte Verbrauchsintensität bzgl. der Ressource Energie [20]. Betriebswirtschaftlich betrachtet ist Energie ein Produktionsfaktor, dessen Erzeugung, Bereitstellung, Einsatz und Entsorgung im Unternehmen Kosten verursacht [116]. Als Bestandteil der Herstellungskosten beeinflussen die Energiekosten gleichzeitig die Kosten des Endprodukts. Aufgrund des stetig steigenden Automatisierungsgrads und des damit einhergehenden hohen Energiebedarfs der Automobilproduktion insbesondere in Zentraleuropa sowie neuartiger energieintensiver Fertigungstechnologien (bspw. Laserschweißen) kommt den Energiekosten auch hinsichtlich zukünftiger Wettbewerbsvorteile eine besondere Bedeutung zu.

Unternehmensexterne Anreize für eine energieeffiziente Produktion in der Automobilindustrie bestehen in der kontinuierlichen Verknappung der häufig zur Erzeugung von Energie verwendeten fossilen Ressourcen (bspw. Erdöl, Kohle) sowie der Reduzierung der mit der Energieerzeugung verbundenen Umweltbelastungen (CO₂-Emission). Ein verändertes Bewusstsein und Konsumverhalten der Kunden führt zu einer Steigerung der Nachfrage nach nachhaltig hergestellten Produkten. Politische Rahmenbedingungen sowie umweltrechtliche Vorgaben schaffen zusätzliche Anreize für eine energieeffiziente Produktion. Beispielsweise ist die Zertifizierung eines Unternehmens nach der DIN EN ISO 50001 mit Vorgaben für ein systematisches Energiemanagement Voraussetzung für die eingeschränkte Befreiung von der EEG-Umlage sowie zukünftig auch für die Entlastung von der Strom- und Energiesteuer [117].

Energieeffizienz in der Automobilproduktion ist somit unter politischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein bedeutsames Themengebiet, das sowohl ökologische als auch ökonomische Effekte adressiert. Neben der Einsparung endlicher Ressourcen zur Erzeugung der für die Produktionsprozesse nutzbaren Endenergie und der Vermeidung der häufig damit einhergehenden Emission schädlicher Treibhausgase steht eine Reduktion der Betriebskosten in Form von Energiekosten der Automobilhersteller im Vordergrund.

2.3. Problemformulierung

Im Rahmen der Problemformulierung werden mehrere Schritte vorgenommen, um das Ziel des Forschungsvorhabens zu spezifizieren und messbare Kriterien für eine erfolgreiche Durchführung zu definieren. Nach einer eingehenden Beschreibung der Ausgangssituation wird zunächst die derzeitige Vorgehensweise der mechanischen Absicherung automatisierter Produktionsanlagen der zukünftigen, erweiterten Vorgehensweise mit Hilfe einer modellbasierten Betrachtung (*Initial Reference Model* vs. *Initial Impact Model*) gegenübergestellt. Im Anschluss werden die für Erreichung des Initial Impact Models zu beantwortenden Forschungsfragen aufgestellt und die zu belegende wissenschaftliche These formuliert. Nach der Definition messbarer Kriterien für die Beurteilung einer erfolgreichen

Durchführung des Forschungsvorhabens werden abschließend unter Verwendung eines ARC-Diagramms die für die Problemlösung relevanten wissenschaftlichen Themengebiete identifiziert und klassifiziert.

2.3.1. Darstellung der Ausgangssituation

Für die Darstellung der Ausgangssituation können drei wesentliche Themenfelder identifiziert werden, die folgend im Einzelnen detailliert und auf Basis von in der Industrie vorherrschenden Praktiken sowie in der Wissenschaft häufig vertretenden Auffassungen vorgestellt werden.

Themenfeld 1: Unzureichende Berücksichtigung von Energieeffizienz im Kontext der Produktionsplanungsprozesse in der Digitalen Fabrik

Im Rahmen der Produktionsplanung sowie während des gesamten Produktentstehungs- und Anlagenentstehungsprozesses nimmt das Konzept der Digitalen Fabrik eine bedeutsame Rolle ein. Die Digitale Fabrik ist laut Definition des VDI ein „*Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u.a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden*“ [57]. Dabei wird eine ganzheitliche Planung, Evaluierung und kontinuierliche Optimierung aller Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik im Zusammenspiel mit dem herzstellenden Produkt angestrebt. Die Digitale Fabrik bietet softwaretechnische Unterstützung für alle Phasen der Entwicklung von Produktionssystemen von der Arbeitsablauf-, Arbeitsmittel-, Arbeitsstätten- bis hin zur Logistikplanung in Form von Tools für die Modellierung, Simulation und Visualisierung [118].

Anwendergruppen der Digitalen Fabrik im Kontext der Automobilproduktion unterscheiden sich bei deren Nutzung hinsichtlich der Anwendungstiefe sowie der Zielsetzung und -priorisierung. Der praxisorientierte Einsatz der Digitalen Fabrik im Kontext der Produktionsplanung eines OEMs hat sich in den vergangenen Jahren zunehmend erhöht und entwickelt sich vermehrt von vereinzelten singulären Anwendungen hin zu einer umfassenden, geschlossenen Implementierung entlang des Produktionsplanungsprozesses [119], [120], [121]. Aus Sicht eines OEMs wird beim Einsatz von Tools der Digitalen Fabrik insbesondere auf eine frühzeitige Steigerung des Produkt- und Anlagenreifegrads, die Reduzierung von Planungszeiten, sowie von Herstellungs-, Investitions- und Anlaufkosten abgezielt [122], [123]. Die wesentlichen Nutzungspotentiale für einen OEM bestehen somit in der Erhöhung der Planungsqualität, der Steigerung der Wirtschaftlichkeit sowie der Standardisierung von Planungsprozessen. Anlagenlieferanten der Automobilindustrie nutzen die Digitale Fabrik gezielt, um ihre Wettbewerbsposition gegenüber den OEMs zu verbessern, bspw. durch die Durchführung einer Virtuellen Inbetriebnahme [124]. Die Relation zwischen der Digitalen Fabrik und der Virtuellen Inbetriebnahme besteht hierbei in der Verwendung

und Aufbereitung der virtuellen Modelle, die auf dem Datenbestand der Digitalen Fabrik basieren [125].

In der Produktionsplanung und -steuerung eines OEMs dominieren bei der Anwendung von Tools der Digitalen Fabrik überwiegend logistikorientierte Zielgrößen, i.e. niedrige Bestände, kurze Durchlaufzeiten, und hohe Auslastung [126]. Im Fokus stehen zudem die Sicherstellung der geforderten Produktqualität, der Nachweis der Herstellbarkeit (bspw. Erreichbarkeitsanalysen, kollisionsfreie Anlagenabläufe), die Absicherung von Fertigungszeiten und ergonomischen Aspekten sowie die Planung von Investitionen. Der Energieverbrauch bei der Automobilherstellung und somit die Sicherstellung einer energieeffizienten Automobilproduktion findet im Bereich der Produktionsplanung im Kontext der Digitalen Fabrik derzeit nur unzureichend Berücksichtigung [127], [128], [129]. Die Integration von Energieverbrauchsbeschränkungen in die Tools der Digitalen Fabrik wird von Toolherstellern vorangetrieben, beschränkt sich derzeit allerdings nur auf vereinzelte Anwendungen und ist innerhalb des Produktionsplanungsprozesses nicht durchgängig etabliert. Verschiedene Forschungsvorhaben mündeten in dem Nachweis der Machbarkeit zur Darstellung von Energieverbräuchen auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen (vgl. Kapitel 3.4). Eine breite Integration in digitale Planungsprozesse in der industriellen Anwendung der Automobilproduktion kann allerdings nicht festgestellt werden.

Es ist zu erwarten, dass Energieeffizienz in zukünftigen Planungsprozessen zunehmend an Bedeutung gewinnen wird: viele energieeffizienzsteigernde Maßnahmen werden nach Anlagenerrichtung im laufenden Produktionsbetrieb eingepflegt [130]. Simulationen im Rahmen der Planungsprozesse der Digitalen Fabrik bieten für eine frühzeitige Integration von Energiesparansätzen ein hohes Potential [131].

Themenfeld 2: Projektstrukturbedingte und organisatorische Hemmnisse für die Sicherstellung eines energieeffizienten Anlagendesigns und -betriebs

Für die Anlagenentstehung und -realisierung ist sowohl spezialisiertes Fachwissen als auch umfangreiches, domänenübergreifendes Wissen aus unterschiedlichen Bereichen der Steuerungstechnik und des Maschinenbaus erforderlich, welche von einem OEM üblicherweise nicht vorgehalten werden kann. Obwohl alle an der Anlagenentwicklung beteiligten Partner im Rahmen der Projektorganisation die Erreichung des gemeinsamen Entwicklungsziels anstreben, haben die einzelnen Akteure zudem individuelle Ziele, die einen Interessenskonflikt bedeuten können. Ein potentieller Konflikt besteht zwischen dem Auftraggeber bzw. dem zukünftigen Betreiber der Anlage (OEM) und dem Anlagenentwickler (GU): für den Anlagenentwickler sind die zukünftigen Betriebskosten einer Anlage während ihrer Nutzungsphase von untergeordneter Relevanz, während sie für den Anlagenbetreiber einen signifikanten Beitrag zu den Produktherstellungskosten darstellen [132], [133]. Die

Erhöhung der Produktionsqualität im Rahmen der Digitalen Fabrik ist bei den beauftragten Entwicklungsdienstleistern von geringerer Bedeutung [124].

Für den Anlagenentwickler steht bei der Entwicklungsauftragsdurchführung die angebotskonforme bzw. kostengerechte Konstruktion, die prozesssichere Funktionsweise und die termingerechte Bereitstellung der Anlage im Vordergrund. Die Phasen des Anlagenlebenszyklus nach der Anlagenentstehung finden vonseiten des Anlagenlieferanten derzeit häufig nur in Form einer wartungs- bzw. recyclinggerechten Anlagengestaltung Berücksichtigung [134], [135]. Für den Anlagenbetreiber sind allerdings neben den reinen Entwicklungskosten auch die Betriebskosten der Anlage im Sinne einer ganzheitlichen Kostenbetrachtung von Investitionsgütern von großer Bedeutung. Hierzu müssen neben den Reparatur- und Wartungskosten der Anlage die Kosten für die zur Erfüllung der Produktionsaufgabe benötigten Ressourcen unabhängig vom Rohmaterial mitbetrachtet werden.

Innerorganisatorisch besteht für den Produktionsplaner eines OEMs zudem häufig wenig Anreiz ein energieeffizientes Anlagendesign zu fördern: die Energiekosten in der Betriebsphase der Anlage werden häufig nicht den Planern der Anlage sondern den Anlagenverantwortlichen (Instandhaltern) zugeordnet. In der Vergangenheit haben sich die zentralisierte Produktionsplanung und der Einkauf eines OEMs bei der Auftragsvergabe und -abwicklung überwiegend auf Investitionskosten von Produktionsanlagen konzentriert und die Optimierung ertragsbestimmender Faktoren der Nutzungsphase den einzelnen Werken bzw. den Anlagenverantwortlichen überlassen [13].

Themenfeld 3: Geringe Möglichkeiten zur Produktbeeinflussung in späteren Entwicklungsphasen

Der Produktentwicklungsprozess technischer Produkte kann in Planungs-, Konzept-, Entwurfs- und Ausarbeitungsphase untergliedert werden [136], [31]. Die Beeinflussbarkeit der Produktmerkmale ist in den frühen Entwicklungsphasen am höchsten und sinkt analog zu dem konstruktiven Freiheitsgrad bei zunehmender Detaillierung der Entwicklungslösung in den späteren Phasen ab [137], [138], [139], [140]. Die Möglichkeit zur Kostenbeeinflussung sinkt mit zunehmenden Konkretisierungsgrad im fortschreitenden Entwicklungsprozess ebenfalls stetig, wohingegen die erforderlichen Zeiten und Kosten für die Behebung eines Konstruktionsfehlers gemäß der Zehnerregel steigen [141], [142]. Hierdurch wird die besondere Bedeutung der frühen Phasen der Produktentwicklung bzgl. der Produktgestaltung und im Hinblick auf die Kostenverantwortung deutlich.

Diese Erkenntnisse aus der Produktentwicklungstheorie lassen sich auch auf den Entwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen für die Automobilproduktion übertragen. Empirische Studien belegen, dass bei der Entwicklung von Produktionsanlagen 70% - 80% der Gesamtkosten in den frühen Entwicklungsphasen festgelegt werden [143].

Unter Berücksichtigung der Energieeffizienz als ein Produktmerkmal kann auch hier festgestellt werden, dass wesentliche Einflussfaktoren für den späteren Energieverbrauch einer Anlage bereits in den frühen Entwicklungsphasen definiert werden. Ein Vergleich der Energieeffizienzpotentiale zwischen Entwicklungs- und Betriebsphase zeigt deutlich, dass die größeren Einflussmöglichkeiten in der Entwicklungsphase und hier insbesondere in der Planungsphase liegen [127], [144], [145]. Demnach sind Defizite hinsichtlich der Energieeffizienz von Anlagen häufig auf Defizite in der Planungsphase zurückzuführen. Vor diesem Hintergrund erscheint der Ansatz der Beeinflussung einer automatisierten Montageanlage hinsichtlich einer energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung in den frühen Entwicklungsphasen ein vielversprechender Ansatz für die Gestaltung eines energieeffizienten Produktionssystems zu sein.

Die Integration von Energieeffizienzaspekten in den Entwicklungsprozess mit dem Ziel einer nachhaltigen Produktentwicklung hat in den vergangenen Jahren vermehrt an Bedeutung gewonnen [146], [147], [148]. Die hieraus hervorgegangenen Erkenntnisse wurden in Form einer EU-Ökodesign-Richtlinie für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte festgehalten und im Rahmen des Energieverbrauchsrelevante-Produkt-Gesetz national umgesetzt [149], [150]. Diese Richtlinie zielt insbesondere auf die nachhaltige Gestaltung hochstückzahliger Konsumgüter, deckt aber auch den Bereich langlebiger Investitionsgüter ab. Die Anwendung der Richtlinien bei der methodischen Vorgehensweise im Entwicklungsprozess automatisierter Produktionsanlagen gestaltet sich aufgrund der hohen Produktindividualität und der starken spezifischen Anwendungsorientierung allerdings schwierig [151].

2.3.2. Modellbasierte Betrachtung

Unter Bezug auf die in Kapitel 2.1.2 vorgenommene Begrenzung des Betrachtungshorizonts auf die Phase der physikbasierten mechanischen Absicherung im Anlagenentstehungsprozess wird das *Initial Impact Model* aufgestellt (vgl. Abbildung 2-6).



Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des Initial Impact Models

Hierzu wird das *Initial Reference Model* der physikbasierten mechanischen Absicherung automatisierter Produktionsanlagen um zusätzliche Bestandteile erweitert. Derzeit wird die physikbasierte mechanische Absicherung auf Basis des Produktmodells, des 3D-Anlagenmodells und der Anlagenkinematik durchgeführt und liefert ein abgesichertes Anlagenlayout, einen abgesicherten Anlagenablauf und die abgesicherte Taktzeit. Die Durchführung der physikbasierten mechanischen Absicherung wird bis dato hinsichtlich der Kriterien Taktzeiterreichung, Ausbringungsqualität und notwendiger Mitteleinsatz vorgenommen.

Im Initial Impact Modell werden die bisherigen Kriterien um das zusätzliche Kriterium der Energieeffizienz ergänzt: während der Phase der physikbasierten mechanischen Absicherung soll bereits der zur Erfüllung der Produktionsaufgabe erforderliche Energieeinsatz mitbetrachtet werden. Mit der Integration konstruktiver und auslegungstechnischer Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz aus den Bereichen der Anlagentechnik, der Produktionstechnik und der Automatisierungstechnik während der physikbasierten mechanischen Absicherung, soll der Energieeinsatz unter Beibehaltung der bisherigen Kriterien gesenkt werden und somit zu einer Reduzierung der Energiekosten während der Betriebsphase der Anlage führen. Hierbei soll die Energieeffizienz einer automatisierten Montageanlage allerdings als nachrangiges Kriterium etabliert werden. Durch das Einpflegen der Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz in die physikbasierte mechanische Absicherung darf die Leistungsfähigkeit und Sicherheit der Anlage nicht beeinträchtigt werden, so dass die Produktionsaufgabe mit den ursprünglich konzeptionierten Rahmenbedingungen (Ausbringungsqualität und Zeiteinsatz) erfüllt werden kann.

2.3.3. Forschungsfragen und wissenschaftliche Hypothese

Für eine tiefergehende Spezifikation des Forschungsvorhabens werden drei interdependente Forschungsfragen formuliert, die im Zuge der vorliegenden Arbeit beantwortet werden (vgl. Tabelle 2-1).

Nr.	Forschungsfragen	Kriterienbeschreibung	Form
1	Wie und mit welcher Qualität können Energieverbräuche von automatisierten Montageanlagen der Automobilproduktion mit Hilfe der physikbasierten Simulation berechnet und visualisiert werden?	Energieverbräuche automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion können mit einer für Optimierungszwecke hinreichenden Genauigkeit physikbasiert simuliert werden.	quantitativ
2	Welche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz können im Rahmen der physikbasierten mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion in welcher Form angewendet werden?	Die Machbarkeit der Integration von energieeffizienzsteigernden Maßnahmen in die mechanische Absicherung automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion kann in Form von testweisen Umsetzungen belegt werden.	qualitativ
3	Wie kann die energieeffizienzorientierte Planung und Auslegung bei der mechanischen Absicherung im Anlagenentwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion methodisch umgesetzt werden?	Ein Konzept für die methodische Umsetzung der energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung bei der mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion in einem industriellen Kontext liegt vor.	absolut

Tabelle 2-1: Forschungsfragen und Erfolgskriterien für die Bewertung des Forschungsvorhabens

Die Formulierung der Forschungsfragen unterstützt die Aufstellung und Erörterung der wissenschaftlichen Hypothese. Die Forschungsfragen stellen die Konkretisierung des aus den Herausforderungen für deutsche Automobilhersteller abgeleiteten Umsetzungsziels dar (vgl. Kapitel 1.1). Für die Bewertung des Forschungsvorhabens können weiterhin Erfolgskriterien aufgestellt werden, die mit den Forschungsfragen und der wissenschaftlichen Hypothese korrespondieren. Hierbei kann ein Kriterium absolut, relativ, quantitativ oder qualitativ ausgeprägt sein (vgl. Tabelle 2-1). Auf Basis dieser Forschungsfragen soll die folgende wissenschaftliche Hypothese im Rahmen der vorliegenden Arbeit diskutiert werden:

„Die frühzeitige Berücksichtigung der Energieverbräuche automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion im Rahmen der physikbasierten mechanischen Absicherung kann für eine energieeffizienzorientierte Anlagenplanung und -auslegung genutzt werden und zu einer Reduktion der Betriebskosten für den Anlagenbetreiber beitragen.“

Die Forschungsfragen, die Bewertungskriterien sowie die wissenschaftliche Hypothese werden als Orientierungshilfe verwendet und bei der Umsetzung sowie bei der Evaluation und Bewertung der Methode (vgl. Kapitel 7 und Kapitel 8), als Beurteilungsbasis herangezogen. Auf Basis der initialen Recherche werden die für das Forschungsvorhaben relevanten Themengebiete in Form eines ARC-Diagramms (Areas of Relevance and Contribution) übersichtlich dargestellt (vgl. Abbildung 2-7).

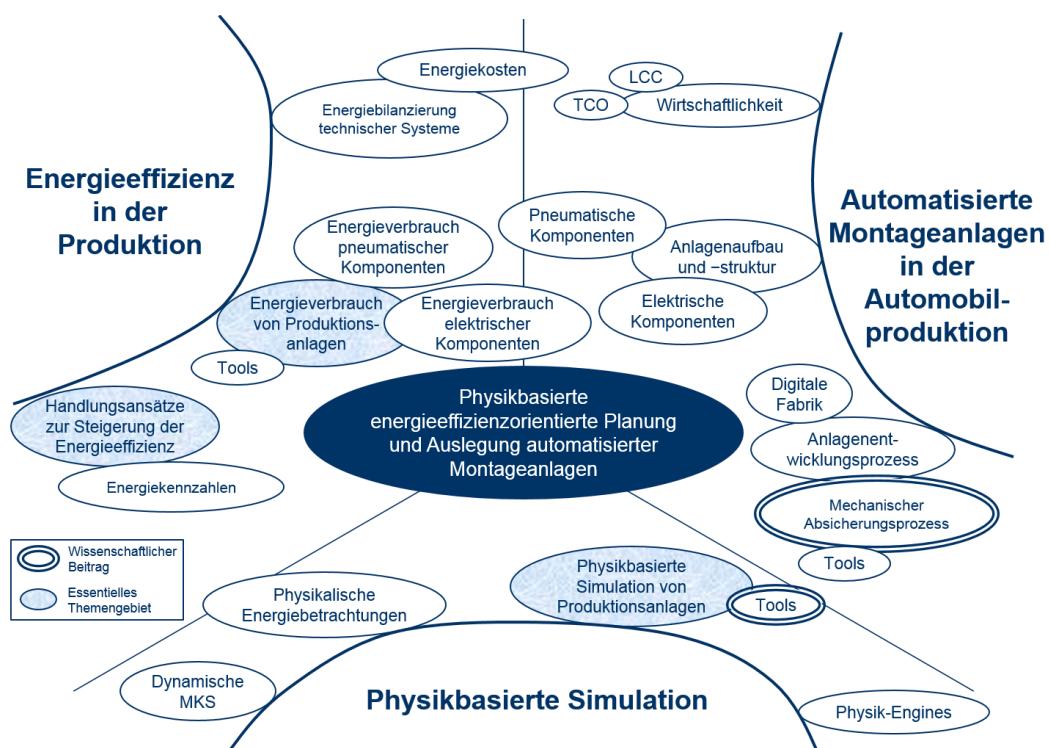


Abbildung 2-7: Areas of Relevance and Contribution (ARC) Diagramm

Hierbei sind die essentiellen Themengebiete und Themengebiete, zu denen ein wesentlicher wissenschaftlicher Beitrag geleistet werden soll, besonders hervorgehoben. Im Zentrum des Vorhabens steht die physikbasierte energieeffizienzorientierte Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen. Hierfür sind die Themencluster *automatisierte Montageanlagen in der Automobilproduktion*, die Simulationsmethode der *physikbasierten Simulation* sowie der Themenkomplex *Energieeffizienz in der Produktion* mit ihren teilweise überschneidenden Teilbereichen von größerer Bedeutung.

Im ersten Themencluster wird näher auf die Konstitution, die Entwicklung und die Nutzung automatisierter Montageanlagen in der Automobilproduktion eingegangen. Hierfür werden die Anlagentopologie mit typischen Komponenten beschrieben und der Entwicklungsprozess sowie ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für automatisierte Montageanlagen vorgestellt. Das zweite Themencluster umfasst die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Simulationsmethodik der physikbasierten Simulation, wobei im Wesentlichen Erläuterungen zu deren Funktionsweise und deren Verwendung zur Simulation automatisierten Produktionsanlagen ausgeführt werden. Gegenstand des dritten Themenclusters ist die energieeffiziente Produktion, wobei hier der Fokus zum einen auf den Energieverbrauch von Produktionsanlagen unter Berücksichtigung der für automatisierte Montageanlagen der Automobilindustrie relevanten Komponenten und zum anderen auf potentielle Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz gelegt wird.

KAPITEL 3: STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG

Dieses Kapitel stellt gemäß dem DRM-Framework den Schwerpunkt der *Descriptive Study I* dar und beinhaltet eine umfassende Aufbereitung des Stands der Technik und Forschung in drei Teilbereichen. Automatisierte Montageanlagen werden hinsichtlich ihres Aufbaus, ihrer mechanischen Absicherung sowie unter dem Gesichtspunkt ihres Energieverbrauchs analysiert. Darüber hinaus werden neben einer Analyse von digitalen Tools für Energieverbrauchssimulationen auch derzeitige Ansätze der physikbasierten Simulation von Produktionsanlagen ausführlich vorgestellt.

3.1. Aufbau, Absicherung und Betrieb automatisierter Montageanlagen

Nach einer Einführung in die topologische Struktur und die Funktionsweise einer automatisierten Montageanlage wird der Prozess der mechanischen Absicherung im Rahmen der Virtuellen Inbetriebnahme ausführlich dargestellt. Zudem werden verschiedene Ansätze für eine ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung automatisierter Produktionsanlagen unter Berücksichtigung der in den Betriebskosten enthaltenen Energiekosten vorgestellt.

3.1.1. Funktionsweise und Struktur automatisierter Montageanlagen

Bei der Unterscheidung von Fertigungsverfahren werden Montagetätigkeiten der Hauptgruppe Fügen (Schweißen, Schrauben, Nieten oder Kleben) zugeordnet [152]. Dabei wird die Montage stets unter Anwendung von Fügeverfahren durchgeführt, umfasst jedoch zudem Handhabungs- und Hilfsvorgänge (Reinigen) sowie Justieren und Prüfen [153], [154]. Neben dem Fügen als Hauptprozess der Montage, bei dem individuelle Produktbestandteile zu Halbzeugen oder Produkten höherer Komplexität verbunden werden, definieren Handhabungsvorgänge den Materialfluss zur korrekten (temporären) räumlichen Positionierung der Produktbestandteile [155]. Die Fahrzeugmontage stellt eine wesentliche Herausforderung auf allen unterschiedlichen Planungsebenen der Produktionsplanung und -steuerung in der Automobilproduktion dar [106].

Technische Systeme im Allgemeinen und automatisierte Montageanlagen im Speziellen dienen einem technischen Prozess, in dem Energien, Stoffe und Signale geleitet und/oder

verändert werden. Eine Änderung stellt hierbei einen Energie-, Stoff- (Material-) oder Signalumsatz dar, von denen je nach Aufgabe und Gestalt des technischen Systems eine Form als Hauptfluss betrachtet wird, der durch weitere Flüsse begleitet wird [136]. Zu- bzw. abgeföhrte Materialflüsse (Haupt- oder Hilfsmaterial), Energieflüsse (Prozessführungs- oder Hilfsenergie) und Informationsflüsse (Fertigungs- oder Prozessparameter) dienen der Erfüllung der wertschöpfenden Produktionsaufgabe [136], [156]. Für eine schematische Betrachtung automatisierter Montageanlagen soll hier der Stoff- bzw. Materialumsatz (Produkt) als Haupt- und der Energieumsatz als Nebenfluss betrachtet werden (vgl. Abbildung 3-1).

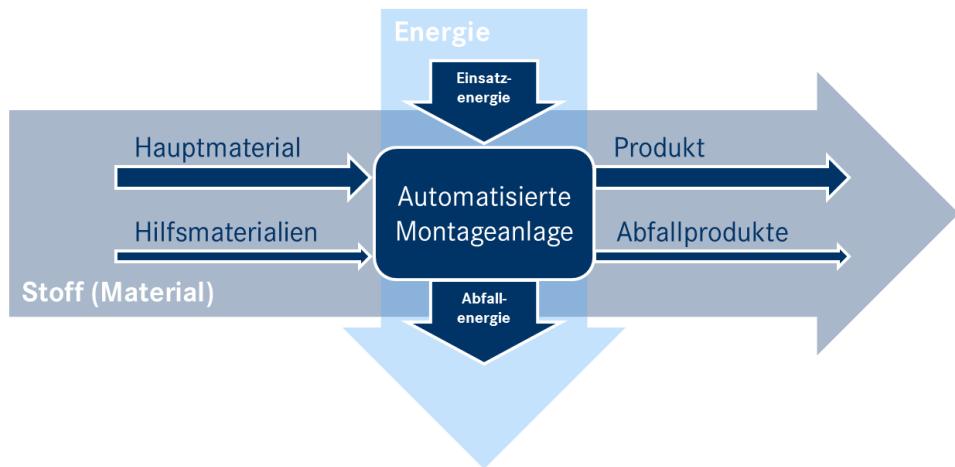


Abbildung 3-1: Ressourcenumsumsatzorientierte Darstellung einer automatisierten Montageanlage

Die eingehenden Materialien (bspw. Halbzeuge, Fügeteile) werden in der automatisierten Montageanlage unter Verwendung von Hilfsmaterialien (bspw. Kühlenschmier- und Reinigungsmittel) zu Produkten transformiert [156]. Dabei erfährt die automatisierte Montageanlage eine Zufuhr von Einsatzenergie für die Änderung der Stoffeigenschaften, des Stoffzusammenhalts oder räumlicher Lagebeziehungen. Diese wird wieder in Form von Spannungen, Bindungs-, Formänderungs-, Scher- und Oberflächenenergie ins Material eingebracht oder zur Materialbewegung verwendet. Hierbei entstehen sowohl verfahrensbedingte Energieverluste als auch Energieverluste, die in unterschiedlichen energetischen Produktzuständen vor und nach dem Montageverfahren begründet sind (bspw. durch Wärmeaufbringung). Die Summe des Energiebetrags zwischen diesen unterschiedlichen Produktzuständen und der verfahrensbedingten Energieverluste wird als Abfallenergie bezeichnet und der Umwelt zugeführt [157].

Auf Basis einer kybernetischen Systematisierung können Produktionssysteme auf Fabrik-, Segment-, Linien- und Arbeitsplatzebene betrachtet werden [158], [159]. Eine automatisierte Montageanlage kann auf der Arbeitsplatzebene eingeordnet werden und stellt sowohl unter räumlichen als auch unter organisatorischen Gesichtspunkten eine abgeschlossene Einheit dar (vgl. Abbildung 3-2). Vom Prozessleitsystem der Fabrikebene wird die

speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) auf Stationsebene mit Steuerungssignalen u.a. über die Reihenfolge der zu fertigen Produktvarianten versorgt. Die Station kann weiterführend in strukturell abgeschlossene Funktionsgruppen (bspw. Roboter, Hubtisch, Schweißzange, etc.) unterteilt werden. Viele Montageoperationen, im Wesentlichen Handhabungs- und Fügevorgänge, wiederholen sich häufig und können durch Funktionsgruppen und standardisierte Komponenten ausgeführt werden. Auf Komponentenebene erfolgt somit die physikalische Wertschöpfung unter Verwendung verfügbarer Ressourcen. Von der SPS empfangen die ansteuerbaren Komponenten bzw. deren Subkomponenten Signale zur Ausführung der Montagetätigkeiten [160].

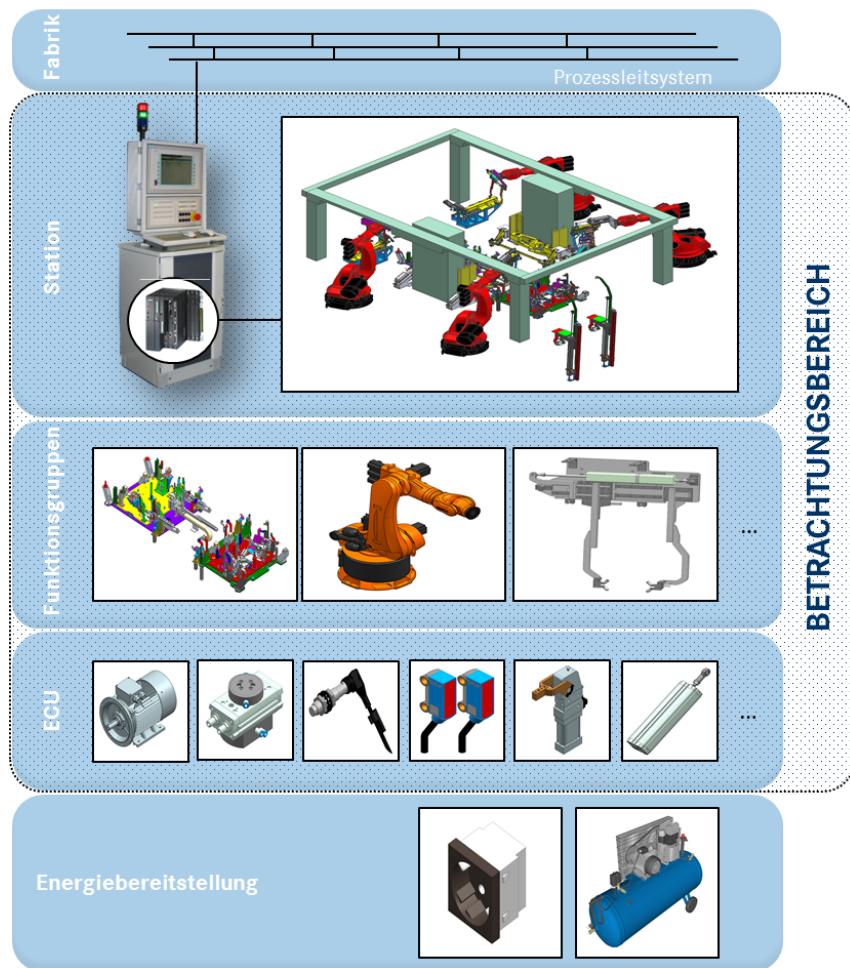


Abbildung 3-2: Strukturübersicht automatisierter Montageanlagen

Generell können Funktionsgruppen automatisierter Montageanlagen in Transfersysteme und Förderer (bspw. Hubtisch, Rollenförderer), prozesstypische Fügeeinheiten (bspw. Schweißzangen, Schrauber), Greifer und Fügehilfen (bspw. Vorrichtungen und Aufnahmen), Zuführeinrichtungen (bspw. Magazine), Handhabungsgeräte sowie Montageroboter untergliedert werden [69]. Die Funktionsgruppen variieren dabei stark in der Individualität ihrer konstruktiven Konstitution: während bspw. Industrieroboter je nach Hersteller in der

konstruktiven Ausführung standardisiert sind und sich häufig nur hinsichtlich der Ausmaße und der potentiellen Traglast unterscheiden, sind Hubtische überwiegend Individualkonstruktionen, für deren Bereitstellung viel höhere Entwicklungsaufwände erforderlich sind.

Die Funktionsgruppen mit ihren Komponenten bestehen aus Sensor- und Aktorelementen, Verbindungselementen und einzelnen Bauteilen (bspw. Riemen, Zahnrad). Durch die Sensorik werden physikalische Messgrößen erfasst und an die SPS überführt und dort zusammen mit digitalen Signalen im Sinne der individuell programmierbaren Steuerungslogik verarbeitet und mit Hilfe von Stellsignalen an die Aktorik transferiert. Dabei umfasst ein Aktor alle Arten von Ausgabeelementen für Bewegungen, Kräfte und Momente, die sowohl analog als auch binär wirken können [161]. Der Aktor (auch: Aktuator) setzt das leistungsarme Stellsignal in ein leistungsbehaftetes Signal einer zur Prozessbeeinflussung notwendigen Energieform um (vgl. Abbildung 3-3) [162]. Das Aktor-Eingangssignal wird durch einen Signalumformer in eine Stellgröße umgeformt, die durch einen Stellantrieb (Wandler) unter Verwendung elektrischer, pneumatischer oder hydraulischer Hilfsenergie die erforderliche Stellenergie erzeugt. Diese wird abschließend durch ein Stellglied in die resultierende Prozessenergie transformiert und dem technischen Prozess zugeführt. Eine exemplarische Ausdetaillierung der Bestandteile elektrischer und pneumatischer Aktoren ist in Abbildung 3-3 dargestellt.

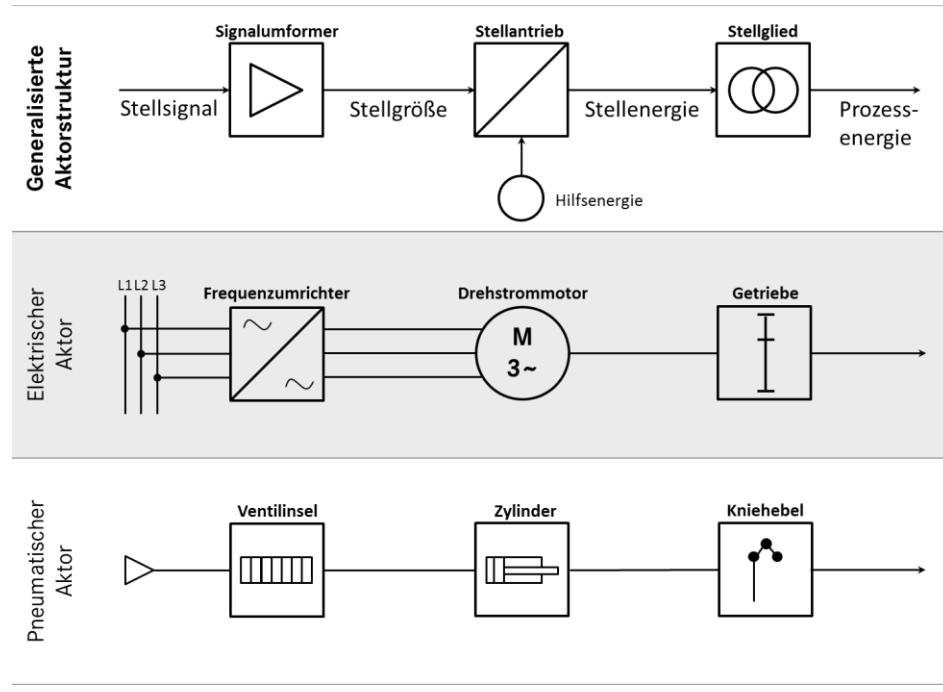


Abbildung 3-3: Generalisierte Struktur eines Aktors (oben) sowie exemplarische Struktur eines elektrischen (Mitte) und eines pneumatischen Aktors (unten) (eigene Darstellung in Anlehnung an [163], [164])

Sensoren und insbesondere Aktoren benötigen zur Ausführung ihrer Funktionen Energie und werden im Rahmen dieser Arbeit als Energiekonsumenten (ECU – Energy Consumption Unit)

betrachtet. Die erforderliche Energiebereitstellung erfolgt aus der Peripherie der Montageanlage in Form elektrischer Energie und aus Druckluftspeichern und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht tiefergehend betrachtet (vgl. Abbildung 3-2).

Sensorelemente zur Aufnahme und Weiterverarbeitung von Signalen erfordern zumeist eine kontinuierliche Energieversorgung (bspw. Lichtschranke). Ihre Verwendung ist für die korrekte Signalverarbeitung zur Prozessablaufgestaltung unabdingbar, jedoch liefern Sensorelemente keinen Beitrag zu der physikalischen Wertschöpfung. Die Durchführung der wertschöpfenden Montageoperationen erfolgt durch die in den Komponenten integrierte lastabhängige Aktorik. Darüber hinaus unterliegen Sensorelemente häufig keinen Gestaltungs- oder Auslegungskriterien im Rahmen von Entwicklungstätigkeiten: auf Basis von Erfahrungswerten, technischer Kompatibilität und von Genauigkeitsanforderungen bzgl. der zu erfassenden analogen physikalischen Messgröße werden Sensorelemente ausgewählt. Daher werden Sensoren als konstante Verbraucher im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt, der Fokus liegt somit auf der Darstellung, Analyse und Optimierung der Energieverbräuche von lastabhängigen Aktoren.

Für die häufig in der Montage erforderlichen Spann-, Greif- und Haltefunktionen ist die Anwendung pneumatischer Antriebstechnik prädestiniert. Pneumatische Antriebs- und Handhabungstechnik umfasst die Verwendung von Druckluft als Arbeitsmedium zum Betrieb pneumatischer Aktoren wie Schweißzangen, Greifer, Kniehebelspanner, Stiftziehzylinder und Linearzylinder [165]. Schätzungen zufolge wird in einem repräsentativen Automobilwerk 30% der insgesamt zur Produktionszeit erforderlichen Druckluft für den Betrieb pneumatischer Aktoren verwendet [166]. Zudem ist eine Vielzahl elektrischer Verbraucher in einer Anlage vorzufinden, die über die Umwandlung elektrischer Energie in thermische oder mechanische Energie Montageoperationen realisieren. Hierbei findet die Umwandlung elektrischer in thermische Energie hauptsächlich im Bereich der Fügetechnologien (Schweißen) Anwendung. Darüber hinaus werden verschiedene Ausprägungsformen elektrischer Antriebe zur Realisierung translatorischer und rotatorischer Bewegungen verwendet (vgl. Kapitel 3.2). Aktoren mit hydraulischer Hilfsenergie finden in automatisierten Montageanlagen der Automobilindustrie nur selten Anwendung, bspw. für die Fügeverfahren Clinchen oder Stanzen. Der Fokus wird bei den Energiebetrachtungen daher folgend auf lastabhängige pneumatische und elektromechanische Aktoren gelegt.

Neben der topologischen Struktur muss im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung der Funktionsweise einer automatisierten Montageanlage zudem der Prozessablauf der Montage in die Überlegungen miteinbezogen werden. Die Reihenfolge der Montageoperationen wird hierbei auf Basis von Prozessablaufprinzipien (sequentiell, parallel oder sequentiell-parallel) definiert und beschreibt somit die Aktivitäten der einzelnen Komponenten und Subkomponenten [158]. Die Prozessfolgen für Produktionsanlagen werden in der Automobilherstellung üblicherweise in Form von Gantt-Charts in einem Taktzeitdiagramm

beschrieben. Die Taktzeit wird auf Basis der strategischen Produktionsplanung vorgegeben und definiert in der Fließbandfertigung die Dauer, in der jeweils eine Mengeneinheit fertig gestellt werden muss, damit das Fließsystem die Soll-Mengenleistung erbringen kann [43], [52]. Sie stellt somit die Zeitspanne dar, die für die Durchführung der Montageoperationen maximal zur Verfügung steht und ist somit immer etwas länger als die Stationszeit, die die Summe der durchschnittlich für die Montageoperationen erforderliche Zeitspanne darstellt. Die einzelnen Montageoperationen werden zeitlich mit ihren jeweiligen Start- und Endzeiten unter Berücksichtigung logischer Prozessfolgen in die Taktzeit eingeordnet (vgl. Abbildung 3-4).

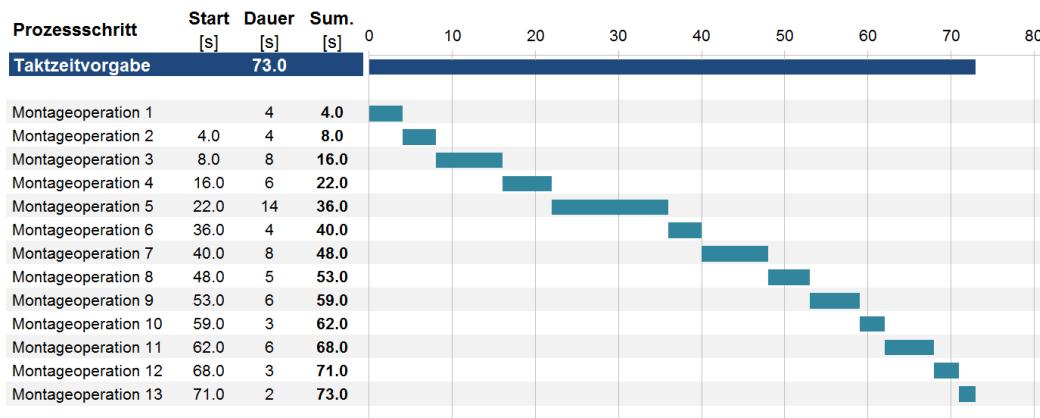


Abbildung 3-4: Beispiel eines Taktzeitdiagramms zur Prozessbeschreibung einer automatisierten Montageanlage in Form eines Gantt-Charts

Die den exakten Aufbau und den Prozessablauf einer automatisierten Montageanlage beschreibenden Planungsdokumente werden im Rahmen der Entwicklungs- und Absicherungstätigkeiten erstellt bzw. verwendet.

3.1.2. Prozess der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen

Um den Prozess der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen zu beschreiben, wird zunächst der Begriff der Absicherung in der Produktentwicklung eingeführt. Anschließend wird der Prozess der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen skizziert und detailliert vorgestellt.

Absicherungsaktivitäten werden in modernen Entwicklungsmethoden mechatronischer Systeme und Produkte eine besondere Bedeutung beigemessen [136], [167]. Zur Gewährleistung der Übereinstimmung der tatsächlichen mit den gewünschten Systemeigenschaften wird der Entwicklungsfortschritt fortlaufend auf Basis der aufgestellten Anforderungen und des spezifizierten Lösungskonzepts überprüft [70]. Absicherungsaktivitäten können ebenfalls als Eigenschaftsanalyse aufgefasst werden, bei der

auf Basis der Identifikation des Analysebedarfs geeignete Analyseverfahren gewählt werden und nach Analysedurchführung die Analyseergebnisse ausgewertet werden [65].

Darüber hinaus können Absicherungsaktivitäten aus prozessualer Sicht auch verstärkt auf den Status im Produktentwicklungsprozess fokussiert sein und die Absicherung eines bestimmten Entwicklungsstands zum Gegenstand haben. Hierbei umfasst die Absicherung die Analyse des Entwicklungsstands, dessen Beurteilung und die Entscheidung bezüglich des weiteren Vorgehens. Dies kann die Fortführung der Entwicklungsaufgabe oder das Einleiten einer Korrektur des Entwicklungsstandes umfassen [168]. Auch aus prozessualer Perspektive sind Absicherungsaktivitäten also ein Bestandteil des Entwicklungsprozesses, die je nach Absicherungsaufgabe, auch iterativ durchgeführt werden müssen.

Das Ziel der mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen besteht in der Erstellung eines detaillierten *erweiterten 3D-Geometriemodells* der Anlage, das eine Beurteilung des gesamten Anlagendesigns, der kinematischen Prozessabläufe sowie der Taktzeiteinhaltung im Rahmen der VIBN ermöglicht (vgl. Kapitel 2.1.2). Die mechanische Absicherung automatisierter Montageanlagen kann die Validierung der Funktionen der Kinematik, der Dynamik sowie der Festigkeit der Anlagenbestandteile und -komponenten umfassen [169]. Im Rahmen dieser Arbeit steht jedoch die Absicherung der Anlagenkinematik und -dynamik im Vordergrund. Bei der mechanischen Absicherung von Produktionsanlagen, auch als Virtual Engineering bezeichnet, erfolgt also die Visualisierung und Absicherung von Anlagenabläufen, Taktzeiten und Kollisionen unter Berücksichtigung beliebiger Produktvarianten [84]. Die mechanische Absicherung kann auch als Vorbereitung der VIBN von automatisierten Produktionsanlagen aufgefasst werden [170].

Das erweiterte 3D-Geometriemodell der Anlage wird dabei auf Basis der Konstruktionsdaten erzeugt und reichert das ursprünglich statische Konstruktionsmodell zu einem Modell an, welches das Bewegungsverhalten der einzelnen Anlagenbestandteile repräsentiert. Bei der VIBN kann dabei zwischen verschiedenen Modellarten unterschieden werden: während ein Kinematikmodell die Bewegungssachsen und Freiheitsgrade sowie die kinematische Kette einer Anlagenkomponente oder -funktionsgruppe umfasst, werden in einem Dynamikmodell zusätzlich die Ursachen der Bewegung berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.3) [171].

Die Beschreibung des Prozesses der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen ist schematisch stark vereinfacht in Abbildung 3-5 dargestellt. Der Prozess der virtuellen Absicherung ist ein informationsverarbeitender Prozess und erfolgt konstruktionsbegleitend [172]. Daher sind zu den einzelnen Absicherungsaktivitäten die wesentlichen Entwicklungs-, Ausgestaltungs- und Auslegungsaktivitäten dargestellt.

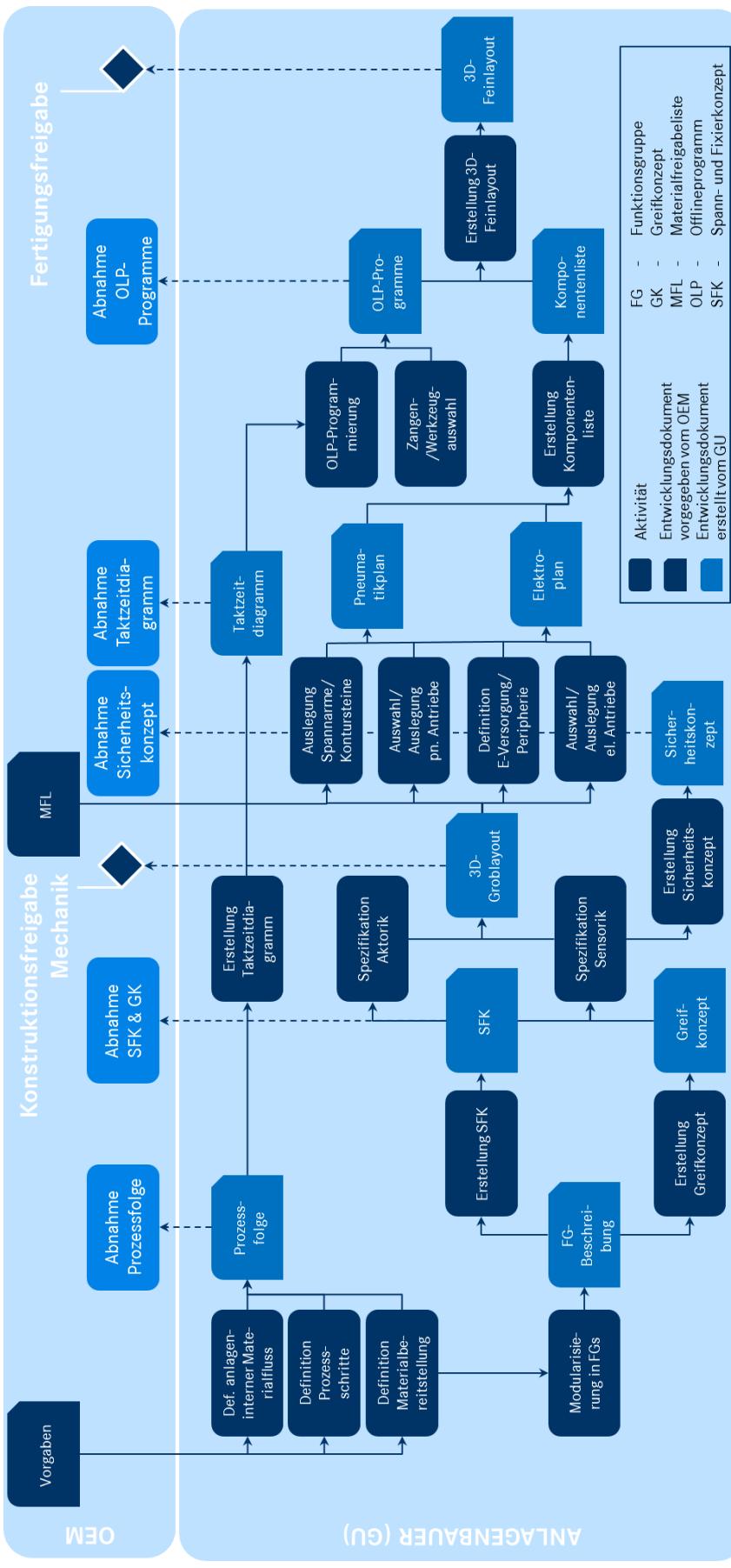


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung des Prozesses der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion (eigene Darstellung auf Basis von [170], [172], [173], [174], [175])

Viele dieser Aktivitäten erfolgen parallel und häufig iterativ, wobei hier alle Aktivitäten zur besseren Übersicht sequentiell dargestellt werden. Zudem fassen die einzelnen Aktivitäten häufig mehrere Entwicklungstätigkeiten zusammen, die von mehreren beteiligten Planern und Entwicklern durchgeführt werden. Der Prozess der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung für automatisierte Montageanlagen orientiert sich dabei an dem Prozessäquivalent zum Anlagenentwicklungsprozess für Anlagen aus dem Gewerk Rohbau, da beide Anlagenentwicklungsprozesse starke Ähnlichkeiten aufweisen.

Die Anlagenplanung, -konstruktion und -absicherung ist ein kollaborativer Entwicklungsprozess, wobei der Auftraggeber (OEM) überwiegend eine Spezifikations- und Kontrollfunktion inne hat und der Auftragnehmer (Anlagenbauer, GU) die Rolle des ausführenden Entwicklungspartners einnimmt. Während also der GU die Verantwortung für die Korrektheit der gestaltenden Konstruktions- und Auslegungsaktivitäten trägt, verantwortet der OEM die korrekte Durchführung der virtuellen Anlagenabsicherungsprozesse [172].

Aus Sicht der Produktionsplanung kann zwischen den Phasen der Grobplanung und der Feinplanung unterschieden werden [176]. Nach der Konzeptfreigabe wird auf Basis der ressourcen-, prozess- und produktbezogenen Vorgaben des OEMs die Prozessschritte, der anlageninterne und der anlagenübergreifende Materialfluss definiert und in Form einer Prozessfolge (Anlagenablaufbeschreibung) festgehalten. In einem digitalen Prozessplanungswerkzeug (bspw. Delmia Process Engineer), werden die Produkt- mit den Ressourcen- und Prozessdaten verknüpft [177]. Nach erfolgreicher Abnahme erfolgt eine Modularisierung der Gesamtanlage in Funktionsgruppen sowie die Erstellung des Taktzeitdiagramms. Eine Funktionsgruppe beinhaltet hierbei mechanisch-elektrische oder magnetisch-thermisch-optische Bauteile, Sensorik zur Zustandserfassung, Aktorik sowie Prozessorik zur Informationsverarbeitung [178], [179].

Auf Basis der Funktionsgruppenbeschreibung werden das Spann- und Fixierkonzept sowie das Greifkonzept (Transportkonzept) aufgestellt. Mit dem Spann- und Fixierkonzept wird die Positionierung und Aufnahme der Fügeteile innerhalb einer Fertigungsvorrichtung definiert, wobei die a priori definierten Toleranzgrenzen berücksichtigt werden müssen. Neben der Position der Spannstelle wird auch bereits die Art der Fixierung bzw. die Art des Spanners spezifiziert [173]. Neben der Spezifikation der gesamten Aktorik wird ebenfalls die Sensorik in Form des erforderlichen Sensortyps, der Signalform und -stärke festgelegt. Die Erstellung des 3D-Groblayouts erfolgt üblicherweise unter Verwendung von Werkzeugen zur Fabrikplanung bzw. Materialflusssimulation (bspw. Plant Simulation, Process Designer) und wird am Meilenstein (bzw. Gateway) der mechanischen Konstruktionsfreigabe vonseiten des OEM abgenommen.

Nach der Abnahme eines 3D-Groblayouts der Anlage in Kombination mit der vorab erstellten Prozessfolge, dem Spann- und Fixierkonzept und dem Greifkonzept markiert der Beginn der Detailphase den Point-of-no-Return im Entwicklungsprozess [176]. Die individuellen Funktionsgruppen werden hierbei konstruktiv vollständig ausdetailliert. Neben der Auswahl und Auslegung der pneumatischen und elektrischen Aktoren auf Basis der vom OEM für das zu fertigende Produkt bereitgestellten Materialfreigabeliste erfolgt zudem die Konstruktion der Spannarne und Kontursteine sowie die Definition der Energieversorgung (bspw. Zuordnung pneumatischer Verbraucher zu einer Ventilinsel). Die daraus resultierenden Planungsdokumente Pneumatikplan und Elektroplan umfassen Detailinformationen, bspw. über die zu verwendenden Ventile bzw. die zu verwendende Spannungsversorgung und werden für die Erstellung der Komponentenliste benötigt, die eine Auflistung aller von der SPS ansteuerbaren Komponenten beinhaltet.

Die Detailkonstruktion und Auslegung pneumatischer und elektrischer Komponenten und die Ausleitung der Planungsdokumente erfolgt häufig mittels digitaler Spezialtools (z.B. EPLAN) oder in herstellerspezifischen Tools (bspw. Siemens Sizer, ProPneu). Auf Basis des abgenommenen Taktzeitdiagramms erfolgt die OLP-Programmerstellung mittels digitaler Tools zur Roboterprogrammerstellung (bspw. Delmia OLP, RobCAD, RobotExpert, Robot Studio). Zudem erfolgt die exakte Zangen- und Werkzeugauswahl auf Basis des spezifizierten Greif- bzw. Transportkonzeptes [175], [180]. Bei der Abnahme der Roboterprogramme werden im Wesentlichen Erreichbarkeits- sowie Prozessabfolgeuntersuchungen durchgeführt. Abschließend werden die ausdetaillierten Funktionsgruppen in einem 3D-Feinlayout unter Verwendung von digitalen Tools wie Process Simulate oder Delmia Assembly Process Simulation aggregiert. Neben dem 3D-Detaillayout werden zudem Stücklisten und 2D-Zeichnungen der zu fertigenden Bauteile und -gruppen erstellt und für eine Bereitstellung an externe Teilelieferanten aufbereitet. Bei der Fertigungsfreigabe werden das Modell und die Zeichnungen vom OEM abgenommen und für eine Weitergabe an den Zulieferer freigegeben [181].

3.1.3. Ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung automatisierter Produktionsanlagen

Bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Produktionsanlagen vor dem Hintergrund des Ressourcenverbrauchs kann grundsätzlich zwischen Verfahren zur Kosten- und Leistungsrechnung, Methoden der Investitionsrechnung und produktlebenszyklusorientierten Ansätzen unterschieden werden [182]. Im Sinne einer ganzheitlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung automatisierter Montageanlagen werden folgend somit die Energiekosten als Gegenstand der unternehmensinternen Kosten- und Leistungsrechnung, Methoden der Investitionsrechnung sowie Instrumente der produktlebenszyklusorientierten Wirtschaftlichkeitsbewertung vorgestellt.

Energiekosten setzen sich aus fixen und variablen Kostenbestandteilen zusammen. Fixe Kosten entstehen durch das Vorhalten eines Energieversorgungssystems selbst wenn keine Produktionsprozesse durchgeführt werden. Zudem gehören zu den Energiekosten neben den Kosten für die Prozessenergie (Prozessführungsenergie) zur Durchführung der Produktionsprozesse auch die Kosten für die Halleninfrastruktur, für die Beheizung oder die Beleuchtung der Fabrikhalle (Fertigungsgemeinkosten). Sowohl die fixen Energiekosten (Energieversorgungsinfrastruktur) als auch die Fertigungsgemeinkosten sollen folgend nicht näher betrachtet werden.

Aus ökonomischer Sicht kann Energie als Produktionsfaktor bezeichnet werden, der den Betriebsstoffen zugeordnet werden kann (vgl. Abbildung 3-6). Betriebsstoffe haben als Elementarfaktor direkten Bezug zum Produktionsobjekt und müssen als Repetierfaktor permanent neu beschafft werden, da sie in sich wiederholenden Vorgängen konsumiert werden [183]. Eine Produktionsanlage oder ein Betriebsmittel kann nach der Beschaffung bis zur Abschreibung den Assets eines Unternehmens zugeordnet werden [184]. Die Energiekosten einer Produktionsanlage sind während der Betriebsphase als Teil der Betriebskosten einzurichten.

Menschliche Arbeit				Betriebsmittel		Werkstoffe	
Geschäfts- und Betriebsleitung	Planung	Organisation	Kontrolle	Objektbezogene Arbeit	Maschinen, Werkzeuge, Gebäude, etc.	Betriebsstoffe	Rohstoffe, Hilfsstoffe, Halbzeuge, etc.
Dispositive Faktoren				Elementarfaktoren			
Originärer Faktor	Derivative Faktoren						
Potentialfaktoren				Verbrauchsfaktoren			

Abbildung 3-6: Morphologie betriebswirtschaftlicher Produktionsfaktoren

(eigene Darstellung basierend auf [185], [186], [68])

Die *Kosten– und Leistungsrechnung* als Bestandteil des internen Rechnungswesens zielt auf die Erfassung der entstehenden Kosten und deren Verteilung nach einem definierten Schlüsselprinzip auf die hergestellten Produkte (Kostenträger) ab und überwacht somit den wirtschaftlichen Einsatz der Produktionsfaktoren [182]. Die Kosten– und Leistungsrechnung gliedert sich in Kostenarten-, Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung. Während die Kostenartenrechnung der möglichst vollständigen Erfassung und Gliederung der im Unternehmen anfallenden Kosten hinsichtlich der Mengen– und Wertkomponenten dient, erfolgt in der Kostenstellenrechnung die Zuordnung der Gemeinkosten zu den betrieblichen Bereichen sowie die Kostenverrechnung bzw. Verteilungsrechnung. In produzierenden Unternehmen stellen die Energiekosten häufig eine eigene Kostenstelle dar [187]. Gegenstand der Kostenträgerrechnung ist die Ermittlung der Kosten von Kostenträgern und die Auswertung des periodenbezogenen Betriebsergebnisses.

Für die Bewertung einer Produktionsanlage im Rahmen der Kosten– und Leistungsrechnung sind im Wesentlichen die Fertigungskosten und hierbei insbesondere die Anlagenkosten relevant. Dabei wird im Bereich der Serienfertigung in der Regel der Ressourcenstundensatz (Maschinenstundensatz) $K_{R,h}$ für eine Produktionsanlage verwendet, der sich aus der Summe der Abschreibungskosten $K_{R,A}$, den Zinskosten $K_{R,Z}$, den Raumkosten $K_{R,R}$, den Energiekosten $K_{R,E}$ sowie den Instandhaltungskosten $K_{R,I}$ bezogen auf Ressourcennutzungszeit $T_{R,h}$ zusammensetzt [31], [188]. Dabei umfassen die Energiekosten $K_{R,E}$ alle Energieträger wie Strom, Druckluft und eventuell Gas und werden bei investitionsintensiven Montageanlagen in frühen Planungsphasen häufig vernachlässigt [69].

$$[\text{€}/\text{h}] K_{R,h} = \frac{K_{R,A} + K_{R,Z} + K_{R,R} + K_{R,E} + K_{R,I}}{T_{R,h}} \quad (2)$$

Dabei soll im Rahmen dieser Arbeit der Summand $K_{R,E}$ sowohl die Kosten für den elektrischen als auch für den pneumatischen Energieverbrauch berücksichtigen.

$$[\text{€}] K_{R,E} = K_{elektr} + K_{pneum} \quad (3)$$

Der Summand für die Kosten für den pneumatischen Energieverbrauch K_{pneum} lässt sich durch das Produkt des insgesamt verbrauchten Absolutvolumens der Druckluft in Normkubikmetern $V_{pneum,N}$ mit dem Kostenfaktor k_{pneum} beschreiben.

$$[\text{€}] K_{pneum} = V_{pneum,N} \cdot k_{pneum} \quad (4)$$

Der Summand für die Kosten des elektrischen Energieverbrauchs K_{elektr} wird durch das Produkt des Strompreises k_{elektr} mit dem Gesamtenergieverbrauch E_{elektr} erfasst.

$$[\text{€}] K_{elektr} = E_{elektr} \cdot k_{elektr} \quad (5)$$

Der Strompreis k_{elektr} setzt sich für industrielle Großkunden, die nicht zu den energieintensiven Industrien zählen, aus den drei unterschiedlichen Kostensegmenten *Beschaffung & Vertrieb*, *Netzentgelt* sowie *Steuern, Abgaben & Umlagen* zusammen (vgl. Abbildung 3-7). Das Kostensegment Beschaffung & Vertrieb stellt einen fixen Kostenanteil dar (verbrauchsunabhängige Kosten), der die Anschlusskosten, den Messstellenbetrieb, Abrechnungskosten sowie die Stromgestehungskosten der Kraftwerke abdeckt. Das Kostensegment Steuern, Abgaben & Umlagen umfasst die Anteile der Stromsteuer, die EEG-Umlage (Erneuerbare Energie Gesetz), die AbLaV-Umlage (Verordnung zu abschaltbaren Lasten), die Offshore-HU (Offshore Haftungsumlage), die StromNEV-Umlage (Stromnetzentgeldverordnung), den KWK-Aufschlag (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) sowie die Konzessionsabgabe [189].

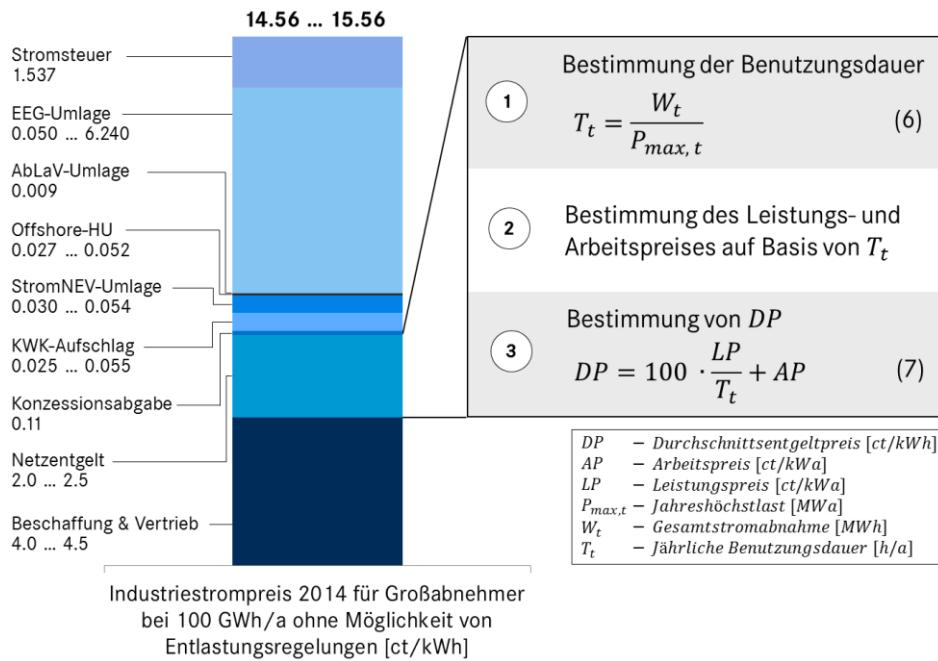


Abbildung 3-7: Zusammensetzung Industriestrompreis (eigene Darstellung basierend auf [26], [190])

Das Kostensegment Netzentgelt (auch Netznutzungsentgelt) beinhaltet die Kosten für den Stromtransport und die -verteilung und ist sowohl von der Spannungsebene (Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannung) als auch von dem Durchschnittsentgeltpreis abhängig. Je nach Größe und Vertragsgestaltung zwischen Unternehmen und Stromlieferant werden Industriebetriebe entweder standardisiert über Arbeits- und Leistungspreis in Kombination mit tageszeitabhängigen Hoch- und Niedertarifen oder nach einem individuellen Tarifsystem (bspw. Grund-, Arbeits- und Leistungspreis sowie Blindstromzuschlag) abgerechnet.

In Abbildung 3-7 ist die Berechnung des Durchschnittsentgeltpreises DP für den Beispielzeitraum eines Jahres aufgezeigt. Auf Basis der Benutzungsdauer T_t werden für die Bestimmung des Durchschnittsentgeltpreises DP zunächst der Arbeitspreis AP und der Leistungspreis LP bestimmt [190]. Die Benutzungsdauer wird hierbei durch den Quotienten aus einer zeitraumbezogenen Gesamtstromabnahme (hier bezogen auf ein Jahr) W_t und einer innerhalb eines Zeitraums bezogenen Höchstlast (hier Jahreshöchstlast) $P_{max,t}$ berechnet. Üblicherweise wird hierfür der Viertelstundenmittelwert zur Ermittlung der Arbeits- und Leistungspreises herangezogen [191].

Da es sich bei automatisierten Produktionsanlagen üblicherweise um langlebige Investitionsgüter handelt, ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht eine klassische Investitionsentscheidung zu treffen, bei der die monetären Konsequenzen der Investitionsalternativen auf Basis einer mehrperiodigen Betrachtung miteinander verglichen werden [192]. Häufig werden Investitionsentscheidungen für Produktionsanlagen allerdings nur auf Basis der Anschaffungskosten getroffen ohne die in der Nutzungsphase entstehenden

Kosten zu berücksichtigen [193]. *Methoden der Investitionsrechnung* zielen auf die rationale Darstellung der Wirtschaftlichkeit einer Investitionsentscheidung über einen mittel- bis langfristigen Planungshorizont ab. Bei den statischen Methoden werden Investitionen als eine Überführung in Sach- oder Finanzvermögen interpretiert, während dynamische Methoden Investitionen in der Gesamtheit aller damit verbundenen ein- und ausfließenden Zahlungsströme begreifen (vgl. Tabelle 3-1) [194], [195].

	Methode	Entscheidungsproblem	Informationsbedarf	Ergebnisqualität
Statisch	Kostenvergleichsrechnung	Wahl-, Ersatzproblem	• Kosten	• kein Umsatzbezug • Fehlbewertung der langfristigen Vorteilhaftigkeit
	Gewinnvergleichsrechnung	Wahl-, Ersatzproblem	• Kosten, Erlöse	• keine Rentabilitätsaussage • Fehlbewertung der langfristigen Vorteilhaftigkeit
	Statische Amortisationsrechnung	Investitionssicherheit, Liquiditätsproblem	• Anschaffungskosten • Restwert • jährliche Rückflüsse	• methodisch bedingte verkürzte Amortisationszeit
	Rentabilitätsrechnung	Wahl-, Ersatzproblem, Einzelinvestition	• Kapitaleinsatz • Gewinn (Deckungsbeiträge)	• Fehlbewertung der langfristigen Vorteilhaftigkeit
Dynamisch	Kapitalwertmethode	Wahl-, Ersatzproblem, Einzelinvestition	• Ein-/Auszahlungen • Kalkulationszinssatz • Nutzungsdauer	• finanzmathematisch exakt • anschaulich
	Interne Zinsfußmethode	Wahlproblem, Einzelinvestition	• Ein-/Auszahlungen • Kalkulationszinssatz • Nutzungsdauer	• exakte Lösung nur für Spezialprobleme
	Annuitätenmethode	Wahl-, Ersatzproblem, Einzelinvestition	• Ein-/Auszahlungen • Kalkulationszinssatz • Nutzungsdauer	• finanzmathematisch exakt • anschaulich
	Dynamische Amortisationsrechnung	Investitionssicherheit, Liquiditätsproblem	• Ein-/Auszahlungen • Kalkulationszinssatz	• finanzmathematisch exakt • anschaulich

Tabelle 3-1: Methoden der Investitionsrechnung (eigene Darstellung basierend auf [196], [197], [198])

Bei den statischen Methoden werden Kosten und Erlöse mit Hilfe von fiktiven Durchschnittswerten zeitraumbezogen bewertet ohne den exakten Zeitpunkt des Zahlungsstroms zu berücksichtigen. Dynamische Methoden beziehen den Zeitpunkt eines Zahlungsstroms durch Diskontierung mit in die Berechnung ein und liefern finanzmathematisch somit das genauere Ergebnis. Detaillierte Ausführungen zu den einzelnen Methoden der Investitionsrechnung mit den dazugehörigen mathematischen Berechnungsgrundlagen findet man bspw. in [197], [198].

Produktlebenszyklusphasenübergreifende Ansätze für die ökologische, ökonomische oder sozialwissenschaftliche Bewertung eines Produkts berücksichtigen mehrere Produktlebenszyklusphasen in einem integrierten Bewertungsprozess [199]. Im Automobilbau ist deren Anwendung allerdings nicht weit verbreitet: die Nutzung lebenszyklusorientierter Wirtschaftlichkeitsbewertungsansätze für Anlagen des Fahrzeugbaus beschränkt sich auf 28% [200]. Neben dem Einstandspreis einer Produktionsanlage müssen für eine lebenszyklusorientierte Kostenbetrachtung bei der Beschaffung einer Produktionsanlage auch die Kosten für den Betrieb, die Wartung und die Entsorgung berücksichtigt werden [201].

Aus ökonomischer Perspektive sind hierbei insbesondere die beiden Ansätze des Life cycle costing (LCC) und des Total cost of ownership (TCO) relevant. Beide Ansätze werden als Instrumente des strategischen Kostenmanagements aufgefasst, wobei der wesentliche Unterschied durch das Erkenntnisinteresse begründet ist [202]. LCC ist ein Verfahren zur lebenszyklusorientierten Bewertung von Investitionsalternativen durch die Betrachtung sämtlicher Kosten, die während des gesamten Lebenszyklus eines Investitionsobjekts anfallen. TCO hingegen ist ein Konzept zur vollständigen Erfassung der Kosten, die im Zusammenhang mit dem Erwerb eines Gutes stehen, mit dem primären Ziel, alternative Bezugsquellen miteinander vergleichen zu können [203]. Aus Kosteneignersicht wird hierbei neben allen Kosten, die bei der Anbahnung, Durchführung und Betreuung einer Lieferbeziehung anfallen, auch das Beschaffungsumfeld auf makroökonomischer Betrachtungsebene berücksichtigt [204]. Das Konzept des TCO geht über den Betrachtungshorizont des LCC hinaus, da bspw. zusätzlich Transaktionskosten entlang der Zulieferkette miteinbezogen werden. Daher eignet es sich insbesondere für wiederkehrende Kaufentscheidungen bei niederpreisigen Verbrauchsgütern.

Norm	Titel	Ausrichtung	PLZ-Phasen	Bewertungsgrundlagen	
				quantitativ	qualitativ
VDMA 34160	Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen	Definition und Prognose von LZK von Maschinen und Anlagen	Entstehung, Betrieb, Verwertung	Entstehungskosten, Betriebskosten (Instandhaltungskosten, Raumkosten, Materialkosten und Rohstoffe, Energiekosten, Hilfs- und Betriebsstoffe, Entsorgungskosten, Personalkosten, Werkzeugkosten, Rüstkosten, Lagerkosten), Verwertungskosten	Keine qualitative Bewertung
DIN-EN 60300-3-3	Zuverlässigkeitmanagement: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten	Ermittlung von LZK mit Fokus auf die Zuverlässigkeit	Entstehung, Betrieb, Verwertung	Keine a priori Festlegung der Kostenaufbruchsstruktur, quantitative Bewertung über Verfahren der Investitionsrechnung	Verweis auf Werkzeuge der präskriptiven Entscheidungsunterstützung (bspw. Analytischer Hierarchieprozess AHP)
VDI 2884	Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)	Entscheidungsunterstützung bei der Beschaffung von Produktionsmitteln unter Berücksichtigung der LZK	Entstehung, Betrieb, Verwertung	Kosten vor der Nutzung (Beschaffungskosten, Beschaffungsfolgekosten), Kosten während der Nutzung (Betriebs- und Hilfsstoffkosten, Instandhaltungskosten), Kosten nach der Nutzung (Außerbetriebnahme, Verwertung); quantitative Bewertung über Verfahren der Investitionsrechnung,	Verweis auf Werkzeuge nicht-monetärer Analysemethoden der Entscheidungstheorie (bspw. Nutzwertanalyse NWA)

Tabelle 3-2: Vergleich von Normen im Zusammenhang mit LCC [205], [206]

Im Folgenden werden verbreitete Konzepte des LCC tiefergehend behandelt, da sie die Phase der Produktentwicklung mit der Nutzungs- und Entsorgungsphase verbinden, Investitionsgüter bei einmaligen Kaufentscheidungen fokussieren (Vernachlässigung der Transaktionskosten) und die Entstehungskosten miteinbeziehen [162], [207]. Es werden etablierte Konzepte auf Basis von Richtlinien und Normen betrachtet, deren Fokus auf langlebigen, investitionsintensiven Anlagen und Systemen liegen (vgl. Tabelle 3-2).

Der VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) beschreibt in dem Einheitsblatt 34160 ein Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen- und Anlagen in der Investitionsgüterindustrie und stellt gleichzeitig ein Berechnungstool mit drei unterschiedlichen Detaillierungsgraden bereit [208], [209]. Eine rein quantitative Bewertung erfolgt über die Definition und Zuordnung von Kosten in die Phasen der Entstehung, des Betriebs und der Verwertung. Die internationale Norm DIN EN 60300-3-3:2014-09 begreift die Lebenszykluskosten mit dem Fokus auf die Zuverlässigkeit und dient der Entscheidungsunterstützung zur Auswahl des besten Entwurfs oder der besten Option für den Betrieb einer Anlage [210]. Hierbei wird im Wesentlichen der Prozess bei der Formulierung einer LCC beschrieben ohne Kostenkategorien a priori zu definieren. Die Richtlinie VDI 2884 kategorisiert die LZK in Kosten vor, während und nach der Nutzung aus Anlagenhersteller sowie -betreibersicht und stellt ein LCC-Framework für beide Nutzergruppen bereit [143].

3.2. Energiebetrachtungen bei automatisierten Montageanlagen

Der Energieverbrauch von Produktionsanlagen hat in den vergangenen Jahren für den Anlagenbetreiber wesentlich an Bedeutung gewonnen. Unter deutschen Automobilherstellern kann eine steigende Bedeutung der Energiekosten als Kostentreiber für die Herstellungskosten festgestellt werden [27]. Energiekosten können bis zu 30% der Herstellungskosten eines Pkw betragen [28]. Der steigende Energiebedarf durch die stetige Erhöhung des Automatisierungsgrads, die vermehrte Anwendung energieintensiver Fertigungsverfahren (bspw. Laserschweißen) oder die Bearbeitung alternativer Werkstoffe (bspw. CFK im Leichtbau) tragen unmittelbar zu einer Erhöhung der Energiekosten als Posten der Produktionskosten bei. Zudem sind zeitökonomische Rationalisierungspotentiale in der Produktion durch die Reduzierung von Durchlaufzeiten und Beständen sowie die Anhebung der Arbeitsintensität in zunehmendem Maß erschöpft, wodurch die Verminderung des Energieverbrauchs im Rahmen kontinuierlicher Optimierungsbestrebungen in den Fokus gerückt ist.

Im Konsumgüterbereich ist die Energieeffizienz eines Produkts bei dessen Nutzung für den Kunden zu einem wichtigen Kriterium bei der Kaufentscheidung geworden. Haushalts- und Elektrogeräte müssen vom Hersteller mit einer Energieverbrauchskennzeichnung versehen werden, die den Kunden über den Energiebedarf informiert [211]. Hierbei erfolgt eine Kategorisierung des Geräts in eine Gerätelasse (A+++ ... F) auf Basis signifikanter Produkteigenschaften (Größe oder Arbeitsvolumen) und des Energiebedarfs des Geräts für die Durchführung eines definierten Prozesses relativ zu einem Referenzwert. Die Energieklassen werden mit Hilfe von Intervallen definiert [212]. Bei der Pkw-Energieverbrauchskennzeichnung erfolgt die Einordnung eines Fahrzeugs in die Energieeffizienzklassen (A+++ ... G) auf Basis einer Rechenvorschrift, die die CO₂-Emission des Fahrzeugs in g/km auf das fahrbereite Fahrzeuggewicht bezieht [213]. Die prozentuale Abweichung des offiziellen spezifischen CO₂-Emissionswerts im kombinierten Testzyklus von

dem fahrzeugspezifischen CO₂-Emissionswert liefert die Klasseneinstufung [214], [215]. Diese Vorgehensweise bei der Bewertung wird kontrovers diskutiert, da Fahrzeuge trotz eines hohen Kraftstoffverbrauchs und der damit verbundenen CO₂-Emissionen bei einem hohen Eigengewicht als umweltfreundlich klassifiziert werden.

Eine Übertragung des Prinzips der Energieverbrauchskennzeichnung nach Klassen in den Bereich langlebiger Produktionsanlagen existiert derzeit nicht. Eine solche Klassifizierung würde sich schon aufgrund der geringen Grundgesamtheit der Anlagen schwierig gestalten [196]. Zudem erscheint wegen der hohen Varianz in der Struktur und Funktionsweise einer Produktionsanlage und der uneinheitlichen Produktionsaufgaben ein Energieeffizienzlabel für Produktionsanlagen als nicht praxistauglich.

Bei einer energieorientierten Betrachtung von Produktionsanlagen muss das Energiemanagement eines produzierenden Unternehmens berücksichtigt werden. Das Energiemanagement ist Gegenstand zahlreicher Normen und Richtlinien und kann als „*eine vorausschauende, organisierte und systematisierte Koordinierung von Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie zur Deckung der Anforderungen unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Zielsetzungen*“ [216] aufgefasst werden (siehe auch [217], [218]). Hierbei ist allerdings festzustellen, dass der Fokus dieser Normen und Richtlinien auf der Energiedatenerfassung, der energieoptimalen Prozessführung und der Implementierung von Energiesparmaßnahmen liegt und somit rein auf den energieeffizienten Betrieb einer Produktionsanlage ausgerichtet ist. Eine Bezugnahme des Energiemanagements auf eine energieeffiziente Planung, Gestaltung und Auslegung von Produktionsanlagen im Rahmen der Produktionsplanung bzw. der Anlagenentwicklung ist nicht erkennbar [39], [114].

3.2.1. Energieverbrauch automatisierter Montageanlagen

Energie ist eine physikalische Zustandsgröße, die das Arbeitsvermögen eines abgeschlossenen Systems kennzeichnet und die SI-Maßeinheit Joule [J] besitzt. Weitere überwiegend in der Energiewirtschaft gängige Maßeinheiten sind Wattstunden [Wh] oder Steinkohleeinheiten [SKE]. Energie kann in unterschiedlichen Erscheinungsformen auftreten, bspw. als mechanische (potentielle oder kinetische), thermische, elektrische oder chemische Energie, wobei die unterschiedlichen Erscheinungsformen in die beiden Klassen *Systemenergie* (Eigenschaft eines thermodynamischen Systems) bzw. *Prozessenergie* (Wechselwirkung zwischen zwei Systemen in Form von Arbeit, Wärme oder elektromagnetischer Strahlung) eingeteilt werden können [219]. Dabei ist für die Überführung einer Energieform in eine jeweils andere Energieform ein häufig verlustbehafteter Transformationsprozess erforderlich [220].

Der Energieerhaltungssatz kennzeichnet die Energie als Erhaltungsgröße, so dass in einem abgeschlossenen System die Gesamtenergie über einen zeitlichen Verlauf konstant bleibt und Energie somit weder erzeugt noch vernichtet werden kann. Die häufig umgangssprachlich

verwendeten Begriffe Energieerzeugung und Energieverbrauch bezeichnen daher die Umwandlung von Energie in eine leicht nutzbare Energieform bzw. den dazugehörigen Umkehrprozess. Ingenieurwissenschaftlich wird unter dem Begriff *Energieverbrauch* die für die Deckung des Energiebedarfs aufgewandte Endenergie verstanden [221]. Wärme, mechanische Energie und Arbeit sind einander äquivalent, wobei Arbeit und Wärme Prozessgrößen darstellen [222]. Leistung wird erbracht, wenn über einen Zeitraum Arbeit verrichtet wird. Arbeit beschreibt somit die Energiedifferenz, die beim Übergang zwischen zwei Energiezuständen aufgebracht werden muss. Die in einem Zeitraum verrichtete Arbeit bzw. die genutzte Energie E kann als das zeitliche Integral der Leistung P aufgefasst werden. Somit sind die Leistung und die Zeit die wesentlichen Einflussgrößen auf den Energieverbrauch.

$$[J]E = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (6)$$

Die Zustandsgröße Exergie E_{Ex} ist ein Maß für die Arbeitsfähigkeit der Energie und beschreibt den Anteil der Energie, der sich in einer vorgegebenen Umgebung in jede andere Energieform umwandeln lässt. Anergie E_{An} ist der Teil der Energie, der sich nicht umwandeln lässt bzw. die Energie der Umgebung [220], [223].

$$[J]E = E_{Ex} + E_{An} \quad (7)$$

Die Energiewertschöpfungskette beschreibt die erforderlichen Prozessschritte für eine industrielle Nutzbarmachung natürlich vorkommender Energieträger (vgl. Abbildung 3-8). Aus den natürlich vorkommenden Primärenergieträgern werden durch Transformationsprozesse nutzungsgerechte Sekundärenergieträger gewonnen [224], [225]. Kann die neue Energieform direkt als Endenergie dem Energieabnehmer bereitgestellt werden (bspw. Elektrizität aus einem Kohlekraftwerk), erübrigt sich dieser Schritt [226]. Endenergie bezeichnet die vom Energieabnehmer direkt bezogene Energieform, meist in Form von elektrischer oder chemischer Energie, während Nutzenenergie alle technischen Formen der Energie umfasst, die der Energieabnehmer für seine individuelle Anwendung benötigt [221]. Der eigentliche Energiebedarf einer Produktionsanlage ist somit nur ein bestimmtes Quantum Nutzenergie, das aus der eingesetzten Endenergie zu erzeugen ist [227].

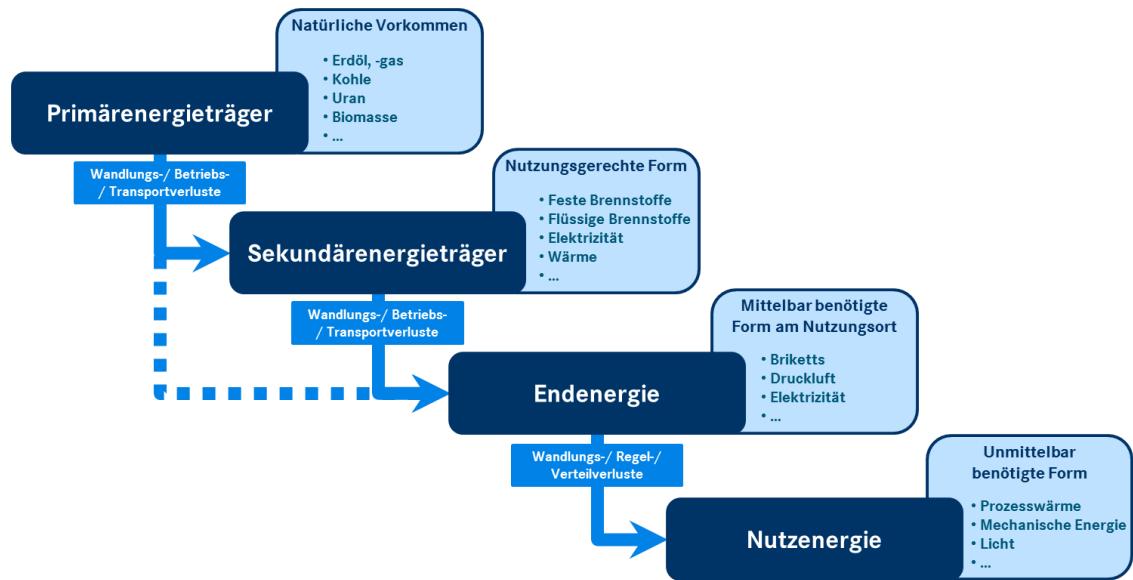


Abbildung 3-8: Energiewertschöpfungskette
(eigene Darstellung basierend auf [228], [229], [230])

Für die Analyse energetischer Prozesse einer automatisierten Produktionsanlage ist das Verständnis des betrieblichen Energieflusses (innerbetriebliches Energieversorgungssystem) erforderlich (vgl. Abbildung 3-9). Der benötigte Endenergiebedarf ist neben der Ausbringungsmenge der Produkte zu einem signifikanten Anteil von der Ausgestaltung des betrieblichen Energieflusses abhängig [231].

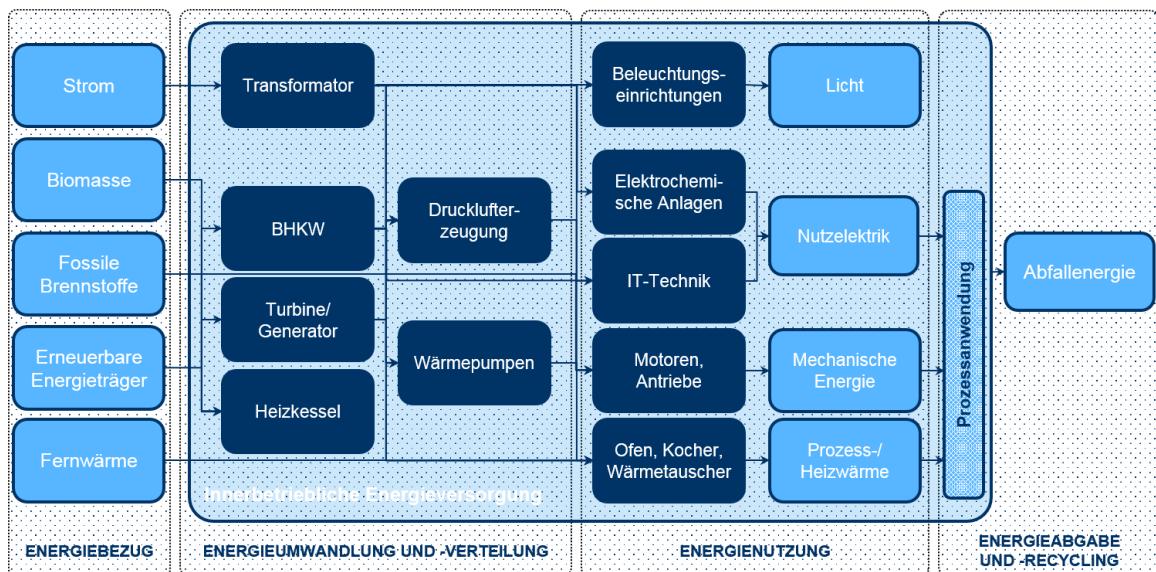


Abbildung 3-9: Innerbetriebliches Energieversorgungssystem
(eigene Darstellung basierend auf [232], [233], [234])

Der betriebliche Energiefluss besteht grundsätzlich aus den Phasen des Energiebezugs, der Energieumwandlung und -verteilung, der Energienutzung und der Energierückgewinnung

bzw. -entsorgung [228]. Durch die Nutzung verschiedener Energiewandler werden die Betriebseinrichtungen, darunter neben Betriebsmitteln auch erforderliche Informations- und Gebäudetechnik, betrieben. Die nicht durch Maßnahmen der Energierückgewinnung rückführbare Energie verlässt das innerbetriebliche Energieversorgungssystem und wird der Umwelt als Abfallenergie zugeführt.

Die Montage zählt zu den flächenmäßig größten Gewerkebereichen eines Automobilproduktionswerks und ist zudem der personalintensivste Produktionsabschnitt der automobilen Produktion. Im Vergleich mit den anderen Gewerken trägt die Montage anteilig mit 22.6% zu dem Gesamtenergieverbrauch eines Automobilwerks bei [235]. In der Montage können mit der Beleuchtung, der Anlagentechnik, der IT und der Belüftung vier wesentliche Hauptverbraucher identifiziert werden [236]. Während Beleuchtung und Belüftung in das Spektrum der Gebäudetechnik fallen, ist die Anlagentechnik direkt den auszuführenden Montageprozessen zuzuordnen. Der Großteil des Energiebedarfs einer Montagehalle wird in Form elektrischer Energie und Wärme benötigt, während Druckluft und Erdgas nur einen geringen Anteil am Gesamtenergiebedarf haben (vgl. Abbildung 3-10). Hierbei stellen Druckluft und elektrische Energie die wesentlichen Energieträger der produktionsprozessbedingten Energieverbräuche (Anlagentechnik) dar und werden daher im Rahmen dieser Arbeit tiefergehend behandelt.

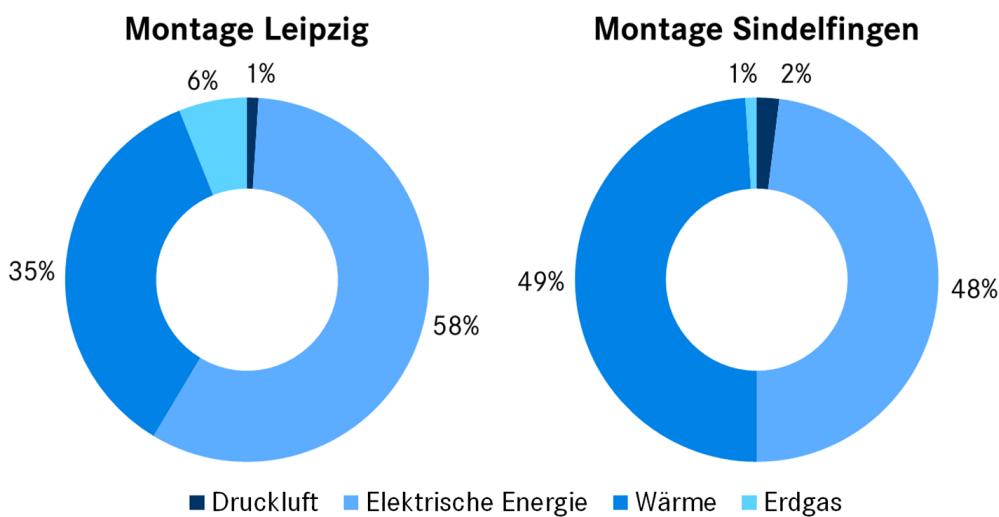


Abbildung 3-10: Prozentualer Anteil von Energieträgern in der Automobilmontage zweier Automobilproduktionswerke unterschiedlicher Hersteller (Erhebungsjahr 2013 bzw. 2011)
(interne Datenerhebung Daimler AG und [236])

Neben dieser verbrauchsorientierten Sicht ergibt sich aus einer kostenorientierten Analyse, dass mehr als zwei Drittel der Gesamtenergiekosten in der Montage auf den Einsatz elektrischer Energie zurückzuführen sind [236]. Interne Untersuchungen haben allerdings ergeben, dass bei einer individuellen Betrachtungsweise der eingesetzten Energieträger

Druckluft den höchsten Preis pro MWh aufweist, gefolgt von elektrischer Energie. Dies wird zudem in zahlreichen Veröffentlichungen aus dem Bereich der industriellen Produktion bestätigt (bspw. [111], [237]). Für eine tiefergehende Analyse sind auch die Besitzverhältnisse der Bezugskraftwerke für elektrische Energie zu berücksichtigen, da diese sich in den Kostenbetrachtungen niederschlägt. Ein Großteil der OEMs betreibt eigene Kraftwerke oder Windkraftanlagen an ihren Produktionsstandorten mit dem Ziel die Abhängigkeit von unternehmensexternen Energieanbietern zu reduzieren [21], [22], [23].

Es existiert eine Vielzahl von Kennzahlen (bzw. Leistungskennzahlen oder Kenngrößen) zur Beschreibung des Energieverbrauchs bzw. der Energieeffizienz, die unterschiedliche Anwendungsbereiche und Betrachtungsebenen fokussieren (bspw. [217], [238]). Eine Kennzahl ist hierbei als ein Maßzahl aufzufassen, die zur Quantifizierung eines Sachverhalts dient und der eine Vorschrift zur quantitativen reproduzierbaren Messung einer Größe, eines Zustands oder eines Vorgangs zugrunde liegt. Kennzahlen können als Einzelkennzahl oder zu Kennzahlsystemen aggregiert werden und dabei als dimensionsbehaftete oder dimensionslose Absolut- (Grundzahlen) oder Relativkennzahlen (Verhältniszahlen) formuliert werden [155]. Isoliert betrachtete Absolutkennzahlen besitzen nur eine sehr begrenzte Aussagekraft, erst durch den Vergleich mit einer anderen absoluten Kennzahl kann eine sinnvolle Aussage formuliert werden [239].

Name		Beschreibung	Formel	Einheit
Gesamtenergieverbrauch	E_{total}	Absoluter Energieverbrauch	$\sum_i E_i$	kWh
Spezifischer Energiebedarf (spez. Energieverbrauch)	E_{spez}	Energieeinsatz pro funktionale Einheit	$\frac{E_x}{FE}$	$\frac{kWh}{Stck.}, \frac{kWh}{kg}, \frac{kWh}{m^2}$
Benutzungsdauer	T_{ben}	Gesamtenergieverbrauch bezogen auf die Maximallistung	$\frac{E_{total}}{P_{max}}$	h, min, s
Benutzungsgrad (Belastungsgrad)	g_{ben}	Benutzungsdauer pro Zeitspanne	$\frac{T_{ben}}{T}$	–
Energieintensität (eines Teilprozesses / einer Komponente)	E_{Int}	Energieverbrauch eines Teilprozesses bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch	$\frac{E_{prozess}}{E_{total}}$	–
Energieträgeranteil	ET_x	Energieverbrauch pro Energieträger bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch	$\frac{E_{ET}}{E_{total}}$	–

Tabelle 3-3: Kennzahlen zur Beschreibung des Energieverbrauchs einer automatisierten Montageanlage

Einheitliche Kennzahlen für den Energieverbrauch haben sich in der Industrie bislang noch nicht durchgesetzt [228]. Während strategische Kennzahlen eine Aggregation integrierter und

dimensionsbehafteter, gesamtproduktionsorientierter Kennzahlen darstellen, bestehen operative Kennzahlen überwiegend aus der Integration dimensionsbehafteter oder dimensionsloser produktionsbezogener Kennzahlen [240]. Die für eine energieverbrauchsorientierte Betrachtung automatisierter Montageanlagen auf Stationsebene geeigneten Kennzahlen sind operativer Natur. Die Kennzahlen, die zur Beschreibung des energetischen Verhaltens automatisierter Montageanlagen im Rahmen dieser Arbeit verwendet sollen, sind in Tabelle 3-3 dargestellt und werden in Kapitel 5.4.1 ausführlich vorgestellt.

Im Kontext dieser Arbeit wird die für den Betrieb von automatisierten Montageanlagen erforderliche Endenergie fokussiert. In der Energiewertschöpfungskette vorgelagerte Prozesse der Energietransformation und -distribution werden nicht näher betrachtet. Das Verhalten von automatisierten Produktionsanlagen und damit auch ihr Energieverbrauch werden zum einen von den verbauten Komponenten und zum anderen von prozessbasierten Parametern bestimmt. Zudem ist ein direkter Zusammenhang zwischen der Höhe des Energieverbrauchs und der Anzahl der wertschöpfenden Operationen nachweisbar [241]. Basierend auf der Analyse der Struktur und Funktionsweise einer automatisierten Montageanlage (vgl. Kapitel 3.1.1) werden folgend die Energieverbräuche pneumatischer und elektrischer Aktoren tiefergehend betrachtet.

3.2.1.1. Energieverbrauch pneumatischer Aktoren

Der Endenergieträger Druckluft wird von pneumatischen Verbrauchern zur Durchführung verschiedener Montagetätigkeiten benötigt. Druckluft ist ein gasförmiger Energieträger, der unter Ausnutzung eines Druckgefälles Arbeit verrichten kann. Bei der Nutzung von Druckluft kann hinsichtlich des Anwendungszwecks in Arbeitsluft (zur Verrichtung von mechanischer Arbeit), Aktivluft (zur Weiterführung von Stoffen), Prozessluft (zur Verfahrenseinbindung, bspw. Trocknung), Vakuumluft (zur Unterdruckerzeugung) und Prüfluft (zu Kontrollzwecken) unterschieden werden. Unter dem Begriff Pneumatik versteht man die druckluftgetriebene Antriebstechnik (bspw. Linearantriebe, Greifer) [242].

Die Pneumatik wird ingenieurwissenschaftlich der Fluidtechnik zugeordnet, wobei als kompressives Fluid Luft verwendet wird [243]. Dabei wird die Druckluft in Abhängigkeit der Kriterien Partikelgröße und -dichte, Restwassergehalt und Drucktaupunkt sowie Ölgehalt in Qualitätsklassen eingeteilt [244]. Vorteile des Einsatzes der Druckluft als Energieträger in der Produktionstechnik sind die einfache Speicherbarkeit, das gefahrlose Handling (bspw. in explosionsgefährdeten Bereichen) sowie die realisierbaren hohen Arbeitsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hoher Präzision und Wiederholungsgenauigkeit. Nachteilig sind neben den hohen Bereitstellungskosten die relativ geringe Fähigkeit zur Kraftübertragung sowie die hohen Verluste durch die Eigenschaft als flüchtiges Medium [245], [246]. Für den Bereich automatisierter Montageanlagen ist die Sicherstellung einer präzisen Halte- bzw. Klemmkraft

über einen längeren Zeitraum, in dem keine zusätzliche Energie verbraucht wird, besonders vorteilhaft.

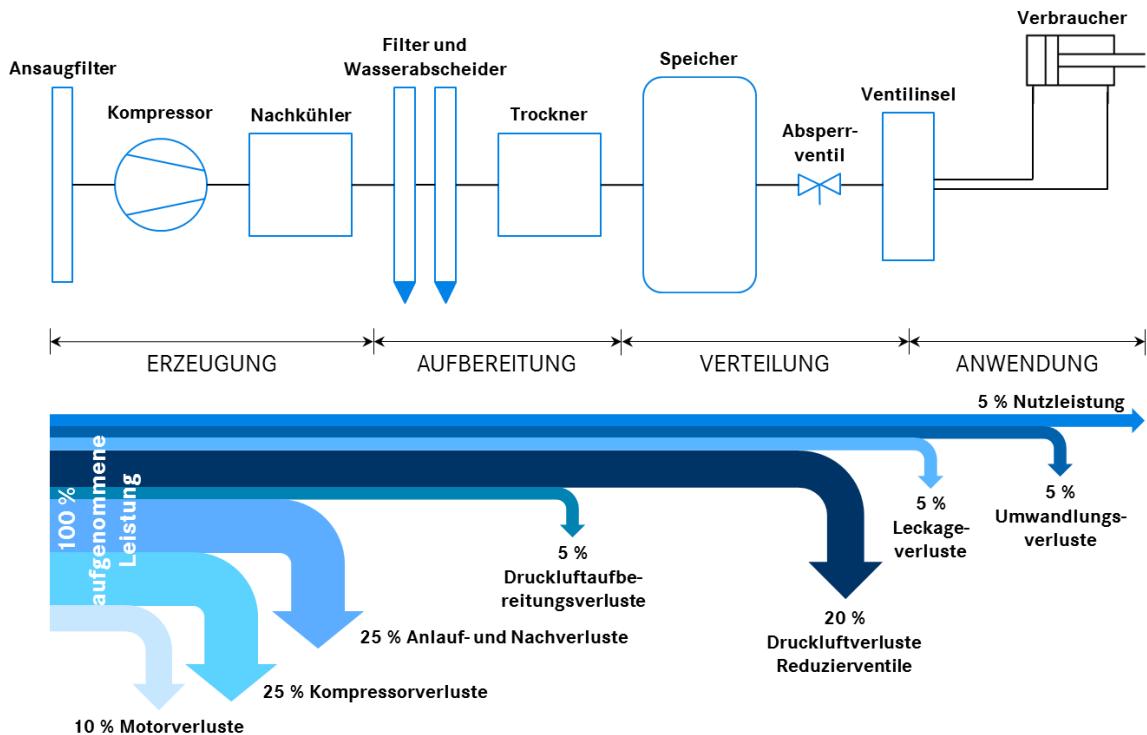


Abbildung 3-11: Wirkungskette der Drucklufterzeugung, -aufbereitung, -verteilung und -anwendung
(eigene Darstellung basierend auf [127], [246])

Bei der Betrachtung des Energieverbrauchs pneumatischer Komponenten muss die gesamte Wirkungskette der Drucklufterzeugung, -aufbereitung, -verteilung und -anwendung betrachtet werden (vgl. Abbildung 3-11). In einem Kompressor (bspw. Hubkolben- oder Schraubenverdichter) wird unter Verwendung eines elektrisch angetriebenen Motors vorab gefilterte Umgebungsluft komprimiert und anschließend mittels eines Nachkühlers gekühlt. Dabei ist der elektrische Energiebedarf von der Bauart des Kompressors, dem Verdichtungsverhältnis und der Prozessführung der Verdichtung (isotherm bzw. isentrop) abhängig, wobei bei der Kompression eine große Wärmemenge emittiert wird. Während die anschließende Filterung der Beseitigung von Partikeln dient, werden Kondensatabscheider und Trockner zur Senkung des Wasserdampfgehalts und somit des Drucktaupunkts verwendet. Die Druckluftverteilung erfolgt über Rohrleitungen in (de-)zentrale Speicher, wobei die Dimensionierung der Rohrleitungen einen wesentlichen Einfluss auf den Strömungswiderstand besitzt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Strömungsverluste mit steigender Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der höheren Strömungsturbulenz ebenfalls steigen [247]. Nach einem Absperrventil und einer häufig eingesetzten zentralen Ventilinsel erfolgt die eigentliche Druckluftanwendung durch die unterschiedlichen pneumatischen Verbraucher. In einer Montagehalle werden zumeist mit 6 bar (Niederdrucknetz) und 10 bzw.

12 bar (Hochdrucknetz) zwei unterschiedliche Druckniveaus verwendet. Während mit dem Niederdrucknetz häufig pneumatische Aktoren wie Linearzylinder, Spanner, Stiftzieher oder Greifer betrieben werden, werden mit dem Hochdrucknetz pneumatische Aktoren versorgt, deren Funktion eine besonders hohe Anpresskraft erfordert (bspw. Schweißzange für das Widerstandspunktschweißen) [242].

Bei der Planung und Auslegung eines Systems zur Druckluftbereitstellung und der angeschlossenen Verbraucher müssen verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Neben den primären Faktoren erforderliches Druckniveau, dem maximal erforderlichen aggregierten Volumenstrom aller Verbraucher \dot{V}_{agg} und der erforderlichen Druckqualität werden des Weiteren die sekundären Faktoren Gleichzeitigkeitsfaktor, notwendige Reserven, Leistungscharakteristika und Nutzungsgrad auch Kosten für Beschaffung, Installation und Wartung miteinbezogen. Hierbei beschreibt der Gleichzeitigkeitsfaktor g_t das Verhältnis von installierter Leistung zu tatsächlich abgerufener Leistung und der Nutzungsgrad η_t das Verhältnis der Zeit zu der Periode, in der der Verbraucher tatsächlich genutzt wird [127].

Die Transformation von elektrischer Energie in Druckluft und anschließend in mechanische Energie ist ein zusätzlicher Umwandlungsschritt, der sich in einem hohen Primärenergieeinsatz und den damit verbundenen Kosten niederschlägt [127]. Druckluft ist daher häufig die teuerste Energieform, die in Produktionsbetrieben eingesetzt wird. Der Energieverbrauch pneumatischer Komponenten wird hauptsächlich über den Luftverbrauch bestimmt, also das in Normkubikmetern angegebene absolute verbrauchte Luftvolumen $V_{pneum,N}$ [242] (vgl. Kapitel 3.1.3). Das Normvolumen bezeichnet hierbei das Volumen, das eine bestimmte Luftmasse unter Normbedingungen (bspw. Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur nach ISO 6358) einnimmt [248]. Die Bereitstellung der Druckluft an der Anlage zur Ausführung der wertschöpfenden Montagetätigkeiten sind sehr kostenintensiv und bewegen sich auf Basis unterschiedlicher Angaben zwischen 0.015 ... 0.03 €/m³ [111], [237]. Über den Luftverbrauch kann mittels der Kennwerte des Kompressors der elektrische Energieverbrauch für die Erzeugung der Druckluft abgeschätzt werden. Für die Erzeugung eines Kubikmeters Druckluft wird die Energiemenge von 0.10 ... 0.15 kWh benötigt, allerdings müssen hierbei noch die Kosten für Wartung, Abschreibung und Service des Kompressors miteinbezogen werden [242].

Neben dem absoluten Luftverbrauch ist auf Basis der obigen Ausführungen zur Planung und Auslegung der Druckluftbereitstellung auch der aggregierte Volumenstrom aller Verbraucher und hierbei insbesondere der maximal zu einem Zeitpunkt abgegriffene Volumenstrom von Interesse. Somit sind die Kenngrößen zur Beschreibung des Energieverbrauchs pneumatischer Aktoren der absolute Verbrauch $V_{pneum,N}$ sowie der aggregierte Volumenstrom aller Verbraucher \dot{V}_{agg} .

3.2.1.2. Energieverbrauch elektrischer Aktoren

Elektrische Energie wird mittels unterschiedlicher Spannungsquellen übertragen, wobei zwischen Gleich-, Wechsel- und Dreiphasenwechselstrom unterschieden werden kann. Während bei Gleichstrom die Stromrichtung und Spannung zeitlich invariant sind, ist Wechselstrom durch die meist periodische Änderung der Stromrichtung und der Spannung gekennzeichnet (bspw. ändern sich im europäischen Stromversorgungsnetz Stromrichtung und Spannung sinusförmig mit einer Frequenz von 50 Hz). Neben dem für Privathaushalte bereitgestellten einphasigen Wechselstrom mit 230 V wird für industrielle Anwendungen häufig ein dreiphasiger Wechselstrom (Dreiphasenwechselstrom, Drehstrom) verwendet, der aus drei jeweils um 120° phasenverschobenen sinusförmigen Wechselspannungen gleicher Frequenz besteht. Hiermit kann ein räumlich umlaufendes Magnetfeld erzeugt werden, das die in industriellen Anwendungen weit verbreiteten Drehstromverbraucher (bspw. Synchron- und Asynchronmotoren) antreiben kann. Leistungsstärkere Drehstromverbraucher werden mit Hilfe einer Dreiecksschaltung an das Versorgungssystem angeschlossen, während leistungsschwächere Drehstromverbraucher unter Verwendung einer Sternschaltung versorgt werden [249]. Die folgenden Erläuterungen für den elektrischen Energieverbrauch beziehen sich auf Drehstromverbraucher.

Bei einem dreiphasigen Wechselspannungs-Versorgungssystem muss bei der elektrischen Leistung zwischen Wirk-, Blind- und Scheinleistung unterschieden werden. Dabei setzt sich die Scheinleistung S aus der pythagoreischen Summe aus Blind- und Wirkleistung zusammen. Sie beschreibt zudem die einem Drehstromverbraucher zugeführte Leistung (Anschlussleistung) über das Produkt der Effektivwerte von Spannung U_{eff} und Strom I_{eff} .

$$[VA] S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{eff} \quad (8)$$

Blindleistung entsteht immer dann, wenn eine Last keinen ohmschen Charakter aufweist [250]. Die Blindleistung Q entspricht somit dem durch kapazitive und induktive Bauteile verursachten Leistungsanteil, der zwischen nicht-ohmschen Verbrauchern und dem Versorgungsnetz oszilliert und nicht in mechanische Energie und Wärme umgewandelt werden kann. Beispielsweise wird für den Aufbau eines temporären magnetischen Feldes in einer Spule eine Leistung aus dem Versorgungsnetz aufgenommen, die beim Abbau des magnetischen Feldes wieder an das Netz zurückgespeist wird.

$$[VAR] Q = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\varphi) \quad (9)$$

Dabei bezeichnet der Phasenverschiebungswinkel φ die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, die durch induktive und kapazitive Widerstände der Verbraucher bestimmt wird. Bei kapazitiven Lasten eilt die Spannung dem Strom nach (negativer Phasenwinkel), während bei induktiven Lasten der Strom der Spannung nacheilt (positiver Phasenwinkel)

[249]. Nutzbar ist allerdings nur der Anteil von Spannung und Strom, der in Phase liegt. Die Wirkleistung P beschreibt die gesamte am Verbraucher in mechanische Energie und Wärme umgewandelte Leistung. Sie entspricht dem zeitlichen Mittelwert der Momentanleistung $p(t)$, der sich aus dem Produkt der Momentanwerte der frequenzabhängigen Größen Spannung und Strom ergibt [251].

$$[W] P = \frac{1}{T} \int_T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_T u(t) \cdot i(t) dt = \sqrt{3} \cdot U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\varphi) \quad (10)$$

Der Energieversorger muss die Scheinleistung versorgungsseitig bereitstellen. Dadurch ist zum einen größerer Wärmeverlust die Folge und zum anderen ist die Verwendung größer dimensionierter Generatoren, Transformatoren, Versorgungsleitungen u.ä. erforderlich. Blindleistung kann demzufolge zu einem Kostentreiber werden, da das Netz belastet wird ohne das Nutzleistung verrichtet wird. Wird ein bestimmtes Maß an Blindleistung überschritten, werden die Blindenergiokosten separat in Rechnung gestellt [252]. Durch Integration der Wirkleistung über einen Zeitraum von t_0 bis t_1 ergibt sich die erforderliche Wirkenergie E .

$$[Wh] E = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (11)$$

Elektrische Aktoren in automatisierten Montageanlagen im Automobilbau umfassen im Wesentlichen elektrische Antriebssysteme (elektromechanische Antriebe). Die elektrische Energie wird durch die Verwendung von Elektromotoren in eine rotierende Bewegungen gewandelt, die durch Getriebe in bahnförmige Bewegungen transformiert werden können.

Bei elektrischen Antriebssystemen erfolgt die Wandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie in Form translatorischer oder rotatorischer Bewegungen verlustbehaftet. Die Verluste bei einem Elektromotor können hierbei aus Eisenverlusten, Ständerwicklungsverlusten, Rotorverlusten, Reibungs- und Lüfterverlusten oder lastabhängigen Zusatzverlusten stammen. Der Wirkungsgrad η beschreibt hierbei das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Leistung. Für einen Elektromotor handelt es sich dabei um die an der Abtriebswelle abgegebenen Leistung P_{mech} in Relation zu der aus dem Versorgungsnetz aufgenommenen Wirkleistung P .

$$[-] \eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{mech}}{P} \quad (12)$$

Neben dem gesamten über einen gewissen Zeitraum erforderlichen Energiebedarf E ist zudem die Höhe der in diesem Zeitraum erforderlichen momentanen Leistungsabgriffe $P(t)$ von Bedeutung. Folglich sind bei der Betrachtung des Energieverbrauchs elektrischer

Komponenten die Kenngrößen des kumulierten Energiebedarfs E sowie der aggregierte momentane Leistungsbedarf aller Verbraucher $P(t)$ von Interesse.

3.2.2. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz automatisierter Produktionsanlagen

In der industriellen Praxis besteht eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz automatisierter Produktionsanlagen. Eine solche Maßnahme beschreibt eine Aktivität, die normalerweise zu einer überprüfbaren, messbaren oder abschätzbareren Verbesserung der Energieeffizienz führt [238]. Eine solche Maßnahme wird im Folgenden vereinfacht als EEIM (Energy Efficiency Improvement Measure) bezeichnet. Eine Verallgemeinerung der unterschiedlichen Maßnahmen kann durch die Bildung von Energieeffizienzprinzipien erfolgen (vgl. Abbildung 3-12) [253].

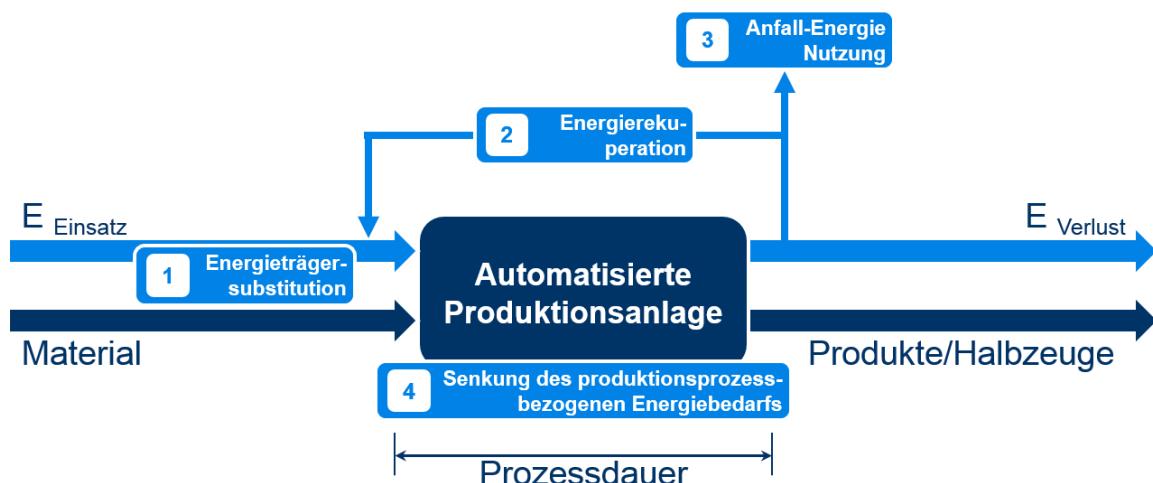


Abbildung 3-12: Energieeffizienzprinzipien von Produktionsanlagen

(eigene Darstellung basierend auf [127], [39])

Neben einem Materialumsatz (Stoffumsatz) findet in dem System automatisierte Produktionsanlage zusätzlich ein Energieumsatz statt (vgl. Kapitel 3.1.1). Der Energieverlust bezeichnet hierbei den aus der Produktionsanlage austretenden Teil der zugeführten Einsatzenergie, der nicht für den Produktionsprozess genutzt werden kann [219].

Eine Einteilung der Energieeffizienzprinzipien kann vorgenommen werden in *Energieträgersubstitution*, *Energierekuperation*, *Anfall-Energie* und *Senkung des produktionsprozessbezogenen Energiebedarfs*. Bei der Energieträgersubstitution (1) kann eine Ersetzung des verwendeten Energieträgers durch einen anderen Energieträger mit günstigerer Primärenergiebilanz erfolgen. Energierekuperation (2) kann bspw. durch die Rückgewinnung, Zwischenspeicherung und bedarfsgerechte Bereitstellung von Bremsenergie elektrischer Antriebe realisiert werden, während bei der Nutzung von Anfall-Energie (3) der

beim Produktionsprozess anfallende Energieverlust in Form von Wärme für die Heizung der Produktionsräume genutzt werden kann.

Im Fokus dieser Arbeit stehen Maßnahmen zur Senkung des Produktionsprozessbezogenen Energiebedarfs (4), d.h. die für die Durchführung der Produktionsaufgabe erforderliche Endenergie soll minimiert werden, ohne die Qualität des Produktionsprozesses zu beeinträchtigen. Für eine energieeffiziente Produktion sind auch die Anwendungsverluste im Bereich der Nutzenergie der Energiewertschöpfungskette von besonderem Interesse (vgl. Kapitel 3.2.1) [39]. Hierbei sollen folgend nur Maßnahmen betrachtet werden, die für den Anwendungsbereich automatisierter Montageanlagen in Betracht gezogen werden können. Auf Basis dieser Abgrenzung erfolgt eine Analyse, welche dieser Maßnahmen in der Phase der mechanischen Absicherung in ein bestehendes Anlagendesign eingepflegt werden können.

Ein Ansatzpunkt zur Reduktion des produktionsprozessbezogenen Energiebedarfs besteht in der frühzeitigen Beeinflussung des Designs des zu fertigenden Produkts zur Sicherstellung eines Produktionsprozesses mit möglichst geringem Energiebedarf. Dieser Ansatz hat seinen Ursprung in den Gestaltungsrichtlinien für eine fertigungs- bzw. montagegerechte Produktgestaltung und stellt eine Sonderform dieses Paradigmas dar [136]. Erste Umsetzungen für die Integration einer Prognose für die produktionsprozessbedingten Energiebedarfe in den Entwicklungsprozess von Produkten konnten prototypisch für automatisierte Produktionsanlagen in der Automobilproduktion aufgezeigt werden [254], [255]. Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch auf der energieeffizienten Gestaltung und Auslegung der automatisierten Montageanlage und schließt somit Adaptionen des zu fertigenden Produkts nicht mit ein, so dass produktbeeinflussende Maßnahmen zur Senkung der produktionsprozessbedingten Energieverbräuche nicht weiter betrachtet werden.

	Design & Auslegung		
	Dimensionierung	Ansteuerung	Prozesskette
	Einfachwirkender Zylinder	Optimierte Ventilansteuerung	Druckluftbereitung
	Antriebssubstitution	Zuluftdrosselung	Druckluftverteilung
	Druckniveaureduzierung	Aktives Absperrventil	
	Schlauchdesign		

Tabelle 3-4: EEIMs für pneumatische Aktoren automatisierter Montageanlagen

Pneumatische Aktoren sind wesentliche Bestandteile einzelner Funktionsgruppen automatisierter Montageanlagen und werden häufig für Positionierungs- und Einspannungsoperationen eingesetzt. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz pneumatischer Aktoren im Anwendungsbereich automatisierter Montageanlagen können in die Kategorien *Design & Auslegung*, *Ansteuerung* sowie *Prozesskette* strukturiert werden (vgl. Tabelle 3-4). In der Kategorie *Design & Auslegung* werden Aspekte der Planung und beim

Entwurf pneumatischer Aktoren zusammengefasst, bspw. die Dimensionierung oder adäquate Druckbeaufschlagung. Die Kategorie Ansteuerung beinhaltet alle EEIMs, die auf eine Optimierung des Druckluftverbrauchs mittels einer verbesserten Ansteuerungsmethodik abzielen. In der Kategorie Prozesskette werden alle Maßnahmen vereinigt, die abgesehen von der Druckluftanwendung die restliche Prozesskette der Drucklufterzeugung, -aufbereitung und -verteilung betreffen.

Elektrische Motoren werden im Rahmen dieser Arbeit als Komponenten einzelner Funktionsgruppen betrachtet und kommen häufig bei der Lösung von Antriebs- und Positionieraufgaben zur Anwendung. Für den Anwendungsbereich automatisierter Montageanlagen konnten auf Basis einer Literaturrecherche drei Kategorien von energieeffizienzsteigernden Maßnahmen identifiziert werden (vgl. Tabelle 3-5).

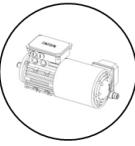
	Design & Auslegung	Prozesssteuerung	Motorkonstruktion
	Energieeffiziente Motoren	Bremsenergierekuperation	Minimierung Rotorreibung
	Dimensionierung	Scheduling	Blindleistungskompensation
	Drehzahlregelung	Standby-Modes	Steigerung Motorwirkungsgrad
	Energieeffiziente Fahrweise		
	Kraftübertragung		

Tabelle 3-5: EEIMs für Elektromotoren in automatisierten Montageanlagen

Die Kategorie *Design & Auslegung* beinhaltet Maßnahmen, die im Rahmen des Anlagenplanungsprozesses die Gestaltung und Auslegung von Elektromotoren hinsichtlich einer designierten Montageoperation betreffen. Neben der Verwendung energieeffizienter Motoren oder einer adäquaten Antriebsdimensionierung kann hier beispielhaft die Implementierung einer bedarfsgerechten Drehzahlregelung genannt werden. Zu der Kategorie *Prozesssteuerung* gehören alle Maßnahmen, die über zusätzliche Aufwände in der Steuerung des Montageprozesses oder der Motoransteuerung realisiert werden können. Durch eine optimierte Prozessplanung (Scheduling) bspw. durch sequentielles Anfahren oder durch Schalten in energieeffiziente Zustände in Stillstandzeiten können hier Energiesparpotentiale erschlossen werden. Konstruktive Maßnahmen werden in der Kategorie *Motorkonstruktion* zusammengefasst, wobei hier im Wesentlichen auf die Erhöhung des Motorwirkungsgrads oder der Reduzierung von Reibungsverlusten abgezielt wird.

Industrieroboter sind in dieser Arbeit auf der Ebene der Funktionsgruppen bzw. Baugruppen eine Montageanlage eingeordnet und stellen somit einen Sonderfall elektrischer Aktoren dar (vgl. Kapitel 3.1.1). Auf Basis von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Erfahrungsberichten von industriellen Anwendern konnten für Industrieroboter im Anwendungsbereich automatisierter Montageanlagen die Kategorien *Layout & Design*,

Prozesssteuerung, Bahn & Trajektorie und *Energieaustausch* identifiziert werden (vgl. Tabelle 3-6). Der Aufstellung und Kategorisierung der EEIMs liegt die Annahme zugrunde, dass der Industrieroboter dem Generalunternehmer als unveränderliche Funktionsgruppe von einem Roboterhersteller bereitgestellt wird, so dass Maßnahmen die direkt das Design des Roboters betreffen (bspw. Massenreduktion des Roboterarms, Reduzierung von Reibung oder Einsatz energieeffizienter Motoren) nicht möglich ist.

	Layout & Design	Prozesssteuerung	Bahn & Trajektorie	Energieaustausch
	2D/3D-Layoutoptimierung	Standby-Modes	PTP mit Überschleifen	Roboterinterner Austausch
	Roboterauswahl	Frühzeitiger Bremseinfall	Bahnoptimierung	Anlangenint. Austausch
	Werkzeugoptimierung	Trajektorienoptimierung		

Tabelle 3-6: EEIMs für Industrieroboter in automatisierten Montageanlagen

Die Kategorie Layout & Design umfasst alle EEIMs, die im Rahmen der Anlagenplanung und -auslegung die Positionierung, die adäquate Auswahl eines Roboters oder die Werkzeuggestaltung für eine spezifische Montageoperation betreffen. In der Kategorie Prozesssteuerung werden EEIMs zusammengefasst, die prozessbedingte Einsparpotentiale bei Roboteranwendungen bieten. Eine Kategorie mit hohem Einsparpotential stellt Bahn & Trajektorie dar, wo entweder die Bahn des Tool Center Point (TCP) oder die Verfahrweise auf einer fixen Bahn des TCP Gegenstand der Optimierungen ist. Die Kategorie Energieaustausch wird von Maßnahmen gebildet, die eine Weiterverwendung von elektrischer Energie betreffen, die von den Motoren des Industrieroboters im Generatorbetrieb während eines Bremsvorgangs erzeugt wird.

Diese Kategorisierung wird bei der Entwicklung der Methode als Basis für eine Bewertung der Umsetzbarkeit der EEIMs im Rahmen der physikbasierten mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen herangezogen.

3.2.3. Digitale Tools zur Energieverbrauchsanalyse automatisierter Produktionsanlagen

Um den Energieverbrauch von Produktionsanlagen zu simulieren, stehen unterschiedliche digitale Tools und Werkzeuge zur Verfügung. Diese wurden mittels einer Literaturstudie und einer Marktanalyse identifiziert und klassifiziert. Dabei unterscheiden sich die vorgestellten Tools hinsichtlich der betrachteten Systemgrenzen, der Abbildungsgüte der 3D-Anlagengeometrie und der Methode der Energiebedarfsberechnung. Die Strukturierung und Klassifizierung der Tools zur Energieverbrauchssimulation wird auf Basis der Automatisierungspyramide vorgenommen, da hierdurch gleichzeitig ein Anhaltspunkt für die vom Simulationstool betrachtete Systemgrenze induziert wird (vgl. Abbildung 3-13).

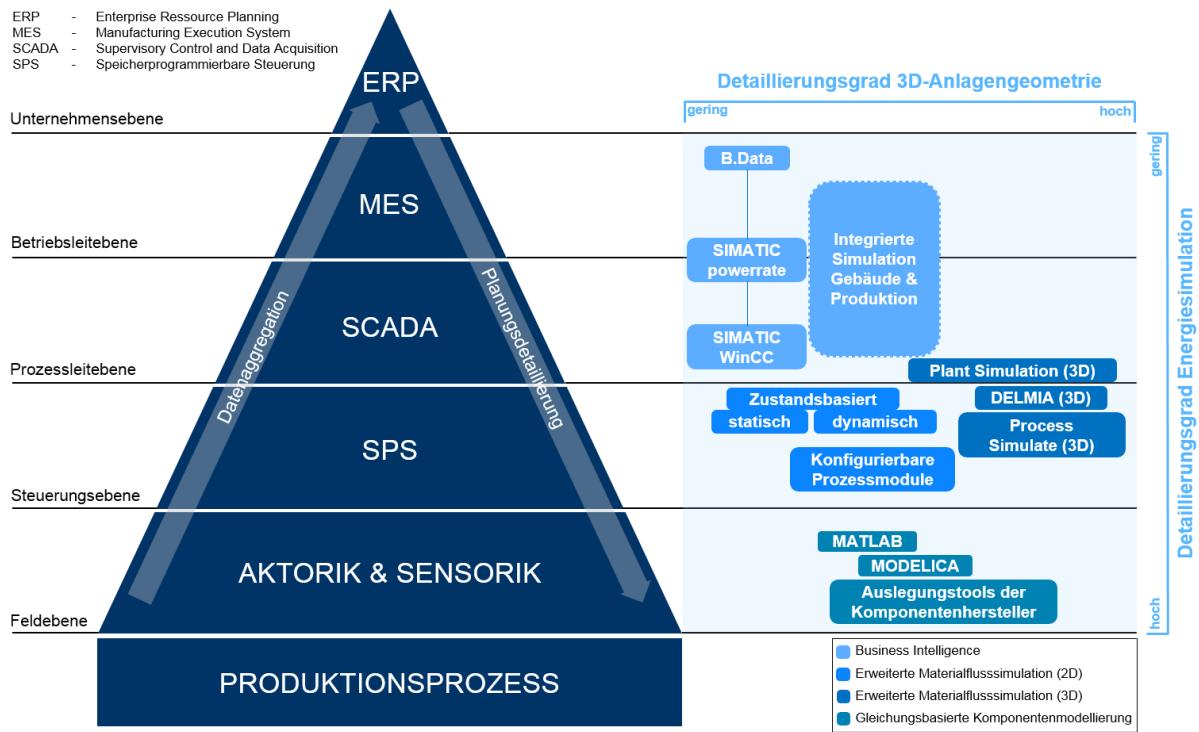


Abbildung 3-13: Klassifizierung digitaler Tools zur Energieverbrauchsanalyse

(eigene Darstellung basierend auf [13], [98], [256])

Auf hohem Abstraktionslevel wurde im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben eine Integration von Energieverbrauchssimulationen von Produktionsanlagen und von Gebäudetechnik und Versorgungseinrichtungen untersucht. Mit begrenzter Abbildungsgüte der Energiesimulation ohne direkten Bezug zu den individuellen 3D-Anlagentopologien werden Energieverbrauchsdaten aggregiert und mit dem Ziel einer ganzheitlichen Energiebetrachtung und Energieverbrauchsoptimierung einer gesamten Produktionsstätte aufbereitet [257], [258], [259].

Auf der Betriebsleitebene bzw. Prozessleitebene besteht die Möglichkeit ein Energiemanagement in das den Produktionsanlagen übergeordnete Prozessleitsystem zu integrieren. Dabei wird auf Basis des installierten Prozessleitsystems (bspw. Siemens SIMATIC PCS7) ein Prozessvisualisierungssystem (bspw. SIMATIC WinCC) genutzt, um eine Energieplanung und -beschaffung, ein Energiecontrolling sowie ein Energiemonitoring und -reporting zu realisieren [260]. Dabei können die Energie- und Stoffströme aller Energieerzeuger und -verbraucher einer gesamten Fabrikhalle bei Verwendung von Profibus und Profinet-Geräten messtechnisch erfasst und ausgewertet werden [261]. Im Rahmen der Energieplanung wird der Energieverbrauch einzelner Produktionsanlagen auf Basis von aus den Messungen gewonnenen Grundlastprofilen prognostiziert und mit Produktionsplänen verknüpft [262], [263]. Dadurch wird eine kurz-, mittel- oder langfristige Energiebedarfsermittlung ermöglicht, die für eine optimierte Energiebeschaffung genutzt

werden kann. Eine interne Kostenverrechnung für die Energiebeschaffung und -verwendung kann durch die Übertragung der Kosten und Erlöse in ein ERP-System realisiert werden (bspw. mit SIMATIC powerrate und B.Data) [264].

Es gibt verschiedene Aktivitäten vonseiten der Forschung und seitens der Systemhersteller mit dem Ziel die Simulation von Energieverbräuchen in die Ablaufsimulation (Materialflusssimulation) zu integrieren. Für Materialflusssimulationen in der Automobilindustrie wurde von der VDA-Arbeitsgruppe Ablaufsimulation die Objektbibliothek VDA Automotive Bausteinkasten zur Standardisierung der Materialflusssimulation entwickelt [265]. Die individuellen Elemente (Maschinentypen) des Baukastens wurden um zustandsbasierte Energieverbräuche erweitert, so dass eine linienweite Energieverbrauchsbetrachtung ermöglicht wird. Die Leistungswerte werden hierbei häufig auf der Basis von Verbrauchsmessungen erstellt und den einzelnen Betriebszuständen (Fertigung, Betriebsbereit, Standby, Wartung, Rüsten, etc.) als konstante (statische) Verbrauchswerte oder mit einem höheren Detaillierungsgrad als dynamische approximierte Realverbräuche zugewiesen [266], [267], [268]. Für eine detaillierte Betrachtung können auch abstrakte Prozessmodule mit einer hohen individuellen Konfigurierbarkeit verwendet werden [144], [269]. Alle diese Ansätze beschränken sich jedoch entweder auf eine rein schematische Prozessdarstellung einer Produktionslinie oder maximal auf eine 2D-Layoutbetrachtung ohne die exakten 3D-Anlagengeometrien zu berücksichtigen.

Exemplarisch für ein Tool einer um Energiesimulation erweiterten 3D-Materialflusssimulation wird die Anwendungssoftware *Tecnomatix Plant Simulation* des Systemhersteller Siemens PLM vorgestellt. Plant Simulation ist eine ereignisorientierte Simulationssoftware, mit der komplexe Produktionssysteme modellbasiert mit ihren Materialflüssen abgebildet werden können [128]. Ab der Version Plant Simulation 11 können auf Basis einer diskreten Materialflusssimulation die Energieverbräuche einzelner Stationen und Anlagen einer Produktionslinie zustandsbasiert dargestellt werden [131], [270]. Während sich zunächst die Energiesimulation nur auf die parametrische Vorgabe des Energieverbrauchs für einzelne Betriebszustände beschränkte, wurde in einer Weiterentwicklung eine dynamische Abbildung des Leistungsprofils für die Anlagenkomponente Roboter implementiert [271], [272]. Diese Funktionalität wurde zudem auch in dem Tool Tecnomatix Process Simulate integriert [273]. In einem Anwendungsfall der Automobilproduktion konnten in einem Motorenwerk durch die simulationsgestützte Energieverbrauchsanalyse mit Plant Simulation und einer anschließenden operationalen Implementierung einer energieeffizienten Anlagenzustandssteuerung beeindruckende Energieeinsparpotentiale erschlossen werden [274].

Die erweiterten Materialflusssimulationen dienen häufig zur energieverbrauchsoptimalen Belegungsplanung einzelner Stationen im Rahmen der Produktionsplanung. Hierbei werden zur Abbildung des Energieverbrauchverhaltens aufgrund der Limitationen der eingesetzten

Tools oder des hohen Datenakquisitionsaufwands häufig gemittelte Energieverbrauchswerte oder angenäherte Leistungsprofile (Äquivalenzleistungsprofile, bspw. M-Verfahrkurve bei einer Roboterbewegung) verwendet [131], [275], [276]. Die Konfiguration der einzelnen statischen Zustände bzw. die Transition zwischen den einzelnen Zuständen ist nur hinsichtlich der Leistungsaufnahme bzw. Übergangszeit konfigurierbar [277]. Eine vollständige Abbildung aller Energie- und Medienverbräuche, deren Erzeugung und auch der für die Bereitstellung erforderlichen Infrastruktur ist in der Ablaufsimulation derzeit allerdings noch nicht möglich [278].

Auf niedrigster Abstraktionsebene besteht die Möglichkeit den Energieverbrauch einzelner Komponenten mittels gleichungsbasierter mathematischer Modellierungstools abzubilden. Hierbei kann bei Kenntnis aller erforderlichen Modellparameter eine Energieverbrauchsprognose unter Berücksichtigung des individuellen Belastungszustands und dynamischer Effekte generiert werden. Umfangreiche Umsetzungen für die Energiebetrachtung von Robotern wurden bspw. in den domänenübergreifenden Simulationstools MATLAB oder Dymola/MODELICA durchgeführt (bspw. [279], [280]). Darüber hinaus bieten die Hersteller pneumatischer und elektrischer Komponenten digitale Tools zur Projektierung gesamter Antriebssysteme an (bspw. Lenze Drive Solution Designer, Siemens Sizer) [281], [282], [283]. Damit können die Bestandteile der Antriebssysteme individuell konfiguriert und ausgelegt werden. Neben der Möglichkeit einer Energieverbrauchsprognose für unterschiedliche Belastungszustände werden vereinzelt auch Möglichkeiten für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung bereitgestellt.

Alle genannten Tools dieser Abstraktionsebene betrachten allerdings nur ein abstrahiertes Abbild einzelner Komponenten einer Produktionsanlage. Topologische Charakteristika der Komponente (Abmessungen, Gewicht, Trägheitsmomente, etc.) werden zwar bei der Berechnung berücksichtigt, aber nicht mittels eines 3D-Volumenmodells repräsentiert. Daher ist auch eine integrierte Betrachtung eines aus Komponenten aggregierten 3D-Anlagenmodells mit einer Energieverbrauchsprognose für die Gesamtanlage nicht möglich.

3.3. Physikbasierte Simulation von Produktionsanlagen

Nach einer kurzen Einführung in die starrkörperbasierte Mehrkörpersimulation wird die Methode der physikbasierten Simulation als eine Ausprägungsform dieses Simulationsansatzes vorgestellt. Des Weiteren werden derzeitige Arbeiten und Vorgehensweisen zur physikbasierten Simulation im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus vorgestellt und analysiert.

3.3.1. Grundlagen der starrkörperbasierten Mehrkörpersimulation

Im Kontext von Produktionsanlagen wird unter dem Begriff Simulation die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Simulationsmodell

verstanden. Der Zweck einer Simulation von Produktionssystemen in der Planungs-, Realisierungs- oder Betriebsphase besteht in dem Gewinn von Erkenntnissen, die auf die Realität übertragbar sind [284]. Das Simulationsmodell stellt hierbei eine abstrahierte Repräsentation eines zu untersuchenden Produktionssystems dar und dient der Entscheidungsvorbereitung und -unterstützung. Im Zusammenhang mit Simulation bedeutet Abstraktion die Beschreibung eines Systems in einem Modell mit einem hinsichtlich Struktur und Verhalten geringeren Detaillierungsgrad als das reale Originalsystem [285]. Die Simulationswürdigkeit eines Sachverhalts kann unter Verwendung der in der VDI 3633 aufgeführten Kriterien untersucht werden: für die Problemstellung der vorliegenden Arbeit können die Kriterien des zu erwartenden Nutzens, der hohen Komplexität der Aufgabe sowie das Fehlen mathematischer Modelle geltend gemacht werden.

Eigenschaft	Ausprägung
Zustand	statisch / quasistatisch / stationär / dynamisch
Zeitverhalten	zeitkontinuierlich / zeitdiskret / ereignisorientiert
Zufallsverhalten	deterministisch / stochastisch
Antwortverhalten	echtzeitfähig / nicht echtzeitfähig

Tabelle 3-7: Eigenschaften von Simulationsmethoden und -modellen

Die Eigenschaften eines Systems und des zugrunde liegenden Simulationsmodells können auf Basis unterschiedlicher Kriterien klassifiziert werden. In der obigen Tabelle sind die wichtigsten Eigenschaften mit ihren potentiellen Ausprägungen aufgeführt (basierend auf [286], [287], [288], [289]). Ein System gilt als statisch, wenn der Systemzustand zeitinvariant ist. Stationäre Systeme sind zeitvariant, wobei sich allerdings der Systemzustand auch bei Änderung der Eingangsgrößen nicht ändert. Bei quasistationären Systemen ändert sich der Systemzustand so langsam, dass sie für Simulationszwecke als stationär angenommen werden können. Im Kontext einer dynamischen Simulation werden unterschiedliche Systemzustände über einen Zeitraum (Zeitintervall) betrachtet.

Zustandsgrößen in einem System können durch analoge oder diskrete Signalverläufe beschrieben werden, wodurch ein System als zeitkontinuierlich bzw. zeitdiskret gekennzeichnet wird [290]. Bei einer computergestützten Simulation ist ein Fehler durch eine zwangsläufig erforderliche Zeit- und Wertdiskretisierung unvermeidlich und kann nur durch eine möglichst feine Diskretisierung minimiert werden [291]. Ein System mit unstetigen Änderung der Zustandsgrößen, die zwischen zwei unstetigen Änderungen einen konstanten Wert aufweisen, wird als zeitdiskret bezeichnet. Ereignisorientierte Systeme sind ein Spezialfall zeitdiskreter Systeme, wobei die Zeitschritte vorab unbekannt sind und das Ziel in der Bestimmung des Eintrittszeitpunkts eines neuen Ereignisses besteht [292].

Existiert ein Zeitpunkt, für den der Zustand des Systems nicht vorhergesagt werden kann, wird das System als stochastisch bezeichnet, andernfalls liegt ein deterministisches System vor. Erfolgt die Systemantwort stets innerhalb eines vorab definierten Zeitintervalls, bezeichnet man das System im informationstechnischen Sinn als echtzeitfähig, wobei diese Definition auf der obsoleten DIN 44300 beruht [293]. Alternativ kann die Echtzeitfähigkeit des Antwortverhaltens einer Simulation mit Hilfe harter und weicher Echtzeitanforderungen charakterisiert werden [294], [295]. Hierbei müssen Systeme mit harten Echtzeitanforderungen die Antwort in jedem Zeitschritt liefern, wobei Systeme mit weichen Echtzeitanforderungen das Echtzeitkriterium nur im Mittel erfüllen müssen [296].

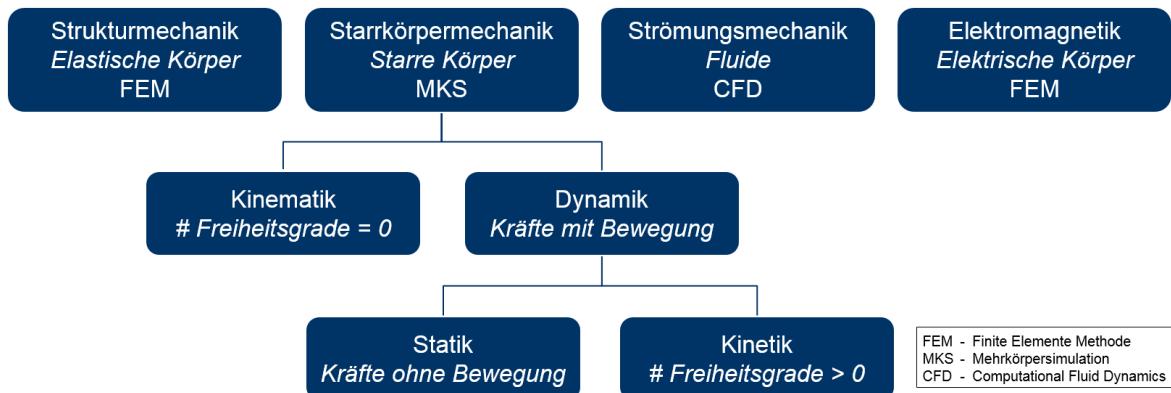


Abbildung 3-14: Ingenieurwissenschaftliche Simulationsmethoden

(eigene Darstellung basierend auf [297])

Aus dem breiten Spektrum der Simulationsmethoden in den Ingenieurwissenschaften (Materialflusssimulation, Fluidsimulation, etc.) wird für die Simulation automatisierter Produktionsanlagen im Rahmen dieser Arbeit folgend die *dynamische Mehrkörpersimulation starrer Körper* fokussiert (vgl. Abbildung 3-14). Hierbei wird die automatisierte Produktionsanlage als ein System aus einer endlichen Anzahl massebehafteter Körper aufgefasst, die durch Kopplungselemente (Gelenke) zu offenen, teilweise geschlossenen oder vollständig geschlossenen kinematischen Ketten verbunden sind [290]. Die massebehafteten Körper werden als starr angenommen, da vereinfachend angenommen wird, dass elastische Verformungen vernachlässigbar klein sind, Strukturschwingungen keinen Einfluss auf das Gesamtsystem besitzen und die Kopplungselemente zwischen den einzelnen starren Körpern masselos sind [298]. Die für die Simulation von automatisierten Montageanlagen wesentlichen Gelenkformen mit den dazugehörigen Freiheitsgraden sind in Tabelle 3-8 dargestellt.

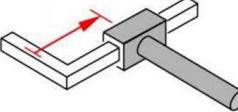
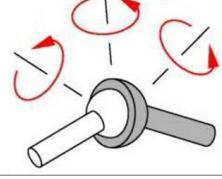
Gelenkart	Translationsgelenk	Rotationsgelenk	Kugelgelenk
# FG	1	1	3
Abbildung			

Tabelle 3-8: Relevante Gelenkartens für die dynamische Starrkörpersimulation automatisierter Montageanlagen (eigene Darstellung basierend auf [299])

Die dynamische Mehrkörpersimulation erweitert die Kinematiksimulation um die Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens des Mehrkörpersystems ausgehend von einem definierten Initialzustand [125]. Die Kinematik betrachtet die Bewegung, Geschwindigkeit und Beschleunigung von Körpern im Raum ohne auf die Ursache der Bewegung einzugehen [163]. Eine Simulation des kinematischen Verhaltens eines Systems ist dadurch gekennzeichnet, dass zu jedem Zeitpunkt mindestens eine der Größen Auslenkung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung vorgegeben sein muss. Die Kinetik als Teilgebiet der Dynamik stellt den Zusammenhang der Bewegung mit der dafür verantwortlichen Ursache her. Bei der Simulation des dynamischen Verhaltens eines Systems wird also nicht nur die Bewegung des Systems, sondern insbesondere deren Ursache betrachtet: auf die massebehafteten Körper eines Systems wirken äußere Einflüsse (Kräfte und Momente) und bewirken somit eine Veränderung der Auslenkung, der Geschwindigkeit und/oder der Beschleunigung. Ein dynamisches Modell stellt also den Zusammenhang zwischen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung und Kräften und Momenten her, die zur Durchführung der Bewegung notwendig sind [300]. Das Verhalten eines Starrkörpers in einer Dynamiksimulation wird also beeinflusst durch seine Körpereigenschaften (Masse, Volumen, Massenschwerpunkt und Trägheitsmomenten) sowie durch die auf ihn wirkenden externen Einflüsse [301].

Mit Hilfe einer dynamischen Mehrkörpersimulation kann das Bewegungsverhalten umfangreicher mechanischer Systeme und Strukturen betrachtet werden und ist somit für die Simulation eines komplexen mechatronischen Systems wie einer Produktionsanlage sehr gut geeignet. Im Gegensatz zu einer FEM-Simulation erstreckt sich der Betrachtungshorizont einer dynamischen Mehrkörpersimulation nicht auf die Untersuchung lokaler (Verformungs-)Bereiche, sondern umfasst ein Gesamtsystem mit allen dazugehörigen Komponenten innerhalb der Systemgrenzen [290]. Eine elastische oder plastische Verformung eines Starrkörpers steht somit nicht im Vordergrund, d.h. die in der dynamischen Mehrkörpersimulation betrachteten Starrkörper unterliegen nur formerhaltenden Transformationen.

Die Untersuchungen im Rahmen der dynamischen Mehrkörpersimulation automatisierter Produktionsanlagen soll sich zudem auf starre Körper beschränken und keine flexiblen

Komponenten (bspw. Verbindungsschlüsse) miteinbeziehen. Dies ist der großen Komplexität der abstrahierten Repräsentation biegeschlaffer Bauteile in Mehrkörpersimulationssystemen geschuldet. Aufgrund ihrer veränderlichen Form besitzen sie einerseits variable Massenschwerpunkte und -momente, andererseits können Eigenkollisionen und innere Spannungen auftreten [302]. Eine Form der Simulation dynamischer Starrkörpersysteme stellt die Methode der physikbasierten Simulation dar, die im folgenden Kapitel ausführlich vorgestellt wird.

3.3.2. Einführung in die physikbasierte Simulationsmethodik

Bei der physikbasierten Simulation (auch Physiksimulation, engl. Physical based modeling) wird das dynamische Bewegungsverhalten der Simulationsobjekte und deren Zusammenwirken unter Verwendung einer Physik-Engine berechnet. Eine Physik-Engine ist eine Softwarebibliothek, die eine echtzeitfähige, interaktive Dynamiksimulation der Simulationskörper auf Basis ihrer geometrischen und physikalischen Eigenschaften und den Grundlagen der Mechanik ermöglicht. Sie löst damit das klassische Problem der direkten Dynamik (Vorwärtsdynamik): welche aktuelle Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung besitzt ein Körper unter einer vorgegebenen Krafteinwirkung [303], [304]. Neben starren Körpern kann mit Physik-Engines auch das dynamische Bewegungsverhalten deformierbarer Körper sowie Partikelsysteme für Fluidsimulationen abgebildet werden [301], [305].

Ursprünglich wurden Physik-Engines für die realitätsgtreue Abbildung des physikalischen Verhaltens komplexer Elemente in Computerspielen oder in Animationsfilmen verwendet. Es existiert eine Vielzahl kommerzieller oder frei verfügbarer Physik-Engines für unterschiedliche Anwendungsbereiche (bspw. ODE, Bullet, PhysX, Vortex). Es kann keine allgemeingültige Aussage über die Wertigkeit oder Qualität einer Physik-Engine getroffen werden. Vielmehr muss die Auswahl einer Engine immer im Hinblick auf den jeweiligen Anwendungsfall erfolgen [306]. Für einen Vergleich zwischen Physik-Engines auf Basis verschiedener Kriterien wird auf weiterführende Literatur verwiesen (bspw. [307], [308], [309], [310]).

Neben einer Physik-Engine umfasst eine Simulationsumgebung zur physikbasierten Simulation eine Visualisierungs- und Manipulationsoberfläche, die eine grafische Darstellung der Simulationsobjekte realisiert (vgl. Abbildung 3-15). Die Simulationsszene wird in Form einer abstrakten Datenstruktur an die Physik-Engine übergeben, die die Prozessschritte zur dynamischen Mehrkörpersimulation ausführt. Die Simulationsszene beschreibt die Geometrie und Pose (Translation und Rotation eines dreidimensionalen Körpers relativ zu einem Koordinatenursprung) sowie die kinematischen Bedingungen (kinematische Relationen) in Form von Gelenken, die die Freiheitsgrade der Körper einschränken. Holonome Zwangsbedingungen verringern die Freiheitsgrade des Mehrkörpersystems und können somit alle Formen von mechanischen Gelenken darstellen. Nichtholonome Zwangsbedingungen bewirken keine Reduktion der Anzahl der Freiheitsgrade eines Mehrkörpersystems [311], [312].

Für jeden Simulationsschritt werden von der Physik-Engine die Prozessschritte *Kollisionserkennung*, *Kollisionsbehandlung*, *Kraftberechnung* und die *Aktualisierung des Systemzustands* durchgeführt [313]. Abschließend wird der aktualisierte Systemzustand in Form der aktuellen Posen der Simulationsobjekte mittels des abstrakten Datenformats an die Visualisierungsfläche übergeben.

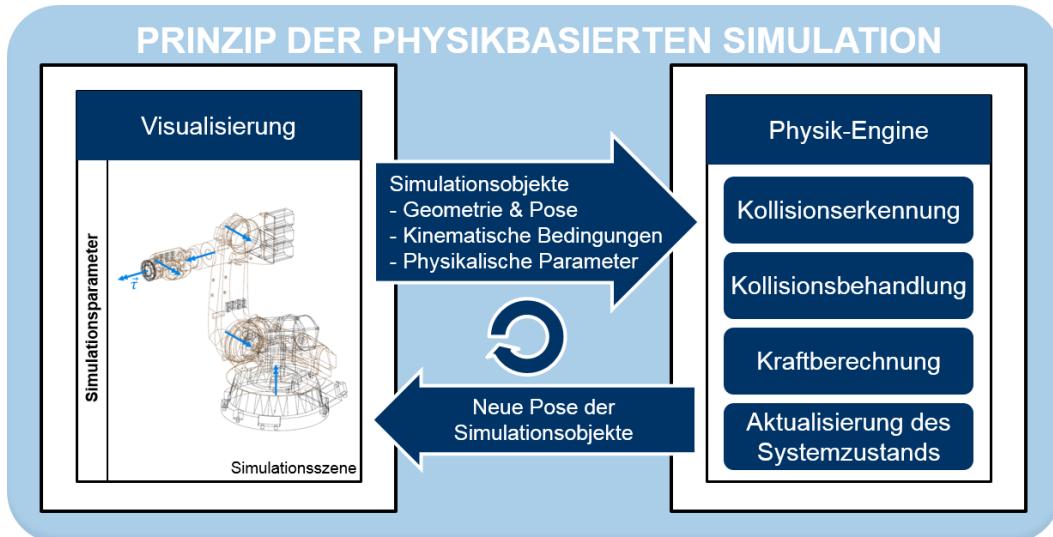


Abbildung 3-15: Vereinfachte Darstellung der prinzipiellen Schritte einer physikbasierten Simulation

Bei der Kollisionserkennung erfolgt im Rahmen einer groben und einer feinen Phase die Detektion der Kollisionen zwischen den Simulationsobjekten. In der groben Phase (broad phase) werden potentiell kollidierende Paare von Simulationskörpern identifiziert, bspw. durch die Anwendung von Raumteilungsverfahren oder unterschiedlichen Formen von Hüllkörperhierarchien (z.B. AABB, OBB) [314]. Diese potentiellen Kollisionspaare werden in der feinen Phase (narrow phase) hinsichtlich einer auftretenden Kollision untersucht (bspw. durch Anwendung des GJK-Algorithmus oder des Lin-Canny-Algorithmus). Eine Kollision kann hierbei zwischen den Eckknoten, Kanten oder Flächen der Hüllgeometrien auftreten [315]. Die Unterscheidung zwischen Kollisionen und permanenten Kontakten zweier Simulationsobjekte kann anhand der relativen Geschwindigkeiten der beiden Körper zueinander erfolgen. Bei Auffinden einer Kollision werden Informationen wie Kollisionskoordinaten oder Eindringtiefe ermittelt [316].

Bei der Kollisionsbehandlung von Starrkörpern kann zwischen zwangsbasierten und impulsbasierten Ansätzen sowie der Penalty Methode unterschieden werden [303], [316], [102]. Bei den zwangsbasierten Ansätzen erfolgt die Einhaltung der Nichtdurchdringungsbedingung zweier kollidierender Körper durch das Aufbringen einer Kraft, während impulsbasierte Ansätze die Einhaltung durch das Aufbringen vieler kleiner Impulse gewährleistet. Bei der Penalty-Methode werden in den Kontaktstellen fiktive Federn mit hohen Federkonstanten aufgebracht. Ein Vergleich mit einer kurzen Auflistung der

Vor- und Nachteile der einzelnen Kollisionsbehandlungsverfahren ist in Tabelle 3-9 dargestellt.

	Impulsbasiertes Verfahren	Zwangsbasiertes Verfahren	Penalty Verfahren
Erläuterung	Setzt zur Kollisionsberechnung keine Zwangsbedingungen voraus; Aufbringen vieler kleiner Impulse zur Nichtdurchdringung	Unterscheidung zwischen anhaltenden Kontakten und Kollisionen; Einführung von Kontaktkräften	Erlaubt Durchdringungen von Körpern; Aufbringen fiktiver Federn in den Kontaktpunkten mit hohen Steifigkeiten
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> - Probleme bei der Handhabung von permanenten Kontakten + Einfache Berechnung von Impulsen im Gegensatz zum Lösen komplexer Systeme von DGLs + Einfache Implementierung, hohe Stabilität + Bei hoher Objektanzahl und hohen -geschwindigkeiten anwendbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Lange Rechenzeit bei vielen gleichzeitigen Kontakten + Handhabung komplexer Mehrkörpersysteme und permanenter Kontakte + Hohe Genauigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Federsteifigkeiten führen zu nur aufwendig lösbar DGLs - Instabilität: für Stabilität sind sehr kleine Simulationsschrittweiten erforderlich + Einfache Implementierung + Auch für deformierbare Körper anwendbar

Tabelle 3-9: Vergleichende Betrachtung von Verfahren der Kollisionsbehandlung bei Physik-Engines
(eigene Darstellung basierend auf [102], [303], [311], [316], [317])

Anschließend erfolgt die Berechnung der auf die Simulationsobjekte wirkenden resultierenden Kräfte unter Berücksichtigung zusätzlich aufgeprägter Kräfte oder Kraftfelder (bspw. Gravitation oder Luftwiderstand). Mit Kenntnis der auf den Simulationsobjekten wirkenden resultierenden Kräfte können deren Beschleunigungen nach dem newtonschen Aktionsprinzip ermittelt werden. Die Bestimmung der neuen Posen der Simulationsobjekte kann unter Verwendung von Integrationsverfahren für lineare Gleichungssysteme durchgeführt werden: während Einschritt-Integrationsverfahren (bspw. Explizites/Implizites Euler-Verfahren, Gauß-Seidel-Verfahren, Explizites Runge-Kutta-Verfahren) nur einen Wert zur Berechnung eines neuen Näherungswertes benötigen, verwenden Mehrschritt-Integrationsverfahren (bspw. Rückwärtsdifferenzenmethode) die Information mehrerer Werte vergangener Integrationsschritte [318].

Neben den physikalischen Parametern der Simulationsobjekte (Massen und Massenträgheitsmomenten, Gravitationskraft) werden von der physikbasierten Simulationsumgebung zusätzliche Simulationsparameter an die Physik-Engine übergeben. Diese umfassen neben der Simulationsschrittweite und der Anzahl der erlaubten Iterationsschritte weitere dimensionslose Parameter bspw. zur Definition der Steifigkeit der Gelenke (CFM, Constraint Force Mixing) oder zur Definition der Stärke der Korrekturkraft an den Gelenken (ERP, Error Reduction Parameter) [319], [320].

Aufgrund der hohen Rechenintensität werden die Physik-Engines häufig durch einen zusätzlichen Grafikprozessor (GPU) unterstützt. Hierbei wird die Ausführung der elementaren Prozessschritte von der zentralen Prozessoreinheit (CPU) auf die GPU portiert und somit eine Verkürzung der Rechenzeit erzielt. Ein GPU weist mehrere Prozessorkerne auf, so dass eine Vielzahl von Berechnungsprozessen parallel ausgeführt werden kann [321]. Die Umsetzung

einer parallelen Berechnungsarchitektur erfolgt mit Programmier-Frameworks CUDA oder OpenCL [318], [322].

Ein wesentlicher Vorteil der physikbasierten Simulation besteht in dem impliziten Ablauf physikalischer Vorgänge ohne der Notwendigkeit einer expliziten Modellierung und Programmierung [323]. Ein signifikanter Unterschied zwischen der physikbasierten Simulation und anderen wissenschaftlichen Simulationsmethoden ist die Verwendung eines integrativen Solvers mit einer geringen Anzahl von Iterationen, der die Echtzeitfähigkeit und die Skalierbarkeit der Engine ermöglicht [310]. Die echtzeitfähige Kollisionserkennung und -behandlung der Physik-Engine führt allerdings zu einer eingeschränkten Berechnungsgenauigkeit. Dies ist dem ursprünglichen Anwendungsgebiet der Physik-Engines geschuldet, da in Computerspielen oder Animationsfilmen die schnelle Kollisionserkennung und -behandlung im Vergleich zu einer hohen Berechnungsgenauigkeit einen höheren Stellenwert besitzt [324]. Zudem werden die physikalischen Gesetze zur Energieerhaltung und der Nichtdurchdringung bei Physik-Engines nicht vollständig eingehalten [306].

Bei der physikbasierten Simulation handelt es sich um eine dynamische, deterministische zeitdiskrete und echtzeitfähige Simulationsmethodik (vgl. Tabelle 3-7). Derzeit ist nur eine überschaubare Anzahl von Simulationsumgebungen zur physikbasierten Simulation zum einen von kommerziellen Anbietern und zum anderen von Forschungseinrichtungen verfügbar [325]. Dabei erstrecken sich die primären Anwendungsgebiete dieser physikbasierten Simulationsumgebungen auf die Bereiche Robotersimulation (bspw. GAZEBO , V-REP, MS Robotics Studio), oder auf die realitätsgetreue Simulation von Maschinenprozessen (z.B. NX/MCD, Blender, Autodesk 3DSmax, VeroSIM). Folgend wird auf bestehende Ansätze der physikbasierten Simulation im Bereich des Maschinen– und Anlagenbaus näher eingegangen.

3.3.3. Physikbasierte Simulation im Maschinen– und Anlagenbau

Das physikbasierte Modell einer Produktionsanlage bildet neben der Geometrie auch bestimmte physikalische Eigenschaften (Masse, Schwerpunkt, Haft– und Gleitreibungskoeffizient) sowie Eigenschaften der Umgebung (z.B. Gravitation) mit ab und führt so zu einer realitätsgetreuen Abbildung und einer hohen Simulationsergebnisqualität [326]. Physikbasierte Simulationsansätze für den Maschinen– und Anlagenbau benötigen für die Simulation keine Regeln oder manuell definierte Randbedingungen, wie Fügepartner und -stellen miteinander verbunden sind, sondern berechnen die Objektbewegungen und -kontakte alleinig auf Basis der Geometrie und der physikalischen Eigenschaften wie Masse, Gravitation, Trägheit und Kontaktbedingungen [327]. Ein wesentlicher Vorteil der physikbasierten Simulation im Bereich des Maschinen– und Anlagenbaus liegt in der kurzen Rechenzeit und der daraus resultierenden kurzen Antwortzeit des physikbasierten Simulationssystems, wodurch eine besondere Eignung für den in der Virtuellen Inbetriebnahme verwendeten Hardware-in-the-Loop-Ansatz besteht.

Hierbei wird die physikbasierte Simulation im Kontext der Maschinen- und Anlagenentwicklung im Wesentlichen für die Absicherung unterschiedlicher Entwicklungsstände eingesetzt. Bezuglich des Fokus bei der Absicherung der Entwicklungsstände kann zwischen materialflussorientierten Absicherungsansätzen und anlagenablaufbezogenen Absicherungsansätzen unterschieden werden.

Bei den Ansätzen zur Betrachtung *materialflussorientierter* Aspekte bei der Absicherung von Maschinen und Anlagen steht das Verhalten der bewegten Produkte, Halbzeuge oder Güter im Vordergrund. Im Fokus steht die realitätsgetreue Abbildung des physikalischen Verhaltens der Produkte (bspw. Stückgutbewegungen) unter Einwirkung durch die Produktionsanlage und deren Komponenten (bspw. Pusher, Förderbänder). Die Abbildung des korrekten physikalischen Verhaltens der Anlage sowie ihrer Komponenten und Bestandteile ist dabei von nachrangiger Bedeutung.

Spitzweg beschreibt eine Methode zur Erstellung von physikbasierten Modellen im Rahmen eines integrierten Konstruktions- und Entwicklungsprozesses von Maschinen und Anlagen [102]. Der Fokus liegt hierbei auf der realitätsgetreuen Abbildung des Materialflusses, die am Beispiel einer Sortieranlage gezeigt wird. Zusätzlich wird hierbei eine Integration von Virtual Reality-Methoden in die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme vorgeschlagen [328]. Lacour hat eine Methode entwickelt, die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme um skalierbare Modelle für materialflussintensive Produktionsanlagen und deren Fördergüter zu erweitern [329]. Hierbei werden die polygonalen 3D-Geometriemodelle der Produktionsanlage und der Fördergüter nach einer Tesselierung mittels einer konvexen Zerlegung in für die physikbasierte Simulation optimierte Modelle überführt. Dadurch werden multiple Kollisionskörper aus einem geometrischen Körper abgeleitet und mit der grafischen Repräsentation des geometrischen Körpers verknüpft [93], [330]. Dieser Ansatz stellt eine Erweiterung des Ansatzes von Röck dar, der die konvexe Zerlegung zum Einsatz einer optimierten Kollisionsberechnung für kleine Anlagenumfänge zeigt [331], [332]. Anwendungsgebiete waren hierfür Anlagen für den Materialtransport für diskrete Fördergüter. Hoher stellt eine kombinierte kinematische und physikbasierte Materialflusssimulation durch die Etablierung eines Multi-Simulators im Kontext der Virtuellen Inbetriebnahme vor. Anwendungsfall ist hierbei der logistische Materialabgriff und -transport von Prozessgütern niedriger morphologischer Komplexität aus einem Hochregallager [333], [334].

Bei den *anlagenablaufbezogenen* Ansätzen bei der Absicherung im Maschinen- und Anlagenbau wird das Hauptaugenmerk auf die Ressource gelegt. Die realitätsgetreue Abbildung des physikalischen Verhaltens der Anlagenbestandteile und der in Relation stehenden Anlagenabläufe stehen dabei im Vordergrund. Ein Anwendungsfeld besteht hierbei in der Absicherung von Robotern und deren Steuerungsprogrammen. Dabei besteht ein breites Anwendungsspektrum, das von der Simulation von individualisierten Servicerobotern

unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen bis hin zur Simulation von standardisierten Industrierobotern für industrielle Produktionszwecke reicht (bspw. [335], [336], [337], [338]). Auf letztere beschränken sich die folgenden Ausführungen.

Rossdeutscher hat ein Verfahren entwickelt, das die physikbasierte Absicherung gesamter roboterbasierter Montageabläufe (Positionierungsvorgänge, Fügevorgänge, etc.) für unterschiedliche Produktvarianten ermöglicht. Dieses Verfahren der virtuellen Roboterprogrammentwicklung umfasst die vollständige Programmerstellung und den systematischen Test von Programmfunctionalitäten. Eine Verfeinerung des Ansatzes wurde von Aichele vorgenommen, der im Rahmen einer virtuellen Roboter-Online-Programmierung insbesondere die Algorithmik der Kollisionserkennung und -behandlung optimieren konnte [339], [340]. Strahilov hat eine Methodik entwickelt, die eine physikbasierte mechanische und steuerungstechnische Absicherung automatisierter Montageanlagen unter Berücksichtigung des korrekten physikalischen Verhaltens der Anlagenbauteile und -komponenten erlaubt [169]. Hierbei wurden auch insbesondere pneumatische Aktoren untersucht und mittels eines detaillierten Modells abgebildet und deren Verhalten im Rahmen der Virtuellen Inbetriebnahme evaluiert [341].

Özdemir hat einen Ansatz für die Planung rekonfigurierbarer Montageanlagen mit Hilfe der physikbasierten Simulation entwickelt. Anwendungsbereiche sind hier Greifvorgänge in der Montage sowie Werkzeugmaschinen, die mittels der Software NX Mechatronics Concept Designer (MCD) von Siemens PLM umgesetzt worden sind [323], [342]. MCD wurde erstmals 2010 als separate Anwendung in das Konstruktionswerkzeug NX integriert und zielt auf eine integrierte Entwicklung der mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Elemente einer Produktionsanlage [343]. Im Vordergrund steht hierbei die einfache Skalierbarkeit und Möglichkeit zur Anpassung der Anlagenkonstruktion, da als Datenbasis für die physikbasierte Simulation die CAD-Konstruktionsdaten verwendet werden. Derzeit ist MCD das einzige industriell breit einsetzbare Tool, das physikbasierte Simulationen gemäß der Ausführungen in Kapitel 3.3.2 ermöglicht [98].

Mit der physikbasierten Simulation formlabiler Bauteile hat sich Stich befasst und hierfür am Beispiel eines Versorgungsschlauchs eines Roboters Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt [344], [345]. Weiteres Anwendungsfeld ist die Verpackungsindustrie, wobei hier der Fokus auf der Erarbeitung einer ganzheitlichen Vorgehensweise zur Integration der physikbasierten Simulation in den Anlagenentwicklungsprozess besteht [346]. Dies stellt eine Fortführung eines generischen anlaufbezogenen Ansatzes dar, die physikbasierte Simulation bei der Absicherung von Produktionsanlagen unterschiedlicher Anwendungsgebiete und -größe einzusetzen. Unterschiedliche Anwendungsbeispiele aus den Anwendungsgebieten Sondermaschinen, Werkzeugmaschinen, Großanlagen und Endmontage werden von Wunsch vorgestellt und die Potentiale für den Einsatz der physikbasierten Simulation für steuerungstechnische Absicherungszwecke evaluiert [101].

Die physikbasierte Simulation im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus ist derzeit überwiegend Gegenstand verschiedener Forschungsaktivitäten und befindet sich noch im Übergangsstadium zu einer breiten industriellen Anwendung. Dies wird durch die geringe Anzahl industrieller Anwendungen sowie der geringen Anzahl industriell breit einsetzbarer Tools für die physikbasierte Simulation belegt. Forschungsbestrebungen decken unterschiedliche Facetten der physikbasierten Simulationsmethodik für den Maschinen- und Anlagenbau ab und werden zu einer Verbreiterung des Themas in der industriellen Anwendung beitragen.

3.4. Abschließende Bewertung des Stand der Technik und Forschung

Für eine abschließende Bewertung des Stands der Technik und Forschung werden die Ergebnisse aus der Analyse der drei Themengebiete Entwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen, Energiebetrachtungen bei automatisierten Montageanlagen und physikbasierte Anlagensimulation zusammengefasst und bewertet. Darüber hinaus werden themenverwandte Forschungsvorhaben beschrieben und hinsichtlich definierter Gesichtspunkte evaluiert.

Entwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen

Automatisierte Montageanlagen für die Automobilproduktion besitzen eine Vielzahl elektrischer und pneumatischer Aktoren zur Realisierung der wertschöpfenden Montagetätigkeiten. Im Rahmen eines komplexen Entwicklungsprozesses werden automatisierte Montageanlagen von einem Anlagenbauer und spezialisierten Unterauftragnehmern geplant, ausgelegt und in Abstimmung mit der Produktionsplanung des Automobilherstellers virtuell abgesichert.

Aus ökonomischer Perspektive ist Energie ein Betriebsstoff und somit ein Repetierfaktor. Dabei gehen Energiekosten in der Kosten- und Leistungsrechnung häufig über den Maschinenstundensatz (Ressourcenstundensatz) in die Betriebskosten ein. Ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, die alle Lebenszyklusphasen der Entwicklung, Nutzung und Entsorgung einer Produktionsanlage umfassen, werden im Anwendungsgebiet des Automobilbaus nur vereinzelt eingesetzt.

Bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen für die Automobilproduktion wird der Aspekt des Energieverbrauchs bzw. der Energieeffizienz nur unzureichend berücksichtigt. Dies kann zum einen damit begründet werden, dass im Kontext des automobilen Herstellungsprozesses der Energieverbrauch des Gewerks Montage im Vergleich zu den anderen Gewerken Presswerk, Rohbau und Lackierung nur einen geringen Stellenwert besitzt. Darüber hinaus ist zum anderen die Montage geprägt von einem hohen Anteil manueller Montagetätigkeiten. Somit ist die Gesamtheit der vollständig automatisierten Montageanlagen und deren Anteil am Energieverbrauch relativ gering.

Die Entwicklung automatisierter Montageanlagen ist ein stark verteilter Entwicklungsprozess, in dem viele Entwicklungsaktivitäten durch spezialisierte Unterauftragnehmer parallel durchgeführt werden. Die damit einhergehende Modularisierung bedingt eine Begrenzung des Betrachtungsbereichs der beteiligten Partner und erschwert eine ganzheitliche Sicht des Zusammenspiels der einzelnen Funktionsgruppen und Komponenten in einem aggregierten Anlagendesign für den einzelnen Entwickler. Dadurch fokussiert sich der individuelle Entwickler auf die Sicherstellung der Funktionalität seines Zuständigkeitsbereichs und Chancen für eine ganzheitliche Optimierung des Anlagendesigns hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien (bspw. Taktzeit aber auch Energieverbrauch) bleiben häufig ungenutzt oder werden für eine Implementierung im digitalen Planungsprozess zu spät erkannt.

Mit Beginn der Nutzungsphase erfolgt der Gefahrenübergang der automatisierten Montageanlage von dem Anlagenlieferanten (GU) auf den Anlagenbetreiber (OEM). Dadurch ist für den GU die Anlagennutzungsphase und die dort entstehenden Betriebskosten nur von untergeordneter Bedeutung. Aus Sicht des OEMs wäre es jedoch im Sinne einer ganzheitlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorteilhaft, die insgesamt mit der Beschaffung und Nutzung der Montageanlage verbundenen Kosten zu berücksichtigen. Zudem besteht keine innerorganisatorische Verantwortung des zuständigen Produktionsplaners für die Betriebskosten einer automatisierten Montageanlage beim OEM. Während der Nutzungsphase werden die Kosten den Anlagenverantwortlichen (Instandhaltern) zugeordnet. Dadurch besteht für den Produktionsplaner des OEMs kein Anreiz, das Anlagendesign schon frühzeitig im Entwicklungsprozess unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz zu beeinflussen.

Energiebetrachtungen bei automatisierten Montageanlagen

Das innerbetriebliche System zur Energieversorgung umfasst den Energiebezug, die Energieverteilung und -umwandlung sowie die Energienutzung. Die Nutzenergie umfasst alle technischen Formen der Energie, die unmittelbar für die Durchführung der Montagetätigkeiten erforderlich sind, während die Endenergie die mittelbar erforderliche bereitzustellende Energie am Versorgungsanschluss der Anlage darstellt. Die wesentlichen in einer Montagehalle benötigten Energieträger sind elektrische Energie, Wärme, Gas und Druckluft. Automatisierte Montageanlagen können als energieeffizient bezeichnet werden, wenn sie bei einer definierten Produktionsleistung einen geringstmöglichen Energieeinsatz erfordern. Für die einzelnen Akteuren automatisierter Montageanlagen können Maßnahmen identifiziert werden, die eine Aktivität beschreiben, die üblicherweise zu einer überprüfbareren, messbaren oder abschätzbaren Verbesserung der Energieeffizienz führt. Digitale Tools für Energieverbrauchsbetrachtungen an automatisierten Montageanlagen fokussieren derzeit nicht einzelne Montagestationen, sondern eine gesamte Montagelinie oder Fabrikhalle. Dabei wird häufig nur elektrische Energie als Energieform betrachtet, wobei der Energieverbrauch häufig statusbasiert approximiert oder stark vereinfacht berechnet wird.

Bei bestehenden automatisierten Montageanlagen der Automobilindustrie sind häufig keine Kenntnisse über die produktionsprozessbezogenen Energieverbräuche vorhanden. Es besteht keine detaillierte messtechnische Überwachung der produktionsprozessbezogenen Energieverbräuche auf Stationsebene, so dass keine Zuordnung der Energieverbräuche zu den einzelnen Montageoperationen erfolgen kann. Messdatenaufnahme gesamter Stationen oder einzelner Funktionsgruppen oder Komponenten erfolgt nur in Einzelfällen.

Liegen Messdaten für einzelne Anlagen oder Funktionsgruppen vor, können Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz automatisierter Montageanlagen implementiert werden. Die Implementierung einer Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz findet dann allerdings häufig an der realen Anlage auf dem Shop-floor in Produktionspausen statt.

Physikbasierte Simulation im Maschinen– und Anlagenbau

Die physikbasierte Simulation im Bereich des Maschinen– und Anlagenbaus ist Gegenstand unterschiedlicher Forschungsvorhaben und ist derzeit in der Industrie nicht weit verbreitet. Dies ist zum einen durch die geringe Marktdurchdringung und Anwendungstiefe von Tools zur physikbasierten Simulation und zum anderen durch den hohen erforderlichen Modellierungsaufwand zu begründen.

Im Bereich der digitalen Absicherungsprozesse wird die physikbasierte Simulation vermehrt für unterschiedliche Anwendungsbereiche (bspw. materialflussintensive Anlagen) eingesetzt, wobei der Fokus jedoch auf einer realitätsgetreuen Abbildung des Produktionssystems durch die Berücksichtigung physikalischer Effekte liegt. Für automatisierte Montageanlagen im Automobilbau wurden bis dato nur wenige Forschungstätigkeiten durchgeführt, deren Fokus nicht auf der Energieberechnung und -visualisierung lag. Die Eignung der physikbasierten Simulation zur Berechnung und Visualisierung der Energieverbräuche automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion muss noch belegt werden.

Nach der Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Technik und Forschung werden folgend verschiedene themenverwandte Forschungsaktivitäten beschrieben und evaluiert. Die Auswahl der zu betrachtenden Forschungsaktivitäten basiert auf folgenden Kriterien (vgl. Tabelle 3-10).

Krit.-Nr.	Kriterienbeschreibung
1	Die Energiebetrachtungen müssen mindestens eine gesamte Produktionsanlage mit unterschiedlichen Komponenten umfassen.
2	Die Simulation des Energieverbrauchs muss mit Hilfe von CAE-Tools der Digitalen Fabrik durchgeführt werden.
3	Neben einer reinen Simulation des Energieverbrauchs muss des Weiteren eine Optimierung des Energieverbrauchs vorgenommen werden.
4	Die Implementation der energieeffizienzsteigernden Optimierungsmaßnahmen muss entweder technisch, wirtschaftlich oder ökologisch evaluiert werden.

Tabelle 3-10: Kriterien für die Auswahl zur Evaluierung von Forschungsaktivitäten

Hierbei werden im Rahmen einer technischen Evaluation produktionstechnische Kennzahlen betrachtet, während eine wirtschaftliche Evaluation betriebswirtschaftliche und eine ökologische Evaluation umweltbezogene Kenngrößen betrachtet. Weitere Analysemerkmale sind das Anwendungsfeld, der Bezug der Forschungsvorhaben zur Produktionsplanung, die betrachteten Energieformen sowie die zur Simulation des Energieverbrauchs verwendeten Tools und Hilfsmittel. In Tabelle 3-11 sind themenverwandte Forschungsaktivitäten mit den diskutierten Merkmalen in chronologischer Reihenfolge dargestellt. Bei den Forschungsaktivitäten handelt es sich um Aktivitäten im Rahmen von abgeschlossenen oder laufenden Forschungsprojekten und abgeschlossenen Dissertationen. Die Vorstellung der Ergebnisse der Forschungsaktivitäten erfolgt hierbei auf Basis öffentlich zugänglicher Dokumente bzw. Abschlussdokumentationen.

Junge hat ein energieeffizientes Produktionssteuerungskonzept entwickelt, das simulationsgestützt eine kennzahlbasierte Optimierung gesamter Produktionsstätten ermöglicht. Hierbei stehen die Energieformen Wärme und Elektrizität im Fokus, die mittels einer Kopplung von Materialflusssimulation und thermischer Gebäudetechniksimulation dargestellt werden [126]. Das Forschungsprojekt PEACH (Projektierung und Steuerung energieeffizienter Anlagen) fokussierte zum einen die Etablierung eines energieeffizienzorientierten Anlagenentwicklungsprozesses und zum anderen die energieeffiziente Anlagensteuerung auf Prozessleitsystemebene. Neben der Elektrizität steht die Druckluft als Energieträger im Vordergrund, wobei die implementierten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz wirtschaftlich evaluiert werden [196].

Das Projekt TEEM (Total Energy Efficiency Management) umfasst die Erweiterung von Methoden zur Fabrik- und Anlagenplanung mit dem Ziel der Energieeffizienzsteigerung durch die Anwendung der Wertstromtheorie auf die Energienutzung in einer Produktionsstätte. Am Beispiel der Prozesskette Spritzguss, Lackierung und Montage können die Energieverbräuche mittels einer Materialflusssimulationssoftware statusbasiert dargestellt und eingepflegte Energieeffizienzmaßnahmen wirtschaftlich ausgewertet werden [347], [348].

Weinert hat am Beispiel der Komponentenfertigung eine Vorgehensweise für die Planung und den Betrieb energieeffizienter Produktionsanlagen entwickelt, bei der mit Hilfe einer Materialflusssimulation der elektrische Energieverbrauch statusbasiert prognostiziert wird. Die Prognoseergebnisse können für unterschiedliche Planungstiefen aufbereitet und bereitgestellt sowie wirtschaftlich evaluiert werden [144]. Im Rahmen des Projekts EnEffCo (Energieeffizienzcontrolling) wurden Methoden und Werkzeuge für ein ganzheitliches Energiemanagement am Beispiel der Automobilproduktion entwickelt. Die Modellierung und Analyse der energieorientierten Prozessmodelle auf Linien- und Stationsebene erfolgt mittels Messdatenaufnahme und Methoden des Data Mining [349], [350].

Name	Kontext & Konzept			Implementation				Evaluation		
	Scope Gebäudetechnik Anlagentechnik	Anwendungsfeld	Bezug zur PP	Energieformen			Optimierungsmaßnahmen			
				Elektrizität	Druckluft	Wärme				
Junge (2007)	x	x	Kunststoffverarbeitung	+	x	x	SIMFLEX/3D	Multiple Maßnahmen (Energetisch, Kosten)	x x	
PEACH (2010)	x	Leitsystem in der Automobilproduktion	+	x	x		ENDAV	Komponentensubstitution, Scheduling	x	
TEEM (2010)	x	Spritzguss, Lackierung, Montage	-	x	x	x	Plant Simulation	Maßnahmen zur Produktionslogistik	x x	
Weinert (2010)	x	Komponentenfertigung	+	x			Plant Simulation	Scheduling	x	
EnEffCo (2012)	x	Roboter, Automobilproduktion	-	x			Protege	Verschiedene Maßnahmen	x x	
BEAT (2012)	x	Spanende Fertigung	+	x			GaBi	Alternative Prozessketten, Optimierung Energiebereitstellung	x x	
EnEffAH (2012)	x	Automatisierungstechnik (Antriebs- und Handhabungstechnik)	-	x	x		Anwendungsspezifische Tools	Manuell (Druckluftbereitstellung)	x	
Thiede (2012)	x	x	Aluminiumdruckgusskomponenten, Textilienproduktion, Leiterplattenproduktion	+	x	x	x	AnyLogic	Verschiedene Maßnahmen	x x x
InnoCaT (2013)	x	x	Automobilproduktion	+	x	x	x	Anwendungsspezifische Tools	Verschiedene Maßnahmen	x x
Haag (2013)	x	x	Spanende Fertigung	+	x	x		Plant Simulation	Verschiedene Maßnahmen	x x
eniPROD (2014)	x	x	Automobilproduktion	+	x	x	x	Anwendungsspezifische Tools	Verschiedene Maßnahmen	x x
SimEnergy (2015)	x	x	Automobilproduktion	+	x	x	x	Integrationskonzept verschiedener Tools	Synergiepotentiale von Gebäudetechnik & Anlagentechnik	x x
ETA Fabrik (2015)	x	x	Metallbearbeitung (Drehen/Schleifen, Wärmebehandeln, Reinigen)	-	x		x	unbekannt	Synergiepotentiale von Gebäudetechnik & Anlagentechnik	x

Tabelle 3-11: Evaluation themenverwandter Forschungsaktivitäten

Das Projekt BEAT (Bewertung der Energieeffizienz alternativer Prozesse und Technologieketten) hat zwei unterschiedliche Technologieketten in der spanenden Fertigung simulationsgestützt analysiert und mittels einer Ökobilanz evaluiert. Zudem wurde ein Leitfaden zur Steigerung der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung insbesondere für die Anwendung in kleineren und mittelständischen Unternehmen formuliert [351], [352].

Beim Forschungsprojekt EnEffAH (Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik) stand die operative Optimierung des Energieverbrauchs elektrischer und pneumatischer Antriebe im Vordergrund. Mittels anwendungsspezifischer Tools wurde die Wirksamkeit energieeffizienzsteigernder Maßnahmen gezeigt und technisch evaluiert. Ein Bezug zur Produktionsplanung wurde hier allerdings nicht hergestellt [353]. Thiede hat eine Methode entwickelt, die auf eine ganzheitliche simulationsgestützte Energieverbrauchsoptimierung einer gesamten Produktionsstätte durch die Verwendung

kennzahlbasierter Prozessmodule abzielt. Dabei werden die Energieformen Elektrizität, Druckluft und Wärme betrachtet, deren Verbrauch mittels energieeffizienzsteigernder Maßnahmen an unterschiedlichen Anwendungsbeispielen reduziert werden konnte. Neben einer technischen und wirtschaftlichen wird auch eine vereinfachte ökologische Evaluation durchgeführt [115].

Im Rahmen der Innovationsallianz Green Carbony Technologies (InnoCaT) wurden Lösungen zur Reduktion des Energiebedarfs für die Prozesskette Karosseriefertigung in der Automobilproduktion erarbeitet [129]. Ein thematischer Ansatz besteht in der Integration von Energiesimulationen in die Tools der Digitalen Fabrik, insbesondere in Materialflusssimulations- und Planungstools oder anwendungsspezifische Tools. Energieeffizienzsteigernde Maßnahmen werden einerseits in die Simulationsmodelle eingepflegt oder auch vermehrt auf dem shop-floor umgesetzt, die dann technisch und wirtschaftlich in Form von Kennzahlen ausgewertet werden. Haag betrachtet ebenfalls das Gesamtsystem Fabrik und simuliert den elektrischen und pneumatischen Energieverbrauch statusbasiert mit Hilfe einer erweiterten Materialflusssimulation am Anwendungsbeispiel der spanenden Fertigung. Durch die Verknüpfung mit der Arbeitsplanung werden verschiedene Planungsalternativen modellbasiert untersucht und technisch und wirtschaftlich bewertet [354].

Das Technologiecluster eniPROD (Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik) umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Forschungsvorhaben bzgl. der Energieeffizienz von Produktionsanlagen mit dem Fokus auf die Automobilproduktion. Hierbei werden mit anwendungsspezifischen Tools häufig auf Basis von aufgenommenen Messdaten Energieverbräuche und alternative Prozessketten simuliert und energetisch-wirtschaftlich bewertet [355]. Das Projekt SimEnergy (Simulationsgestützte Planung und Bewertung der Energieeffizienz für Produktionssysteme in der Automobilproduktion) zielt auf die Integration verschiedener Simulationsansätze der Digitalen Fabrik zur Energiesimulation bei Produktions- und Logistikprozessen. Dabei erfolgt eine Kopplung diskreter Ablaufsimulationen und kontinuierlicher thermodynamischer Simulationen mittels einer Interoperabilitätsplattform mit dem Ziel des Vergleichs verschiedener Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungskonzepte [257], [258]. Das Projekt ETA Fabrik (Energieeffiziente Modelfabrik der Zukunft) untersucht verschiedene interdisziplinäre Ansätze zur Reduktion des Energieverbrauchs anhand des Anwendungsszenarios Metallbearbeitung. Ein Bestandteil ist dabei die virtuelle energieeffiziente Fabrik zur Simulation der elektrischen und thermischen Energieverbräuche als Grundlage zum Einpflegen von Optimierungsmaßnahmen ohne Bezug zur Produktionsplanung [356].

Es kann abschließend festgestellt werden, dass in aktuellen Forschungsaktivitäten der Schwerpunkt auf eine ganzheitliche Betrachtungsweise des Gesamtsystems Fabrik gelegt wird, so dass eine integrierte Betrachtung von Gebäude- und Anlagentechnik angestrebt wird.

Zudem besitzt die Mehrheit der untersuchten Forschungsansätze einen Bezug zur Produktionsplanung oder Produktionssteuerung und betrachtet dabei mehrere Energieformen. Die Simulation der Energieverbräuche wird dabei häufig mit Hilfe erweiterter Materialflusssimulationen oder mittels spezifischer Anwendungstools durchgeführt. Die Evaluation der eingepflegten energieeffizienzsteigernder Maßnahmen erfolgt dabei häufig technisch und wirtschaftlich und nur selten ökologisch.

TEIL 2: CONCEPT DEVELOPMENT

Handlungsbedarf und Anforderungsanalyse
Methodischer Konzeptentwurf
Softwaretechnische Implementierung

KAPITEL 4: HANDLUNGSBEDARF UND ANFORDERUNGSANALYSE

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Grundlagen des zweiten Teils der vorliegenden Arbeit (*Concept Development*) erarbeitet. Hierfür werden derzeitige Defizite in den einzelnen Themenbereichen identifiziert und potentielle Handlungsfelder aufgezeigt. Die darauf basierende Formulierung von Anforderungen an die zu entwickelnde Methode stellt im Kontext des DRM-Frameworks den Beginn der *Prescriptive study* dar.

4.1. Defizite und Ableitung von Handlungsfeldern

Auf Basis des aufgearbeiteten Stands der Technik und Forschung werden im Rahmen dieses Kapitels zur Konkretisierung des Forschungsbedarfs Ergebnisse aus einer empirisch durchgeföhrten Untersuchung über die derzeitige Vorgehensweise bei der Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen vorgestellt. Abschließend erfolgt die Identifikation potentieller Handlungsfelder, die als Basis für die Formulierung von Anforderungen an die zu entwickelnde Methode dienen.

4.1.1. Empirische Untersuchung zur Konkretisierung des Forschungsbedarfs

Die Produktionsplanung eines OEMs fungiert als Bindeglied zwischen der Produktentwicklung und der Produktherstellung und befasst sich mit der gewerkespezifischen Planung und Absicherung einzelner Maschinen, gesamter Produktionssysteme bis zu ganzen Produktionsstätten (vgl. Kapitel 2.1.1). Der einzelne Produktionsplaner ist dabei für die operative Ausgestaltung einer Produktionsanlage verantwortlich und bestimmt somit deren wesentliche Eigenschaften in der Betriebsphase.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde unter den Produktionsplanern des Gewerks Montage in dem Automobilproduktionswerk der Daimler AG in Sindelfingen eine Umfrage durchgeführt, um die derzeitigen Planungsprämissen und den Stellenwert des Themas Energieeffizienz im Planungs- und Absicherungsprozess automatisierter Montageanlagen festzustellen. Hierfür wurde ein Umfrageformular (vgl. Anhang A) auf Basis gängiger Fachliteratur entwickelt (bspw. [357]) und digital an 64 Produktionsplaner und -verantwortliche versendet, wobei 18 auswertbare Formulare als Antwort erhalten worden sind. Als Vorlage fungierte eine Umfrage, die im Rahmen eines ähnlichen Forschungsvorhabens bereits vor einigen Jahren

gewerkeübergreifend in einem Automobilwerk durchgeführt worden ist (vgl. [39]). Folgend wird der Hintergrund der einzelnen Fragestellungen erläutert und eine Analyse und Interpretation der Antworten vorgenommen.

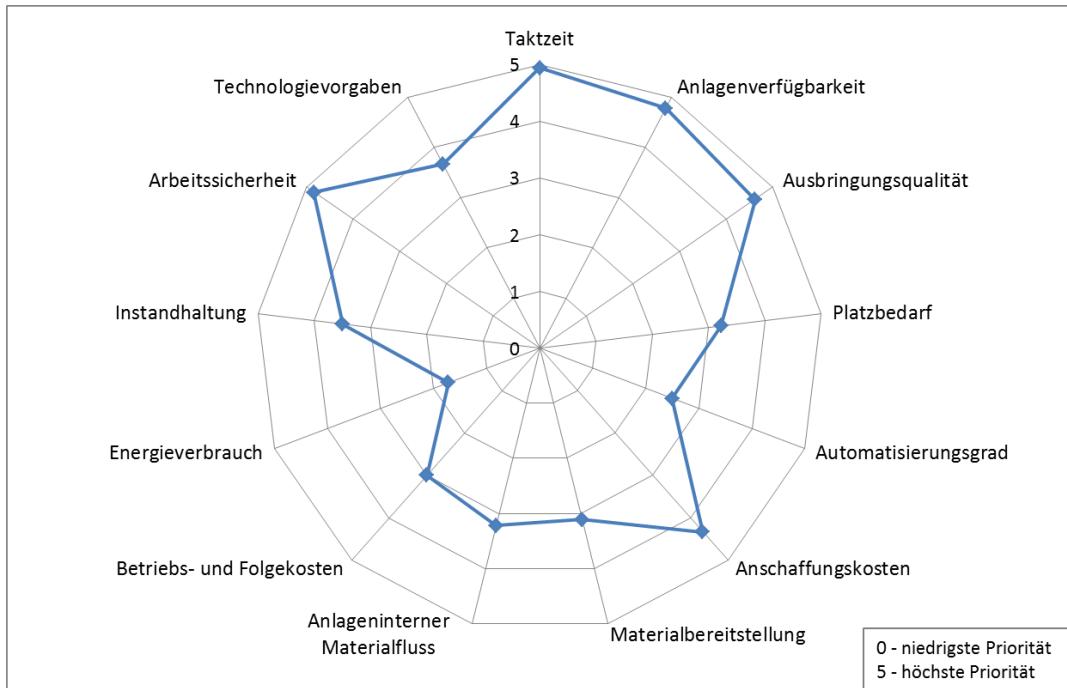


Abbildung 4-1: Priorisierte Planungsprämissen bei der Planung automatisierter Montageanlagen
(interne Datenerhebung Daimler AG)

Frage 1: Bitte gewichten Sie die folgenden Planungsvorgaben hinsichtlich ihrer Bedeutung für Ihre Planungsaktivitäten.

Für eine individuelle Bewertung der Priorität einzelner Planungsaspekte wurden produktionstechnische, ökonomische und ökologische Kriterien als Antwortmöglichkeiten bei der Fragestellung vorgegeben und bei der Auswertung der Mittelwert aller Gewichtungen berechnet. Erwartungsgemäß wird den produktionstechnischen Kriterien Taktzeit, Anlagenverfügbarkeit und Ausbringungsqualität eine hohe Bedeutung beigemessen (vgl. Abbildung 4-1). Dass die Planungsprämissen Arbeitssicherheit ein dominantes Kriterium darstellt ist nachvollziehbar, da sie eine wesentliche Rolle bei der Anlagenabnahme, also bei Gefahrenübergang vom GU zum OEM darstellt. Zudem können technologische Planungsvorgaben (Fügetechnologie, etc.) sowie die Instandhaltung als dominante Kriterien identifiziert werden. Unter ökonomischen Gesichtspunkten überwiegen die Anschaffungskosten gegenüber den Betriebs- und Folgekosten. Der Energieverbrauch spielt als Planungsprämissen, wie aus der Literaturanalyse abgeleitet, nur eine sehr untergeordnete Rolle und stellt das Kriterium mit der geringsten Gewichtung dar.

Frage 2: Welche Faktoren und Hilfsmittel können zu einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung beitragen? Bitte gewichten Sie die Faktoren bzgl. ihres Potentials.

Diese Frage zielte auf die Identifikation potentieller Faktoren und Hilfsmittel zur Gewährleistung der technischen Realisierbarkeit einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung. Wesentliche Elemente des Anlagenplanungs- und -realisierungsprozesses wurden als Faktoren ausgewählt und den Planern als Auswahlmöglichkeiten zur Priorisierung präsentiert. Dargestellt wird der gemittelte Wert der priorisierten Antworten (Balken) sowie der gemittelte Wert der neun höchsten bzw. neun niedrigsten Angaben als Bereich (Linie) für die einzelnen Antwortmöglichkeiten.

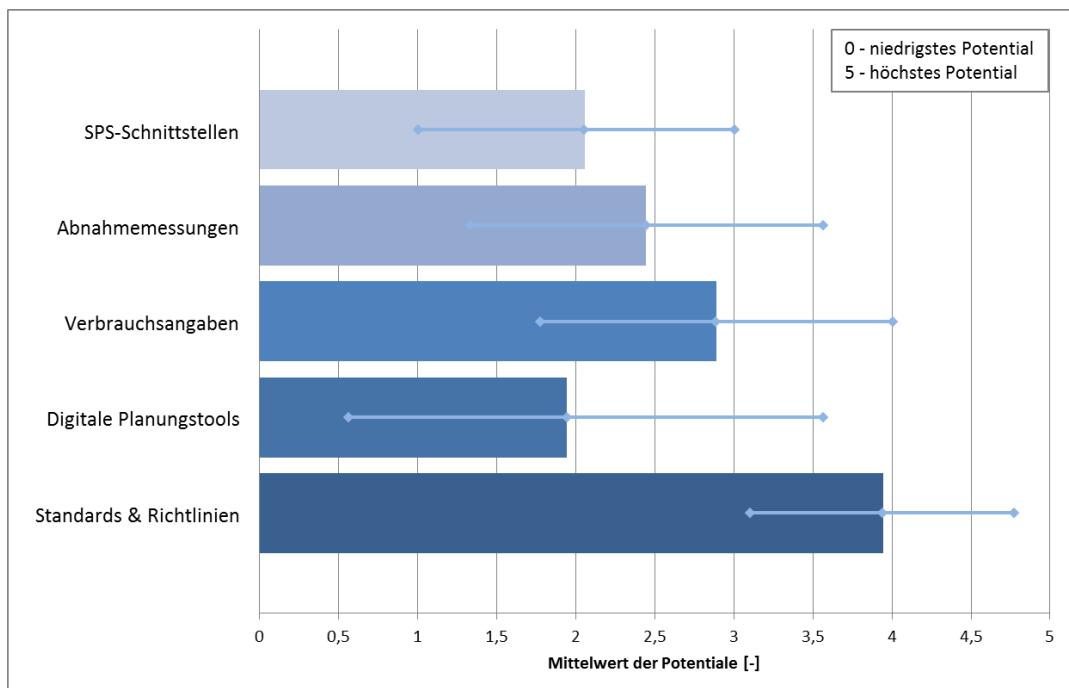


Abbildung 4-2: Potentielle Faktoren und Hilfsmittel zur Unterstützung einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung (interne Datenerhebung Daimler AG)

Aus den gemittelten priorisierten Antworten geht hervor, dass nach Ansicht der Planer für eine technische Realisierung einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung die Schaffung von Standards und Richtlinien elementar ist (vgl. Abbildung 4-2). Hieraus kann abgeleitet werden, dass Bestrebungen hinsichtlich der Formalisierung zur technischen Integration des Themas Energieeffizienz in den Anlagenplanungs- und -realisierungsprozess gewünscht sind. Angaben über den Energieverbrauch einzelner Anlagenbestandteile oder -komponenten können zudem einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung zuträglich sein.

Digitale Planungstools zur Unterstützung eines energieeffizienzorientierten Anlagenplanungsprozesses werden allerdings nur mit einem sehr geringen gemittelten Potential bewertet. Die Gründe hierfür könnten in einer Skepsis gegenüber der

Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse in die Realität (i.e. begrenzte Simulationsgenauigkeit) oder der begrenzten Aussagekraft von Simulationsstudien (i.e. Idealisierte Simulationsannahmen, Vernachlässigung von Anlagenalterungsprozessen, etc.) liegen. Bei genauerer Analyse der Daten wird allerdings augenscheinlich, dass die Planer bei dieser Bewertung ein uneinheitliches Meinungsbild abgeben. Der Scope der gemittelten höchsten bzw. niedrigsten Gewichtungen umfasst einen relativ großen Bereich, der durch eine sehr diametral verteilte Auffassung bei der Beurteilung des Potentials digitaler Planungstools entsteht: ein Teil der Planer schätzen also das Potential als hoch ein während der andere Teil der Planer das Potential als sehr gering einschätzt.

Frage 3: In einer Montagehalle gibt es vier wesentliche Kategorien von Energieverbrauchern: Anlagentechnik, Be- und Entlüftung, IT und Beleuchtung. Bitte schätzen Sie die prozentualen Anteile der vier Kategorien am Gesamtenergiebedarf einer Montagehalle.

Zur Verdeutlichung der Relevanz des Energieverbrauchs von Montageanlagen am Gesamtenergieverbrauch einer Montagehalle wurden die Planer gebeten, den Anteil der vorgegebenen wesentlichen Verbrauchskategorien Anlagentechnik, Be- und Entlüftung, IT und Beleuchtung am Gesamtverbrauch einer Montagehalle auf Basis einer Schätzung zu quantifizieren (vgl. Abbildung 4-3). Die vier wesentlichen Verbrauchskategorien sind hierbei für näherungsweise 85% des Gesamtenergieverbrauchs einer Montagehalle verantwortlich [358].

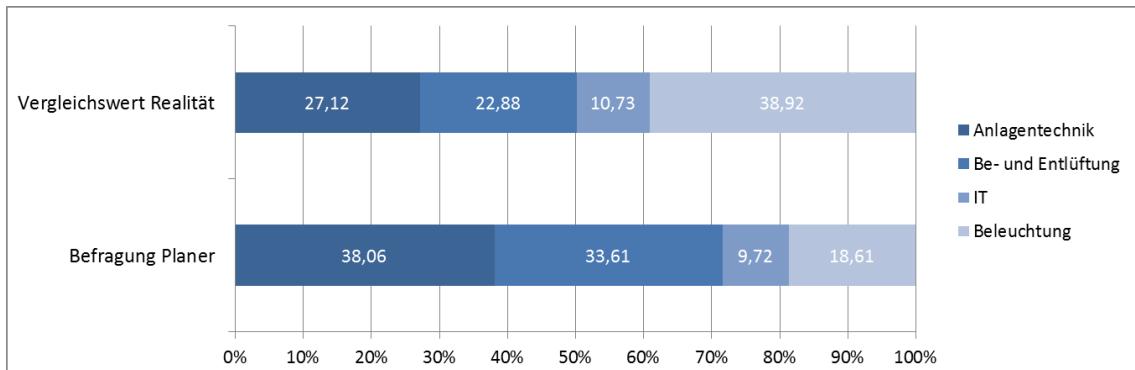


Abbildung 4-3: Anteile der wesentlichen Kategorien von Energieverbrauchern am Gesamtenergieverbrauch einer Montagehalle (interne Datenerhebung Daimler AG und adaptierte Vergleichswerte aus [236])

Aus den quantifizierten Schätzwerten ist zu erkennen, dass die Planer den Anteil des Energieverbrauchs der Anlagentechnik bei der Betrachtung des Mittelwerts als signifikanten Bestandteil des Gesamtenergieverbrauchs einer Montagehalle einstufen. Bei einer genaueren Betrachtung der individuellen Schätzwerte fällt allerdings auf, dass sich der Mittelwert aus einer stark verteilten Datenbasis ergibt (Standardabweichung 17.81%). Dies lässt den Schluss zu, dass der Anteil des Energieverbrauchs der Anlagentechnik am Gesamtenergieverbrauch einer Montagehalle entweder stark über- oder unterschätzt wird. Einen signifikanten

Unterschied zwischen dem gemittelten Schätzwert der Planer und der adaptierten Vergleichswerte besteht darüber hinaus in der Kategorie Beleuchtung, die vonseiten der Planer stark unterschätzt wird. Ein Grund hierfür könnte in der Unkenntnis der hohen Anforderungen in den stark regulierten Beleuchtungsvorschriften für produzierende Betriebe liegen.

Frage 4: Wo sehen Sie die wesentlichen Hebel und Ansatzpunkte für die Etablierung eines energieeffizienzorientierten Anlagenplanungsprozesses?

Für eine Identifikation der wesentlichen methodischen Hebel- und Ansatzpunkte zur Etablierung eines energieeffizienzorientierten Anlagenplanungsprozesses sollte auf die Erfahrung und individuelle Kompetenz der Planer zurückgegriffen werden. Hierbei wurden potentielle methodische Stellhebel bei der Fragestellung vorgegeben, wobei der Möglichkeit zum Hinzufügen weiterer Stellhebel Rechnung getragen wurde.

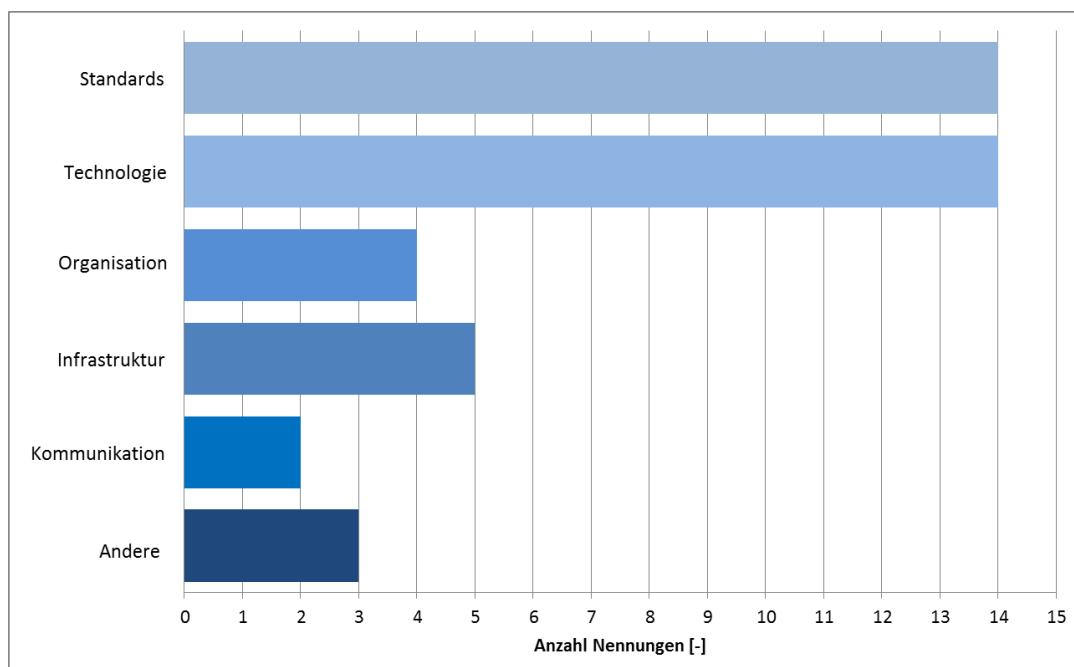


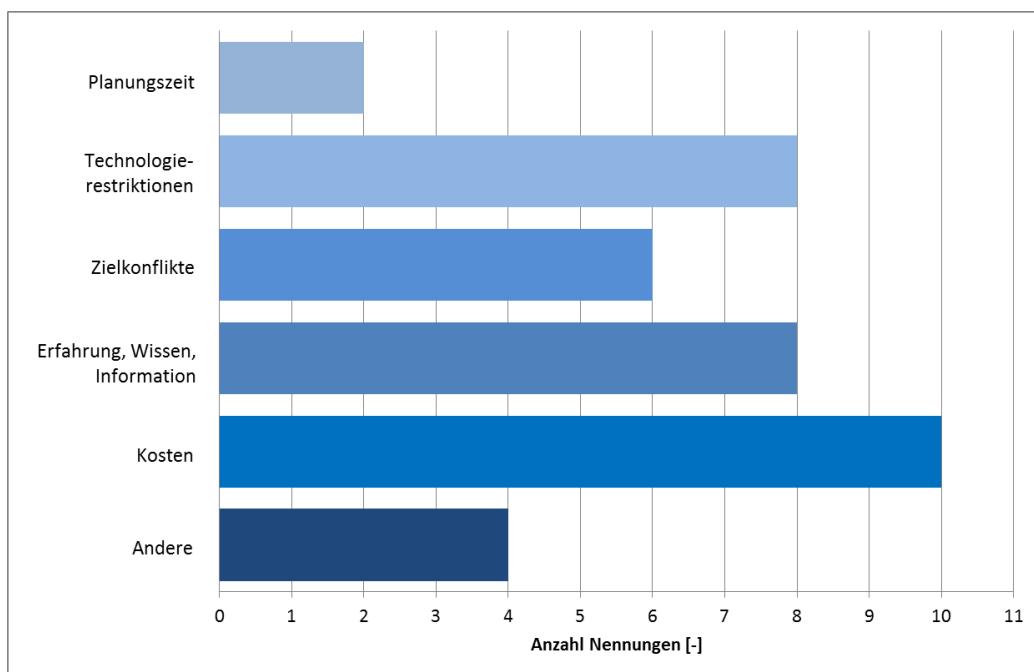
Abbildung 4-4: Wesentliche Stellhebel zur methodischen Etablierung eines energieeffizienzorientierten Anlagenplanungsprozesses (interne Datenerhebung Daimler AG)

Aus den Antworten der Planer ist ersichtlich, dass die beiden Faktoren Standards und Technologie als vielversprechende Ansatzpunkte zur Etablierung eines energieeffizienzorientierten Anlagenplanungsprozesses eingeordnet werden (vgl. Abbildung 4-4). Die Schaffung von Standards (Lastenhefte, Designrichtlinien, etc.) erhöht aus Planersicht offensichtlich die Wahrscheinlichkeit einer Berücksichtigung von Aspekten der Energieeffizienz im Planungsprozess. Die Verwendung energieeffizienter Technologien (bspw. energieeffiziente Motoren) kann ebenfalls einen wesentlichen Beitrag zu einem energieeffizienzorientierten Anlagenplanungsprozess leisten. Unter den freien

Antwortmöglichkeiten wurden unter anderem vermehrt die Simulation bzw. Offline-Programmierung oder manuelle Low Cost-Lösungen als potentielle Ansatzpunkte genannt.

Frage 5: Wo sehen Sie die größten Hemmnisse bei der Umsetzung einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung?

Zur Identifikation potentieller Hemmnisse für die methodische Umsetzung einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung sollte ebenfalls auf die Erfahrung der Planer zurückgegriffen werden, um mögliche Schwachstellen bei der Implementierung im Vorfeld zu erkennen. Den Planern wurden potentielle Hemmnisse vorgeben, wobei die Möglichkeit zur Erweiterung um zusätzliche Antwortmöglichkeiten gegeben war.



**Abbildung 4-5: Hemmnisse bei der Umsetzung einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung
(interne Datenerhebung Daimler AG)**

Als wesentliche Hemmnisse für eine methodische Umsetzung aus Planersicht wurden Kosten, Technologierestriktionen und Erfahrung, Wissen und Information genannt (vgl. Abbildung 4-5). Die Kosten sind im Planungsprozess von großer Bedeutung und zusätzliche Planungsaufwände, die oftmals mit einer Inanspruchnahme außerplanmäßiger Zeit- und Budgetkapazitäten einhergehen, könnten bei den Planern zu einer unzureichenden Akzeptanz und Ablehnung führen. Aufgrund von Technologierestriktionen sind die Ausgestaltungsmöglichkeiten der Planer von vornherein beschränkt, so dass die Möglichkeit, bspw. zur Verwendung einer energieeffizienten Fügetechnologie, nicht gegeben ist. Mangelnde Erfahrung, Wissen und Information deuten auf eine unzureichende Transparenz bzgl. des Themas Energieeffizienz von Produktionsanlagen in der Planung hin. Zudem könnte der Informationsrückfluss von Erfahrungswerten von den Anlagenbetreibern und

Instandhaltern aus der operativen Produktion hier Abhilfe schaffen. Hierfür spricht auch die vermehrt in den freien Antwortmöglichkeiten gestellte Forderung nach einer systematischen Erfassung und Bereitstellung von Best-Practice Beispielen für eine energieeffiziente Anlagengestaltung.

Frage 6: Werden derzeit bei der Anlagenvergabe Konzepte der ganzheitlichen Kostenbetrachtung über den gesamten Lebenszyklus der Anlage (TCO – Total Cost of Ownership oder LCC – Life Cycle Costing) miteinbezogen?

Diese Frage diente der Feststellung der gängigen Praxis im Planungsprozess automatisierter Montageanlagen hinsichtlich der Verwendung ganzheitlicher Kostenbetrachtungskonzepte. Bei dieser reinen Entscheidungsfrage wurden die Antwortmöglichkeiten vorgeben, wobei im Fall einer vereinzelten Anwendung von ganzheitlichen Kostenbetrachtungskonzepten die Häufigkeit der Anwendung angegeben werden sollte.

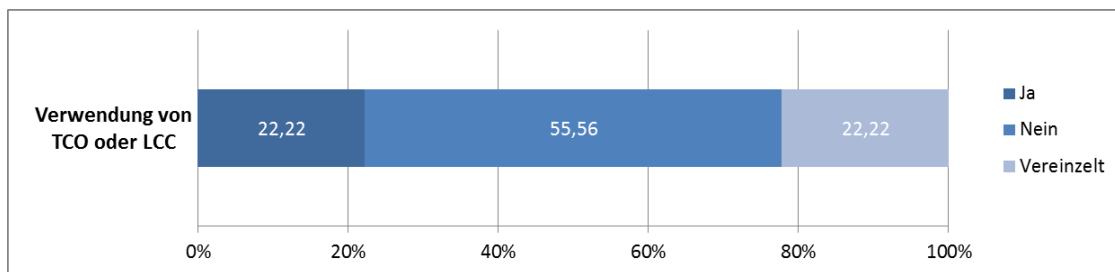


Abbildung 4-6: Verwendung von ganzheitlichen Kostenbetrachtungskonzepten in der Praxis bei der Vergabe automatisierter Montageanlagen (interne Datenerhebung Daimler AG)

Es kann festgestellt werden, dass, wie aus der Literaturanalyse abgeleitet, Konzepte der ganzheitlichen Kostenbetrachtung überwiegend noch nicht in der industriellen Praxis eingesetzt werden (vgl. Abbildung 4-6). Bei der vereinzelten Anwendung von TCO- oder LCC-Konzepten erfolgte die Anwendung auch nur in einem geringen Ausmaß (maximal 30%). Dies kann zum einen auf die fehlende Transparenz der Betriebs- und Folgekosten zur Anlagenlaufzeit oder zum anderen auf das vorherrschende Kostenparadigma zurückgeführt werden, das eine Minimierung des Anschaffungs- bzw. Einstandspreises einer Produktionsanlage vorsieht.

4.1.2. Identifikation von Handlungsfeldern

Auf Basis der abschließenden Bewertung des Stands der Technik und Forschung und der empirischen Untersuchung zur Konkretisierung des Forschungsbedarfs können sowohl technische als auch methodische bzw. organisatorische Handlungsfelder identifiziert werden.

Der Schwerpunkt unter *technischen* Gesichtspunkten besteht in der Realisierung einer Möglichkeit zur Berechnung, Visualisierung, Analyse und Optimierung der produktionsprozessbezogenen Energieverbräuche automatisierter Montageanlagen auf Basis

eines virtuellen Anlagenmodells. Die für die Durchführung automatisierter Montageoperationen relevanten Endenergeträger Druckluft und elektrische Energie müssen für die einzelnen Akteure im Rahmen der Absicherungsprozesse mit Tools der Digitalen Fabrik abgebildet werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei einer konstruktiven und auslegungstechnischen Optimierung des Energieverbrauchs häufig Änderungen an den 3D-Konstruktionsdaten der automatisierten Montageanlage vorgenommen werden müssen. Daher ist die Verwendung eines anpassungsfähigen 3D-Geometriemodells als Basis der Energieberechnung und -visualisierung erforderlich. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist eine Energieberechnung und -visualisierung automatisierter Montageanlagen für die Automobilproduktion mit einer anschließenden Optimierung des Energieverbrauchs mit Hilfe der physikbasierten Simulation im Rahmen von Absicherungsprozessen noch nicht wissenschaftlich untersucht worden.

Aus *organisatorischer* bzw. *methodischer* Sicht können darüber hinaus mehrere Handlungsfelder identifiziert werden. Obwohl viele der themenverwandten Forschungsvorhaben einen Bezug zur Produktionsplanung bzw. -steuerung aufweisen, wird der Entwicklungsprozess des Betriebsmittels für eine Optimierung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase nicht thematisiert. Es besteht kein Konzept, das die Möglichkeiten zur Beeinflussung einer automatisierten Montageanlage für die Automobilproduktion während ihrer Entwicklung für eine energieeffizienzorientierte Planung und Auslegung darstellt. Zudem müssen methodische oder organisatorische Reize vonseiten des OEMs an den GU etabliert werden, um eine automatisierte Montageanlage für eine spezifische Montageaufgabe mit einem möglichst geringen Energieverbrauch zu entwickeln.

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen umfassen derzeitige produktlebenszyklusübergreifende Ansätze Änderungen während des Anlagenentwicklungsprozesses und den damit verbundenen Aufwänden nicht explizit oder nur unzureichend. Derzeitige Ansätze sind dabei nicht direkt auf den Anwendungsfall von automatisierten Montageanlagen im Automobilbau übertragbar, da keine direkten Erlöse mit den gefertigten Halbzeugen erzielt werden können. Hier besteht Handlungsbedarf im Hinblick auf die Schaffung einer Möglichkeit zur Miteinbeziehung von Änderungskosten während des Produktentwicklungsprozesses und der Auswirkung der damit verbundenen Energiespareffekte auf die Betriebskosten für den Anlagenbetreiber ohne explizite Berücksichtigung des finanziellen Benefits durch eine gestiegene Produktivität.

4.2. Formulierung von Anforderungen

Bei der Formulierung von Anforderungen an die Methode zur energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen im Rahmen der physikbasierten mechanischen Absicherung kann zwischen methodischen und technischen Anforderungen unterschieden werden (vgl. Tabelle 4-2). Auf Basis der bisherigen Vorgehensweise bei der

Planung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen werden die methodischen Anforderungen aufgestellt, wohingegen die technischen Anforderungen auf Überlegungen hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit der Methode beruhen.

Anforderungsformulierung	
M.1	Moderate Erhöhung des Planungs- und Auslegungsaufwands
M.2	Ermöglichung einer strukturierten Energieverbrauchsanalyse einer Gesamtanlage
M.3	Identifikation und Integration von EEIMs in Planungs- und Auslegungsvorgänge
M.4	Ermöglichung von Energieeffizienzvergleichen zwischen Auslegungsvarianten von Komponenten, Funktionsgruppen und der Gesamtanlage
M.5	Ermöglichung von lebenszyklusübergreifenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen unterschiedlicher Anlagenvarianten
T.1	Abbildung der Prozessleistungen und der Energieverbräuche elektrischer und pneumatischer Aktoren
T.2	Weiterverwendung des Simulationsmodells für die folgenden Absicherungsprozesse (VIBN)
T.3	Spezifische Anforderungen an die Simulationsumgebung zur physikbasierten Simulation

Tabelle 4-1: Zusammenstellung der Anforderungen an die Methode zur energieeffizienzorientierten Auslegung automatisierter Montageanlagen im Rahmen der physikbasierten mechanischen Absicherung

Beim Aufstellen der Anforderungen können fünf methodische Anforderungen formuliert werden. Zunächst muss die Methode einfach in den derzeitigen Prozess der mechanischen Absicherung integrierbar sein und möglichst geringen Mehraufwand in der Planung und Auslegung mit sich bringen (M.1). Allerdings kann ein gewisser Mehraufwand eingeräumt werden, da ein völlig neues Kriterium in den Planungs- und Absicherungsprozess integriert werden soll. Die zusätzlichen Planungs- und Absicherungsaufwände müssen in Form von zusätzlichen organisatorischen und inhaltlichen Aufgaben an die beteiligten Personen im Anlagenentwicklungsprozess zugewiesen werden.

Mit Hilfe der Methode muss es möglich sein, auf Basis eines existierenden Anlagendesigns eine strukturierte Energieverbrauchsanalyse durchzuführen (M.2). Hierfür müssen Vorgehensweisen und Hilfsmittel bereitgestellt werden, die eine Identifikation von Optimierungspotentialen hinsichtlich des Energieverbrauchs einer Montageanlage unterstützen. Eine wesentliche methodische Anforderung besteht darüber hinaus in der Integration von EEIMs in den Planungs- und Absicherungsprozess (M.3). Hierbei sind insbesondere Lösungsvorschläge bzgl. der Ausgestaltung der EEIM-Integration zu erarbeiten (bspw. wann ist es am vorteilhaftesten eine EEIM anzuwenden?, welche Informationen müssen für die EEIM-Umsetzung zusätzlich in welcher Form bereitgestellt werden?, welche Abstimmungsprozesse sind für eine EEIM-Integration erforderlich?).

Zudem muss eine Überprüfbarkeit der EEIM-Integration ermöglicht werden, d.h. ein Vergleich zwischen Auslegungsvarianten einzelner Komponenten, Funktionsgruppen sowie der

Gesamtanlage vor und nach einer EEIM-Integration (M.4). Dadurch soll ein relativer Vergleich unterschiedlicher Auslegungsvarianten ermöglicht werden, der eine Aussage über die Energieeffizienz einer Anlage, einer Funktionsgruppe oder einer Komponente erlaubt. Für eine abschließende Beurteilung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Auslegungsvarianten einer Gesamtanlage sowie deren Entwicklungskosten muss mittels der Methode eine lebenszyklusübergreifende Kostenbetrachtung ermöglicht werden (M.5). Diese ist zum Zweck einer verbesserten Entscheidungsfindung den beteiligten Entwicklungspartnern in kompakter Form bereitzustellen.

Neben den methodischen Anforderungen können drei technische Anforderungen identifiziert werden, die eine technische Umsetzbarkeit der Methode gewährleisten sollen. Zunächst sind mit der physikbasierten Simulation die Prozessleistungen der individuellen pneumatischen und elektrischen Aktoren in der Montagestation realitätsnah zu modellieren (T.1). Der Fokus liegt hierbei auf der Abbildung und Simulation der Prozessleistung einer energieverbrauchenden Komponente, da die Grundleistung (Versorgungsleistung), die die Komponenten in einen arbeitsbereiten Zustand versetzt, in der Regel invariant ist und im Rahmen von Auslegungstätigkeiten nicht beeinflusst werden kann. Des Weiteren muss das in der Methode verwendete Simulationsmodell für eine Weiterverarbeitung in dem anschließenden steuerungstechnischen Absicherungsprozess (VIBN) geeignet sein (T.2). Hierfür ist sicherzustellen, dass das in der Methode verwendete Simulationsmodell als erweitertes 3D-Geometriemodell der Anlage zum Zweck der Visualisierung in der VIBN verwendet werden kann (vgl. Kapitel 2.1.2).

Eine wesentliche technische Anforderung besteht darüber hinaus in den erforderlichen technischen Spezifika gegenüber der physikbasierten Simulationsumgebung bzw. der Physik-Engine (T.3). Diese umfassen bspw. Spezifikationen hinsichtlich der Bedien- und Erweiterbarkeit oder die korrekte simulationsgestützte Abbildung automatisierter Montageanlagen im Rahmen einer dynamischen Mehrkörpersimulation (vgl. Tabelle 4-2). Mittels der physikbasierten Simulationsumgebung müssen die automatisierten Montageanlagen und die korrespondierenden Montageprozesse abgebildet werden können. Hierbei ist die Abbildung der konvexen oder konkaven (starren) Simulationskörper sowie die Definition und Abbildung kinematischer Ketten mit Hilfe von Translations-, Rotations- und Kugelgelenken elementar. Darüber hinaus muss der Montageprozess auf Basis der Definition eines Taktzeitdiagramms ereignisgesteuert oder zeitgesteuert abbildbar sein. Die physikbasierte Simulationsumgebung sollte des Weiteren eine einfache Handhabung und Erweiterbarkeit ermöglichen. Zum einen sollen die kinematischen Ketten in Form einer verzweigten Baumstruktur systematisch dargestellt und zum anderen die Vorgänge der automatisierten Montageanlage interaktiv visualisiert werden können (bspw. Blickwinkeländerung, Zoom-Funktionalität). Die möglichst einfache Erweiterbarkeit der physikbasierten Simulationsumgebung um zusätzliche Umfänge oder Module zur Berechnung

und Visualisierung des Energieverbrauchs ist eine elementare technische Anforderung. Zur Ausgestaltung der methodischen Prozesskette sind zudem umfangreiche Schnittstellen für den Datenimport- und -export unabdingbar.

Art	Technische Anforderungsspezifikation
Physikbasierte Simulationsumgebung	Abbildung von Translations-, Rotations- und Kugelgelenken
	Abbildung kinematischer Ketten (offen, teilw. geschlossen, geschlossen)
	Abbildung konvexer/konkaver Körper
	Abbildung von Prozessreihenfolgen (Zeit/Ereignisgesteuert)
Usability	Darstellung verzweigter Baumstrukturen
	Erweiterbarkeit (API)
	Schnittstellen (3D-Datenimport/-export, Simulationsergebnisse-Export)
Physik-Engine	Interaktive Visualisierung
	Kinematische Positionsgenauigkeit
	Anpassbare Schrittweite (Zeit/Iteration)
	Echtzeitfähigkeit
	Kollisionsdetektion und -behandlung
	Dynamische Kraftübertragung

Tabelle 4-2: Technische Anforderungsspezifikation bzgl. der physikbasierten Simulationsumgebung bzw. der Physik-Engine

Die zu verwendende Physik-Engine muss neben einer kinematischen Positionsgenauigkeit die dynamische Kraftübertragung zwischen den einzelnen Körpern sowie zwischen Körpern und Gelenken gewährleisten. Zudem muss eine hinreichend genaue Kollisionsdetektion und -behandlung von der Engine bereitgestellt werden. Zur Steigerung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse soll die Physik-Engine die Anpassung der Schrittweiten, sowohl der zeitlichen Simulationsschrittweiten, als auch der Anzahl der Iterationsschritte bei der Aktualisierung des Systemzustands ermöglichen. Für die Weiterverwendung im Rahmen einer physikbasierten VIBN soll darüber hinaus eine echtzeitfähige Physik-Engine verwendet werden.

KAPITEL 5: METHODISCHER KONZEPTENTWURF

Dieses Kapitel umfasst unter Bezugnahme auf das DRM-Framework die Fortsetzung der im vorigen Kapitel begonnenen *Prescriptive study* in Form des methodischen Konzeptentwurfs für eine energieeffizienzorientierte Auslegung automatisierter Montageanlagen. Der methodische Konzeptentwurf umfasst dabei ausschließlich die Darstellung der einzelnen Prozessschritte und ihre inhaltliche Ausgestaltung. Eine detaillierte Betrachtung der technischen Umsetzung der dargestellten Inhalte der einzelnen Prozessschritte folgt in Kapitel 6.

5.1. Einführung und Gesamtüberblick

Die Methode besteht aus fünf Prozessschritten, die bei der Durchführung der Methode sequentiell durchlaufen werden (vgl. Abbildung 5-1). Dabei bestehen die einzelnen Prozessschritte aus einer individuellen Anzahl von Prozessstufen mit höherem Detaillierungsgrad. Die einzelnen Prozessschritte mit ihren jeweiligen Prozessstufen werden mit ihren detaillierten Ein- und Ausgängen durch die Prozessmodellierungssprache BPMN 2.0 zu Beginn jedes Prozessschrittes dargestellt und anschließend ausführlich erläutert. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der detaillierten Erläuterung der für die Durchführung der Methode erforderlichen Tätigkeiten, während die Beschreibung der Anwendung der Methodik auf industrielle Anwendungsfälle in Kapitel 7 vorgenommen wird. Eine auszugsweise Beschreibung dieser Methode wurde in leicht abgewandelter Form in [359] veröffentlicht.

Zur Durchführung der Methode sind zusätzlich verschiedene Dokumente aus dem Bereich der operativen Produktionsplanung sowie Entwicklungsdokumente aus dem Anlagenentwicklungsprozess erforderlich. Aus diesen Dokumenten werden Informationen extrahiert, die für die Durchführung der einzelnen Prozessschritte unabdingbar sind. Daher wird vereinfachend angenommen, dass diese Dokumente in vollem Umfang zur Verfügung stehen und zugänglich sind. Zudem wird vorausgesetzt, dass ein detailliertes 3D-Geometriemodell der automatisierten Montageanlage für eine Weiterverwendung in einer physikbasierten Simulationsumgebung vorliegt.

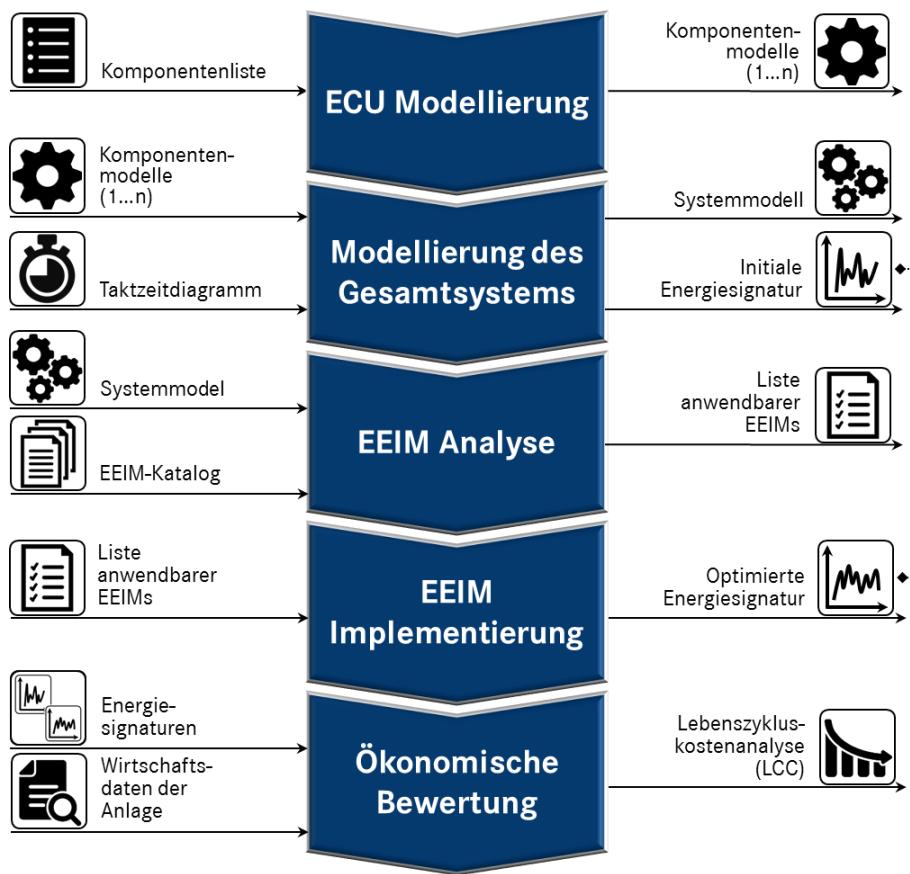


Abbildung 5-1: Methodik zur energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung bei der physikbasierten mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen

Eingangsgrößen für die Methode sind neben Dokumenten der Produktionsplanung und Konstruktionsdaten der automatisierten Montageanlage die aufbereiteten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz für den Anwendungsfall automatisierter Montageanlagen (vgl. Kapitel 3.2.2). Die Ausgangsgrößen der Methode sind neben den physikbasierten Systemmodellen des ursprünglichen Anlagendesigns sowie des energieeffizienten Anlagendesigns zudem eine produktlebenszyklusübergreifende Wirtschaftlichkeitsanalyse in Form einer LCC, die einen relativen Vergleich der beiden Anlagenauslegungsvarianten hinsichtlich des ökonomischen Nutzens aus Sicht des Anlagenbetreibers bzw. Entwicklungsauftraggebers ermöglicht.

5.2. Modellierung energieverbrauchender Anlagenkomponenten

Im initialen Prozessschritt der Methode werden die physikbasierten Komponentenmodelle für die relevanten ECUs auf Basis der CAD-Daten der Anlage entwickelt (ECU Modellierung). Mittels der physikbasierten Komponentenmodelle kann der Energieverbrauch der einzelnen Komponenten für individuelle Anwendungsfälle ermittelt werden. Die Erstellung der physikbasierten Komponentenmodelle erfolgt mittels einer dreischrittigen Vorgehensweise

ausgehend von einem Geometriedatentransfer in die physikbasierte Simulationsumgebung über die ECU-Identifikation bis zur Modellierung der individuellen ECU Energieverbräuche (vgl. Abbildung 5-2).

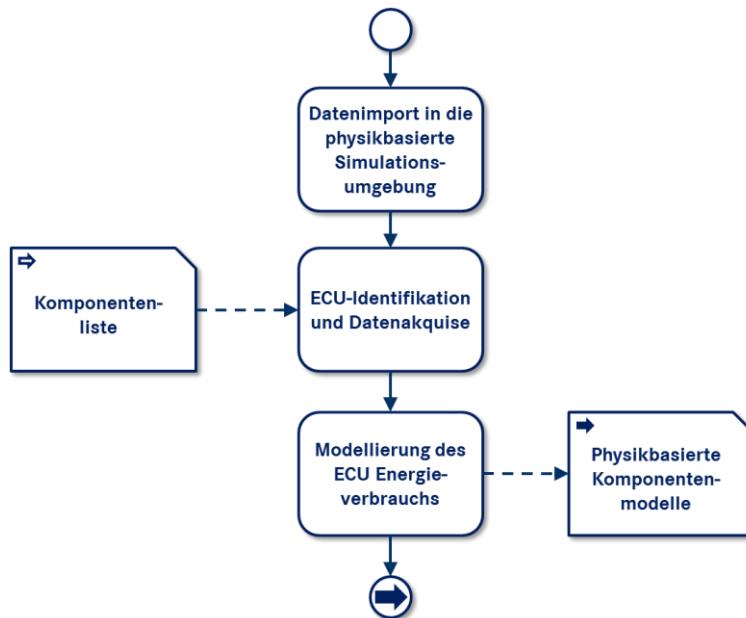


Abbildung 5-2: BPMN-Darstellung Prozessschritt ECU-Modellierung

5.2.1. Datenimport in die physikbasierte Simulationsumgebung

Zunächst werden die CAD-Anlagendaten aus dem Konstruktionstool oder dem Tool zur konventionellen kinematischen Anlagensimulation in die physikbasierte Simulationsumgebung transferiert. Dies kann bspw. durch die Verwendung standardisierter Datenformate (STEP-Format, STL-Format) realisiert werden. Hierbei muss eine größtmögliche Abbildungsgenauigkeit des ursprünglichen Konstruktionsmodells angestrebt werden, da auf Basis dieser Daten die energieeffizienzorientierten Optimierungen abgeleitet und implementiert werden. Da die Optimierungen in Form von Adaptionen an der Konstruktion oder Auslegung der Montageanlagen vorgenommen werden, ist eine solch feingranulare Betrachtung unter Verwendung der Konstruktionsdaten erforderlich. Idealerweise sind nach dem Datenimport in das Tool zur physikbasierten Simulation die einzelnen Komponenten mit ihren individuellen Bestandteilen als Einzelteile identifizierbar und somit auch adaptierbar.

Der Aufwand für den Datenimport in die physikbasierte Simulationsumgebung hängt von den Exportfunktionalitäten des Quellentools sowie der Datenqualität des Quellenmodells ab. Sind die Quelldaten korrupt oder unzureichend bedatet, ist eine manuelle Anreicherung der Daten notwendig. Hierbei ist die Angabe der Bauteileigenschaften, bspw. der korrekten Bauteilmassen, der Bauteilschwerpunkte und der sich daraus ergebenen Massenträgheitsmomente elementar für die korrekte Berechnung des physikalischen Verhaltens der Anlagenbestandteile durch die Physik-Engine. Des Weiteren ist zusätzlich die

Parametrierung der physikbasierten Simulationsumgebung zur Durchführung einer Simulation erforderlich. Beispielsweise ist hier die Angabe der Simulationsschrittweite oder des CFM-Parameters erforderlich oder die Auswahl bzw. Deaktivierung des Reibmodells der Physik-Engine notwendig, falls ein individuelles Reibmodell bei der Berechnung verwendet werden soll.

5.2.2. Komponentenidentifikation und Datenakquise

Auf Basis der Komponentenliste werden die individuellen ECUs identifiziert und die für die Modellierung des Energieverbrauchs mit Hilfe der physikbasierten Simulation erforderlichen Informationen aus den Datenblättern der Komponentenhersteller extrahiert. Hierbei wird eine Analyse und Klassifikation der einzelnen ECUs anhand der an die Methodik gestellten Anforderungen sowie des Betrachtungshorizonts vorgenommen. Folgend werden die einzelnen ECU-Typen am Beispiel von elektrischen Verbrauchern vorgestellt (vgl. Abbildung 5-3).

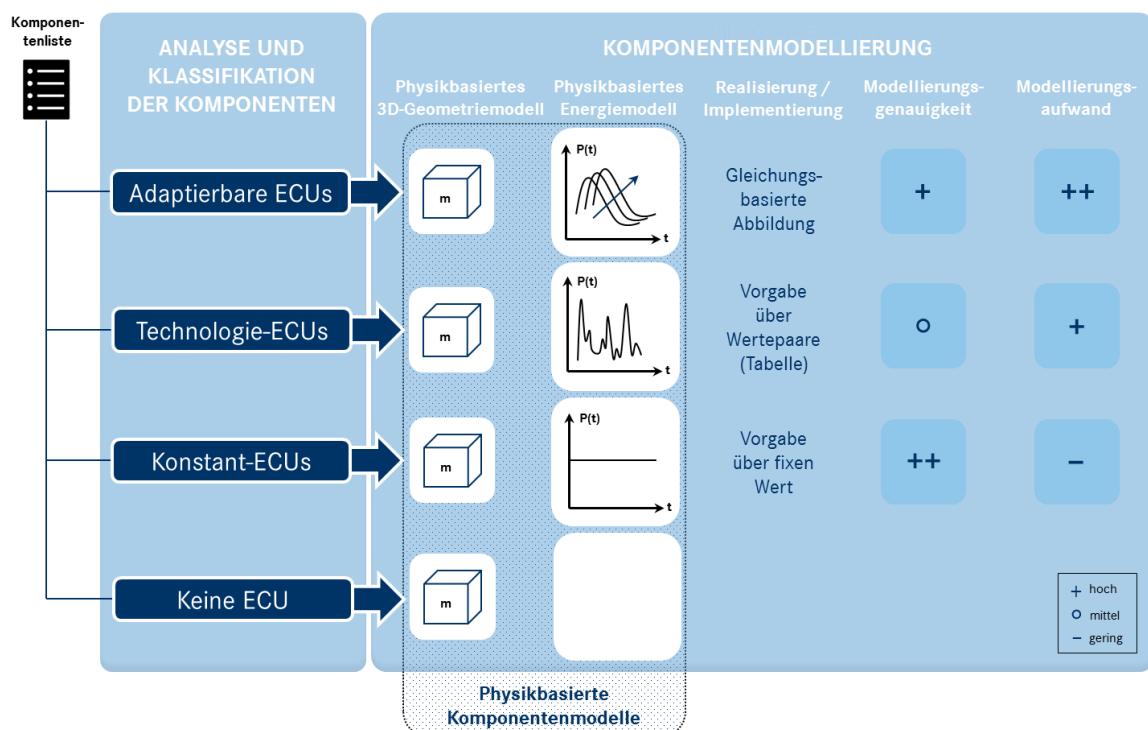


Abbildung 5-3: Klassifizierung und korrespondierende Modellierungstiefe der ECUs

Für alle geometrischen Komponenten der Montageanlage wird ein physikbasiertes 3D-Geometriemodell in der physikbasierten Simulationsumgebung erzeugt. Trägt die Komponente nicht zu dem Energieverbrauch der Anlage bei, ist kein physikbasiertes Energiemodell der Komponente erforderlich. Bei einem konstanten Verbraucher (bspw. einem Sensor), der permanent mit Energie versorgt werden muss, ist die Abbildung des Energieverbrauchs mittels eines konstanten Wertes möglich. Dieser konstante Verbrauchswert wird in jedem Zeitschritt in der Simulation berücksichtigt, unabhängig ob

Montageoperationen durchgeführt werden oder nicht. Für diese Komponenten kann daher ein zeitlich unabhängiger konstanter Verbrauchswert bei der Modellierung verwendet werden.

Bei den ECUs mit einem sich zeitlich ändernden Energieverbrauch kann eine Unterscheidung in Technologie-ECUs und Adaptierbare ECUs vorgenommen werden. Technologie-ECUs umfassen alle pneumatischen und elektrischen Verbraucher, die an einer technologischen Montageoperation (bspw. Fügeoperation) beteiligt sind. Exemplarisch können hier elektrisch oder pneumatisch angetriebene Schweißzangen genannt werden, deren Verbrauch sich über der Zeit stark ändert (bspw. Leistungsspitzen beim Setzen der Schweißpunkte). Allerdings sind diese ECUs nicht adaptierbar, da gemäß dem Betrachtungshorizont die Fügetechnologien bzw. -operationen als vorgegeben und somit invariant angenommen werden (vgl. Kapitel 3.1.2). Adaptierbare ECUs umfassen alle Energieverbraucher, die nicht an einer technologischen Montageoperation beteiligt sind und somit Potential für eine konstruktive oder auslegungstechnische Anpassung aufweisen. Exemplarisch können hier elektrische oder pneumatische Antriebe zur Bewegung oder Positionierung von Halbzeugen genannt werden. Je nach Anwendungsfall und Ausgestaltung weisen die adaptierbaren ECUs einen anwendungsspezifischen Energieverbrauch auf.

Zur Vorbereitung der Modellierung des ECU-Energieverbrauchs werden abschließend die für die Modellierung erforderlichen Parameter aus den Datenblättern der Komponentenhersteller extrahiert. Dabei handelt es sich für pneumatische Zylinder bspw. um die Ermittlung des Zylinderdurchmessers, dem Durchmesser der Kolbenstange und des maximalen Kolbenhubs oder für einen Drehstrommotor um die Bestimmung der Phasenverschiebung.

5.2.3. Modellierung des Energieverbrauchs einer Anlagenkomponente

Für die Modellierung des Energieverbrauchs eines ECUs ist sowohl der zeitliche Verlauf des individuellen Leistungsabgriffs sowie der absolute Energieverbrauch über einen definierten Zeitraum von Interesse (vgl. Kapitel 3.2.1). Basierend auf der ECU-Klassifikation wird die Modellierungstiefe für die physikbasierten Komponentenmodelle festgelegt.

Konstante ECUs können über einen fixen Wert modelliert werden, der für jeden Simulationsschritt berücksichtigt wird. Beispielsweise kann für einen Sensor der in dem Datenblatt vermerkte elektrische Energieverbrauch bei jedem Simulationsschritt beaufschlagt werden. Diese Beaufschlagung kann dezentral jedem konstanten ECU zugeordnet sein oder gesammelt in einem separaten Element in dem physikbasierten Simulationsmodell abgebildet werden. Der Modellierungsaufwand ist hierbei aufgrund der singulären Wertzuordnung sehr gering und die Modellierungsgenauigkeit dementsprechend hoch (vgl. Abbildung 5-3).

Eine Modellierung der Energieverbräuche von Technologie-ECUs kann vereinfacht aggregiert (bspw. für ein gesamtes Fügewerkzeug) über eine Wertetabelle erfolgen, die die zeitliche

Abhängigkeit des Energieverbrauchs der Montageoperation widerspiegelt. Eine solche Wertetabelle kann durch die Durchführungen von Messungen generiert werden, wobei der Messaufwand mit der Anzahl der abzubildenden Varianten stark steigt. Beispielsweise ist für die Abbildung eines Schweißvorgangs die Berücksichtigung unterschiedlicher Schweißtechnologien (MIG-Schweißen, Laserschweißen, etc.) sowie unterschiedlicher Fügematerialien erforderlich. Dabei kann allerdings nur eine begrenzte Modellierungsgenauigkeit erzielt werden, da der Energieverbrauch eines Schweißvorgangs zudem von einer Vielzahl für Einzelvorgänge kompliziert zu bestimmender Parameter abhängig ist (bspw. Dicke des Fügematerials, Abstand der Fügepartner zueinander, etc.). Die Abbildung dieser hohen Varianz führt zudem zu einem erhöhten Modellierungsaufwand.

Für adaptierbare ECUs erfolgt die Modellierung des Energieverbrauchsverhaltens gleichungsbasiert. In Abhängigkeit der komponentenspezifischen Eigenschaften und des Belastungszustands wird der Energieverbrauch durch die Implementierung physikalischer Gesetzmäßigkeiten abgebildet. Der Modellierungsaufwand ist hierfür signifikant, da neben den aus den Datenblättern extrahierbaren Parametern häufig noch andere Parameter experimentell oder simulationsgestützt identifiziert werden müssen. Zudem müssen aufgrund der hohen Komplexität der einzelnen physikalischen Zusammenhänge häufig vereinfachende Annahmen für das physikalische Verhalten der Komponenten vorgenommen werden.

Nach Abschluss dieses Prozessschritts sind alle unterschiedlichen ECUs einer automatisierten Montageanlage hinsichtlich ihres Energieverbrauchs klassifiziert und mit Hilfe eines physikbasierten Komponentenmodells abgebildet. Dadurch sind die Berechnung und Darstellung der Energieverbräuche der einzelnen Komponenten über einen zeitlichen Verlauf sowie der Absolutwert des Energieverbrauchs möglich.

5.3. Modellierung des Gesamtsystems

Als Ergebnis des vorigen Prozessschritts konnten die physikbasierten Komponentenmodelle mit den integrierten Energieverbrauchsmodellen der relevanten ECUs erhalten werden. Zur umfassenden Modellierung des physikbasierten Gesamtsystems der Montageanlage ist die Modellierung der kinematischen Abhängigkeiten (kinematischen Ketten) sowie des Prozessablaufs des Montageprozesses erforderlich (vgl. Abbildung 5-4).

Auf Basis der einzelnen physikbasierten Komponentenmodelle wird das physikbasierte Gesamtsystemmodell der Montageanlage erstellt. Als Eingangsgröße ist hierbei neben den physikbasierten Komponentenmodellen das Taktzeitdiagramm der Anlage zur Modellierung des Montageablaufs erforderlich. Aus dem physikbasierten Gesamtsystemmodell der Montageanlage kann der Energieverbrauch der Montageanlage für die einzelnen Montageoperationen in Form einer initialen Energiesignatur erzeugt werden.

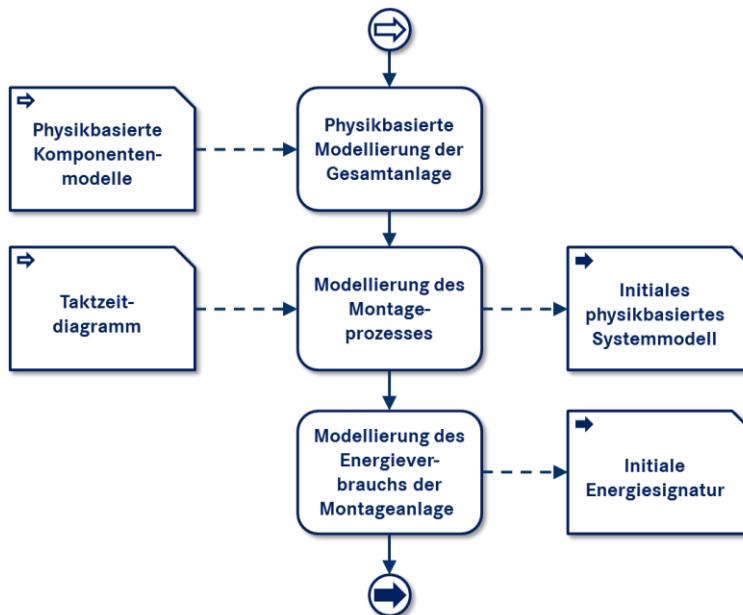


Abbildung 5-4: BPMN-Darstellung Prozessschritt physikbasierte Modellierung des Gesamtsystems

5.3.1. Physikbasierte Modellierung der Gesamtanlage

Aus den individuellen physikbasierten Komponentenmodellen der ECUs wird das physikbasierte 3D-Geometriemodell der Gesamtanlage erstellt. Hierfür ist die Modellierung der einzelnen Funktionsgruppen mit den internen und externen kinematischen Abhängigkeiten notwendig. Hierbei erfolgt die Definition der erforderlichen Gelenke hinsichtlich Gelenktyp (Translations-, Rotations- oder Kugelgelenk) sowie Gelenkklage und -ausrichtung. Zudem werden die positiven Bewegungsrichtungen und die minimalen und maximalen Bewegungsgrenzen der Gelenke festgelegt. Dadurch werden die Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Komponenten und der Funktionsgruppen der Montageanlage eingeschränkt. Dies stellt allerdings zunächst nur eine reine Definition der kinematischen Abhängigkeiten dar und resultiert in einem statischen physikbasierten 3D-Geometriemodell der Anlage.

5.3.2. Modellierung des Montageprozesses

Basierend auf dem statischen physikbasierten 3D-Geometriemodell der Montageanlage und der Informationen aus dem Taktzeitdiagramm wird das initiale physikbasierte Systemmodell der Montageanlage generiert. Das Taktzeitdiagramm enthält Informationen über den zeitlichen Prozessablauf der Montageanlage und kann somit zur Prozessmodellierung des Montageprozesses herangezogen werden. Allerdings liegen Taktzeitdiagramme jedoch häufig nicht in standardisierter Form vor. Im Gegensatz zu den 3D-Geometriemodellen der Montageanlagen haben sich bis dato noch keine Formate zur Beschreibung eines Montageprozesses flächendeckend in der industriellen Anwendung entscheidend durchgesetzt. Häufig erfolgt die Darstellung von Taktzeitdiagrammen für Montageanlagen mit

Hilfe von Datenverarbeitungssoftware (MS Excel), Zeitplanungssoftware (MS Project) oder Präsentationssoftware (MS Power Point).

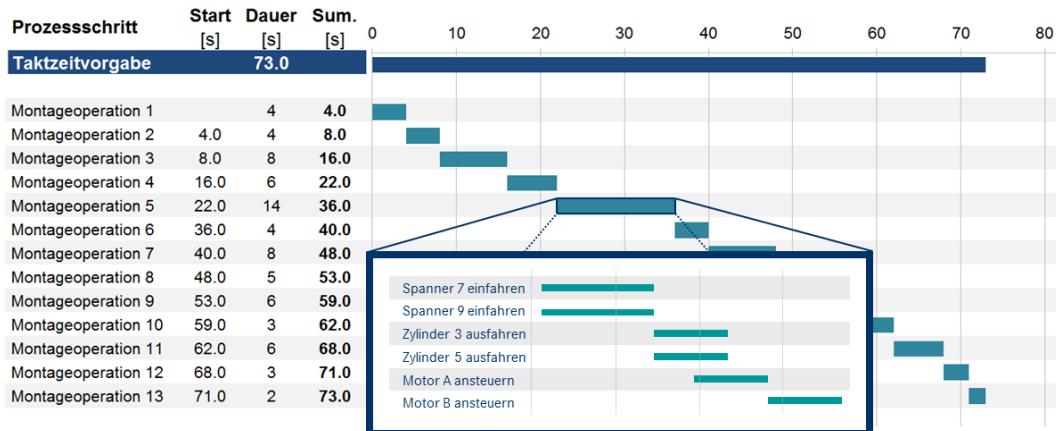


Abbildung 5-5: Exemplarische Darstellung eines Taktzeitdiagramms inklusive der Relation zwischen Montageoperationen und ECU-Aktivitäten

Die einzelnen Montageoperationen mit den zeitlichen Abläufen sind in den Zeilen des Taktzeitdiagramms mit den jeweilig erforderlichen Prozessdurchführungszeiten dargestellt (vgl. Abbildung 5-5). Die einzelnen Montageoperationen umfassen allerdings häufig eine Vielzahl unterschiedlicher ECU-Aktivitäten, die für eine physikbasierte Modellierung des Montageprozesses aus den Montageoperationen extrahiert werden müssen. So können bspw. für die Montageoperation „Achse einspannen“ mehrere Spanneinheiten mit zeitlich versetzten Spannvorgängen erforderlich sein. Aus dem Taktzeitdiagramm sind somit die an den einzelnen Montageoperationen beteiligten ECUs zu identifizieren und deren zeitliche Aktivität in der physikbasierten Simulationsumgebung nachzubilden.

Es bestehen mehrere Möglichkeiten die Steuerung, also den Start und die Überprüfung der Vollendung einer ECU-Aktivität, zu modellieren. Eine Möglichkeit besteht in der signalgesteuerten Auslösung und Abfrage der ECUs in der physikbasierten Simulationsumgebung mittels einer externen Steuerungssoftware über einen gemeinsamen Speicherbereich beider Softwareapplikationen. Alternativ kann mithilfe eines in der physikbasierten Simulationsumgebung integrierten Prozessablaufskripts eine positionsgesteuerte Abbildung der Montageprozesse erzielt werden. Beide Vorgehensweisen stellen im Wesentlichen eine abstrahierte Abbildung der Schrittfolge dar, die durch das Steuerungsprogramm bei der steuerungstechnischen Absicherung im Rahmen der VIBN repräsentiert wird. Das initiale physikbasierte Systemmodell der Montageanlage besteht demzufolge aus einer Kombination des physikbasierten 3D-Geometriemodells der Gesamtanlage und des Prozessmodells des Montageprozesses in der physikbasierten Simulationsumgebung.

5.3.3. Modellierung des Energieverbrauchs der Montageanlage

Mit Hilfe des initialen physikbasierten Systemmodells der Montageanlage kann die initiale Energiesignatur der Montageanlage erzeugt werden. Die Energiesignatur stellt dabei den Energieverbrauch der Montageanlage über der Taktzeit dar und umfasst neben dem elektrischen Energiebedarf der elektromechanischen ECUs in Form der zu einem definierten Zeitpunkt erforderlichen Leistung P auch den Druckluftbedarf der pneumatischen ECUs in Form des aggregierten Volumenstroms \dot{V}_{agg} (vgl. Abbildung 5-6 bzw. Kapitel 3.2.1). Die Kombination der beiden für Montageanlagen relevanten Energieformen in Bezug auf die einzelnen Montageoperationen (MO) ermöglicht eine ganzheitliche Darstellung der für die einzelnen Montageoperationen erforderlichen Energiebedarfe. Dadurch wird eine Relation zwischen den Montageoperationen und dem dafür erforderlichen Energiebedarf geschaffen, die ein tiefergehendes Verständnis der Prozessabläufe ermöglicht und als Basis für energetische Optimierungsbestrebungen verwendet werden kann.

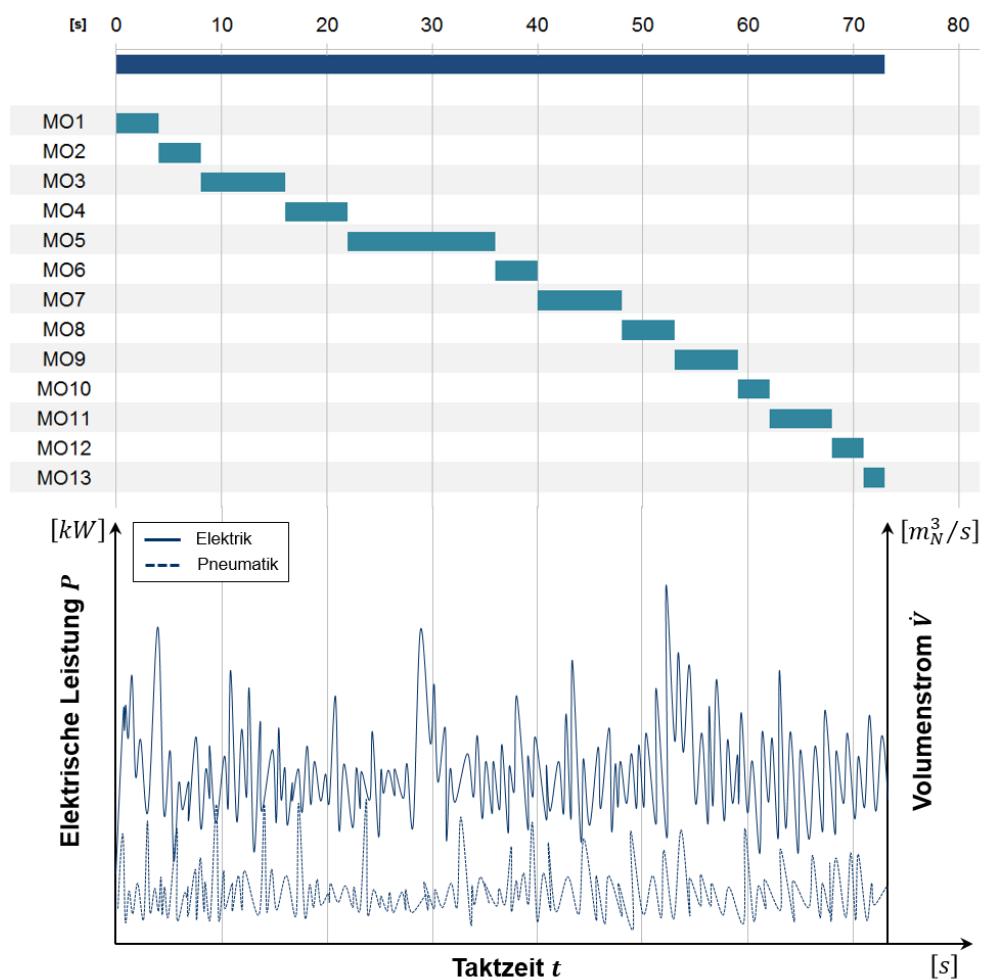


Abbildung 5-6: Exemplarische Energiesignatur einer automatisierten Montageanlage

In der physikbasierten Simulationsumgebung erfolgt die Darstellung der Energiesignatur grafikbasiert, wobei die Rohdaten der grafischen Darstellung für eine weiterführende Analyse in Form einer Excel-Tabelle exportiert werden können.

5.4. Analyse energieeffizienzsteigernder Maßnahmen

Ausgehend von dem physikbasierten Systemmodell der automatisierten Montageanlage und der initialen Energiesignatur wird die Optimierung des Energieverbrauchs initiiert. Hierfür wird neben dem physikbasierten Systemmodell zudem der Katalog energieeffizienzsteigernder Maßnahmen (EEIM Katalog) für automatisierte Montageanlagen benötigt. Der EEIM-Katalog setzt sich aus den Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz automatisierter Produktionsanlagen zusammen und beruht auf einer komponentenbasierten Darstellung potentieller energieeffizienzsteigernder Maßnahmen (vgl. Kapitel 3.2.2).

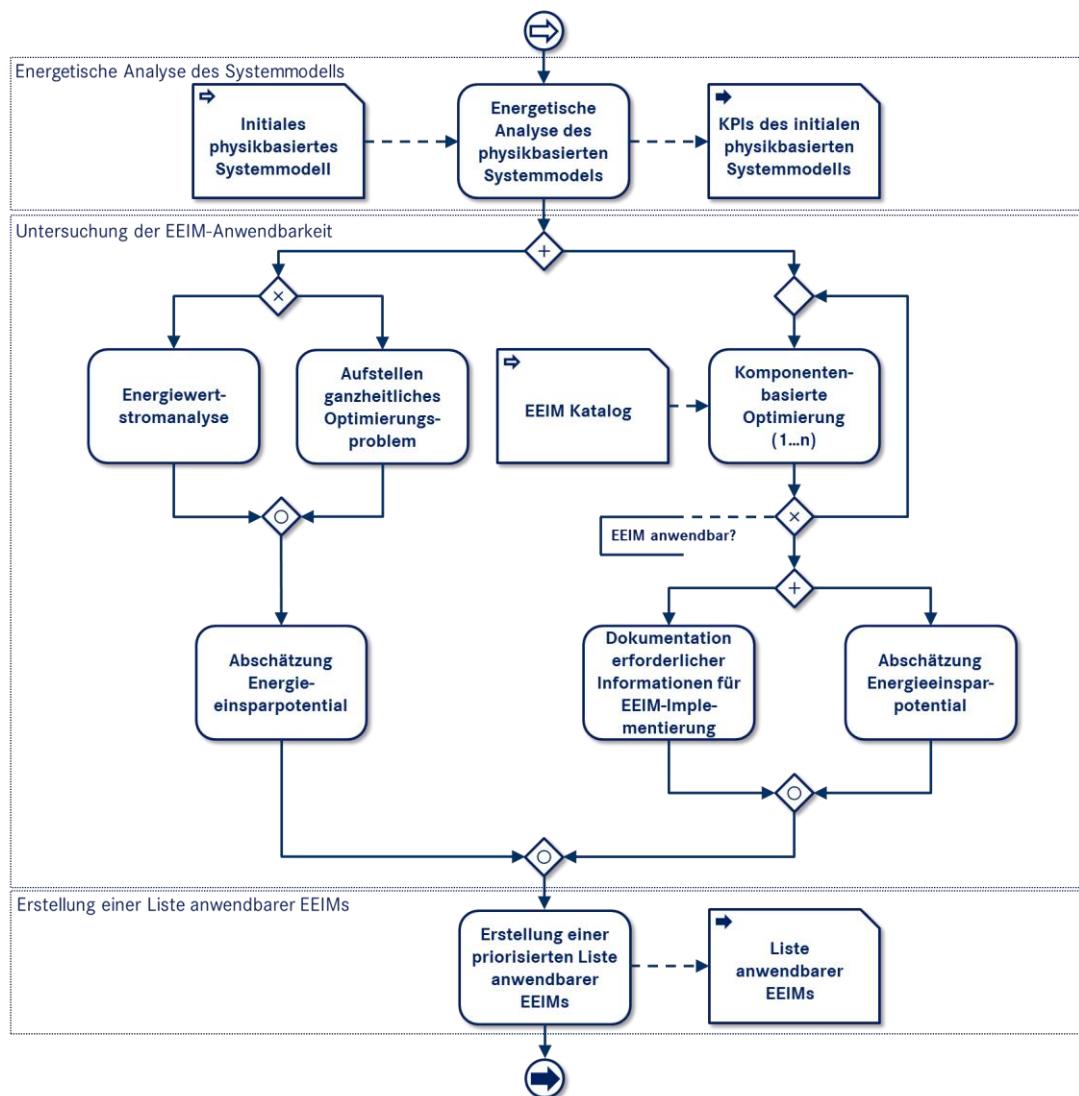


Abbildung 5-7: BPMN-Darstellung der EEIM-Analyse

Das Ziel des Prozessschritts der EEIM-Analyse besteht in der Formulierung einer Aussage über die Anwendbarkeit und das Energieeinsparpotential eines EEIMs für die betrachtete automatisierte Montageanlage. Der Prozessschritt EEIM-Analyse unterteilt sich in die Prozessstufen Energetische Analyse des Systemmodells, Untersuchung der EEIM-Anwendbarkeit und Erstellung einer Liste anwendbarer EEIMs.

5.4.1. Energetische Analyse des Systemmodells

Auf Basis des initialen physikbasierten Systemmodells wird eine energetische Analyse des Verbrauchverhaltens der automatisierten Montageanlage vorgenommen. Für eine strukturierte Betrachtung des Energieverbrauchsverhaltens werden Kennzahlen verwendet, die für eine Analyse auf operationaler Ebene für automatisierte Montageanlagen einsetzbar sind (vgl. Kapitel 3.2.1). Folgend werden die relevanten Kennzahlen in ihrer Zusammensetzung beschrieben und beispielhaft erläutert.

Der Gesamtenergieverbrauch E_{total} umfasst den absoluten Energieverbrauch einer automatisierten Montageanlage über den Verlauf eines Takts. Der Gesamtenergieverbrauch entspricht der Summe der pro Simulationszeitschritt erforderlichen Leistung integriert über den Zeitraum der Taktzeit. Die Umrechnung des aggregierten Volumens der konsumierten Druckluft $V_{pneum,N}$ auf einen elektrischen Energieverbrauch kann dabei mit Hilfe von empirischen Erfahrungswerten vorgenommen werden, um eine einzige Kennzahl für den Gesamtverbrauch zu erhalten. Des Weiteren kann der Energieträgeranteil ET_x bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch ermittelt werden, so dass der Anteil des pneumatischen mit dem Anteil des elektrischen Energieverbrauchs ins Verhältnis gesetzt werden kann.

Darüber hinaus wird mit der Benutzungsdauer T_{ben} der Gesamtenergieverbrauch mit der maximal abgegriffenen Leistung ins Verhältnis gesetzt, wodurch die Leistungsspitzen beim elektrischen Verbrauch bzw. der maximal zu einem Zeitpunkt abgegriffene Volumenstrom bei der energetischen Analyse berücksichtigt werden kann. Der Benutzungsgrad g_{ben} dient als Maß für die Nutzungsintensität einer Komponente oder eines ECUs über einen definierten Zeitraum. Dabei kann sich der Zeitraum bspw. die gesamte Taktzeit oder nur über die Dauer einzelner Montageoperationen erstrecken. Zudem kann der spezifische Energiebedarf E_{spez} pro funktionale Einheit berechnet werden. Eine funktionale Einheit kann hierbei eine Stückmenge sein, bspw. kann dann der Energiebedarf für die Erzeugung eines Zusammenbaus aus zwei Fügeteilen beschrieben werden. Die Energieintensität E_{Int} beschreibt den Energieverbrauch eines Teilprozesses oder einer Komponente bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch. Somit kann beispielsweise der Anteil des Energieverbrauchs einer Roboterbewegung mit dem Anteil des Energieverbrauchs eines Einspannvorgangs verglichen werden.

Die Berechnung der Kennzahlen muss auf Basis der jeweiligen Montageanlage manuell erfolgen. Die Gestaltung der Kennzahlen, oder auch Energie-KPIs (Energie-Key Performance

Indicators), ist bewusst generisch gehalten und hängt somit stark von den Gegebenheiten der spezifischen Montageanlage ab. Als Datenbasis zur Erstellung der Energie-KPIs dient das Resultat des verbraucherspezifischen Exports der Rohdaten der Energiesignatur aus der physikbasierten Simulationsumgebung.

5.4.2. Untersuchung der Anwendbarkeit energieeffizienzsteigernder Maßnahmen

Mit Hilfe der Energie-KPIs lassen sich erste Ansatzpunkte für eine energetische Optimierung identifizieren. Beispielsweise kann unter Verwendung der Energie-KPIs der Prozess mit dem größten Anteil am Energieverbrauch oder die ECU mit dem größten Verbrauch identifiziert werden. Für eine Optimierung der Energieeffizienz einer Montageanlage bestehen unterschiedliche Möglichkeiten, wobei in der Methode zwischen einer komponentenspezifischen und einer prozessorientierten Vorgehensweise unterschieden werden soll.

5.4.2.1. Prozessorientierte Vorgehensweise

Bei der prozessorientierten Vorgehensweise bei der EEIM-Analyse wird der Fokus auf den gesamten Montageprozess der zu betrachtenden automatisierten Montageanlage gelegt.

Eine Variante der prozessorientierten Vorgehensweise besteht in der Erweiterung der aus dem Ansatz des Lean Managements stammenden Technik der Wertstromanalyse um energetische Inhalte. Die Wertstrommethode ist eine betriebswirtschaftliche Methode zur Optimierung der Prozessführung von Produktionsprozessen. Mit Hilfe einer abstrahierten kartographischen Darstellung werden die Produktionsabläufe mit den dazugehörigen Material- und Informationsflüssen abgebildet [360]. Der Fokus liegt dabei auf der Optimierung von Logistik- und Zuliefererprozessen mit dem Ziel der Minimierung von Beständen von unfertigen Produkten zwischen den einzelnen verarbeitenden Prozessschritten der Produktion. Das Vorgehen bei der Wertstrommethode besteht in der Aufnahme des vorliegenden Prozessablaufs (Ist-Wertstrom), auf dessen Basis ein optimierter Produktionsprozessablauf (Soll-Wertstrom) durch die Implementierung von Prozessverbesserungen generiert wird.

Das Konzept der Wertstrommethode kann um energetische Gesichtspunkte erweitert werden [361], [362], [363], [364]. Dabei werden die Prozesskästen für die einzelnen Produktionsprozessschritte um den gemessenen oder approximierten Bedarf für unterschiedliche Endenergien erweitert. Die derzeit bekannten Anwendungen beziehen sich wie auch bei der ursprünglichen Wertstromanalyse auf eine gesamte Produktionshalle bzw. eine gesamte Produktionslinie. Hier soll die Energiewertstrommethode auf eine einzelne automatisierte Montageanlage mit ihren individuellen Bestandteilen angewandt werden. Dabei fungieren die einzelnen aus dem Taktzeitdiagramm generierten Montageoperationen als Äquivalent zu den Produktionsprozessen. Für eine Untersuchung der EEIM Anwendbarkeit

wird nur der Ist-Wertstrom eines automatisierten Montageprozesses dargestellt, auf dessen Basis eine Auswahl potentiell anwendbarer EEIMs erfolgt.

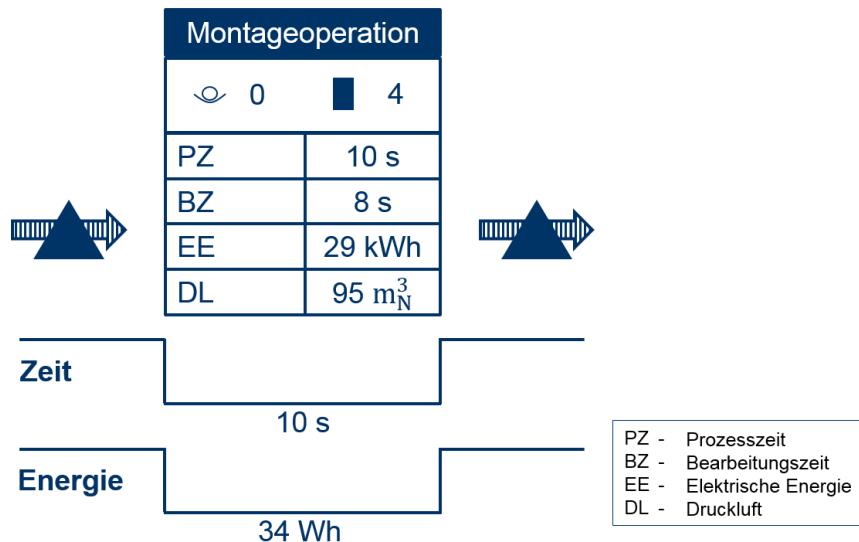


Abbildung 5-8: Exemplarischer Prozesskasten einer Montageoperation bei einer Wertstromanalyse

Ein möglicher Prozesskasten für die Montageoperation eines Taktzeitdiagramms ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Der um die energetischen Verbräuche erweiterte Prozesskasten ist analog der für die ursprüngliche Wertstrommethode verwendeten Prozesskästen konzipiert. Für eine übersichtliche Darstellung wurden einige typische Größen des Prozesskastens (Prozessmenge, Losgröße, Verfügbarkeit, Rüstzeit, etc.) vernachlässigt und nicht dargestellt. Im oberen Teil des Prozesskastens befinden sich der Name der Montageoperation sowie die Angabe der Anzahl der an der Montageoperation beteiligten Montagemitarbeiter. Die an der Montageoperation beteiligten Ressourcen sind im Fall automatisierter Montageanlagen die für die Durchführung der Montageoperation erforderlichen ECUs. Die Prozesszeit (PZ) entspricht der im Taktzeitdiagramm für die Montageoperation vorgesehenen Zeit, wobei die Bearbeitungszeit (BZ) der tatsächlich für die Montageoperation erforderlichen Zeitspanne entspricht. Der elektrische Energiebedarf (EE) sowie der Druckluftbedarf (DL) kann aus der Energiesignatur des initialen physikbasierten Systemmodells generiert werden. Die in der Wertstromanalyse typische zeitstrahlähnliche Darstellung der erforderlichen Prozesszeit wird zudem um den erforderlichen Energiebedarf ergänzt. Weitergehende Betrachtungen könnten zudem den zeitlichen Anteil des wertschöpfenden bzw. nicht-wertschöpfenden Anteils der Prozesszeit betrachten sowie die wertschöpfenden und nicht-wertschöpfenden Anteile des Gesamtenergiebedarfs.

Eine weitere Variante der prozessorientierten Vorgehensweise bei der EEIM-Analyse besteht in der Aufstellung und Lösung eines Optimierungsproblems für dynamische Mehrkörpersysteme. Hierbei erfolgt auf Basis einer dynamischen Mehrkörpersimulation die Aufstellung eines Optimierungskriteriums unter Berücksichtigung der systemspezifischen

Eigenschaften und Parameter (bspw. [14], [291], [365]). Für eine energieeffiziente Auslegung einer automatisierten Montageanlage kann das Optimierungskriterium in der Minimierung des für eine Montageoperation erforderlichen Energiebedarfs bestehen. Der Energiebedarf wird dabei durch das physikbasierte Systemmodell berechnet und für eine Optimierung aufgegriffen. Randbedingungen für eine solche Optimierung sind bspw. bei einer angetriebenen geführten Bewegung einer Funktionsgruppe die geometrisch definierten Start- und Endpunkte zu definierten Zeitpunkten (bspw. Start- und Ende der Montageoperation). Durch diese prozessorientierte Vorgehensweise können die Prozessabläufe einer automatisierten Montageanlage restrukturiert, parallelisiert oder skaliert werden.

5.4.2.2. Komponentenbasierte Vorgehensweise

Bei der komponentenbasierten Vorgehensweise wird jede einzelne Komponente (1...n) der automatisierten Montageanlage zunächst ohne Berücksichtigung der einzelnen Montageoperationen fokussiert. Eingangsgröße hierfür ist der komponentenbasierte EEIM-Katalog, der basierend auf der EEIM-Kategorisierung eine spezifische EEIM-Beschreibung bereitstellt (vgl. Kapitel 3.2.2). Dabei kann einen EEIM häufig auf unterschiedliche Weisen auf eine Komponente angewendet werden, so dass für einen EEIM mehrere Möglichkeiten zur Umsetzung dargestellt werden (vgl. Abbildung 5-9). Die Darstellung der EEIMs für die Komponente Elektromotor und die Funktionsgruppe Roboter sind im Anhang B zu finden.

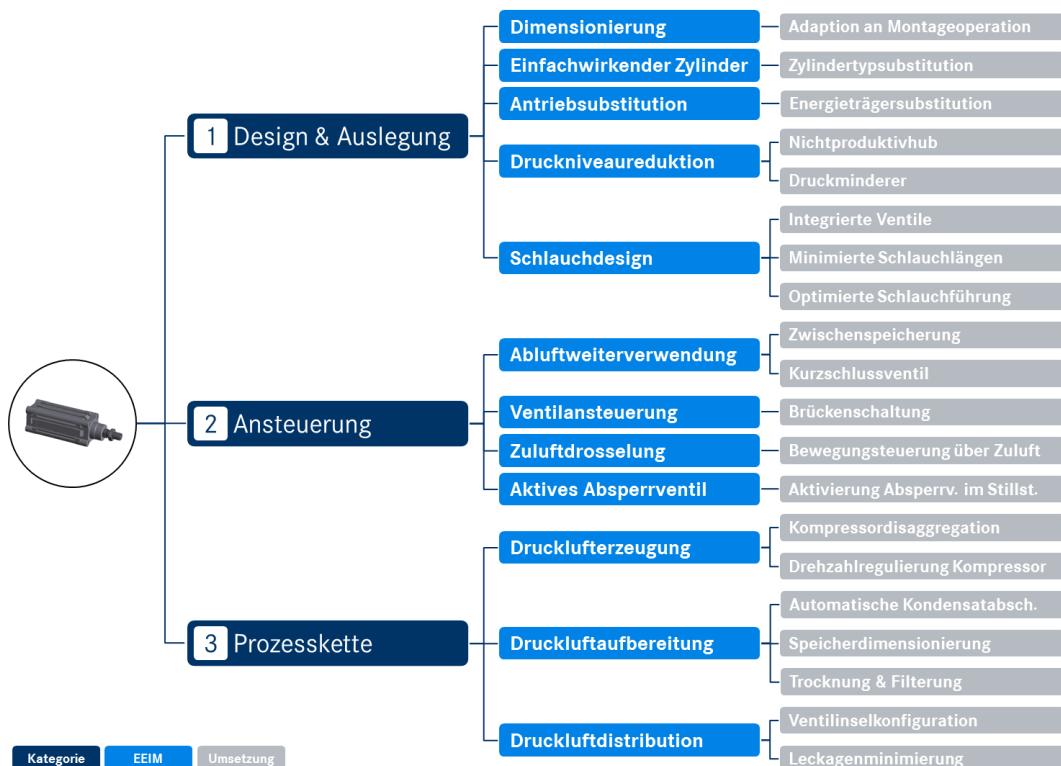


Abbildung 5-9: Potentielle EEIMs für pneumatische Aktoren mit Umsetzungsvorschriften

Neben der Aussage über die Anwendbarkeit einer komponentenbasierten EEIM müssen die für die Implementierung notwendigen Informationen gesammelt und dem Implementierer zur Verfügung gestellt werden. Diese Informationen können bspw. die zur Verfügung stehenden Alternativantriebe aus einer für die Konstruktion einer Montageanlage freigegebenen Materialliste sein.

Sowohl bei der prozessbasierten als auch bei der komponentenbasierten Vorgehensweise ist die Abschätzung des Energieeinsparpotentials des potentiell zu implementierenden EEIM erforderlich. Das mögliche Einsparpotential hängt dabei von der ursprünglichen Auslegung der Komponente bzw. des Montageprozesses ab. Die Einschätzung über die Häufigkeit der Anwendbarkeit eines EEIMs sowie das Potential der möglichen Einsparung kann zuverlässig nur aus Erfahrungswerten gewonnen werden. Für die Verwendung im Rahmen dieser Arbeit sollen die aus der Literatur gewonnenen Richtwerte hinsichtlich Anwendbarkeit und Einsparpotential (falls angegeben) übernommen werden. Hieraus kann für jede EEIM eine Beschreibung in Form eines Templates erstellt werden, das die Rahmenbedingungen für die Einsetzbarkeit und die Mächtigkeit eines EEIMs beschreibt.

EEIM: Pneumatik – Einfachwirkender Zylinder			
Anwendungsvoraussetzungen	Aufwand	Umsetzung	
<ul style="list-style-type: none"> • Nichtproduktivhub nicht taktzeitkritisch • Kenntnis über einsetzbare Alternativantriebe (Materialfreigabeliste) • Kenntnis über verfügbaren Bauraum, Anschlusstechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklungsaufwand GU (3D-Modell Anpassung, Absicherungssimulation) • Abstimmungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-Modellbasierte Komponentensubstitution • Abstimmung Konstrukteur GU und Produktionsplaner OEM 	
Anwendbarkeit	selten	Einsparung	bis zu 50%
		Implementierung Auswahl/Auslegung pneumatischer Antriebe	

Abbildung 5-10: Template zur Beschreibung eines EEIMs

Neben den Anwendungsvoraussetzungen und der Häufigkeit der Einsetzbarkeit für automatisierte Montageanlagen werden der für die Implementierung erforderliche Aufwand sowie die Höhe der potentiellen Einsparung angegeben. Darüber hinaus wird die Umsetzung der EEIM beschrieben sowie die Aktivität im Planungsprozess für die Umsetzung der EEIM spezifiziert.

5.4.3. Erstellung einer Liste anwendbarer energieeffizienzsteigernder Maßnahmen

Auf Basis der Aussage zur Anwendbarkeit und der Potentialbewertungen der einzelnen anwendbaren EEIMs kann eine Priorisierung der EEIM erfolgen. Dabei können die EEIMs hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien priorisiert werden. Denkbare Priorisierungsgrößen sind hierbei die prognostizierte Höhe der Einsparung oder der für die Anwendung erforderliche Implementierungsaufwand.

Zum Abschluss des Prozessschritts EEIM-Analyse liegt eine Potentialbewertung möglicher zu implementierender EEIMs für die spezifische Montageanlage vor. Eine Implementierung in das physikbasierte Komponentenmodell bzw. Systemmodell wird in dem folgenden Prozessschritt vorgenommen.

5.5. Implementierung energieeffizienzsteigernder Maßnahmen

Basierend auf der Liste der anwendbaren EEIMs wird eine stufenweise EEIM-Implementierung in das Anlagendesign vorgenommen. Der Prozessschritt EEIM-Implementierung umfasst die Prozessstufen EEIM-Implementierung auf Komponenten und Systemmodellebene, Wirtschaftliche Bewertung des EEIM sowie Erstellung des energieeffizienten Anlagendesigns (vgl. Abbildung 5-11). Zum Abschluss dieses Prozessschritts liegen neben dem energieeffizienten Anlagendesign die optimierte Energiesignatur und die Energie-KPIs des energieeffizienten Anlagendesigns vor.

5.5.1. Implementierung energieeffizienzsteigernder Maßnahmen auf Komponenten- und Systemmodellebene

Bei der EEIM-Implementierung auf Komponenten- und Systemmodellebene werden zunächst die für die Umsetzung des EEIM erforderlichen Maßnahmen in das Komponentenmodell eingearbeitet. Hierbei kann es sich bspw. um den Austausch eines Elektromotors durch einen Elektromotor höherer Energieeffizienzklasse handeln, dessen Eignung für die Montageaufgabe zunächst auf Komponentenebene untersucht werden muss. Hierfür ist in der Regel die physikbasierte Modellierung der Austauschkomponente erforderlich. Ist dieser Nachweis erbracht und der Energiebedarf zur Bewältigung der Montageaufgabe hat sich nachweislich verringert, muss die Integration der EEIM auf Systemmodellebene nachgewiesen werden. Am Beispiel des Austauschmotors kann dies die Integration einer geänderten Motorgeometrie in das Anlagendesign darstellen. Entspricht die Geometrie des Austauschmotors nicht der des ursprünglich verwendeten Motors sind Anpassungen hinsichtlich des Bauraum-Packagings im ursprünglichen Anlagendesign erforderlich, die in dem physikbasierten 3D-Geometriemodell umgesetzt werden müssen. Anschließend ist eine Überprüfung der Funktionsweise des adaptierten physikbasierten Systemmodells durchzuführen. Kann die für die Umsetzung der EEIM erforderliche Adaption in das statische physikbasierte 3D-Geometriemodell integriert werden (bspw. Integration der neuen Motorgeometrie), muss zudem eine Überprüfung des physikbasierten Systemmodells der automatisierten Montageanlage erfolgen. Beispielsweise kann die Durchführung des Montageprozesses durch die Kollision mit der adaptierten 3D-Geometrie behindert werden, so dass eine Implementierung des EEIMs nicht sinnvoll wäre.

5.5.2. Wirtschaftliche Bewertung der energieeffizienzsteigernden Maßnahme

Nach der Sicherstellung der technischen Machbarkeit der Implementierung eines EEIMs ist die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit des EEIMS zu überprüfen. Betriebswirtschaftlich kann die Implementierung eines EEIMs als eine Rationalisierungsinvestition aufgefasst werden.

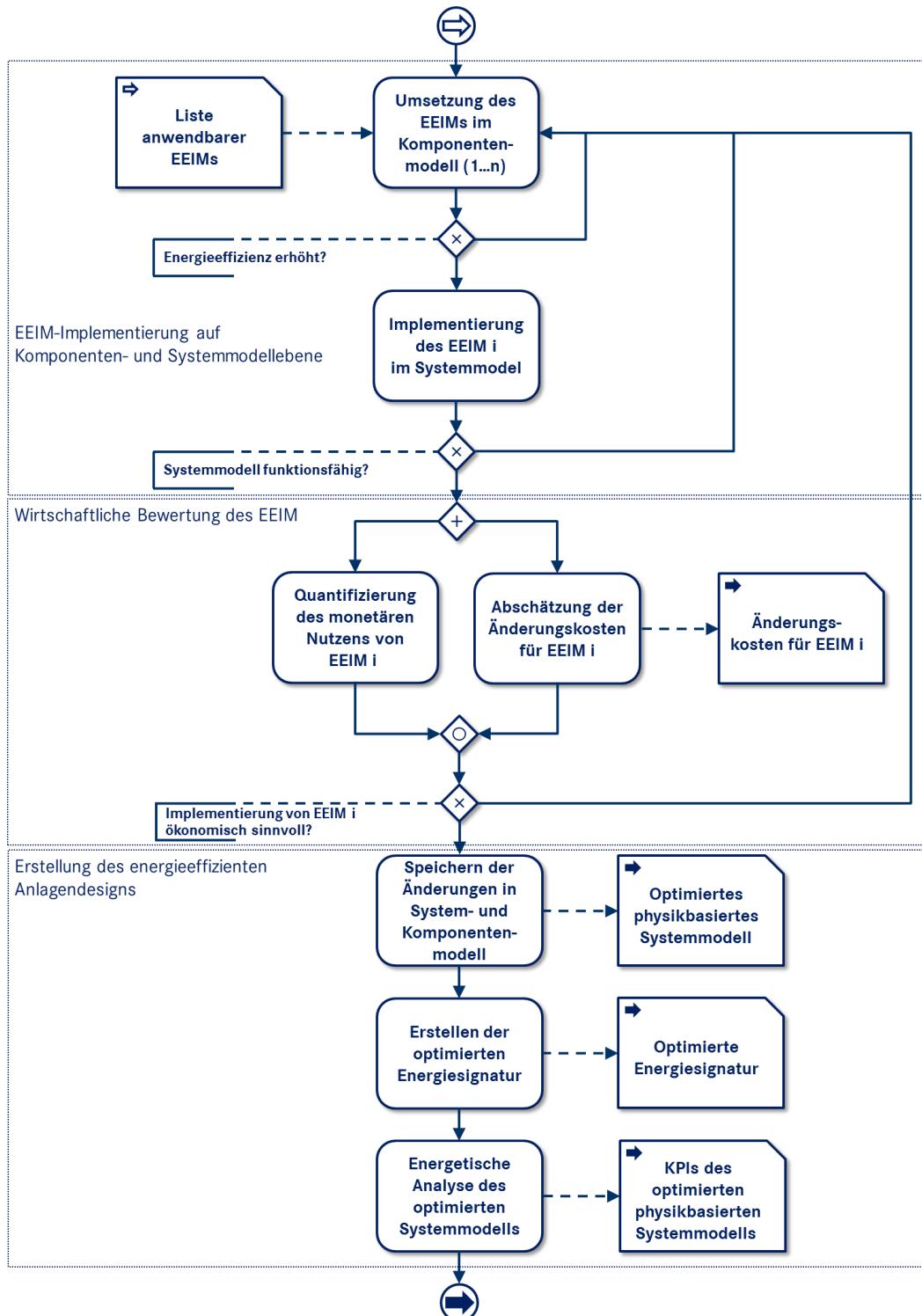


Abbildung 5-11: BPMN-Darstellung Prozessschritt EEIM-Implementierung

Eine Rationalisierungsinvestition zielt auf eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit einer betrieblichen Leistungserbringung häufig in Form einer technischen Optimierung. Eine Produktivitätserhöhung ermöglicht dabei die Erbringung des vor der Rationalisierungsinvestition bereits erzielten Outputs durch einen insgesamt geringeren Inputverzehr.

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit für eine EEIM-Implementierung soll von den dynamischen Methoden der Investitionsrechnung das Konzept der Kapitalwertmethode verwendet werden (vgl. Kapitel 3.1.3). Der Kapitalwert (engl. Net Present Value – NPV) ist eine finanzielle Kennzahl, die zukünftige Erträge eines Vorhabens auf den aktuellen Zeitpunkt umrechnet [197], [198]. Zukünftige Kosten und Erlöse werden auf den Zeitpunkt der Investition diskontiert und erlauben somit eine Aussage über die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit einer Investition zu einem möglichen Investitionszeitpunkt. Ein Investitionsvorhaben mit einem negativen NPV wird als nicht lohnenswert eingestuft, während die Höhe bei einem positiven NPV ein Maß für die Vorteilhaftigkeit eines Investitionsvorhabens darstellt.

Zur Berechnung des NPVs für einen technisch machbaren EEIM ist die Bestimmung des monetären Nutzens erforderlich. Hierfür werden die zukünftigen Energieeinsparungen determiniert und monetär bewertet. Dafür ist ein Vergleich zwischen den beiden Auslegungsvarianten auf Komponenten- oder Systemmodellebene durchzuführen und die Abweichung zwischen dem aggregierten Energieverbrauch ($\Delta V_{pneum,N}$ bzw. ΔE) der Montageoperation zu bestimmen. Aus der Differenz des Energieverbrauchs beider Auslegungsvarianten wird mit den Kostenfaktoren k_{pneum} bzw. k_{elektr} die monetären Ersparnisse ΔES_{EEIM} für den Zeitraum eines Jahres berechnet.

$$[\text{€}] \Delta ES_{EEIM} = \Delta ES_{elektr} + \Delta ES_{pneum} = \Delta E \cdot k_{elektr} + \Delta V_{pneum,N} \cdot k_{pneum} \quad (13)$$

Darüber hinaus werden die Änderungskosten für die Implementierung des technisch machbaren EEIMs evaluiert. Die Änderungskosten stellen das Investment I_{EEIM} zur Realisierung des EEIMs dar und müssen alle Kostenarten umfassen, die zur zeitpunktbezogenen Umsetzung der neuen Auslegungsvariante der automatisierten Montageanlage erforderlich sind. Hierzu zählen bspw. erhöhte Materialkosten oder erhöhte Entwicklungsaufwände für die Anlagenkonstrukteure. Die mit der Realisierung des EEIMs zwangsläufig verbundenen über einen Zeitraum verteilten zusätzlichen Investitionen ΔCI_{EEIM} müssen von den monetären Ersparnissen ΔES_{EEIM} für den Zeitraum des Auftretens subtrahiert werden. Hierzu zählen bspw. erhöhte Wartungsaufwände für eine komplexere Komponente bei einem Komponentenaustausch.

$$[\text{€}] NPV_{EEIM,i} = -I_{EEIM,i} + \sum_{t=1}^{t_{ALZ}} (\Delta ES_{EEIM,i} - \Delta CI_{EEIM,i}) \cdot \frac{(1+EC)^t}{(1+DR)^t} \quad (14)$$

Für die Berechnung des NPVs $NPV_{EEIM,i}$ für einen technisch machbaren EEIM i sind neben dem erforderlichen Investment und den monetär erzielbaren Ersparnissen zusätzliche Parameter erforderlich. Hierzu gehören die geplante Anlagenlaufzeit t_{ALZ} sowie der Kalkulationszinssatz DR , der die subjektive Mindestverzinsungsforderung an die Investition quantifiziert und somit determiniert, wie die zukünftigen Zahlungen auf den Barwert diskontiert werden. Darüber hinaus wird eine potentielle Steigerung des Energiepreises durch die Berücksichtigung einer konstanten jährlichen Steigerungsrate EC in die Berechnung des NPVs miteinbezogen. Bei langfristigen Investitionsentscheidungen ist die Berechnung mit einer konstanten Energiepreissteigerungsrate üblich, um mittels einer anschließenden Sensitivitätsanalyse die Auswirkung der hohen Volatilität der Energiepreisentwicklung auf die Investition zu untersuchen [366].

Aufgrund des Ergebnisses der NPV-Berechnung kann eine Bewertung über die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit einer EEIM-Implementierung getätigt werden. Stellt sich ein technisch umsetzbarer EEIM als wirtschaftlich nicht rentabel heraus, sollte aus Anlagenbetreibersicht keine Implementierung in das Anlagendesign erfolgen.

5.5.3. Erstellung des energieeffizienten Anlagendesigns

Auf Basis einer positiven Wirtschaftlichkeitsaussage für die technischen machbaren EEIMs wird das physikbasierte Komponenten- und Systemmodell der automatisierten Montageanlage angepasst und somit in ein energieeffizientes Anlagendesign transformiert. Die notwendigen Änderungen werden in den individuellen Komponentenmodellen und in dem Systemmodell gespeichert und somit ein zweites Modell der zu untersuchenden automatisierten Montageanlage erzeugt, das als Grundlage für die bereits mit dem initialen Systemmodell durchgeführten Analyseschritte dient. Hierzu gehören die Erstellung der optimierten Energiesignatur sowie die Aufstellung der Energie-KPIs für das optimierte Systemmodell.

Nach Vollendung des Prozessschritts EEIM-Implementierung liegt ein optimiertes physikbasiertes Systemmodell mit implementierten technisch machbaren und wirtschaftlich sinnvollen EEIMs vor. Darüber hinaus liegt eine optimierte Energiesignatur mit den dazugehörigen Energie-KPIs für das energieeffiziente Anlagendesign vor.

5.6. Ökonomische Bewertung

Der finale Prozessschritt der Methode besteht in der Durchführung einer ökonomischen Bewertung der beiden in den vorigen Prozessschritten erzeugten Anlagendesigns. Dabei handelt es sich um die relative Bewertung zweier möglicher Designausprägungen einer

automatisierten Montageanlage mit dem Ziel, eine Entscheidungsunterstützung für den Entwicklungsauftraggeber und späteren Anlagenbetreiber zu leisten. Hierbei soll unter Berücksichtigung aller für die Entwicklung, die Nutzung und die Entsorgung anfallender Kosten eine aus Sicht des Anlagenbetreibers ökonomische Entscheidungsfindung unterstützt werden.

Für eine ökonomische Bewertung wird als produktlebenszyklusübergreifender Ansatz die Methode des Life cycle costings (LCC) ausgewählt (vgl. Kapitel 3.1.3). Aus Betreibersicht kann die LCC für unterschiedliche Anwendungsgebiete eingesetzt werden, bspw. als Entscheidungsunterstützung für alternative Produktionsprozesskonzepte oder alternative Instandhaltungs- oder Logistikkonzepte [143]. Im Kontext dieser Arbeit soll die Entscheidung über alternative Produktionsmittelkonfigurationen fokussiert werden. Das Vorgehen bei der LCC-Entwicklung ist generisch und muss auf die für den hier zu betrachtenden Anwendungsfall der automatisierten Montageanlagen bedarfsgerecht zugeschnitten werden (vgl. Abbildung 5-12).

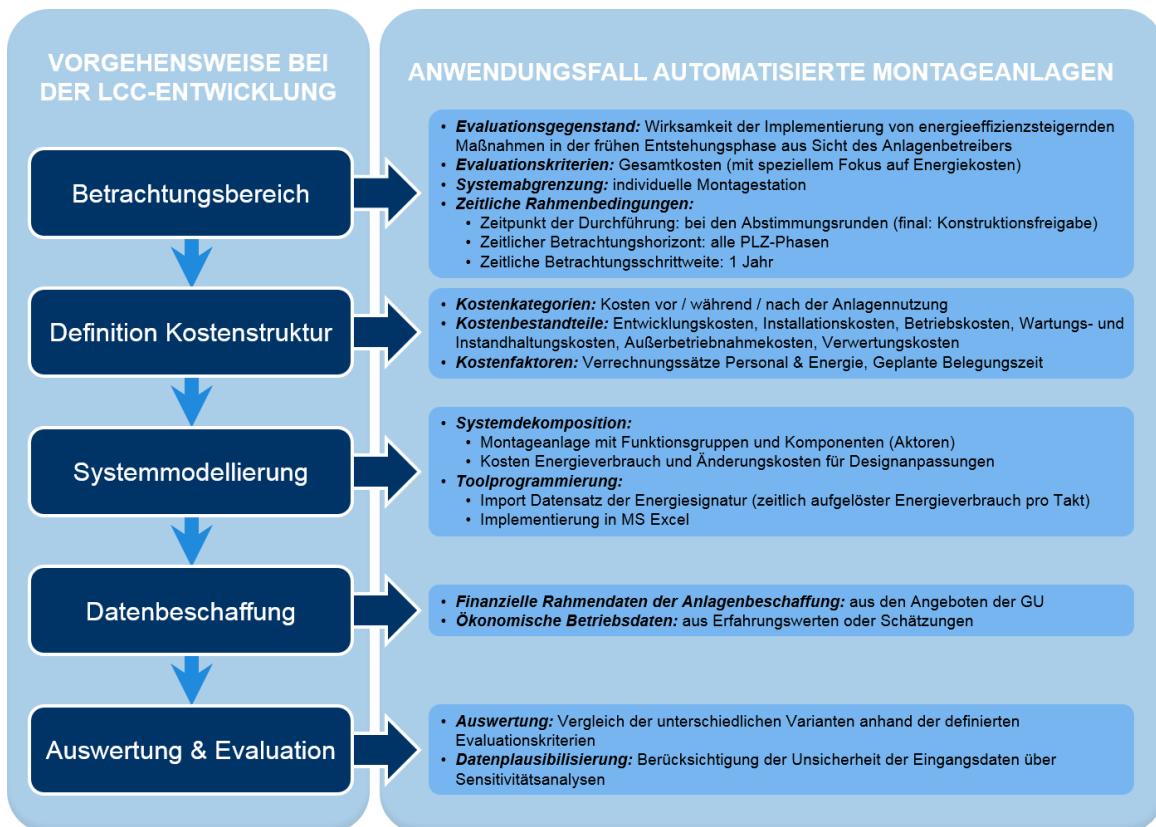


Abbildung 5-12: Vorgehen bei der LCC-Entwicklung für automatisierte Montageanlagen

Als initialer Schritt bei der LCC-Entwicklung wird der Betrachtungsbereich für die ökonomische Bewertung abgegrenzt. Evaluationsgegenstand im Rahmen dieser Arbeit ist die Wirksamkeit der Implementierung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in den frühen Phasen des Anlagenentstehungsprozesses automatisierter Montageanlagen. Als Evaluationskriterium werden die für den Anlagenbetreiber bzw.

Entwicklungsprojektauftraggeber entstehenden Gesamtkosten mit dem Fokus auf die Energiekosten ausgewählt. Die Systemgrenze umschließt dabei eine einzelne automatisierte Montageanlage, wobei der Bedarf für die Montageanlage bereits vonseiten der strategischen Produktionsplanung spezifiziert worden ist und in jedem Fall durch die operative Produktionsplanung des OEMs realisiert werden muss (vgl. Kapitel 2.1.1). Dabei sollte die LCC zu den während des Anlagenplanungs- und -absicherungsprozesses stattfindenden Abstimmungsrunden zwischen Planern des OEMs und den Konstrukteuren des GUs durchgeführt werden (insbesondere bei den Meilensteinen Konstruktions- und Fertigungsfreigabe, vgl. Kapitel 2.1.2). Dabei sollten alle Phasen des Produktlebenszyklus (Entwicklung, Nutzung, Entsorgung) mit einer zeitlichen Betrachtungsschrittweite von einem Jahr betrachtet werden.

Nach der Abgrenzung des Betrachtungsbereichs wird die für automatisierte Montageanlagen relevante Kostenstruktur definiert. Dabei sind aufgrund des gewählten zeitlichen Betrachtungshorizonts die Kostenkategorien vor, während und nach der Anlagennutzung von Interesse. Dabei stellen die Kosten vor der Nutzung die Entstehungskosten dar, die sich aus den Kostenbestandteilen Entwicklungs- und Installationskosten zusammensetzen. Kosten während der Nutzung werden durch die Betriebskosten und Wartungs- und Instandhaltungskosten repräsentiert, während sich die Entsorgungskosten aus den Außerbetriebnahme- und den Verwertungskosten zusammensetzen. Als Kostenfaktoren treten in diesem Zusammenhang die geplante Nutzungscharakteristik der automatisierten Montageanlage sowie die Verrechnungssätze für Energie- und Personalkosten auf.

Die Modellierung des für die LCC zu betrachtenden Systems ist im Rahmen der vorigen Prozessschritte ausführlich erläutert worden. Für die Anwendung im Kontext der LCC ist die Systemdekomposition in einzelne Funktionsgruppen und Komponenten mit den dazugehörigen Energieverbräuchen und korrespondierenden Energiekosten von elementarer Bedeutung. Der aus der Energiesignatur gewonnene Datensatz über die Energieverbräuche pro Takt wird für eine Weiterverarbeitung in das LCC-Tool (MS Excel) importiert.

Für die Durchführung der LCC ist zudem die Beschaffung der zur Berechnung verwendeten Eingangsdaten erforderlich. Die finanziellen Rahmendaten zur Anlagenbeschaffung (Kosten für das Entwicklungsprojekt) werden den Dokumentationsunterlagen des Angebots des GUs entnommen. Darüber hinaus werden die Betriebsdaten der Anlage aus Erfahrungswerten oder Schätzungen generiert. Der finale Schritt der LCC-Auswertung und Evaluation liefert einen Vergleich der beiden unterschiedlichen Auslegungsvarianten der automatisierten Montageanlage anhand der definierten Evaluationskriterien Gesamtkosten und Energiekosten. Des Weiteren wird hier eine Datenplausibilisierung in Form einer Sensitivitätsanalyse bzgl. der Eingangsdaten (hier: Energiepreisentwicklung) vorgenommen.

KAPITEL 6: SOFTWARETECHNISCHE IMPLEMENTIERUNG

Dieses Kapitel umfasst mit der Darstellung der softwaretechnischen Umsetzung einzelner Bestandteile der Methode zur energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen den finalen Abschnitt der *Prescriptive study* in Anlehnung an das DRM-Framework. Dabei wird zum einen auf die Modellierung der energieverbrauchenden Aktoren in einer physikbasierten Simulationsumgebung und zum anderen auf die Umsetzung des Tools zur produktlebenszyklusübergreifenden Wirtschaftlichkeitsanalyse eingegangen.

6.1. Physikbasierte Modellierung energieverbrauchender Aktoren

Die Auswahl der physikbasierten Simulationsumgebung basiert auf den in Kapitel 4.2 spezifizierten technischen Anforderungen an das Tool zur Physiksimulation bzw. an die Physik-Engine (vgl. Tabelle 4-2). Das Tool v-rep (virtual robot experimentation platform) erfüllt alle Anforderungen an die physikbasierte Simulationsumgebung, wobei die umfangreichen Schnittstellen zum Datenimport und -export sowie die ausführlich dokumentierte und erweiterbare API die wesentlichen Vorteile darstellen [367], [368]. Darüber hinaus stellt v-rep die beiden Physik-Engines Bullet und ODE (Open Dynamics Engine) in der jeweils aktuellsten Version zur Verwendung bereit.

Auf Basis der Ausführungen zu der Struktur und Funktionsweise einer automatisierten Montageanlage (vgl. Kapitel 3.1.1) sowie der ECU Klassifikation (vgl. Kapitel 5.2.2) wird folgend die physikbasierte Modellierung pneumatischer Aktoren, die physikbasierte Modellierung eines Industrieroboters sowie die physikbasierte Modellierung eines Elektromotors im Hinblick auf die jeweiligen Energieverbräuche vorgestellt.

6.1.1. Erweiterung des physikbasierten Modells für pneumatische Aktoren

Ein typischer pneumatischer Aktor besteht aus einem Zylindergehäuse, das durch einen beweglichen Kolben in eine linke und eine rechte Kammer aufgeteilt wird (vgl. Abbildung 6-1). In den beiden Kammer herrschen unterschiedliche Bedingungen, die durch die thermodynamischen Zustandsgrößen Luftmasse (m_l, m_r), Druck (p_l, p_r) und Volumen (V_l, V_r) definiert sind. Zudem sind die Kolbenflächen (A_l, A_r), auf die der in den Kammern vorliegende Druck wirken kann, durch die geometrischen Abmessungen des Zylinders bekannt. Das hier

vorgestellte physikbasierte Modell eines pneumatischen Aktors stellt eine Erweiterung des von Strahilov entwickelten physikbasierten Modells zur Abbildung des pneumatischen Verhaltens doppeltwirkender Linearzylinder dar [169], [341].

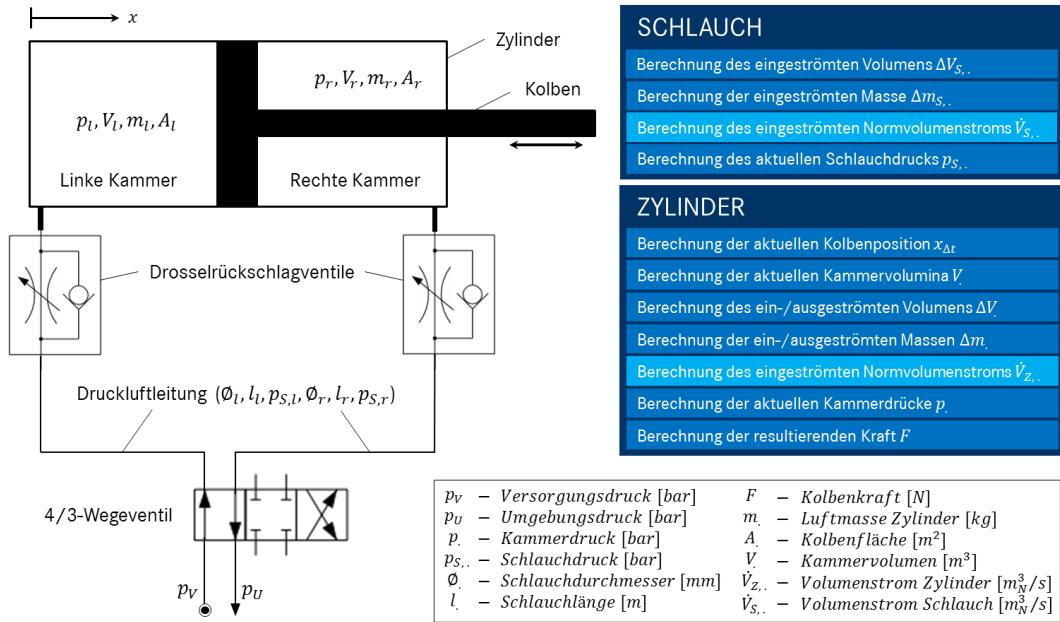


Abbildung 6-1: Schematische Darstellung des erweiterten physikbasierten Modells für pneumatische Aktoren (basierend auf [169], [341], [369])

Der Druckbeaufschlagungsvorgang eines pneumatischen Aktors besteht aus der Druckbeaufschlagung des Schlauchvolumens zwischen Ventilinsel und der zu beaufschlagenden Zylinderkammer sowie der Druckbeaufschlagung der Zylinderkammer. Über ein Ventil (hier: 4/3-Wegeventil) wird eine der beiden Zylinderkammern mit dem Versorgungsdruck p_V verbunden während die andere Kammer mittels des regulierbaren Drosselquerschnitts (0 ... 100%) des Drosselruckschlagventils mit der Umgebung (Umgebungsdruck p_U) verbunden ist. Die Bewegungsgeschwindigkeit eines Kolbens wird häufig durch die Drosselung der Abluft aus der nicht mit dem Versorgungsdruck beaufschlagten Kammer gesteuert (Abluftdrosselung) während die Belüftung der Antriebskammer ungedrosselt erfolgt. Die geschaltete Druckluft füllt die druckbeaufschlagte Kammer und bewirkt somit eine resultierende Kraft F auf den Kolben, die als Antriebskraft für Positionieren, Heben, Schwenken, Halten oder Klemmen verwendet werden kann.

Der Simulationsalgorithmus funktioniert als zweistufiger Prozess, wobei zunächst der Schlauch und anschließend die Zylinderkammer mit dem Versorgungsdruck beaufschlagt wird. Der Algorithmus beruht auf der vereinfachenden Annahme, dass Luft als ideales Gas betrachtet werden kann und verwendet die Zustandsgleichung idealer Gase. Des Weiteren wird angenommen, dass in dem zu füllenden Schlauch Umgebungsbedingungen herrschen.

Zudem werden alle Zustandsänderungen vereinfachend als isotherm angenommen. Der Algorithmus hat iterativen Charakter und wird für jeden Simulationsschritt in der physikbasierten Simulationsumgebung aufgerufen.

Wird das Ventil geschaltet, wird das in diesem Simulationsschritt Δt in den Schlauch eingeströmte Volumen $\Delta V_{S..}$ und die dazugehörige Masse der Druckluft berechnet. Auf Basis der eingeströmten Masse $\Delta m_{S..}$ wird der für die Energiebetrachtungen erforderliche Normvolumenstrom $\dot{V}_{S..}$ über die Zustandsgleichung idealer Gase berechnet. Hierfür werden die spezifische Gaskonstante ($R_{spez} = 287,058 \text{ J/(kgK)}$) sowie der normierte Umgebungsdruck ($p_{U,N} = 1,013 \text{ bar}$) verwendet.

$$[m_N^3/s] \dot{V}_{S..} = \frac{\Delta m_{S..} \cdot R_{spez} \cdot T}{\Delta t \cdot p_{U,N}} \quad (15)$$

Nach der Berechnung des nach dem Einströmen der Masse vorliegenden Schlauchdrucks $p_{S..}$, wird überprüft, ob der Schlauchdruck dem anliegenden Versorgungsdruck p_V entspricht. In diesem Fall wird der Algorithmus mit dem Füllen der Zylinderkammer fortgesetzt, andernfalls erfolgt eine erneute Durchführung des für die Füllung des Schlauchs erläuterten Algorithmusabschnitts.

Nach der kompletten Füllung des Schlauchs wird der Algorithmus zur Beschreibung des physikalischen Verhaltens eines doppeltwirkenden Linearzyinders durchgeführt. Nach der Bestimmung der aktuellen Position des Kolbens $x_{\Delta t}$ und der sich daraus ergebenden Kamervolumina V wird das ein- oder ausgeströmte Volumen ΔV und die dazugehörige Masse Δm bestimmt. Auf Basis der eingeströmten Luftmasse wird der erforderliche Volumenstrom $\dot{V}_{Z..}$ analog zu Gleichung (15) berechnet. Nach der Berechnung der vorliegenden Kammerdrücke p werden die auf die Kolbenflächen wirkenden Kräfte und die daraus resultierende Kraft F berechnet. Diese wird gemeinsam mit einer vorgegebenen maximalen Kolbengeschwindigkeit an das Translationsgelenk des Zylinders übergeben. Die bei der relativen Bewegung zwischen Kolben und Zylinder auftretenden Reibkräfte werden dabei in einem vereinfachten Modell mittels Haft- und Gleitreibung abgebildet.

Neben der Erweiterung des bestehenden Algorithmus um die Berechnung der von den Schläuchen entstehenden Verbräuche wurde der Algorithmus für die Anwendung auf unterschiedliche Typen von pneumatischen Aktoren erweitert (vgl. Tabelle 6-1). Neben dem doppeltwirkenden Linearzyylinder wurde jeweils ein Modell für einen einfachwirkenden Linearzyylinder sowie für einen Kniehebelspanner entwickelt. Bei einem einfachwirkenden Zylinder erfolgt der Rückhub nicht über die Druckbeaufschlagung einer Kammer, sondern wird über eine vorgespannte Rückstellfeder realisiert. Diese Feder wird häufig unter Vorspannung in die Linearzylindereinheit integriert und übt so eine Gegenkraft F_F auf den Kolben aus. Die Höhe der Federkraft ist dabei abhängig von der Kolbenposition x und der Federkonstanten k .

Die Federkonstante wurde dabei für verschiedene Modelle einfachwirkender Zylinder im Rahmen einer prototypischen Umsetzung von einem Komponentenhersteller bereitgestellt.

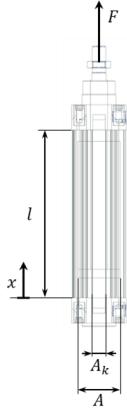
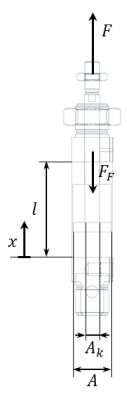
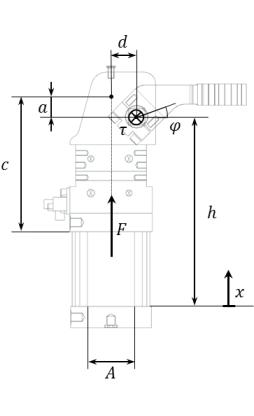
Bauart	Doppeltwirkender Linearzylinder	Einfachwirkender Linearzylinder	Kniehebelspanner
Implementierte Gleichungen	$F = p_l \cdot A - p_r \cdot (A - A_k)$	$F = p_l \cdot A - F_F$ $= p_l \cdot A - k \cdot x$	$\tau = d \cdot F$ $= d \cdot [p_l \cdot A - p_r \cdot (A - A_k)]$ $x(\varphi) = h - c + a \cos(\varphi)$ $- \sqrt{b^2 - (d - a \sin(\varphi))^2}$
Schematische technische Zeichnung			
Gelenkart	Translationsgelenk	Translationsgelenk	Rotationsgelenk

Tabelle 6-1: Schematische technische Darstellung der modellierten pneumatischen Aktoren

Darüber hinaus wurde ein Modell für einen Kniehebelspanner entwickelt. Kniehebelspanner kommen in Anlagen zur Automobilproduktion häufig für Positionierungs- und Fixierungsoperationen zum Einsatz und weisen durch den Kniehebelmechanismus eine große Haltekraft bei einer relativ geringen Hubbewegung auf. Im Gegensatz zu dem doppeltwirkenden und einfachwirkenden Linearzylinder wird der Kniehebelspanner über ein Rotationsgelenk mit dem Drehwinkel φ realisiert. Dementsprechend wirkt statt einer Kraft ein Drehmoment, das im Algorithmus bei der Berechnung der resultierenden Kraft aus der Multiplikation mit dem Hebelarm d entsteht und gemeinsam mit einer maximalen Drehgeschwindigkeit an das Rotationsgelenk übergeben wird.

Programmiertechnisch wird der Algorithmus in einem Ausführungsskript umgesetzt, das an dem zu dem Zylinder gehörigen Gelenk angehängt ist. Hierbei werden für jeden Zylinder im Rahmen einer Initialisierung die geometrischen Zylinder- und Schlauchparameter (l, A , bzw. \emptyset, l) angegeben bevor für jeden Simulationsschritt der erläuterte Algorithmus ausgeführt wird. Die Daten des erforderlichen Volumenstroms werden für jeden pneumatischen Aktor individuell berechnet und dann in einer separaten Einheit aggregiert. Aus dieser separaten Einheit wird die grafische Ausgabe in Form des aggregierten Volumenstroms über der Zeit generiert.

6.1.2. Sechsachsiger Industrieroboter

Industrieroboter sind universell einsetzbare, programmierbare Bewegungsautomaten, die mit Werkzeugen oder Fertigungsmitteln (Effektoren) ausrüstbar sind, um Handhabungs- oder Fertigungsaufgaben ausführen zu können [154]. In der Automobilproduktion werden überwiegend sechsachsige Vertikalknickarmroboter unterschiedlicher Größe und Traglastkapazität eingesetzt. Das physikbasierte Modellierung des Energieverbrauchs eines sechsachsigen Industrieroboters wird hier am Beispiel des KUKA KR210-2 erläutert.

Der Fokus bei der physikbasierten Modellierung des Energieverbrauchs des Industrieroboters liegt auf der detailgetreuen Modellierung der mechanischen Roboterbestandteile, die einen wesentlichen Einfluss auf die Dynamik des Roboters ausüben und somit einen wesentlichen Beitrag zum Energieverbrauch des Roboters liefern. Die mit dem eigentlichen Robotermanipulator verwendete Roboterperipherie (Schaltkasten mit Lüfter, Steuerungs-PC, Steuerungs-Panel) sowie elektrische Bauteile (Gleichrichter, Bussystem, Wechselrichter) stehen nicht im Fokus der Arbeit, obwohl diese einen nicht unwesentlichen Anteil am Energieverbrauch des Gesamtsystems des Industrieroboters darstellen. Diese Anteile sind allerdings überwiegend statischer Natur und müssen somit unabhängig vom Lastzustand des Roboters zur Bereitstellung der Betriebsbereitschaft des Roboters aufgewendet werden. Mit Hilfe der physikbasierten Modellierung sollen die lastabhängigen Energieverbräuche ermittelt werden, auf deren Basis eine Erhöhung der Energieeffizienz im Rahmen der mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen erzielt werden kann. Vor diesem Hintergrund soll daher die Modellierung überwiegend statischer Energieverbräuche des Industrieroboters vernachlässigt werden. Die physikbasierte Modellierung des Energieverbrauchs des Industrieroboters beschränkt sich somit auf den eigentlichen Robotermanipulator und den dort enthaltenen Elementen. Die mathematische Modellierung erfolgt hierbei auf Basis einer Kombination unterschiedlicher bestehender Modellierungsansätze (vgl. [162], [370], [371], [372], [373], [374], [375]).

Das physikbasierte Modell des Industrieroboters basiert auf einer offenen (seriellen) kinematischen Kette, dessen einzelne Glieder (Achsen) durch Rotationsgelenke miteinander verbunden sind. An dem finalen Kettenglied befindet sich der Effektor (Werkzeug, Tool), der den Bezugspunkt des Roboters (TCP – Tool Center Point) definiert und mittels eines starren Gelenks mit der sechsten Achse verbunden ist. Die sechs Freiheitsgrade werden durch die Hauptachsen (Grundachsen, Achsen 1 bis 3) im Wesentlichen zur Positionsvariation sowie den Nebenachsen (Handachsen, Achsen 4 bis 6) hauptsächlich zur Orientierungsvariation verwendet und sind durch Achswinkelbeschränkungen limitiert [299]. Die Achswinkelbeschränkungen sowie die maximalen Achswinkelgeschwindigkeiten wurden hierbei dem Datenblatt des Herstellers entnommen [376]. Daraus ergeben sich der kugelförmige Arbeitsraum (Volumen, das durch die Gesamtheit aller potentiellen TCP-Posen

eingenommen wird) sowie der Kollisionsraum (Volumen, das der Roboter bei der Bewegungsdurchführung potentiell einnehmen kann) des Roboters [377].

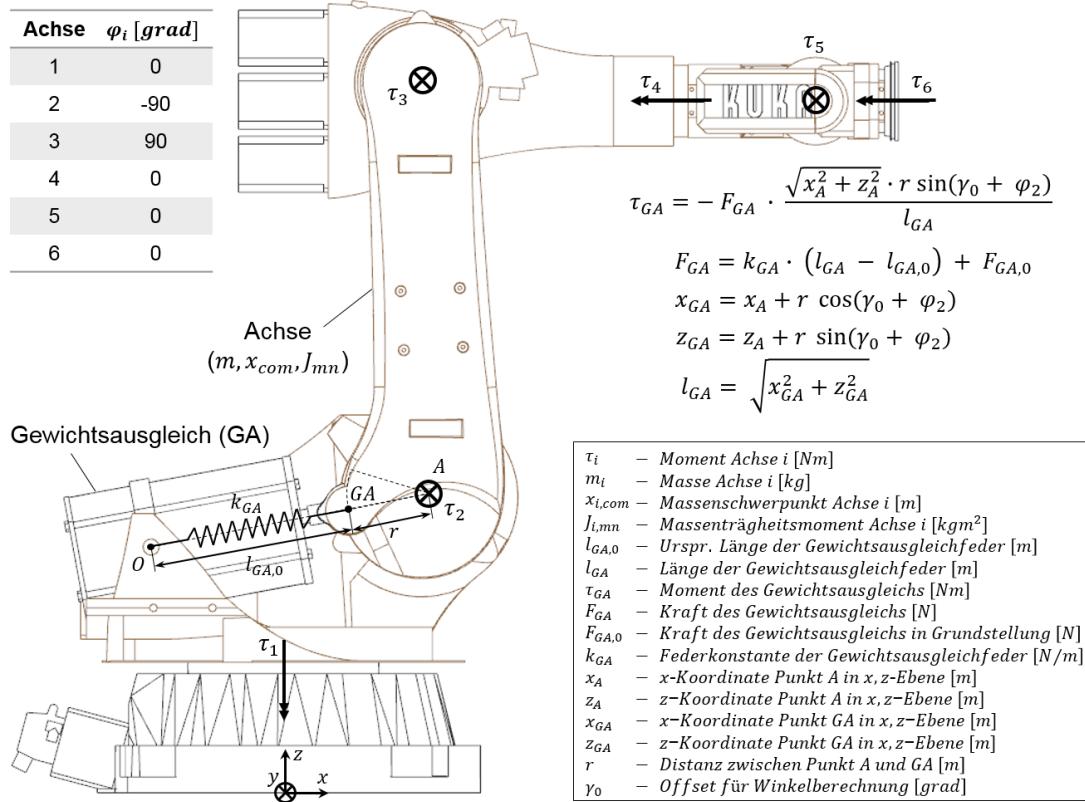


Abbildung 6-2: Schematische technische Darstellung der betrachteten Elemente bei der physikbasierten Modellierung des Energieverbrauchs eines Industrieroboters

In Abbildung 6-2 ist die Grundstellung (Kanonenstellung) eines sechsachsigen Industrieroboters ohne Effektor mit den dazugehörigen Achspositionen φ_i und den an den Rotationsgelenken wirkenden Achsmomenten τ_i in jeweils positiver Drehrichtung bezogen auf das globale Koordinatensystem xyz im Flächenmittelpunkt des Sockels (Achse 0) dargestellt. Die einzelnen Achsen i des Industrieroboters sind dabei durch ihre Massen m_i , die Massenschwerpunkte $x_{i,com}$ sowie die Massenträgheitsmomente $J_{i,mn}$ um die jeweiligen Drehachsen m und n in einem auf den Achskörper bezogenen Koordinatensystem charakterisiert. Vereinfachend werden bei der physikbasierten Modellierung des Industrieroboters die Achsen als steife (unverformbare), starre Körper angenommen. Die dynamischen Charakteristika der einzelnen Roboterachsen sind vertrauliche Daten des Roboterherstellers.

Neben den einzelnen Achsen muss bei der Modellierung der Kinematik und der Dynamik eines sechsachsigen Industrieroboters zusätzlich der Einfluss des Gewichtsausgleichs (GA) berücksichtigt werden. Der Gewichtsausgleich dient der Belastungsreduzierung der Antriebe durch die durch das Eigengewicht erzeugten Gravitationskräfte und wird üblicherweise

zwischen Achse 1 und Achse 2 installiert. Der Gewichtsausgleich kann vereinfachend als ein Feder-Masse-System aufgefasst werden, das bei der Auslenkung von Achse 2 ein zusätzliches Moment τ_{GA} aufbringt und somit einen Beitrag zu dem Achsmoment τ_2 liefert.

$$[Nm] \tau_{GA} = -F_{GA} \cdot \frac{\sqrt{x_A^2 + z_A^2} \cdot r \sin(\gamma_0 + \varphi_2)}{l_{GA}} \quad (16)$$

Dabei ergibt sich τ_{GA} durch die Rückstellkraft des Gewichtsausgleichs F_{GA} und dem von der Achsposition φ_2 abhängigen Hebelarm. Die Kraft des Gewichtsausgleichs lässt sich vereinfacht auf Basis der Kraftgleichung einer vorgespannten Feder als Summe der Federkraft des Gewichtsausgleichs in Robotergrundstellung $F_{GA,0}$ und der bei Auslenkung zusätzlich wirkenden Federkraft F_{GA} darstellen.

$$[N] F_{GA} = k_{GA} \cdot (l_{GA} - l_{GA,0}) + F_{GA,0} \quad (17)$$

Die Federkraft im ausgelenkten Zustand setzt sich dabei aus dem Produkt aus der Federkonstanten k_{GA} und der Wegdifferenz der Feder zusammen. Der Hebelarm für das Moment τ_{GA} ist durch geometrische Abmessungen sowie durch die Abbildung der kinematischen Abhängigkeiten zwischen dem Fixierpunkt O des GA an Achse 1, dem Achsaufhangungspunkt A der Achse 2 sowie dem Fixierpunkt GA des Gewichtsausgleichs an Achse 2 definiert (vgl. Abbildung 6-2).

$$[m] x_{GA} = x_A + r \cos(\gamma_0 + \varphi_2) \quad (18)$$

$$[m] z_{GA} = z_A + r \sin(\gamma_0 + \varphi_2) \quad (19)$$

$$[m] l_{GA} = \sqrt{x_{GA}^2 + z_{GA}^2} \quad (20)$$

Aus diesen trigonometrischen Zusammenhängen lässt sich mit dem Drehwinkel-Offset zur Winkelberechnung γ_0 der Hebelarm für jede zugelassene Position von Achse 2 bestimmen.

Die Modellierung des Antriebsstrangs einer einzelnen Roboterachse wird durch die Modellierung des Motors und des Getriebes inklusive der im Antriebsstrang auftretenden Reibung vorgenommen. Es wird dabei vereinfachend angenommen, dass jeder Antriebsstrang nur jeweils eine Achse des Roboters antreibt. In Abbildung 6-3 ist das Vorgehen bei der Modellierung und der Algorithmus zur Berechnung des Energieverbrauchs eines Antriebsstrangs exemplarisch anhand von Achse 3 dargestellt. Hier ist der auf der Oberseite der Achse installierte Motor über eine Gelenkwelle mit dem Getriebe verbunden und bewirkt eine am Achsende vorliegende mechanische Leistung P_{mech} , die sich aus dem Produkt des

Achsmomentes τ_A (bzw. hier: τ_4 , vgl. Abbildung 6-2) und der Achswinkelgeschwindigkeit ω_A (bzw. $\dot{\varphi}_4$) ergibt.

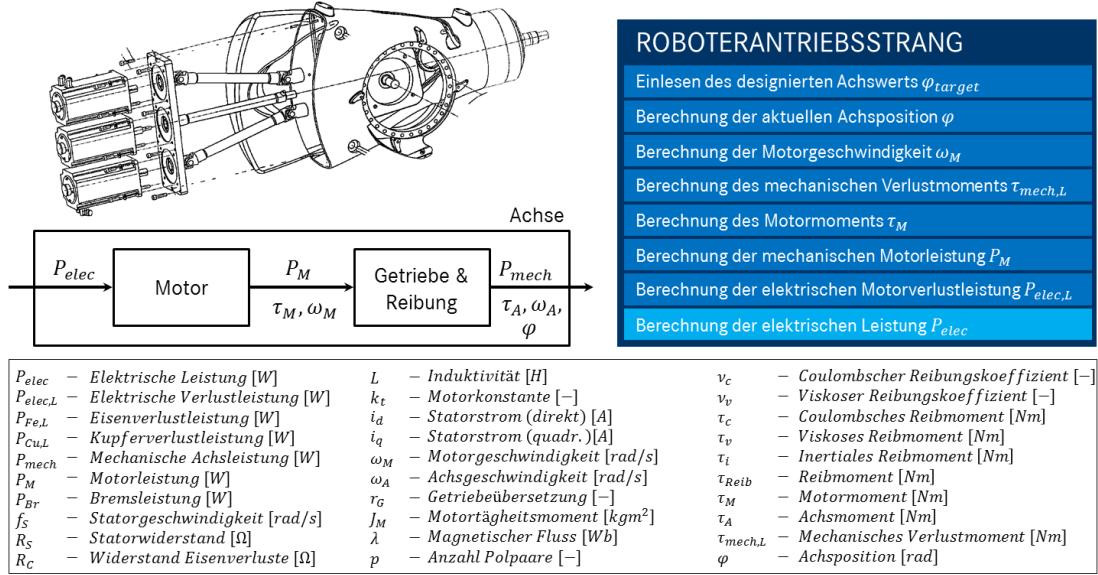


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung des physikbasierten Modells zur Berechnung des Energieverbrauchs eines Roboterantriebsstrangs

$$[W] P_{mech} = \tau_A \cdot \omega_A \quad (21)$$

Das von dem Motor aufzubringende Moment τ_M setzt sich dabei zusammen aus der Summe des mit der Getriebeübersetzung r_G beaufschlagten Moments zur Abbildung des dynamischen Verhaltens des starren Achskörpers τ_A und des mechanischen Verlustmoments $\tau_{mech,L}$, das sich aus den Reibverlustmoment τ_{Reib} und der inertialen Getriebeträgheit τ_i zusammensetzt.

$$[Nm] \tau_M = \frac{\tau_A}{r_G} + \tau_{mech,L} = \frac{\tau_A}{r_G} + \tau_{Reib} + \tau_i \quad (22)$$

Dabei wird das Moment für das dynamische Verhalten des starren Achskörpers τ_A aus der Dynamikgleichung für starre Kräfte unter Berücksichtigung der Massenträgheit, Coriolis-, Zentrifugal- und Gravitationskräfte von der Physik-Engine für jeden Simulationsschritt in Abhängigkeit der Achsposition und -geschwindigkeit berechnet und bereitgestellt. Die einzelnen Verlustmomente bestehend aus dem Coulombschen Reibmoment τ_c und dem viskosen Reibmoment τ_v sowie der inertialen Trägheit von Motor und Getriebe τ_i ergeben sich vereinfacht mit den Reibkoeffizienten v_c und v_v sowie der aus der Getriebeübersetzung berechneten Motorwinkelgeschwindigkeit ω_M zu:

$$[Nm] \tau_{Reib} = \tau_c + \tau_v = \nu_c sign(\omega_M) + \nu_v \omega_M \quad (23)$$

$$[Nm] \tau_i = J_M \dot{\omega}_M \quad (24)$$

Daraus kann die von dem Motor aufzubringende mechanische Motorleistung P_M berechnet werden, die sich aus dem Produkt des Motormoments und der Motorwinkelgeschwindigkeit ergibt.

$$[W] P_M = \tau_M \cdot \omega_M \quad (25)$$

Neben der mechanischen Leistung P_M für den Roboterantriebsstrang ist zusätzlich die elektrische Verlustleistung des Motors $P_{elec,L}$ bei der Berechnung der gesamten elektrischen Leistung des Antriebsstrangs P_{elec} miteinzubeziehen.

$$[W] P_{elec} = P_M + P_{elec,L} = P_M + P_{Fe,L} + P_{Cu,L} \quad (26)$$

Überwiegend werden in Industrierobotern permanentmagneterregte Synchronmotoren unterschiedlicher Bauart eingesetzt, deren elektrische Statorverluste im Wesentlichen auf Eisen- $P_{Fe,L}$ und Kupferverluste $P_{Cu,L}$ zurückzuführen sind. Für die Modellierung eines permanentmagneterregten Synchronmotors (PMSM) wird auf die Methode der d/q-Transformation (auch: Park Transformation) zurückgegriffen (vgl. [378]). Dabei erfolgt eine Überführung der dreiphasigen Drehstromgrößen in eine zweidimensionale Darstellung auf Basis eines rotorfesten, mitdrehenden Koordinatensystems. Dadurch können alle sinusförmigen Wechselgrößen im stationären Fall als zeitlich konstante Größen betrachtet werden. Das d/q-Ersatzschaltbild einer PMSM ist in Abbildung 6-4 dargestellt.

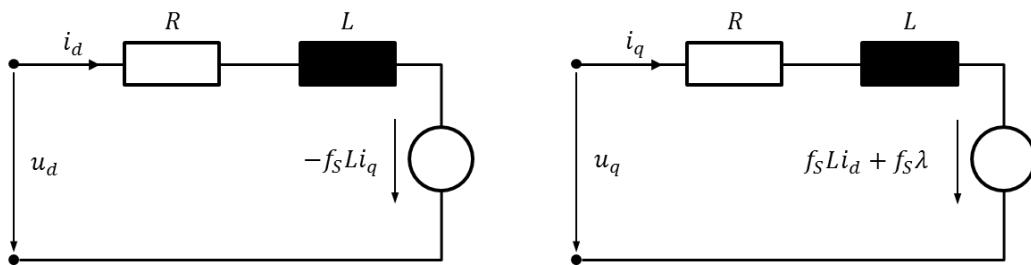


Abbildung 6-4: d/q-Ersatzschaltbild einer PMSM

Dabei stellen die mit d bzw. q indizierten Größen die direkten bzw. quadratischen Größen in der d/q-Darstellung dar. Unter der vereinfachenden Annahme eines rotationssymmetrischen Aufbaus des Rotors ($L_q = L_d = L$) und der Vernachlässigung des momentirrelevanten Flussstroms ($i_d = 0$) können die elektrischen Statorverluste berechnet werden. Die

Statorfrequenz f_S hängt dabei linear von der Anzahl der Polpaare p sowie der Motorgeschwindigkeit ω_M ab.

$$[\text{rad/s}] f_S = p \omega_M \quad (27)$$

Die elektrischen Verluste in den Kupferwicklungen des Stators können aus einem konstant angenommenen Statorwiderstand R_S (unter der Annahme einer Arbeitstemperatur des Motors von $T_w = 343,15 \text{ K}$) und dem momentbildenden Strom i_q berechnet werden. Die Eisenverluste $P_{L,Fe}$ lassen sich vereinfacht unter der Verwendung des Widerstands für Eisenverluste R_C der Induktivität L und des magnetischen Flusses λ annähern.

$$[W] P_{Cu,L} = \frac{3}{2} i_q^2 R_S \quad (28)$$

$$[W] P_{Fe,L} = \frac{3}{2} \frac{f_S}{R_c} \left[(Li_d + \lambda)^2 + (Li_q)^2 \right] \quad (29)$$

Für eine exaktere Modellierung des elektrischen Energieverbrauchs eines Roboters kann hier weiterführend eine Abbildung der elektrischen Verluste in den elektrischen Bauteilen (Gleichrichter, Wechselrichter, DC-Bus) erfolgen. Die Modellierung des Energiebedarfs für das Offthalten der Motorbremse P_{Br} wurde vereinfacht über einen zeitlichen Steuerung abgebildet: befindet sich der Roboter für eine definierbare zeitliche Dauer T_{Br} in Ruhe, so wird der Energiebedarf für das Offthalten der Bremsen bis zu einem erneuten Bewegungsstart nicht berücksichtigt.

$$[W] P_{Br} = \begin{cases} 1, & \text{für } T \leq T_{Br} \\ 0, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (30)$$

Die programmiertechnische Umsetzung im physikbasierten Simulationstool erfolgt nach dem Aufbau der kinematischen Kette des Roboters durch die Implementierung des beschriebenen Algorithmus in ein Ausführungsskript des Gelenks, das zwischen zwei Achsen des Roboters angelegt ist. Nach einer Initialisierung der mechanischen und elektrischen Parameter für jede Achse wird der Algorithmus in jedem Simulationsschritt ausgeführt. Die Ergebnisse der Leistungsberechnung werden individuell für jede Achse über dem zeitlichen Verlauf grafisch dargestellt. Zudem werden die individuellen Achsleistungen in einer separaten Einheit aggregiert und ebenfalls grafisch ausgegeben.

6.1.3. Drehstromasynchronmaschine mit Getriebe und Frequenzumrichter

Frequenzumrichtergespeiste, drehzahlvariable Drehstromasynchronmaschinen werden in der Industrie häufig als Antriebslösung eingesetzt. Die physikbasierte Modellierung des Energieverbrauchs einer frequenzgesteuerten Drehstromasynchronmaschine wird hier am Beispiel des Modells GKS06-3M VBR 080C32 der Firma Lenze erläutert. Eine schematische

Darstellung des physikbasierten Modells zur Energieverbrauchsberechnung einer Drehstromasynchronmaschine (ASM) mit Getriebe und Frequenzumrichter ist in Abbildung 6-5 dargestellt.

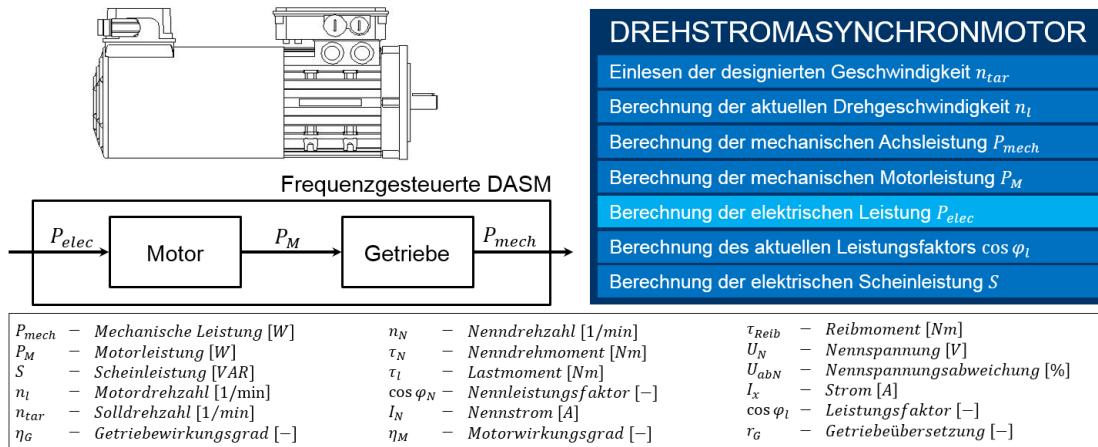


Abbildung 6-5: Schematische Darstellung des physikbasierten Modells zur Berechnung des Energieverbrauchs einer frequenzgesteuerten Drehstromasynchronmaschine mit Getriebe

Der Drehstromasynchronmotor wird dabei durch einen Frequenzumrichter gespeist, der durch die Anpassung der Statorfrequenz f_S die Synchondrehzahl n_S unter Berücksichtigung der Anzahl der Polpaare p linear beeinflusst.

$$[min^{-1}] n_S = \frac{f_S}{p} \quad (31)$$

Im Gegensatz zu der PMSM muss bei der ASM für die Modellierung zwischen einer Anlaufphase und einer stationären Phase unterschieden werden. In der Anlaufphase nähert sich die aktuelle Motordrehzahl n_l an die den designierten Betriebspunkt kennzeichnende Solldrehzahl n_{tar} an, wobei die Berechnung der aktuellen Drehzahl auf Basis des Positionsunterschieds zwischen zwei aufeinanderfolgenden Simulationsschritten unter Berücksichtigung des Getriebeübersetzungsverhältnis r_G erfolgt. Die mechanische Achsleistung P_{mech} entspricht dem Produkt des Drehmoments τ_l mit der Achswinkelgeschwindigkeit.

$$[kW] P_{mech} = \tau_l \cdot 2 \pi n_l / 60 \quad (32)$$

Unter Berücksichtigung des als konstant angenommenen Wirkungsgrads des Getriebes wird die vom Motor abgegebene Leistung P_M bestimmt.

$$[kW] P_M = \frac{P_{mech}}{\eta_{GT}} \quad (33)$$

Der drehzahlabhängige Wirkungsgrad η_M berücksichtigt die Stromwärmeverluste im Stator und Rotor und stellt den Zusammenhang zwischen der aus dem Netz aufgenommenen elektrischen Wirkleistung P_{elec} und der mechanischen Motorleistung P_M her.

$$[-] \eta_M = \frac{P_M}{P_{elec}} \quad (34)$$

Aus dem Datenblatt des Motors geht hervor, dass η_M bei $P_M \geq 0.75 P_N$ konstant ist. Daher wird bei der Modellierung von einem konstanten Wirkungsgrad ausgegangen. Der betriebspunktabhängige Wirkleistungsfaktor $\cos \varphi_l$ wird vereinfachend über einen linearen Zusammenhang abgebildet.

$$[-] \cos \varphi_l = \left[\cos \varphi_N - \left(1 - \frac{\Delta \cos \varphi}{\Delta n} \right) \cos \varphi_N \right] \frac{n_l}{n_N} + \left(1 - \frac{\Delta \cos \varphi}{\Delta n} \right) \cos \varphi_N \quad (35)$$

Dabei entspricht $\frac{\Delta \cos \varphi}{\Delta n}$ der Steigung der Geraden zur Abbildung des angenommenen linearen Zusammenhangs zwischen dem Wirkleistungsfaktor und der Drehzahl. Daraus kann die Scheinleistung S bestimmt werden.

6.2. Umsetzung der ökonomischen Bewertungsumfänge

Die Umsetzung der ökonomischen Bewertungsumfänge umfasst zum einen die Implementierung der produktlebenszyklusphasenübergreifende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (LCC) und zum anderen die im Rahmen der Methode verwendeten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei den Prozessschritten EEIM-Analyse sowie EEIM-Implementierung.

6.2.1. LCC-Umsetzung

Die Umsetzung der LCC erfolgt auf Basis des vorgestellten Vorgehens bei der LCC-Entwicklung für automatisierte Montageanlagen mit Hilfe des Tools MS Excel (vgl. Kapitel 5.6). Die Abgrenzung des *Betrachtungsbereichs* sowie die Definition der *Kostenstruktur* wird zum einen in den Arbeitsblättern Modellkonfiguration bzw. -spezifikation und zum anderen in dem Arbeitsblatt Kostenstruktur umgesetzt. Bei der Modellkonfiguration werden neben der Angabe der individuellen Projektdaten (Anlagenlieferant, Anlagenverwendungszweck, Bearbeiter, etc.) die in die LCC einzubeziehenden Einzelbestandteile der Entstehungs-, Nutzungs- und Entsorgungskosten ausgewählt. Mit Hilfe der Modellspezifikation werden die Rahmendaten für die Gesamtkostenberechnung im Rahmen der LCC definiert. Hierbei werden bei der Definition der Anlagen-Charakteristik das Anlagen-Nutzungsprofil, die

Belastungscharakteristik sowie die Leistungscharakteristik festgelegt. Aus der Angabe der geplanten Anlagenlaufzeit t_{ALZ} , des angewendeten Schichtsystems SS , der Wochenarbeitstage t_t und der Einsatzzeit t_W ergibt sich die für den gesamten Nutzungszeitraum der Anlage geplante Belegungszeit T_B (vgl. Abbildung 6-6).

Anlagen-Charakteristik				
Anlagen-Nutzungsprofil				
Geplante Anlagenlaufzeit	t_{ALZ}	7	[Jahre]	Anzahl der geplanten Betriebsjahre
Schichtsystem	SS	Einschichtbetrieb	[Schichten/Tag]	Anzahl der Schichten pro Arbeitstag
Wochenarbeitstage	t_t	5	[Tage/Woche]	Anzahl der Arbeitsstage pro Woche
Einsatzzeit	t_W	48	[Wochen/Jahr]	Anzahl der Arbeitswochen pro Jahr
Jahresbetriebsstunden	t_j	1920	[h/Jahr]	Anzahl der Betriebsstunden pro Jahr
Geplante Belegungszeit	T_B	13440	[h]	Summe der Betriebsstunden über die geplante Anlagenlaufzeit
Nutzungsgrad	N_G	99.80	[%]	Prozentualer Anteil der geplanten Belegungszeit, in der die Anlage störungsfrei der Produktion zur Verfügung steht
Belastungscharakteristik				
Lastbetrieb	LB	98.99	[%]	Prozentualer Anteil der Nutzungszeit, in der sich die Anlage unter Last befindet
Standby-Betrieb	SB	1.01	[%]	In den Pausenzeiten während der Schichten und im Schichtwechsel befindet sich die Anlage im Standby-Betrieb
Leistungscharakteristik				
Taktzeit	t_{TZ}	70	[s]	Dauer der Taktzeit
Ausbringung/Takt	AB_T	1	[Stck./Takt]	Anzahl der pro Takt ausgebrachten Produkte/Halbzeuge

Abbildung 6-6: Anlagencharakteristik bei der Modellspezifikation der LCC

Der Nutzungsgrad N_G definiert den prozentualen Anteil der geplanten Belegungszeit, in der die Anlage störungsfrei zur Verfügung steht. Die Belastungscharakteristik beschreibt darüber hinaus den prozentualen Anteil der um den Nutzungsgrad verringerten geplanten Belegungszeit, die die Anlage im Last- bzw. Standby-Betrieb verbringt. In der Leistungscharakteristik sind die Angaben für die Taktzeit t_{TZ} und die taktbezogene Ausbringung AB_T hinterlegt.

Verrechnungssätze				
Verrechnungssätze Energie				
Strompreis	kelekt	0.1500	[€/kWh]	Gemittelter Strompreis (Durchschnittsentgeltpreis) für industrielle Kunden basierend auf Arbeits- und Leistungspreis
Druckluftpreis	k_pneum	0.0225	[€/m _N ³]	Aus Erfahrungswerten ermittelte Kosten für die Bereitstellung eines m ³ Druckluft in Normbedingungen
Verrechnungssätze Personal				
Stundensatz Ingenieur	R _{Ing}	109.00	[€/h]	Verechnungssatz für zusätzliche Entwicklungsaufwände durch einen Ingenieur pro Stunde
Stundensatz Servicetechniker	R _{Ser}	77.00	[€/h]	Verechnungssatz für zusätzliche Wartungsaufwände durch einen Servicetechniker pro Stunde
Stundensatz Maschinenführer	R _{Mas}	60.00	[€/h]	Verechnungssatz für zusätzliche Bedienungsaufwände durch einen Maschinenführer pro Stunde
Stundensatz Monteur	R _{Mon}	69.00	[€/h]	Verechnungssatz für zusätzliche Inbetriebnahmeaufwände durch einen Monteur pro Stunde

Abbildung 6-7: Verrechnungssätze bei der Modellspezifikation LCC

Darüber hinaus werden im Rahmen der Modellspezifikation der LCC die zu verwendenden Verrechnungssätze festgelegt (vgl. Abbildung 6-7). Hierbei sind zum einen die Sätze zur Berechnung der Energiekosten (Strompreis k_{elektr} und Druckluftpreis k_{pneum}) und zum anderen die Sätze zur Berechnung der Personalkosten hinterlegt. Die zugrundeliegenden Werte dienen dabei als Richtwerte und stammen aus Erfahrungswerten bzw. wurden aus vergleichbaren Berechnungsvorschriften übernommen.

Kostenstruktur					
Symbol	Kostenart	Erläuterung	Einheit	Zusammensetzung	
Kosten vor der Nutzung - Entstehungskosten					
E	Entstehungskosten				
E.1	Entwicklungskosten			E.1.1 + E.1.2 + E.1.3 + E.1.4	
E.1.1	Konstruktions- und Auslegungskosten	Kosten für die Konzeption, Konstruktion und Auslegung der Gesamtanlage mit allen Funktionsgruppen, Komponenten und Verbindungsselementen	[€]	# erforderlicher Engineering-hours * R_{Eng}	
E.1.2	Komponentenkosten	Kosten für die Beschaffung verwandelter Standardbauteile und -komponenten von den Komponentenherstellern	[€]	Summe der Einzelkosten	
E.1.3	Fertigungs- und Beschaffungskosten	Kosten für die Fertigung und Beschaffung von Nicht-Standardbauteilen	[€]	Summe der Einzelkosten	
E.1.4	Projekmanagementkosten	Kosten für die Durchführung des Entwicklungsprojekts (Reisekosten, Toolkosten, IT-Kosten, etc.)	[€]	Summe der Einzelkosten	
E.2	Installationskosten			E.2.1 + E.2.2 + E.2.3 + E.2.4 + E.2.5 + E.2.6	
E.2.1	Montage- und Errichtungskosten	Kosten für die Errichtung der Montageanlage an ihrem designierten Standort auf dem shop-floor	[€]	# erforderlicher Monteurstunden * R_{Men}	
E.2.2	Bauliche Infrastrukturkosten	Kosten für die Anpassung der baulichen Infrastruktur in der Montagehalle	[€]	# erforderlicher Monteurstunden * R_{Men}	
E.2.3	Versorgungs-Infrastrukturkosten	Kosten für die Anpassung der Versorgungs-Infrastruktur der Montagehalle in Form von Energie- und Medienanschlüssen	[€]	# erforderlicher Monteurstunden * R_{Men}	
E.2.4	Inbetriebnahmekosten	Kosten für die Inbetriebnahme der Montageanlage auf dem shop-floor	[€]	# erforderlicher Monteurstunden * R_{Men}	
E.2.5	Zertifizierungskosten	Kosten für die Sicherheitsabnahme und die Zertifizierung der Montageanlage	[€]	# erforderlicher Monteurstunden * R_{Men}	
E.2.6	Schulungskosten	Kosten für die Schulung der für die Anlage zuständigen MA	[€]	Summe der Einzelkosten	
Kosten während der Nutzung - Nutzungskosten					
N	Nutzungskosten				
N.1	Betriebskosten			N.1.1 + N.1.2 + N.1.3 + N.1.4	
N.1.1	Energiekosten	Zeitraumbezogene Kosten für die erforderlichen Energieträger zum Betrieb der Anlage	[€/Jahr]	Erforderlicher Jahresenergiebedarf * gemittelter Energieträgerpreis	
N.1.2	Hilfsstoffkosten	Zeitraumbezogene Kosten für die erforderlichen Hilfsstoffe zum Betrieb der Anlage	[€/Jahr]	Erforderlicher Jahresenergiebedarf * gemittelter Hilfsstoffpreis	
N.1.3	Personalkosten	Zeitraumbezogene Personalkosten für das Bedienpersonal der Montageanlage	[€/Jahr]	Jahresbetriebsstunden * R_{Men}	
N.1.4	Versicherungskosten	Zeitraumbezogener Versicherungsbeitrag zur Absicherung gegen von der Anlage verursachte Schäden	[€/Jahr]	Jährlicher Versicherungsbeitrag	
N.2	Wartungs- und Instandhaltungskosten			N.2.1 + N.2.2	
N.2.1	Präventive Maßnahmen	Zeitraumbezogene Kosten für die Durchführung geplanter, präventiver Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen	[€/Jahr]	# erforderlicher präventiver IH-Stunden * R_{Ser}	
N.2.2	Korrektive Maßnahmen	Zeitraumbezogene Kosten für die Durchführung korrektiver Instandsetzungsmaßnahmen nach einem ungeplanten Ausfall	[€/Jahr]	# erforderlicher korrekter IH-Stunden * R_{Ser}	
Kosten nach der Nutzung - Entsorgungskosten					
R	Entsorgungskosten				
R.1	Außenbetriebnahmekosten			R.1.1 + R.1.2	
R.1.1	Demontagekosten	Kosten für den Ab- und Rückbau sowie die Reinigung der Montageanlage	[€]	# erforderlicher Demontagestunden * R_{Men}	
R.1.2	Betriebsstoffentsorgungskosten	Kosten für die Entsorgung von Betriebs- oder Hilfsstoffen	[€]	Summe der Einzelkosten	
R.2	Verwertungskosten			R.2.1 + R.2.2	
R.2.1	Recyclingkosten	Kosten für die fachgerechte Entsorgung von Anlagenbestandteilen	[€]	Summe der Einzelkosten	
R.2.2	Verschrottungskosten	Kosten für die fachgerechte Verschrottung von Anlagenbestandteilen	[€]	Summe der Einzelkosten	

Abbildung 6-8: Kostenstruktur im Rahmen der LCC

Die Kostenstruktur listet die einzelnen Kostenposten für die zugehörigen Kostenarten in den jeweiligen Lebenszyklusphasen auf (vgl. Abbildung 6-8). Bei den Kosten vor der Nutzung (Entstehungskosten) sind die Entwicklungskosten bzw. die Installationskosten relevant. Hierbei dienen für die Berechnung der Konstruktions- bzw. Auslegungskosten die erforderlichen Engineering-Stunden als Grundlage, während bei den Installationskosten die erforderlichen Montagestunden einen wesentlichen Beitrag liefern. Die Kosten während der Nutzung setzen sich aus den Betriebskosten sowie den Wartungs- und Instandhaltungskosten zusammen. Die Energiekosten als Bestandteil der Betriebskosten werden dabei mittels des Produkts aus dem erforderlichen Jahresenergiebedarf und dem gemittelten Energieträgerpreis (k_{elektr} bzw. k_{pneum}) ermittelt. Die häufig vernachlässigten Kosten nach der Nutzung (Entsorgungskosten) ergeben sich aus den Außerbetriebnahme- und Verwertungskosten.

Die *Systemmodellierung* erfolgt auf Basis der Struktur der Montageanlage bestehend aus Funktionsgruppen und ECUs und kann optional in einem separaten Arbeitsblatt dargestellt werden. Die für die Berechnung der Energiekosten relevante Größe ist der absolute Energieverbrauch pro Taktzeit. Mit Hilfe der Anlagenlaufzeit und der Verrechnungssätze für Energiekosten können die Energiekosten für die gesamte Lebensdauer der Anlage berechnet werden. Die *Datenbeschaffung* erfolgt auf Basis der Ausschreibungsunterlagen und den Rahmendaten der Anlagenbeschaffung.

Auf Basis der Kostenstruktur kann nach der Durchführung der Optimierungsaktivitäten die *Auswertung & Evaluation* erfolgen. Kenngrößen sind hierbei aus Sicht des Anlagennutzers die Gesamtkosten einer Anlagenvariante bestehend aus den Kostenbestandteilen der Kostenstruktur. Hierbei ist der Anteil der Nutzungskosten an den Anlagengesamtkosten und hier insbesondere der Energiekosten von großer Bedeutung. Dabei können noch die Auswirkungen von variablen Energiepreisen auf die Anlagengesamtkosten sowie die Amortisationszeit der unterschiedlichen Anlagenvarianten betrachtet werden.

6.2.2. Analyse und Bewertung energieeffizienzsteigernder Maßnahmen

Bei dem Prozessschritt EEIM-Analyse erfolgt die Prozessstufe *Energetische Analyse des Systemmodells* unter Verwendung der Energiesignatur sowie der Energie-KPIs. Die Energiesignatur wird auf Basis der aus dem Tool zur physikbasierten Simulation exportierten Rohdaten der aggregierten Energieverbräuche erzeugt und mit dem Taktzeitdiagramm verknüpft. Eine beispielhafte Umsetzung einer Energiesignatur für einen Roboter mit einem Einspannwerkzeug ist in Abbildung 6-9 dargestellt.

Dabei setzt sich der Montagevorgang aus vier Montageoperationen zusammen, wobei die Montageoperationen *Anfahren & Positionieren* sowie *Depositionieren* von dem Roboter durchgeführt und die Montageoperationen *Einspannen* und *Entspannen* von dem Spannwerkzeug ausgeführt werden. Neben dem aggregierten Rohdatenexport können aus

der physikbasierten Simulationsumgebung zudem die komponentenbasierten Energieverbrauchsdaten exportiert werden. Diese dienen als Basis für die Berechnung der Energie-KPIs, die in Abbildung 6-10 exemplarisch dargestellt sind. Der Gesamtenergieverbrauch E_{total} wird auf Basis des elektrischen Energieverbrauchs berechnet, wobei für eine einheitliche Betrachtung der Druckluftverbrauch mit einem Umrechnungsfaktor (hier: 0.15 kWh/m³) versehen wird und somit in den Gesamtenergieverbrauch miteinbezogen werden kann.

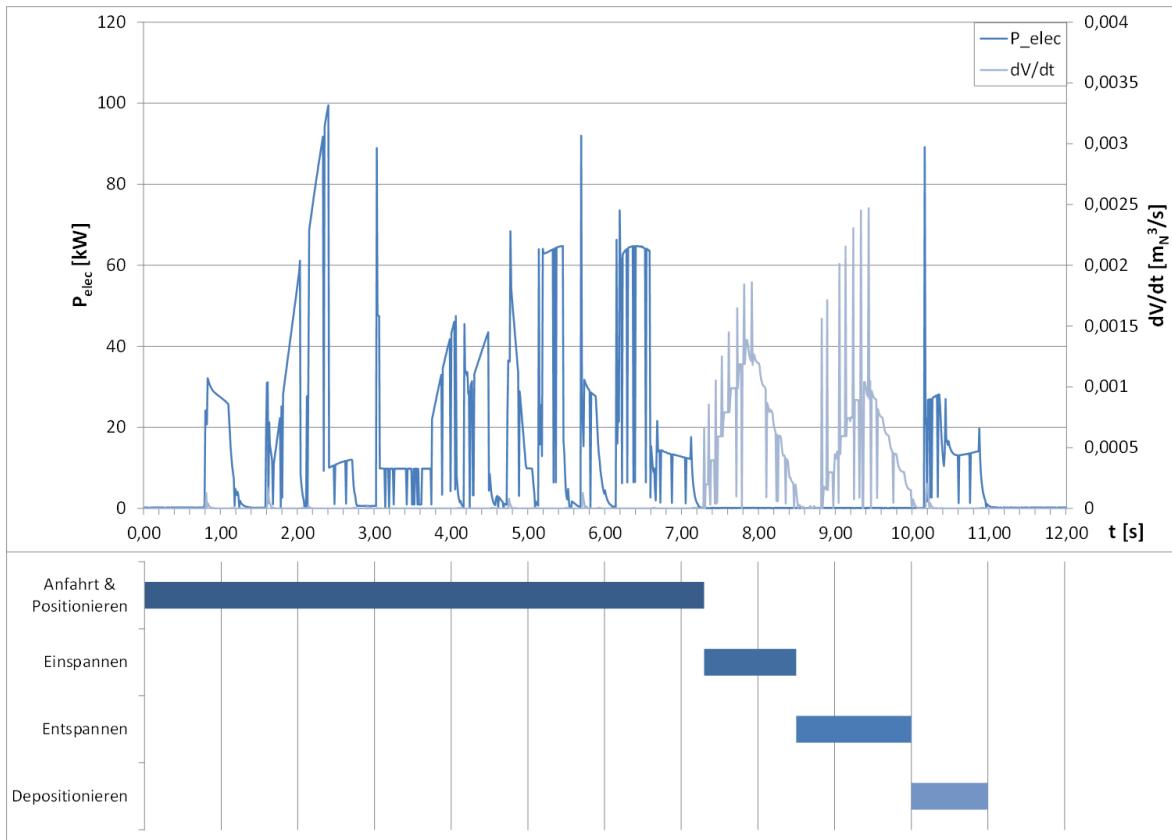


Abbildung 6-9: Beispielhafte Umsetzung einer Energiesignatur für einen Roboter mit Einspannwerkzeug

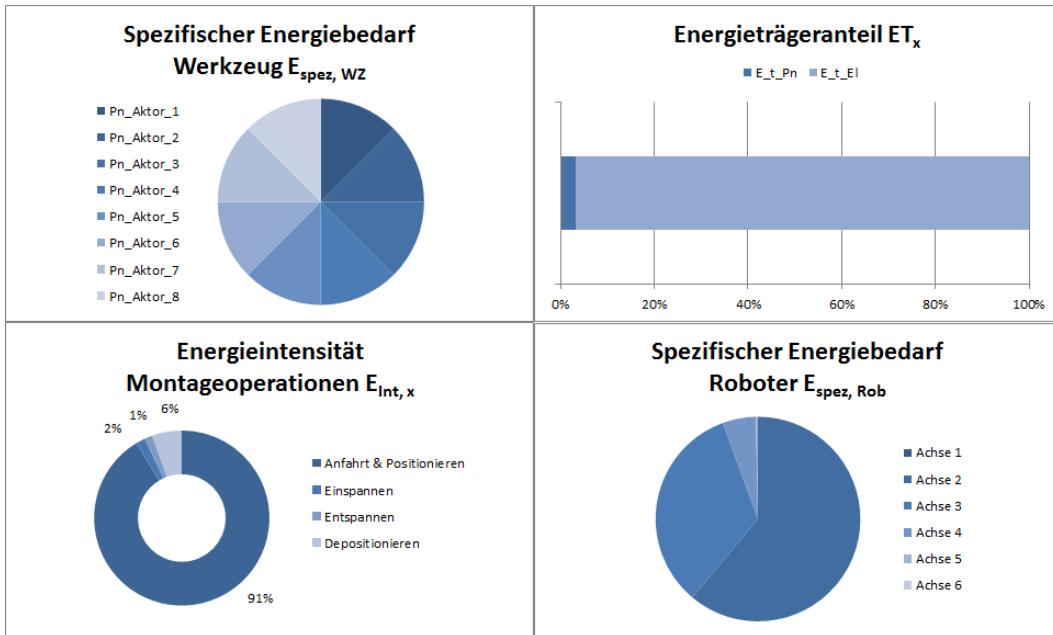


Abbildung 6-10: Exemplarische Darstellung Energie-KPIs

Auf Basis des Gesamtenergieverbrauchs kann zum einen der Energieträgeranteil ET_x und zum anderen der spezifische Energiebedarf $E_{spez,x}$ bestimmt werden. In dieser exemplarischen Darstellung ist der spezifische Energiebedarf für die Funktionsgruppen Roboter und Spannwerkzeug ermittelt worden. Der elektrische Energieträgeranteil verteilt sich demzufolge zu einem Großteil auf die Roboterachsen 2 und 3, die damit zugleich über alle Montageoperationen betrachtet den wesentlichen Anteil am spezifischen Energieverbrauch des Roboters besitzen. Beim spezifischen Energiebedarf des Werkzeugs ist der pneumatische Energiebedarf gleichmäßig auf die acht baugleichen pneumatischen Verbraucher verteilt. Die Energieintensität $E_{int,x}$ ist in diesem Beispiel für die einzelnen Montageoperationen bestimmt worden. Diese Darstellung ermöglicht eine Relation zwischen den einzelnen Montageoperationen und den dazugehörigen Energieverbräuchen. Daraus ist ersichtlich, dass in diesem Beispiel die Montageoperation Anfahren & Positionieren den wesentlichen Anteil des Energieverbrauchs verursacht.

NPV-Berechnung				
Einsparungen und Berechnungssätze				
Steigerungsrate Energiepreis	EC	3.00	[%]	Als konstant angenommene jährliche Steigerungsrate der Energiekosten
Kalkulationszinssatz	DR	10.00	[%]	Angenommen Verzinsung für ein alternatives Investment
Energieeinsparungen Pneumatik	$\Delta V_{pneum,N}$	3000.00	[m _N ³ /Jahr]	Jährliche Energieeinsparungen Elektrik
Energieeinsparungen Elektrik	ΔE	1500.00	[kWh/Jahr]	Jährliche Energieeinsparungen Pneumatik
Monetäre Einsparungen Pneumatik	ΔES_{pneum}	67.5	[€/Jahr]	Jährlicher finanzieller Benefit durch geringeren Energieverbrauch Pneumatik
Monetäre Einsparungen Elektrik	ΔES_{elektr}	225	[€/Jahr]	Jährlicher finanzieller Benefit durch geringeren Energieverbrauch Elektrik
Erforderliches Investment				
Zusätzliche Entwicklungsstunden	Δh_{Entw}	0.50	[h]	Anzahl zusätzlicher Arbeitsstunden für die Entwicklungsingenieure
Zusätzliche Montagestunden	Δh_{Mont}	0.00	[h]	Anzahl zusätzlicher Arbeitsstunden für die Monteure
Zusätzliche Materialkosten	ΔK_{Mat}	100.00	[€]	Zusätzliche Kosten für die Beschaffung und Bereitstellung von Material
Investment	I_{EEIM}	154.50	[€]	Summe der erforderlichen Investments berechnet auf Basis der Kostensätze
Erforderliche verteilte Kosten				
Zusätzliche Wartungsstunden	ΔK_{IH}	0.1	[h/Jahr]	Anzahl zusätzlicher Arbeitsstunden für die Servicetechniker pro Laufzeitjahr
Zusätzlicher Bedienungsaufwand	ΔK_{Bed}	0.1	[h/Jahr]	Anzahl zusätzlicher Arbeitsstunden für die Maschinenführer pro Laufzeitjahr
Zusätzliche verteilte Kosten	$\Delta C_{I_{EEIM}}$	13.70	[€/Jahr]	Summe der verteilten Aufwände pro Laufzeitjahr berechnet auf Basis der Kostensätze
NPV Kalkulation				
Kapitalbarwert	NPV _{EEIM}	21.46	[€]	Je höher der Kapitalbarwert, desto vielversprechender ist die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit des zu implementierenden EEIM

Abbildung 6-11: Umsetzung der NPV-Berechnung zur wirtschaftlichen Bewertung eines technisch machbaren EEIMs

Bei dem Prozessschritt EEIM-Implementierung erfolgt in der Prozessstufe *Wirtschaftliche Bewertung des EEIM* eine ökonomische Bewertung des EEIMs unter Verwendung der Kapitalwertmethode. Die Berechnung des Kapitalwerts (NPV) für den jeweiligen EEIM erfolgt dabei immer unter Berücksichtigung der erzielbaren Einsparungen, des erforderlichen Investments sowie der über die Anlagenlaufzeit erforderlichen verteilten Kosten (vgl. Abbildung 6-11).

Die Berechnung des NPVs erfolgt auf Basis der Gleichung (14) und erfordert die Kenntnis der jährlichen monetären Einsparungen (ΔES_{pneum} bzw. ΔES_{elektr}), die mittels des technisch machbaren EEIMs erzielt werden können. Diese ergeben sich aus dem Produkt der Energieeinsparungen ($\Delta V_{pneum,N}$ bzw. ΔE) mit den jeweiligen Verrechnungssätzen Energie aus der Modellkonfiguration (vgl. Kapitel 6.2.1). Das zusätzliche Investment ergibt sich aus den zusätzlich erforderlichen Stundenaufwendungen zur Umsetzung des EEIMs für die Entwickler Δh_{Entw} bzw. Monteure Δh_{Mont} und möglichen höheren Materialkosten (ΔK_{Mat}). Die zusätzlich potentiell anfallenden periodischen Kosten werden über die verteilten Kosten berücksichtigt und beinhalten zusätzliche Personalaufwände für Bediener und Instandhalter.

Bei der NPV-Berechnung werden zudem die Steigerungsrate des Energiepreises EC sowie der Kalkulationszinssatz DR berücksichtigt.

Da die Berechnung des NPVs auf Basis einiger vereinfachender Annahmen und unter Unsicherheiten über zukünftige Preisentwicklungen erfolgt, ist die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse über die Eingabeparameter vorteilhaft. Dabei werden hier beispielhaft die Höhe des erforderlichen zusätzlichen Investments sowie die Steigerungsrate des Energiepreises herangezogen. Ausgehend von dem berechneten erforderlichen Investment und der angegebenen Energiepreissteigerungsrate wird für eine signifikante \pm -Abweichung von diesen Werten ein NPV-Kennfeld generiert, das die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit des EEIMs unter anderen Prämissen verdeutlicht (vgl. Abbildung 6-12).

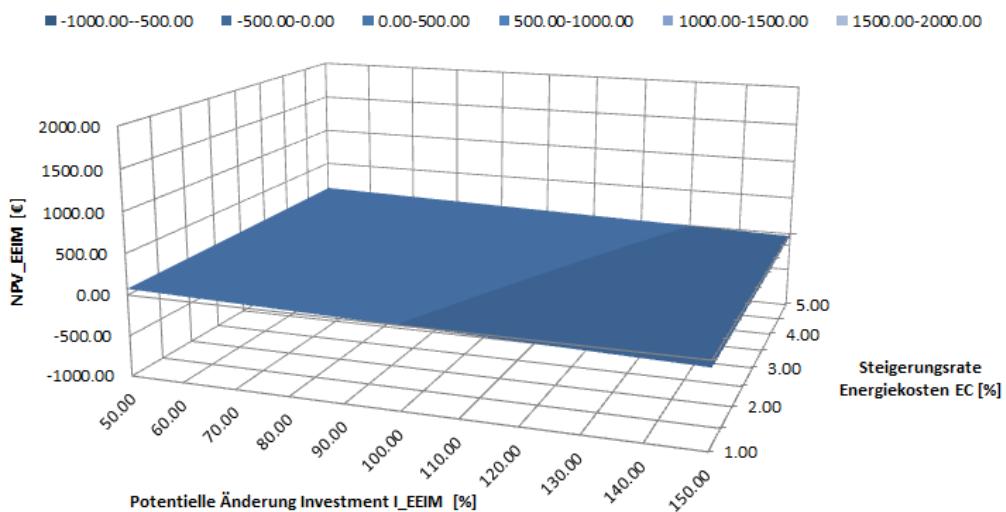


Abbildung 6-12: Beispielhafte Darstellung der Sensitivitätsanalyse bei der EEIM-Berechnung

Auf Basis dieser Darstellung kann festgestellt werden, bis zu welchem Ausmaß Unsicherheiten bei der Parametereingabe im Rahmen der EEIM-Berechnung toleriert werden können. Aus der beispielhaften Darstellung ist ersichtlich, dass die Implementierung des EEIMs auch bei einem notwendigen Investment von 120% des ursprünglich veranschlagten Investments bei einer gleichzeitigen jährlichen Energiepreissteigerungsrate von 5% immer noch wirtschaftlich sinnvoll wäre.

TEIL 3: APPLICATION

**Evaluierung der Anwendbarkeit der Methode
Bewertung der industriellen Relevanz**

KAPITEL 7: EVALUIERUNG DER ANWENDBARKEIT DER METHODE

In Anlehnung an das DRM-Framework entspricht das folgende Kapitel der *Descriptive Study II* und umfasst die Darlegung der Anwendbarkeit der entwickelten Methode. Hierfür werden die prinzipielle Durchführbarkeit des Gesamtansatzes sowie die Machbarkeit einzelner Methodenelemente an zwei realen Evaluationsbeispielen automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion gezeigt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der physikbasierten Modellierung und Simulation des Energieverbrauchs validiert.

7.1. Prototypischer Anwendungsfall 1: Wendestation

Das erste Anwendungsszenario umfasst eine Station zur Entnahme einer Vorderachse aus einem Werkstückträger und der korrekten Positionierung für nachfolgende Montageprozesse. Dabei wird die Vorderachse zunächst geometrisch eindeutig innerhalb der Station fixiert bevor die Achse anschließend um 180° um rotiert wird und in die Montagelage für nachfolgende Montageprozesse positioniert wird (vgl. Abbildung 7-1).

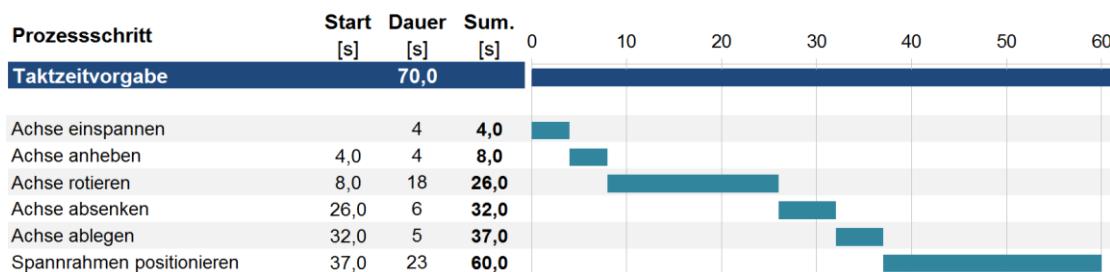


Abbildung 7-1: Reduziertes Taktzeitdiagramm der Wendestation

Für die Umsetzung der Wendestation im Rahmen der physikbasierten Simulationsumgebung v-rep werden die Konstruktionsdaten der Montageanlage und des Produkts (Vorderachse) aus Catia bzw. Delmia V5 mittels des STL-Datenformats übertragen. Hierbei werden die einzelnen kinematischen Baugruppen, die sich relativ zueinander bewegen, zusammengefasst und mit den aggregierten physikalischen Eigenschaften versehen. Die ECU-Identifikation erfolgt auf Basis der Komponentenliste und liefert 12 pneumatische Verbraucher (Linearzylinder und

Spanner) sowie zwei Elektromotoren, wobei der Großteil der ECUs der Funktionsgruppe Spannrahmen zuzuordnen ist (vgl. Abbildung 7-2).

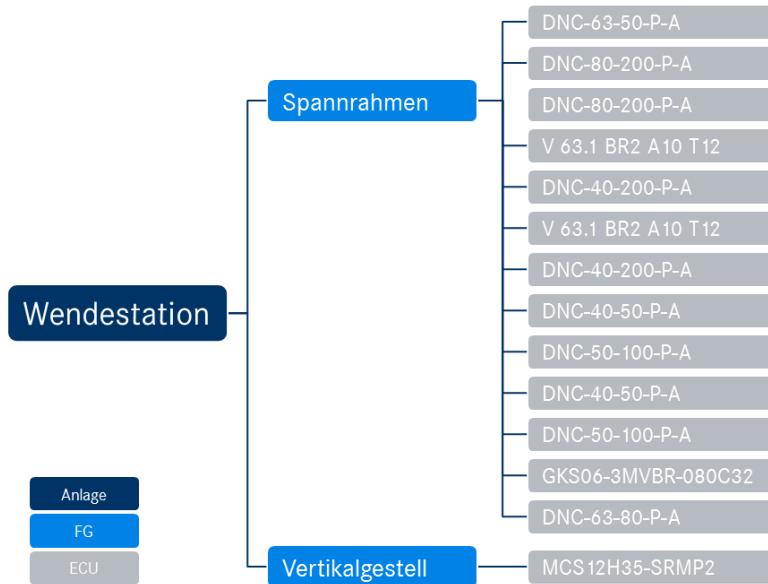


Abbildung 7-2: Struktur der Funktionsgruppen für den Anwendungsfall Wendestation

Die physikbasierten Komponentenmodelle können aus den in Kapitel 6.1 vorgestellten Modellen erzeugt werden. Die Modellierung des Gesamtsystems der Montageanlage wird durch die Definition zusätzlicher Gelenke, der Kinematisierung des Produkts und auf Basis des Taktzeitdiagramms erreicht, aus dem die einzelnen ECU-Aktivitäten extrahiert werden können. Dabei wird der Montageprozesses über ein positionsgesteuertes Skript in der physikbasierten Simulationsumgebung realisiert, das die unterschiedlichen Zustände der Schrittfolge des SPS-Programms über geometrische Positionen einzelner Anlagenbestandteile abbildet. Aus den zusätzlichen produktionsplanerischen Dokumenten (bspw. Pneumatikplan) können die relevanten Parameter (bspw. Druckniveau, Drosselöffnung) gewonnen werden. Die Steuerung der pneumatischen ECUs erfolgt auf Basis einer vorhandenen Benutzeroberfläche in der physikbasierten Simulationsumgebung, die der Funktionsweise einer Ventilinsel nachempfunden ist (vgl. [169]). Mit Hilfe dieser Benutzeroberfläche können als wichtige Eingangsparameter zur Steuerung der pneumatischen Verbraucher (Höhe des Versorgungsdrucks p_V , Größe des Drosselquerschnitts, Schaltzustand des Ventils) definiert werden. Darüber hinaus werden die Endlagen der pneumatischen Verbraucher als Ausgangsgröße ausgegeben. Auf dieser Basis kann das physikbasierte Systemmodell generiert werden, mit dessen Hilfe die Energiesignatur der Wendestation erzeugt werden kann (vgl. Abbildung 7-3).

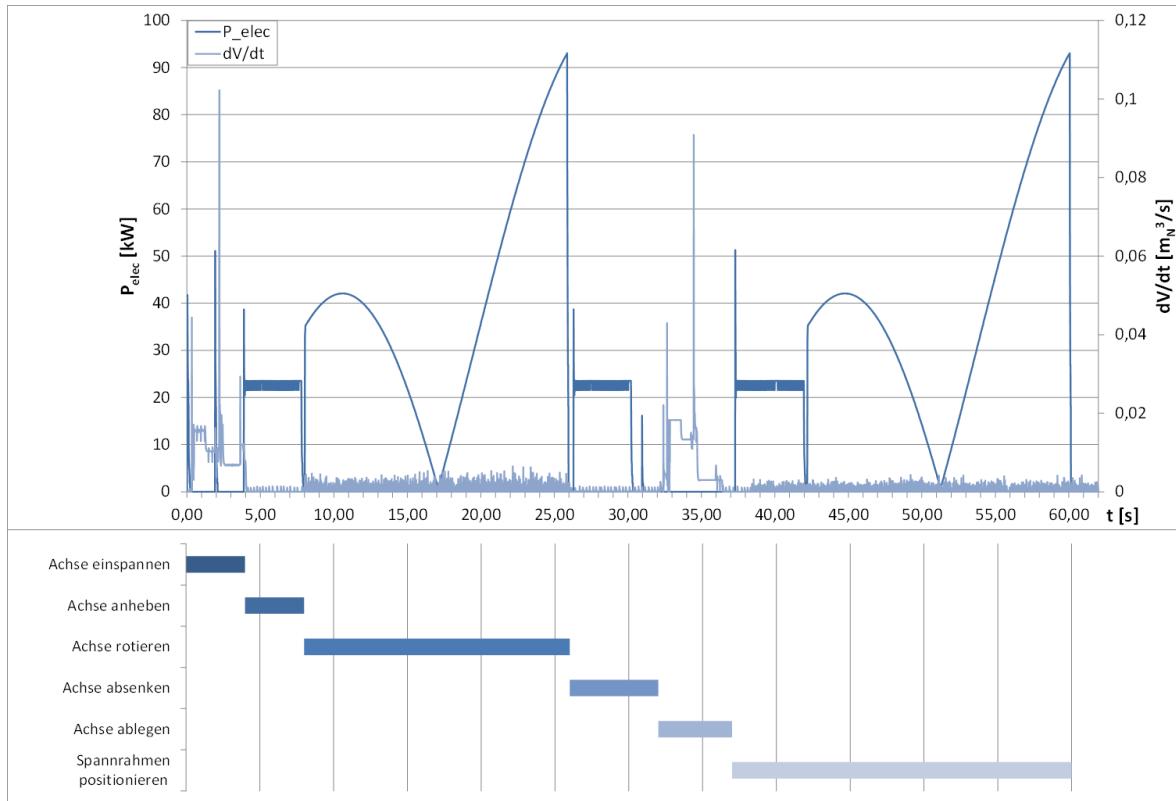


Abbildung 7-3: Energiesignatur der Wendestation

Im Rahmen der EEIM-Analyse werden auf Basis des physikbasierten Systemmodells und der Energiesignatur der Wendestation die Energie-KPIs berechnet (vgl. Abbildung 7-4). Die Darstellung des Energieträgeranteils dokumentiert den hohen Anteil des Druckluftbedarfs am Gesamtenergiebedarf. Hierfür sind im Wesentlichen die große Anzahl an pneumatischen Verbrauchern, deren Dimensionierung, die langen Schlauchleitungen sowie der hohe Betriebsdruck ($l = 5 \text{ m}$, $p = 12 \text{ bar}$) verantwortlich. Die pneumatischen Verbraucher sind in den Montageoperationen „Achse einspannen“ und „Achse ablegen“ aktiv, während in den anderen Montageoperationen ausschließlich die Elektromotoren aktiv sind. Die einzelnen pneumatischen ECUs, die an dem Einspann- bzw. Ablegevorgang beteiligt sind, sollen daher tiefergehend hinsichtlich des spezifischen Energiebedarfs untersucht werden. Beispielhaft ist daher der spezifische Energiebedarf der einzelnen pneumatischen Verbraucher für die Montageoperation „Achse einspannen“ bei der Erstellung der Energie-KPIs berücksichtigt worden (vgl. Abbildung 7-4).

Bei der Untersuchung der EEIM-Anwendbarkeit wird somit der EEIM-Katalog für pneumatische Verbraucher als Grundlage verwendet. Hierbei werden die EEIMs *Dimensionierung*, *einfachwirkender Zylinder*, *Druckniveaureduktion* und *Schlauchdesign* als potentielle EEIMs identifiziert. Die EEIMs der Kategorie Ansteuerung scheinen bei dem hinsichtlich der Pneumatik komplexen Design der Anlage nicht zielführend anwendbar zu sein.

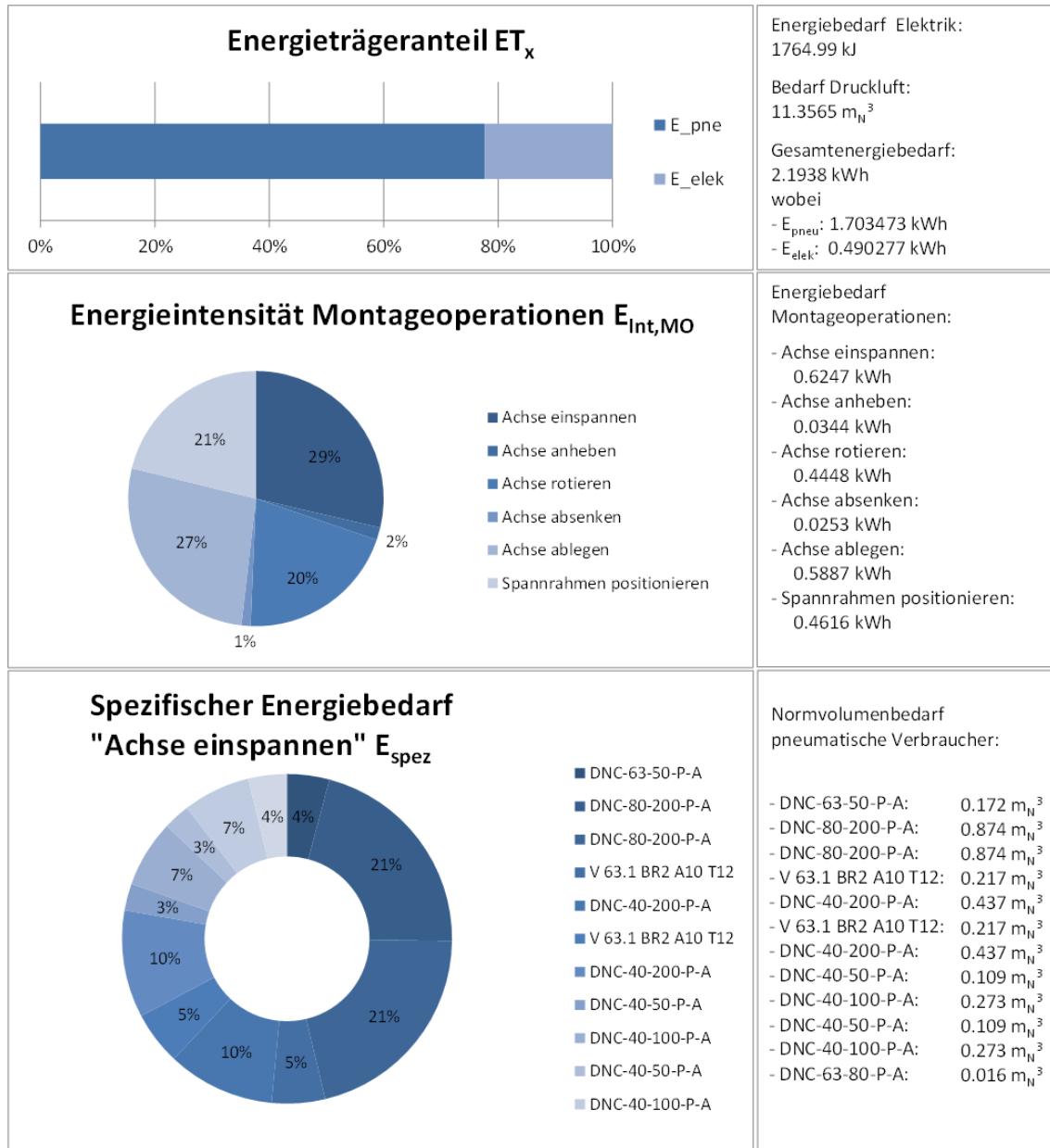


Abbildung 7-4: Energie-KPIs des initialen Designs der Wendestation

Nach einer Analyse der Installation der Schläuche in der Anlage wird von der Anwendung des EEIMs *Schlauchdesign* abgesehen, da die Schlauchführung aufgrund des beweglichen Spannrahmens bereits vielen Einschränkungen unterworfen ist und das Energieeinsparpotential durch wahrscheinlich nur minimale Änderungen der Schlauchlänge äußerst gering ausfallen dürfte. Die Anwendung des EEIMs *einfachwirkender Zylinder* scheint aufgrund der komplizierten Sequenzfolge bei der Montageoperation „Achse ablegen“ risikoreich zu sein. Obwohl wesentliche Einsparpotentiale durch die Anwendung eines einfachwirkenden Zylinders erschlossen werden könnten, könnte der wechselseitig abhängige Ablegeprozess der Achse bspw. durch ein ruckartiges Entspannen durch die Feder beim Rückhub beeinträchtigt werden und somit an Prozesssicherheit einbüßen. Somit sind die

EEIMs *Dimensionierung* und *Druckniveaureduktion* als die für pneumatische Verbraucher sinnvoll anwendbaren EEIMs identifiziert.

Die Umsetzung des EEIMs Druckniveaureduktion soll mit der Umsetzungsvorschrift „Druckminderer“ realisiert werden. Ein zusätzlich eingebauter Druckminderer limitiert den ursprünglich angelegten Versorgungsdruck für beide Hübe oder nur für den Produktivhub oder den Nichtproduktivhub. Die Nichtproduktivhübe entsprechen im Fall der Wendestation den ECU Aktivitäten der Montageoperation „Achse ablegen“. Obwohl die Implementierung auf Komponentenmodellebene für die Nichtproduktivhübe für alle ECUs erfolgreich war und eine Steigerung der Energieeffizienz erzielt werden konnte, verhindert ein nicht funktionstüchtiges Systemmodell (fehlgeschlagener Ablegeprozess) die Implementierung des EEIMs für den Nichtproduktivhub. Die Implementierung des EEIMs für den Produktivhub für alle pneumatischen Verbraucher ist sowohl auf Komponentenmodell- als auch auf Systemmodellebene erfolgreich.

Demzufolge muss die größtmögliche Druckniveaureduzierung ermittelt werden, bei dem der Einspannvorgang in dem Systemmodell noch mit einer gewissen Sicherheitsreserve voll funktionstüchtig möglich ist. Hierbei wird bei der physikbasierten Simulation die von den pneumatischen Verbrauchern aufgebrachte Spann- bzw. Haltekraft berücksichtigt, d.h. wird der Versorgungsdruck auf ein zu geringes Druckniveau herabgesenkt, kann die erforderliche Spannkraft nicht mehr aufgebracht werden und die Achse wird die geometrisch definierte Position verlassen. Die Untersuchungen am physikbasierten Systemmodell haben ergeben, dass bis zu einem reduzierten Versorgungsdruck von $p_{V,neu} = 8 \text{ bar}$ die Prozesssicherheit des Einspannvorgangs gewährleistet werden kann. Die Druckniveaureduktion kann durch die Installation von Druckminderern vor den für den Produktivhub zu füllenden Zylinderkammern realisiert werden.

Die wirtschaftliche Bewertung des EEIMs erfolgt auf Basis der potentiell eingesparten Energiekosten, die sich aus dem verminderten Druckluftverbrauch von $\Delta V = 1.289 \text{ m}_N^3$ für die Montageoperation „Achse einspannen“ ergeben (vgl. Abbildung 7-5). In einem Einschichtsystem (Umrechnungsfaktor: 0.15 kWh/m $_N^3$, Energiepreis: 0.15 €/kWh) können damit jährliche Einsparpotentiale von $\Delta ES_{pneu} = 1670.50 \text{ €/Jahr}$ erschlossen werden.

Allerdings ist mit der Umsetzung auch ein erheblicher Mehraufwand verbunden. Für die zusätzliche Entwicklungsleistung für die Untersuchungen am physikbasierten Systemmodell werden zusätzliche Entwicklungsstunden ($\Delta h_{Entw} = 2.5 \text{ h}, R_{Ing} = 109 \text{ €/h}$) und für den zusätzlichen Installationsaufwand an der realen Anlage zusätzliche Montagestunden ($\Delta h_{Mont} = 5 \text{ h}, R_{Mon} = 69 \text{ €/h}$) veranschlagt. Darüber hinaus führt erhöhter Materialbedarf (Druckminderer, Schläuche, Verbindungsstücke) zu zusätzlichen Materialkosten ($\Delta K_{Mat} = 800 \text{ €}$). Über die angenommene Anlagenlaufzeit von $t_{ALZ} = 10 \text{ Jahre}$ kann unter der Annahme von nicht zusätzlich auftretenden zeitlich verteilten Kosten ΔCI_{EEIM} ein positiver

Evaluierung der Anwendbarkeit der Methode

Kapitalbarwert ermittelt werden (angenommene Energiepreissteigerungsrate $EC = 3\%$, angenommener Kalkulationszinssatz $DR = 1\%$).

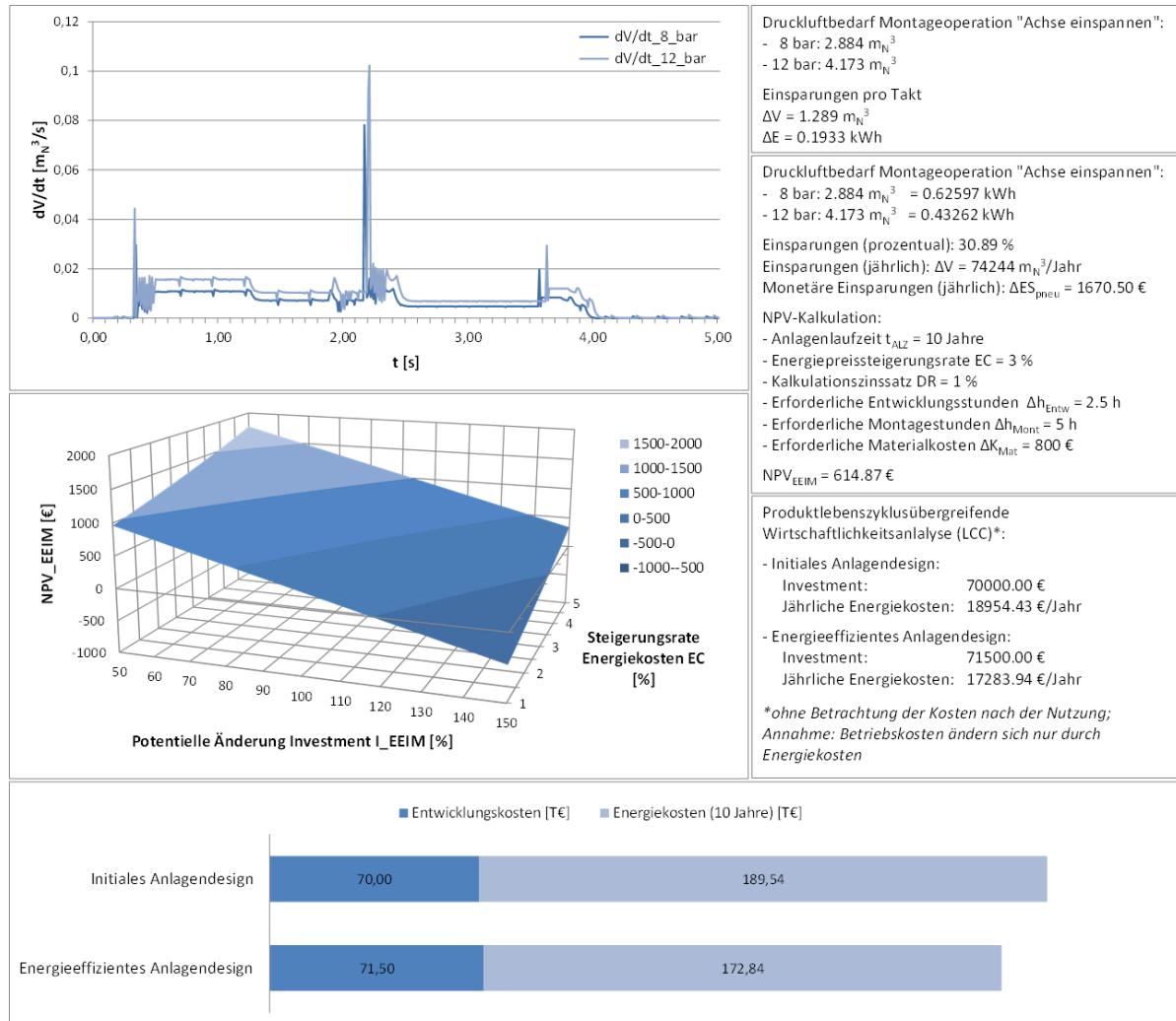


Abbildung 7-5: Auswertung Implementierung EEIM Druckniveaureduzierung

(Volumenstrom bei Versorgungsdruck von 8 bar und 12 bar, Sensitivitätsanalyse der NPV-Kalkulation, Vergleich der Gesamtkosten beider Anlagendesignvarianten)

Die NPV-Sensitivitätsanalyse ergibt eine wirtschaftliche Sinnhaftigkeit des EEIMs bis zu einer Änderung des für die Umsetzung des EEIMs erforderlichen Investments von ca. +20% des ursprünglich veranschlagten Investments. Somit kann die Implementierung des EEIMs Druckniveaureduzierung als wirtschaftlich sinnvoll erachtet werden. Die Änderung des physikbasierten Systemmodells beschränkt sich auf die Erstellung einer zusätzlichen Funktionalität zur Reduzierung des Versorgungsdrucks des Produktivhubs in dem Skript der pneumatischen Verbraucher sowie der Integration der 3D-Modelle der Druckminderer an den entsprechenden Zylinderkammereinlässen.

Von der Implementierung des zweiten anwendbaren EEIMs *Dimensionierung* wird aufgrund der großen konstruktiven Änderungsaufwände abgesehen. Obwohl eine Steigerung der Energieeffizienz auf Komponentenmodellebene nachgewiesen werden konnte, wären umfangreiche Änderungen am Systemmodell notwendig (bspw. Neukonzipierung der Vorschubfunktionalität für das Einspannen am Achszentrum von DNC 63-50-P-A). Hierdurch ist die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit der EEIM-Implementierung *Dimensionierung* äußerst fraglich und wird somit nicht weiter verfolgt.

Eine umfangreiche produktlebenszyklusübergreifende Wirtschaftlichkeitsanalyse des initialen und des energieeffizienten Anlagendesigns kann aufgrund der fehlenden Zuordnung der Gesamtkosten für das Entwicklungsprojekt (70000 €) auf die einzelnen Kostenposten nicht vorgenommen werden. Eine vereinfachte Gesamtkostenanalyse über die Kosten vor der Nutzung und der Kosten während der Nutzung unter der Annahme unveränderlicher Kosten nach der Nutzung wird durchgeführt. Hierbei wird zudem angenommen, dass die Energiekosten den wesentlichen Unterschied bei den Betriebskosten zwischen den beiden Anlagendesignvarianten ausmachen (vgl. Abbildung 7-5). Es kann festgestellt werden, dass trotz der höheren Investitionskosten (1500 € für die EEIM-Implementierung) über eine Laufzeit von 10 Jahren geringere Gesamtkosten erzielt werden können. Weiterführende Berechnungen haben ergeben, dass der Break-even bei dem angenommenen Energiepreis von 0.15 €/kWh schon nach dem ersten Jahr erreicht werden kann. Bei einem geringeren Energiepreis ($\geq 0.11 \text{ €/kWh}$) weist die energieeffiziente Anlagendesignvariante ebenfalls geringere Gesamtkosten auf, allerdings wird der Break-even später erreicht.

7.2. Prototypischer Anwendungsfall 2: Dachmontage

Das zweite Anwendungsszenario umfasst einen Teilausschnitt einer automatisierten Montagezelle zur Dachmodulmontage der Daimler AG am Produktionsstandort Sindelfingen. An der Station „Dachmodul fügen“ werden unterschiedliche Dachmodularten mit der Karosse verklebt. Hierfür sind verschiedene vorbereitende Montageoperationen erforderlich (bspw. Klebeauftrag) bis die hier untersuchten Montageoperationen ausgeführt werden. In Abbildung 7-6 ist ein reduziertes Taktzeitdiagramm mit den relevanten Montageoperationen dargestellt.

In der Montagestation ist ein Roboter für den Klebeauftrag, die Positionierung und das Fügen des Dachmoduls mit der Karosse verantwortlich (Roboter 1), während ein zweiter Roboter (Roboter 2) ein Abstützwerkzeug durch die Hintertür in den linken Fondbereich der Karosse einführt, positioniert und wieder ausfährt. Das Abstützwerkzeug dient dabei der Aufbringung einer Gegenkraft für ein gefahrloses Fügen, die über mehrere pneumatische Linearyylinder an unterschiedlichen Angriffspunkten aufgebracht wird. Im Fokus der folgenden Ausführungen steht der Roboter 2 mit dem Abstützwerkzeug sowie der von diesem ausgeführte Montagevorgang des Abstützens.

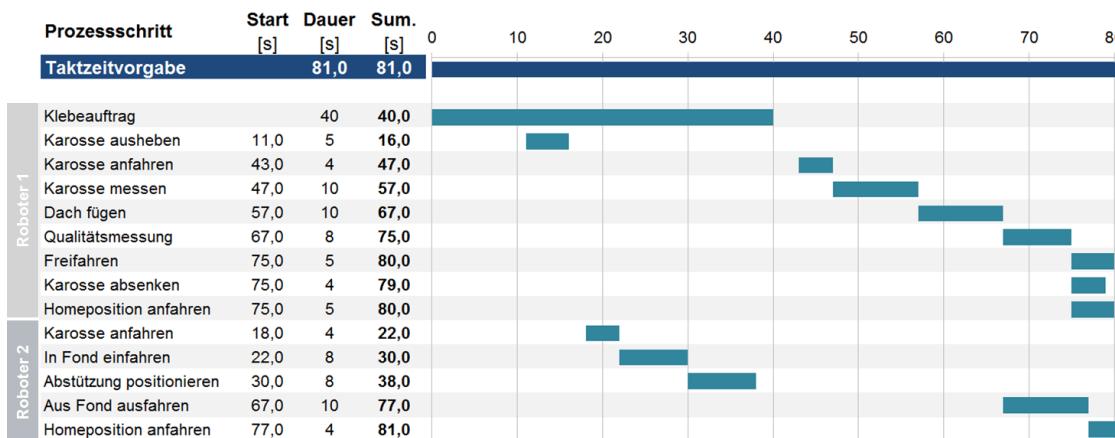


Abbildung 7-6: Reduziertes Taktzeitdiagramm der Montagestation Dachmodul

Der Transfer aus dem kinematischen Simulationstool Delmia V5 in die physikbasierte Simulationsumgebung v-rep erfolgt mittels des STL-Datenformats. Hierbei werden die einzelnen Achsen des Roboters sowie die festen und beweglichen Anteile des Abstützwerkzeugs separat transferiert, wobei das STL-Datenformat die Lagerichtigkeit der Einzelteile zu einem globalen Referenzkoordinatensystem garantiert. Die zusätzlich vorliegenden Konstruktionsdaten des Abstützwerkzeugs werden für eine genaue Bestimmung der physikalischen Eigenschaften (Massen und Trägheitsmomente) der festen und beweglichen Anteile verwendet. Bei der ECU-Identifikation und Klassifizierung auf Basis der Komponentenliste werden der Roboter 2 (KUKA KR210-2) sowie die acht in dem Abstützwerkzeug verbauten Linearzylinde (Festo Kompaktylinder ADN-20-60-KP-A-P-A) als variable ECUs identifiziert und mittels der aus den Datenblättern extrahierten Informationen modelliert (vgl. Abbildung 7-7). Diese Modelle können mit den in Kapitel 6.1.1 bzw. 6.1.2 vorgestellten Modellierungsansätzen erstellt werden.

Bei der Modellierung der Gesamtanlage werden die zwischen den einzelnen Funktionsgruppen vorliegenden kinematischen Abhängigkeiten modelliert. Die Funktionsgruppe Abstützwerkzeug ist mittels eines fixen Gelenks als Effektor an die sechste Achse des Roboters angeflanscht (vgl. Abbildung 7-8). Die restlichen kinematischen Verbindungen liegen durch die Modellierung der ECUs bereits vor. Zur Modellierung des Montageprozesses wird die Information über die einzelnen Aktivitäten der ECUs aus dem Taktzeitdiagramm benötigt. Die Extraktion der einzelnen ECU-Aktivitäten aus den Montageoperationen des Taktzeitdiagramms ergibt, dass an den Montageoperation „Karosse anfahren“, „In Fond einfahren“ sowie „Homeposition anfahren“ ausschließlich die Motoren des KUKA KR210-2 beteiligt sind, während an der Montageoperation „Abstützung positionieren“ ausschließlich die pneumatischen Linearzylinde des Abstützwerkzeugs aktiv sind. Bei der Montageoperation „Aus Fond ausfahren“ sind alle betrachteten ECUs involviert. Die Abbildung des Montageprozesses erfolgt prozessbasiert mit Hilfe eines separaten Prozessskripts in der physikbasierten Simulationsumgebung.

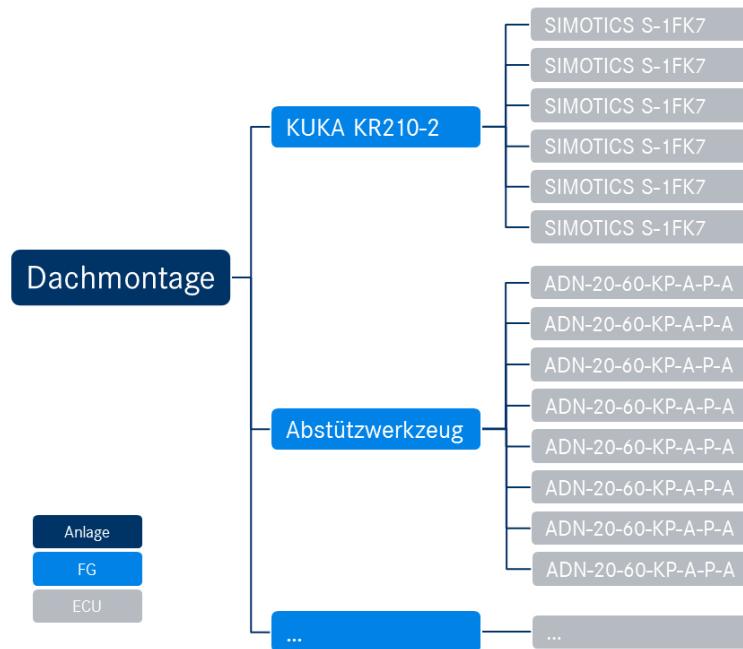


Abbildung 7-7: Struktur der betrachteten Funktionsgruppen des Anwendungsfalls Dachapplikation mit den dazugehörigen ECUs

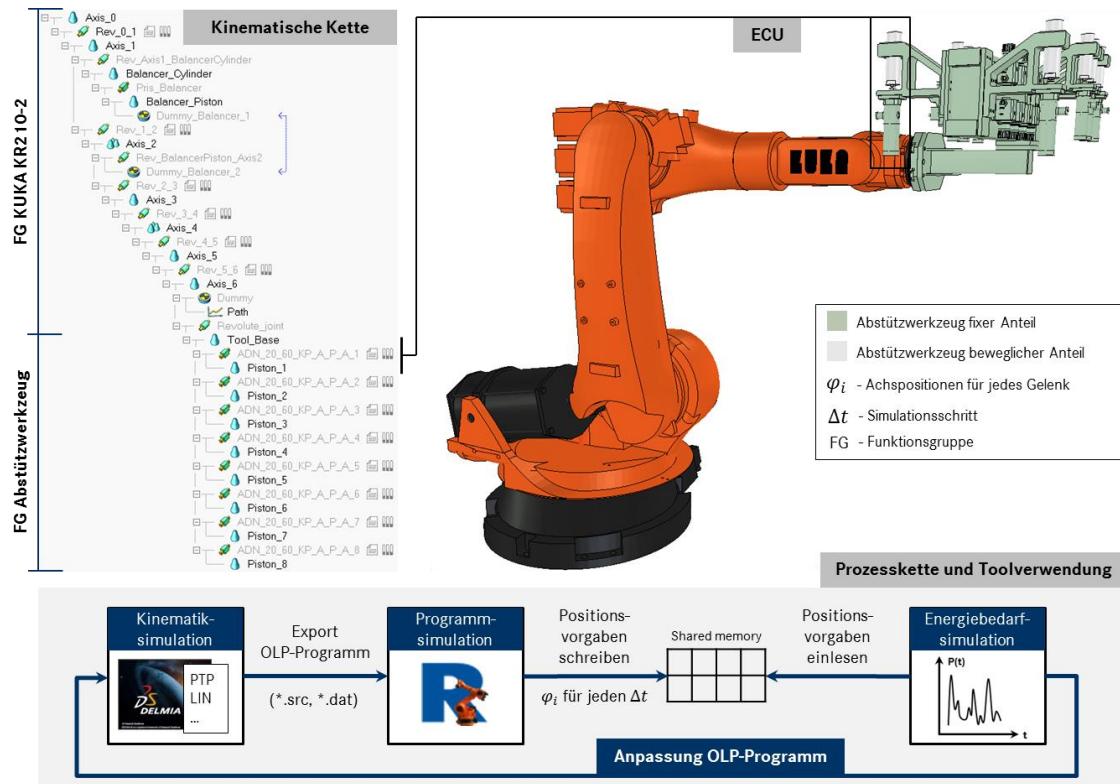


Abbildung 7-8: Kinematische Kette und Prozesskette Anwendungsfall Dachapplikation

Zur Realisierung der Ausführung des Montageprozesses in der physikbasierten Simulationsumgebung müssen mehrere Softwarekomponenten miteinander interagieren (vgl. Abbildung 7-8). Während die Simulation der pneumatischen ECUs dabei analog der in Kapitel 7.1 vorgestellten Vorgehensweise erfolgt, wird die Ansteuerung des Roboters über eine Prozesskette unterschiedlicher Softwaretools realisiert. In dem Softwarewerkzeug zur Kinematiksimulation (hier: Delmia V5) wird die OLP-Programmierung der einzelnen Roboter vorgenommen (vgl. Kapitel 3.1.2). Die OLP-Programme werden als Quelldateien (*.src, *.dat) exportiert und in ein Programm zur Roboterprogrammsimulation (RobSim) importiert. RobSim ist Bestandteil der zur Virtuellen Inbetriebnahme verwendeten Software RF::Suite und berechnet die individuellen Achsstellungen φ_i der einzelnen Robotergelenke i auf Basis der Bewegungsvorgaben aus dem OLP-Programm. Über einen gemeinsamen Speicherbereich (shared memory) werden die Positionsangaben zwischen RobSim und v-rep ausgetauscht. Die Energieverbrauchssimulation eines in Delmia erzeugten OLP-Programms erfolgt in v-rep somit auf Basis der von RobSim erzeugten Positionsangaben. Eine Anpassung dieser OLP-Programme ist nur in Delmia möglich und erfordert den erneuten Durchlauf der gesamten Prozesskette.

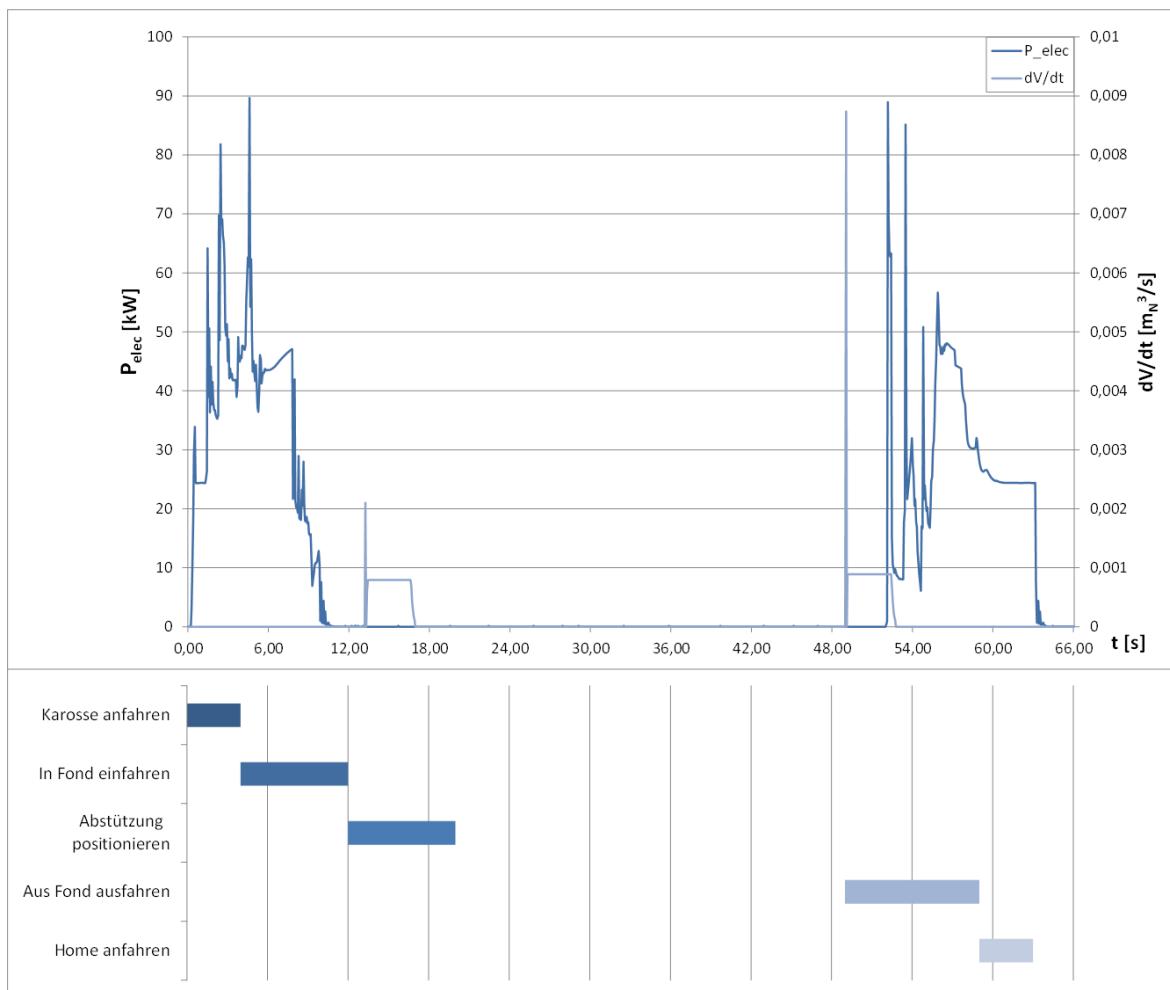


Abbildung 7-9: Energiesignatur des betrachteten Ausschnitts der Anlage zur Dachmontage

Die initiale Energiesignatur des betrachteten Ausschnitts der Montageanlage zur Dachapplikation kann damit auf Basis des Taktzeitdiagramms, des OLP-Programms, der Ansteuerungsreihenfolge der pneumatischen ECUs sowie der Pneumatikpläne erstellt werden (vgl. Abbildung 7-9). Aus der Energiesignatur wird die Zuordnung der Energieverbräuche zu den einzelnen Montageoperationen auf Basis der extrahierten ECU-Aktivitäten ersichtlich. Der elektrische Energieverbrauch setzt sich dabei aus den Fahrbewegungen des Roboters zusammen, wohingegen der Druckluftverbrauch durch die Linearzylinder des Abstützwerkzeugs verursacht wird. Hierbei ist zu erwähnen, dass sich die Ventilinsel zur Ansteuerung der Linearzylinder auf dem Abstützwerkzeug befindet, so dass hier nur sehr kurze Schlauchlängen vorliegen. Zudem befinden sich Druckminderer vor den Linearzylindern, wodurch der ursprünglich anliegende Druck des Niederdrucknetzes bei der Montageoperation „Abstützung positionieren“ auf $p_l = 3 \text{ bar}$ bzw. bei der Montageoperation „Aus Fond ausfahren“ auf $p_r = 4.5 \text{ bar}$ beschränkt wird.

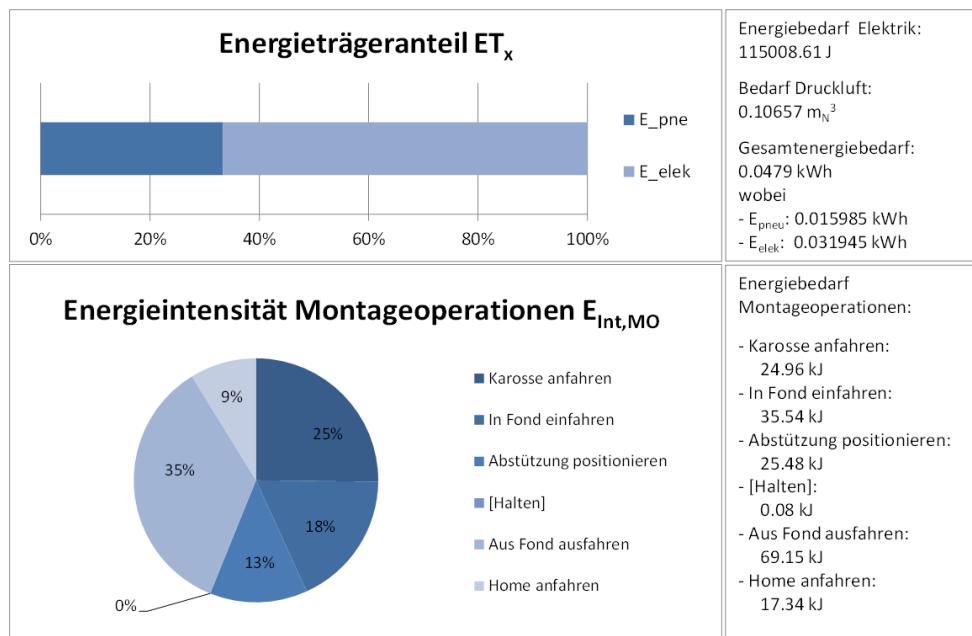


Abbildung 7-10: Energie-KPIs des Anwendungsfalls Dachapplikation

Auf Basis der Energiesignatur können die Energie-KPIs berechnet werden, die einen ersten Anhaltspunkt bei der EEIM-Analyse bieten. Als Energie-KPIs wurden in diesem Anwendungsfall neben dem Gesamtenergiebedarf der Energieträgeranteil sowie die Energieintensität für die einzelnen Montageoperationen ermittelt (vgl. Abbildung 7-10). Aus der Darstellung des Energieträgeranteils ist ersichtlich, dass der Druckluftbedarf in Relation zu dem elektrischen Energiebedarf ungefähr ein Drittel einnimmt. Die Darstellung der Energieintensität weist neben den Intensitäten der einzelnen Montageoperationen zusätzlich einen geringen Anteil des Energiebedarfs des Roboters zum Halten der Position innerhalb des Fondbereichs des Fahrzeugs nach der Montageoperation „Abstützung positionieren“ bis zum Start der Montageoperation „Aus Fond ausfahren“ auf. Aus der Darstellung der Energieintensitäten ist

erkennbar, dass der Anteil der Montageoperation zur Einfahrt des Abstützwerkzeugs in den Fondbereich des Fahrzeugs einen wesentlichen Anteil zu dem Gesamtenergieverbrauch beiträgt. Des Weiteren kann bei der Analyse des reduzierten Taktzeitdiagramms festgestellt werden, dass diese Montageoperationen im Gegensatz zu den Montageoperationen „Aus Fond ausfahren“ sowie „Home anfahren“ nicht taktzeitkritisch sind: die Montageoperation „Abstützung positionieren“ muss erst bis zum Start der Montageoperation „Dach fügen“ des Roboters 1 abgeschlossen sein (vgl. Abbildung 7-6). Somit liegt eine ungenutzte Zeitspanne vor, die durch das Halten des positionierten Abstützwerkzeugs gekennzeichnet ist.

Bei der Untersuchung der Anwendbarkeit potentieller EEIMs wird folgend der komponentenbasierte Ansatz verfolgt werden. Auf Basis des EEIM-Katalogs werden folgend potentielle EEIMs identifiziert werden. Dabei sollen EEIMs für pneumatische Aktoren nicht weiter verfolgt werden. Zum einen ist die Montageoperation „Aus Fond ausfahren“, an der pneumatische Verbraucher beteiligt sind, taktzeitkritisch und zum anderen ist die Montageoperation „Abstützung positionieren“ für den Gesamtenergieverbrauch nahezu irrelevant. Aus konstruktiver Sicht ist die Montageoperation „Abstützung positionieren“ zudem durch das Aufbringen einer Gegenkraft eines Gegengewichts direkt an der Fügeoperation beteiligt. Die Auslegung des durch das Werkzeug von Roboter 1 ausgeübten Anpressdrucks erfolgt unter Voraussetzung einer hinreichenden durch das Abstützwerkzeug aufgebrachten Abstützkraft. Änderungen an der Höhe der Abstützkraft könnten daher zu einem Verlust an Prozesssicherheit der Fügeoperation resultieren. Darüber hinaus kann das Potential für Einsparungen durch die Verwendung kurzer Schlauchlängen (Ventilinsel ist Bestandteil des Abstützwerkzeugs) sowie die implementierten Druckminderer als gering eingestuft werden.

Vielmehr sollen die Montageoperationen „Karosse anfahren“ und „In Fond einfahren“ im Fokus der energetischen Optimierungen stehen, da sie einerseits 43% des Gesamtenergiebedarfs des betrachteten Montagevorgangs verursachen (vgl. Abbildung 7-10) und andererseits eine implizite Taktzeitreserve durch den logisch nachfolgenden Prozess „Dach fügen“ des Roboters 1 vorliegt. Dadurch treten die EEIMs für die Komponente Roboter in den Vordergrund (vgl. Anhang B), da ausschließlich dieser an den genannten Montageoperationen beteiligt ist.

Bei der Analyse der Roboterbahn fällt auf, dass die Home-Position des Roboters eine unnötig große Distanz zwischen der ein- und ausfahrenden Karosse aufweist. Die Parallelisierung der dritten Achse entlang der Förderungsrichtung der Karosse in der Homeposition scheint unnötig. Hier könnte potentiell der *EEIM Bahnoptimierung* mit der Umsetzungsvorschrift *Homeposition optimieren* angewandt werden, wobei die Homeposition näher an der Karosse definiert werden könnte, um so einen Streckenabschnitt der An- bzw. Rückfahrt einzusparen. Dies könnte im OLP-Programm durch eine geringere abschließende Drehung des Roboters um Achse 1 in Form einer graduellen Annäherung unter Berücksichtigung des

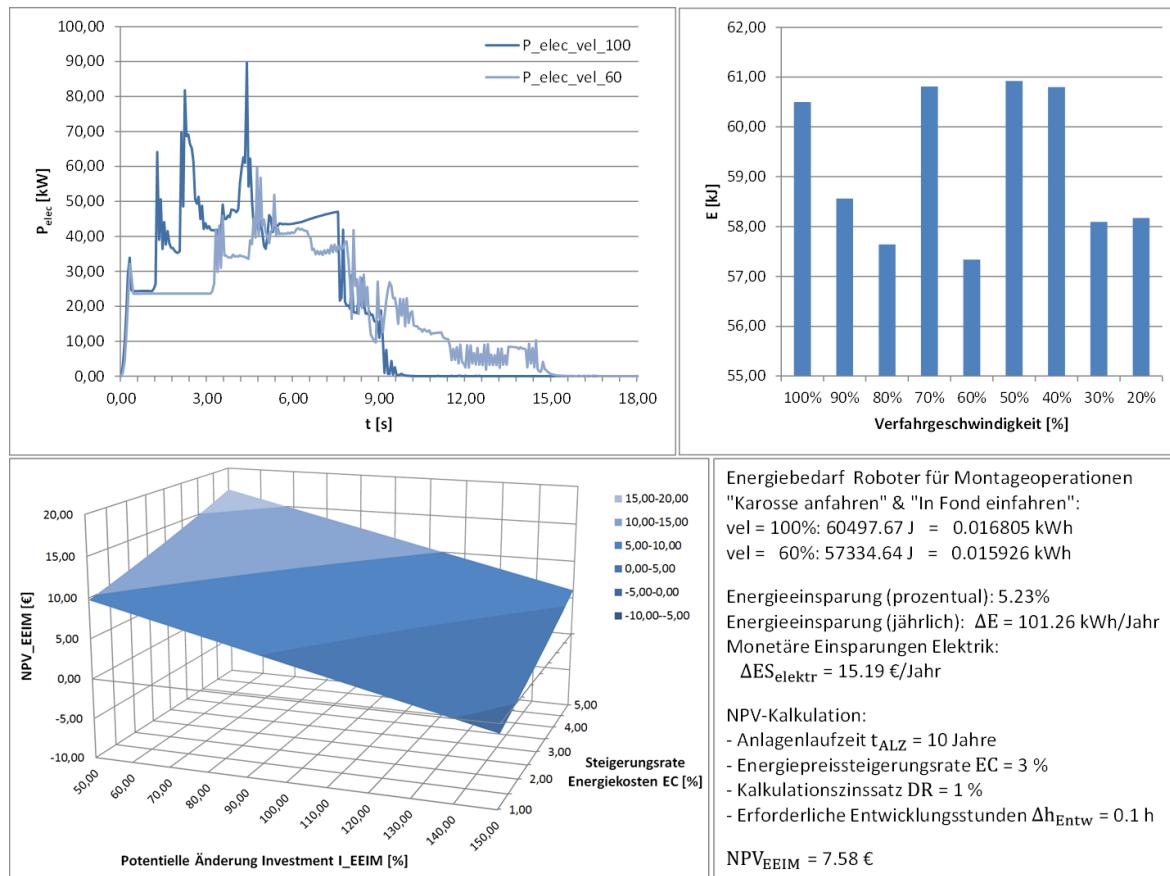
sicherheitsrelevanten Abstands erfolgen. Zusätzliche erforderliche Informationen zur Implementierung des EEIMs Bahnoptimierung sind das OLP-Programm zur Bestimmung und Anpassung der Homeposition und der minimal einzuhaltende sicherheitsrelevante Abstand zu der einfahrenden Karosse.

Bei der Analyse der Roboterbahn fällt weiterhin auf, dass die Karosseanfahrt in einer Folge energetisch ungünstiger kinematischer Posen erfolgt (Tool befindet sich während der Karosseanfahrt mit dem Schwerpunkt relativ weit entfernt vom Mittelpunkt der Achse 1). Der *EEIM Bahnoptimierung* mit der Umsetzungsvorschrift *Minimierung Weglänge* könnte hier Abhilfe schaffen, um eine kinematisch vorteilhaftere Endposition der Montageoperation „Karosse anfahren“ zu realisieren. Erforderliche Informationen wären hierfür das OLP-Programm und die Kenntnis von Koordinaten einer energieeffizienten Pose vor der Montageoperation „In Fond einfahren“. Darüber hinaus fällt bei der Analyse der Roboterbahn die unnötig lange Haltezeit der Position innerhalb des Fondbereichs auf. Aufgrund einer vorhandenen Taktzeitreserve liegt die Anwendung des EEIM *Trajektorienoptimierung* mit der Umsetzung *Geschwindigkeitsanpassung* nahe. Hierfür ist das OLP-Programm mit den darin verwendeten Geschwindigkeiten erforderlich sowie die Kenntnis der Durchführungsduer der angepassten Trajektorie. Die Liste anwendbarer EEIMs umfasst somit die Einträge *Trajektorienoptimierung* sowie *Bahnoptimierung* und dient als Grundlage für die EEIM-Implementierung.

Die komponentenmodellbasierte Untersuchung der EEIMs erfolgt durch die Verwendung des in Kapitel 6.1.2 vorgestellten Modells, wobei zur Abbildung der für den Anwendungsfall vorliegenden Bedingungen ein Ersatzgewicht mit der Masse und den Träigkeitseigenschaften des Abstützwerkzeugs an die sechste Achse appliziert wird. Die komponentenmodellbasierte EEIM-Implementierung des EEIMs *Bahnoptimierung* mit der Umsetzungsvorschrift *Homeposition optimieren* hat ergeben, dass der Energieverbrauch durch die veränderte Homeposition nicht nachweislich gesenkt werden kann und somit keine Erhöhung der Energieeffizienz festzustellen ist. Bei der Implementierung des EEIMs *Bahnoptimierung* mit der Umsetzungsvorschrift *Homeposition optimieren* kann ebenfalls keine signifikante Steigerung der Energieeffizienz konstatiert werden.

Die komponentenmodellbasierte Implementierung des EEIMs *Trajektorienoptimierung* mit der Umsetzungsvorschrift *Anpassung Geschwindigkeit* liefert bei einigen Geschwindigkeiten einen geringeren Energieverbrauch bei einer verlängerten Durchführungsduer der Montageoperationen. Dabei ist eine stufenweise Reduzierung der Geschwindigkeit untersucht worden, wobei der minimale Energieverbrauch bei einer Verfahrgeschwindigkeit von 60% der ursprünglichen Verfahrgeschwindigkeit festgestellt werden kann (vgl. Abbildung 7-11). Die Funktionsfähigkeit des Systemmodells kann nachgewiesen werden, indem der kollisionsfreie Ablauf des Montageprozesses bei angepasster Trajektoriengeschwindigkeit abgebildet wird: durch die frühzeitige Positionierung der Karosse (Montageoperation

„Karosse ausfahren“, vgl. Abbildung 7-6) vor dem Einfahrvorgang des Abstützwerkzeugs in den Fondbereich, besteht keine Kollisionsgefahr durch eine verlangsamte Einfahrbewegung.



**Abbildung 7-11: Auswertungsübersicht Implementierung EEIM Trajektorienoptimierung
(Leistungsbedarf bei zwei Verfahrgeschwindigkeiten, Energieverbrauch bei unterschiedlichen Verfahrgeschwindigkeiten, Sensitivitätsanalyse der NPV-Kalkulation)**

Die wirtschaftliche Bewertung des EEIM erfolgt auf Basis der prognostizierten eingesparten Energiekosten (vgl. Abbildung 7-11). Durch die Einsparung von ca. 5.23% des Energiebedarfs für die Montageoperationen „Karosse anfahren“ und „In Fond einfahren“ können (Zweischichtsystem, Energiepreis 0.15 €/kWh) $\Delta E = 101.26 \text{ kWh/Jahr}$ eingespart werden und somit eine jährliche Ersparnis von $\Delta E_{\text{elektr}} = 15.19 \text{ €/Jahr}$ erzielt werden. Zusätzliche zeitlich verteilte monetäre Aufwände $\Delta C_{I_{EEIM}}$ sind durch eine reine Anpassung der Trajektorie nicht zu erwarten, wodurch ein geschätzter erhöhter Entwicklungsaufwand eines Entwicklers von $\Delta h_{\text{Entw}} = 0.1 \text{ h}$ zu einem erforderlichen Investment von $I_{EEIM} = 10.90 \text{ €}$ (Stundensatz Ingenieur $R_{Ing} = 109 \text{ €/h}$) führt. Mit einer angenommenen Energiepreissteigerungsrate $EC = 3\%$ sowie einem angenommenen Kalkulationszinssatz $DR = 1\%$ kann die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit des EEIMs belegt werden. Aus der Sensitivitätsanalyse der Eingangsdaten der NPV-Berechnung kann geschlussfolgert werden, dass die Implementierung des EEIMs *Trajektorienoptimierung* wirtschaftlich sinnvoll ist, solange eine

Energiepreisseigerungsrate von ca. $EC \geq 1.5\%$ vorliegt und das erforderliche Investment nicht das 1.4-fache der ursprünglich veranschlagten zusätzlichen Entwicklungsstunden Δh_{Entw} übersteigt. Weiterführend könnten hier noch tiefergehende Untersuchungen zur Feststellung der energieoptimalen Verfahrgeschwindigkeit vorgenommen werden. Beispielsweise könnte die Verfahrgeschwindigkeit in einem Bereich von 55...65% variiert werden oder für die Anfahrt der einzelnen Punkte die Geschwindigkeit abschnittsweise angepasst werden. Dies erfordert zum einen allerdings einen erhöhten Zeitaufwand und zum anderen spezifisches Fachwissen zur Programmierung von Robotern.

Für die Erstellung des energieeffizienten Anlagendesigns ist keine Änderung an dem physikbasierten Systemmodell vorzunehmen. Die Änderung besteht ausschließlich in der Anpassung des OLP-Programms in Delmia. Die optimierte Energiesignatur besteht in einer reinen Substitution des Abschnitts der ersten beiden Montageoperationen durch den dargestellten zeitlichen Leistungsabgriff. Die Energie-KPIs des energieeffizienten Systemmodells verändern sich durch den verminderten Energieverbrauch für die betrachteten Montageoperationen nur marginal. Auf eine umfassende ökonomische Bewertung soll bei diesem Anwendungsfällen verzichtet werden. Die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit wurde durch den positiven NPV belegt, der die erhöhten Entwicklungskosten bereits berücksichtigt. Eine Erhöhung der Entsorgungskosten, die zu einer Erhöhung der Gesamtkosten der Anlage innerhalb des Produktlebenszyklus führen würde, ist durch die reine Anpassung des OLP-Programms auszuschließen.

7.3. Validierung der Simulationsergebnisse

Nach VDI-Richtlinie 3633 entspricht die Validierung im Kontext der Simulation von Produktionssystemen einer Überprüfung einer hinreichenden Übereinstimmung eines Modells mit dem modellierten Originalsystem [284], [379]. Dabei soll überprüft werden inwiefern ein Modell das Verhalten des abzubildenden Systems hinreichend genau wiedergibt. Somit wird mittels der Validierung eine Aussage über eine reproduzierbare Ergebnisqualität oder Abbildungsgüte eines Simulationsmodells angestrebt. Dabei kann die Validierung durch die Anwendung von Ansätzen zur empirischen Bewertung, theoretischen Bewertung sowie vergleichenden Bewertung dargelegt werden [380].

Im Fokus der Validierung stehen im Rahmen dieser Arbeit die Simulationsergebnisse der physikbasierten Energieverbrauchssimulation. Andere relevante Validierungsaspekte der physikbasierten Simulationsmethodik, bspw. hinsichtlich der hinreichend genauen Abbildung der Kinematik und Dynamik, wurden bereits ausführlich untersucht und werden somit nicht weiter betrachtet (vgl. [169], [309], [308], [381]). Dadurch wird ein direkter Bezug zu der ersten Forschungsfrage bzw. zu dem ersten Erfolgskriterium des Forschungsvorhabens (vgl. Kapitel 2.3.3) hergestellt. Für die Validierung der Simulationsergebnisse der Energieverbrauchssimulation mit Hilfe der physikbasierten Simulation kommen Ansätze der

vergleichenden Bewertung zum Einsatz. Eine auszugsweise Beschreibung der Validierung des physikbasierten Modells für pneumatische Aktoren wurde in leicht abgewandelter Form in [382] veröffentlicht.

7.3.1. Validierung des physikbasierten Modells für pneumatische Aktoren

Die Validierung des physikbasierten Simulationsmodells für pneumatische Aktoren erfolgt auf Basis eines Vergleichs mit einer herstellereigenen Simulationssoftware zur Planung und Auslegung pneumatischer Komponenten (Fa. Festo, Simulationssoftware: CACOS – Computer Aided Cylinder Optimizing System). Zum Vergleich der Ergebnisse beider Simulationssysteme sollen zum einen der zeitliche Verlauf des Massenstroms der einem Zylinder zugeführten Druckluft und zum anderen die über einen Zeitraum zugeführte absolute Masse als wesentliche Validierungskriterien betrachtet werden. Der Massenstrom kann dabei als SI-Äquivalent zu dem für die Energiebetrachtungen verwendeten Volumenstrom betrachtet werden, der über den Zusammenhang (15) berechnet werden kann. Gegenstand der Validierungsuntersuchungen ist der Expansionsvorgang eines Linearzylinders bei einer fixen Drosseleinstellung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Versorgungsdrücke ($p_{V,1} = 4 \text{ bar}$, $p_{V,2} = 6 \text{ bar}$, $p_{V,3} = 8 \text{ bar}$). In dem ersten Validierungsszenario wird ein Linearzylinder ohne Zuleitung (Schlauch) betrachtet während im zweiten Validierungsszenario ein Linearzylinder mit Zuleitung betrachtet wird. In beiden Validierungsszenarien wird sowohl in dem Modell der physikbasierten Simulation als auch bei den CACOS-Simulation eine äquidistante Simulationsschrittweite von $\Delta t = 0.006 \text{ s}$ verwendet.

Die Ergebnisse des ersten Validierungsszenarios ist in Abbildung 7-12 grafisch dargestellt. Der Startzeitpunkt des Expansionsvorgangs bei unterschiedlichen Druckniveaus ist aus Gründen der Lesbarkeit zeitlich versetzt dargestellt ($t_{Start,4 \text{ bar}} = 0.3 \text{ s}$, $t_{Start,6 \text{ bar}} = 1.3 \text{ s}$, $t_{Start,8 \text{ bar}} = 2.3 \text{ s}$). Die Charakteristik des zeitlichen Massenstromverlaufs bei der Füllung einer Zylinderkammer wird von dem physikbasierten Simulationsmodell abgebildet: nach einem hohen Anfangswert erfolgt über den Zeitraum des Expansionsvorgangs ein zeitlich konstanter Massenstromzufluss in die Kammer bis die Zylinderkammer vollständig gefüllt ist. Allerdings ist ersichtlich, dass der Anfangswert bei den Vergleichsdaten der CACOS-Simulation bei allen Druckniveaus deutlich höher ausfällt und ein stetiger Übergang in die Phase des zeitlich konstanten Massenstromzuflusses vorliegt. Bei dem physikbasierten Simulationsmodell wird die Phase des zeitlich konstanten Massenstromzuflusses schneller erreicht, wobei zuvor eine starke Oszillation zwischen dem Wert des zeitlich konstanten Massenstromzuflusses und null vorliegt. Die Höhe des zeitlich konstanten Massenstromzuflusses sowie die zeitliche Dauer des Expansionsvorgangs weisen bei allen Druckniveaus nur geringe Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen auf.

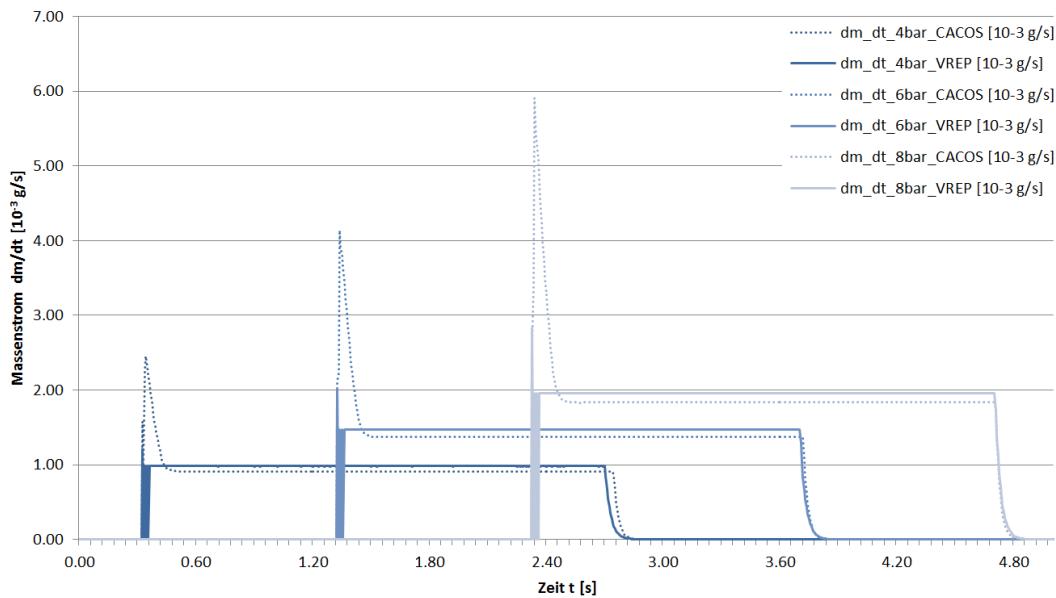


Abbildung 7-12: Vergleich der Simulationsergebnisse für einen Expansionsvorgang eines Linearzyinders bei unterschiedlichen Versorgungsdrücken und konstanter Drosselöffnung (40%)

Der prozentuale mittlere Fehler des zeitlichen Massenstromverlaufs Δx_{mit} wird relativ zu dessen minimal \dot{m}_{min} bzw. maximal angenommenen Werten \dot{m}_{max} bestimmt, wobei n die Anzahl der Datenpunkte repräsentiert.

$$[\%] \Delta x_{mit} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\dot{m}_{VREP,i} - \dot{m}_{CACOS,i}|}{\dot{m}_{max} - \dot{m}_{min}} \cdot 100 \quad (36)$$

Auf Basis des zeitlichen Verlaufs des Massenstroms kann die absolut in die Zylinderkammer geströmte Masse $m_{Abs.}$ über die Simulationszeit ermittelt werden. Der Fehler der absoluten Masse Δx_{abs} wird auf Basis des maximal ermittelten Absolutwertes der Masse ermittelt.

$$[\%] \Delta x_{abs} = \frac{|m_{abs,VREP} - m_{abs,CACOS}|}{\max(m_{abs,VREP}; m_{abs,CACOS})} \cdot 100 \quad (37)$$

Bei einem Vergleich der prozentualen Abweichung zwischen den absoluten Massenwerten steigt der Fehler bei höheren Druckniveaus zwar leicht an, bewegt sich aber in einem vernachlässigbaren Bereich von ca. 1% (vgl. Tabelle 7-1). Der mittlere Fehler bewegt sich ebenfalls im niedrigen einstelligen Prozentbereich und verringert sich mit steigendem Druckniveau.

p_V [bar]	Validierungsszenario 1		Validierungsszenario 2	
	Δx_{mit} [%]	Δx_{abs} [%]	Δx_{mit} [%]	Δx_{abs} [%]
4	2.19	0.94	3.54	2.61
6	1.88	0.99	3.79	3.21
8	1.78	1.02	4.23	3.61

Tabelle 7-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Validierungsszenarien des physikbasierten Modells für pneumatische Aktoren

Das Ziel des zweiten Validierungsszenarios besteht in der Betrachtung der physikbasierten Simulationsergebnisse pneumatischer Aktoren unter Berücksichtigung der Zuleitung und des damit verbundenen Schlauchvolumens. Dafür wird der in dem ersten Validierungsszenario betrachtete Zylinder mit einer Zuleitung ($\emptyset_{Schlauch} = 1.128 \cdot 10^{-3} m$, $l_{Schlauch} = 1m$) versehen und die Simulationsergebnisse nach analoger Vorgehensweise verglichen (vgl. Abbildung 7-13).

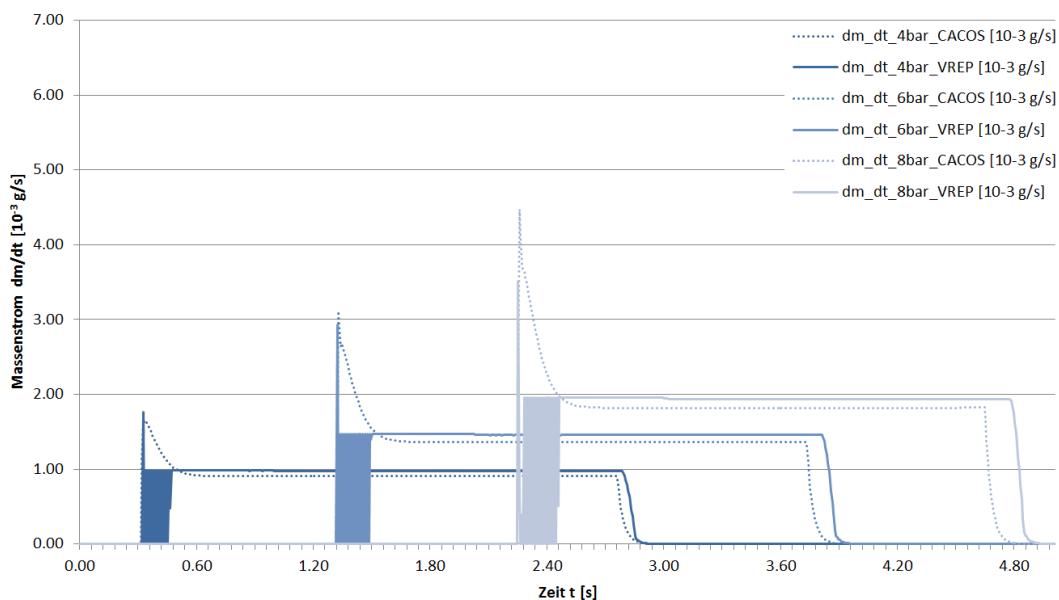


Abbildung 7-13: Vergleich der Simulationsergebnisse für einen Expansionsvorgang eines Linearzylinders mit Zuleitung bei unterschiedlichen Versorgungsdrücken und konstanter Drosselöffnung (40%)

Hinsichtlich der zeitlichen Betrachtungen kann konstatiert werden, dass das physikbasierte Modell den charakteristischen Verlauf des Massenstroms bei der Füllung der Kammer des Linearzylinders mit einer vorgeschalteten Zuleitung wiederspiegelt. Der Unterschied bei dem hohen Anfangswert zwischen beiden Simulationsansätzen fällt im Vergleich zum ersten Validierungsszenario sehr viel geringer aus. Allerdings treten die starken Oszillationen bis zum Erreichen der Phase des konstanten Massenstromzuflusses sehr viel länger auf. Zudem sind

die zeitlichen Abweichungen bis zur vollständigen Ausfahrt des Zylinders im Vergleich zum ersten Validierungsszenario sehr viel stärker ausgeprägt und nehmen mit steigendem Druckniveau zu. Bei der Analyse der Simulationsfehler fällt auf, dass sowohl der mittlere als auch der absolute Fehler zwischen den Simulationsergebnissen im Vergleich zum ersten Validierungsszenario grundsätzlich höher ausfällt. Allerdings bewegen sich die Fehler im niedrigen einstelligen Prozentbereich (vgl. Tabelle 7-1).

Die Ursachen der Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen des physikbasierten Simulationsmodells zu dem herstellerspezifischen Simulationsmodell liegen zum einen in der vergleichsweise geringeren Modellierungstiefe und zum anderen in der Unsicherheit bei der Angabe signifikanter Parameter. Das physikbasierte Simulationsmodell basiert auf mehreren vereinfachenden Annahmen (z.B. vereinfachtes Reibmodell, isotherme Zustandsänderungen) und limitiert bspw. durch die Angabe einer maximalen Kolbengeschwindigkeit die Ein- und Ausfahrgeschwindigkeit des Zylinders. Während bei der physikbasierten Simulation die Anzahl der erlaubten Iterationen des Solvers gering gehalten wird, um die Echtzeitfähigkeit der 3D-Simulation zu garantieren, erfolgt die herstellerspezifische Simulation ohne 3D-Darstellung und ermöglicht eine hohe Anzahl an Iterationsschritten. Abschließend kann festgestellt werden, dass die Abweichungen zwischen beiden Modellierungsansätzen gering ausgeprägt sind und somit die Eignung der physikbasierten Simulation zur Abbildung des Energieverbrauchs pneumatischer Aktoren festgestellt werden kann.

7.3.2. Validierung des physikbasierten Modells des sechsachsigen Industrieroboters

Die Validierung des physikbasierten Simulationsmodells für den Energiebedarf eines sechsachsigen Industrieroboters wird ebenfalls auf der Basis eines Vergleichs mit einer herstellereigenen Simulationssoftware zur Berechnung des Energiebedarfs eines Roboters durchgeführt (Fa. KUKA). Zur Analyse der Simulationsergebnisse des physikbasierten Simulationsmodells sollen einerseits der zeitliche Verlauf des mechanischen Leistungsbedarfs des Motors (P_M , vgl. Gleichung (25)) und zum anderen der absolute mechanische Energiebedarf E_M bezogen auf die einzelnen Roboterachsen sowie auf die gesamte Funktionsgruppe Roboter. Bei den Validierungsuntersuchungen wird bei dem physikbasierten Simulationsmodell und der herstellerspezifischen Software eine Simulationsschrittweite von $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ verwendet. Dabei werden vier Validierungsszenarien untersucht, bei denen die gleichen Achsbewegungen und die gleiche Testtrajektorie bei wechselnden Effektorgewichten ($m_{E,1} = 0 \text{ kg}, m_{E,2} = 50 \text{ kg}, m_{E,3} = 100 \text{ kg}, m_{E,4} = 150 \text{ kg}$) analysiert werden.

Die Ergebnisse des dritten Validierungsszenarios sind in Abbildung 7-14 dargestellt. Der Leistungsbedarf P_M einer einzelnen Achse ist über dem zeitlichen Verlauf einer Bewegung mit den designierten Ausgangs- und Zielachspositionen dargestellt (Diagramme (a) - (f)).

Evaluierung der Anwendbarkeit der Methode

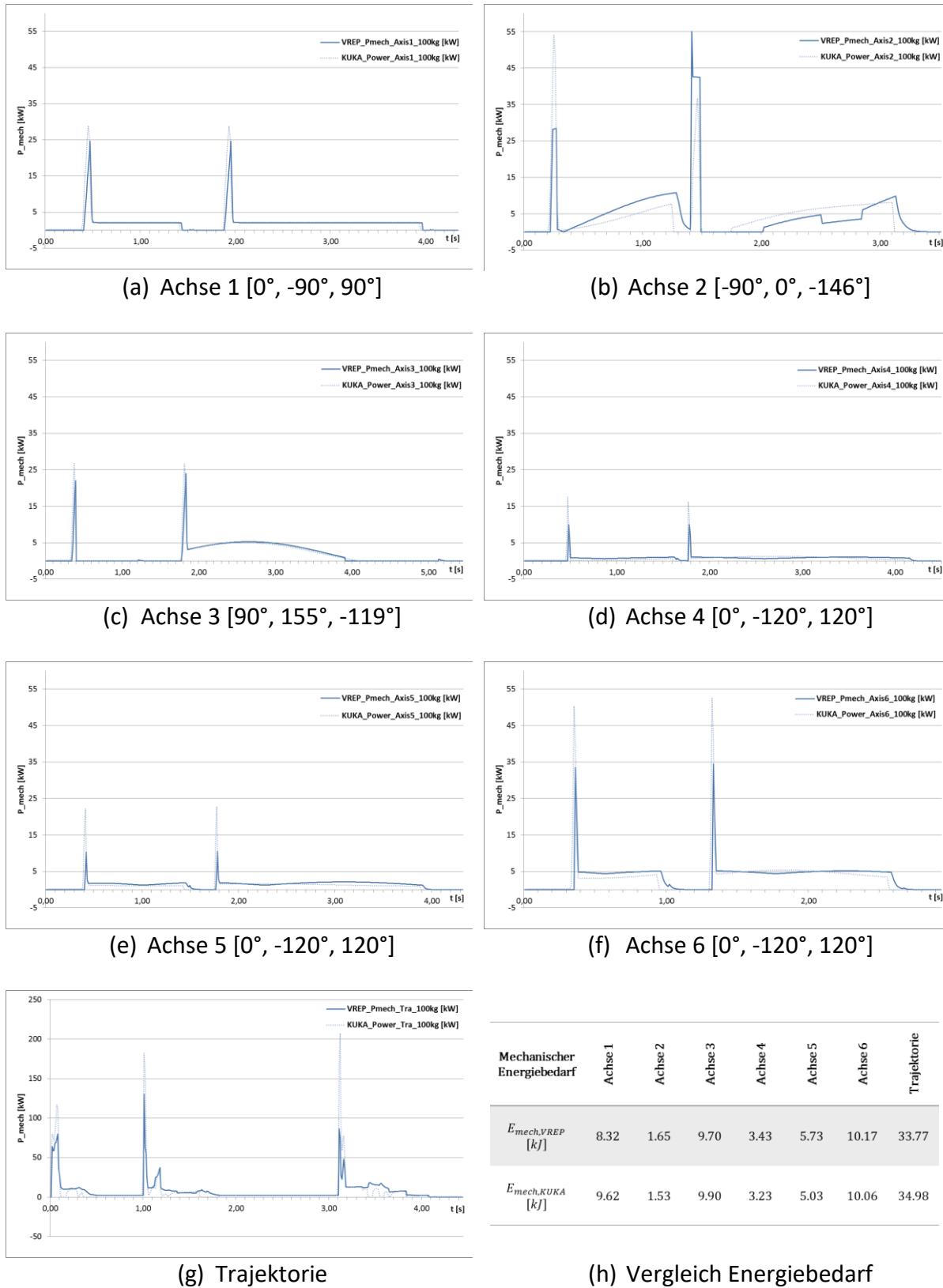


Abbildung 7-14: Vergleich der Simulationsergebnisse des mechanischen Leistungs- und Energiebedarfs für definierte Roboterbewegungen mit einem Effektorgewicht von 100 kg (Validierungsszenario 3)

Es kann festgestellt werden, dass der charakteristische Verlauf des Leistungsbedarfs bei allen Achsen abgebildet wird. Die Spannungsspitzen sind bei den Simulationsergebnissen der herstellereigenen Software stärker ausgeprägt (insbesondere bei Achse 5 und Achse 6). Die stärkste Diskrepanz hinsichtlich des zeitlichen Leistungsbedarfverlaufs weist Achse 2 auf: hier sind neben den Abweichungen in der Höhe des Leistungsbedarfs zudem signifikante Abweichungen bzgl. der Start- und Endpunkte des Leistungsabgriffs erkennbar. Bei der Betrachtung einer gesamten Trajektorie sind darüber hinaus Abweichungen erkennbar. Konsequenterweise sind bei den Simulationsergebnissen der herstellereigenen Software im Vergleich zu den Ergebnissen des physikbasierten Simulationsmodells die Spannungsspitzen ebenfalls stärker ausgeprägt, wohingegen der zeitliche Verlauf des Leistungsabgriffs korrekt abgebildet wird (vgl. Abbildung 7-14 (g)). Beim Vergleich der Simulationsergebnisse des mechanischen Energiebedarfs E_M ist ersichtlich, dass eine geringe positive sowie negative Diskrepanz bei der Betrachtung der individuellen Achsen festgestellt werden kann. Bei einer integrierten Betrachtung der aggregierten Achswerte innerhalb einer Trajektorie heben sich die Abweichungen teilweise gegenseitig auf und resultieren in einer geringen Abweichung von dem von der herstellereigenen Software ermittelten Wert (vgl. Abbildung 7-14 (f)).

Für alle Validierungsszenarien wird der absolute Fehler bei der Betrachtung des mechanischen Energiebedarfs ermittelt, indem die Differenz zwischen den ermittelten Werten beider Simulationsansätze auf den höheren Ergebniswert beider Simulationsansätze bezogen wird.

$$[\%] \Delta x_{abs} = \frac{|E_{mech,VREP} - E_{mech,KUKA}|}{\max(E_{mech,VREP}; E_{mech,KUKA})} \cdot 100 \quad (38)$$

Analog zu dem in Kapitel 7.3.1 vorgestellten Vorgehen erfolgt die Berechnung des mittleren Fehlers auf Basis der Leistungsdifferenz der einzelnen Wertepaare bezogen auf die maximal und minimal angenommenen Leistungswerte.

$$[\%] \Delta x_{mit} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_{mech,VREP,i} - P_{mech,KUKA,i}|}{P_{mech,max} - P_{mech,min}} \cdot 100 \quad (39)$$

Eine Übersicht über die Fehlerberechnung für alle Validierungsszenarien ist zusammenfassend in Tabelle 7-2 dargestellt. Es kann konstatiert werden, dass sich der mittlere Fehler Δx_{mit} sowohl bei der Betrachtung der individuellen Roboterachsen als auch bei der Betrachtung der Trajektorien in einem niedrigen einstelligen Prozentbereich bewegt. Der absolute Fehler Δx_{abs} fällt häufig höher aus und bewegt sich überwiegend in einem niedrigen zweistelligen Prozentbereich, wobei bei der Betrachtung der Trajektorie ein geringerer absoluter Fehler bei steigendem Ladungsgewicht beobachtet werden kann.

Evaluierung der Anwendbarkeit der Methode

	Validierungsszenario 1 (Effektorgewicht: 0 kg)		Validierungsszenario 2 (Effektorgewicht: 50 kg)		Validierungsszenario 3 (Effektorgewicht: 100 kg)		Validierungsszenario 4 (Effektorgewicht: 150 kg)	
	Δx_{mit} [%]	Δx_{abs} [%]	Δx_{mit} [%]	Δx_{abs} [%]	Δx_{mit} [%]	Δx_{abs} [%]	Δx_{mit} [%]	Δx_{abs} [%]
Achse 1 (0°, -90°, 90°)	1.23	11.47	1.39	12.84	1.82	13.53	2.08	15.03
Achse 2 (-90°, 0°, -146°)	3.06	8.15	3.46	1.54	4.92	7.30	5.55	27.95
Achse 3 (90°, 155°, -119°)	0.78	14.33	1.10	7.48	1.32	2.00	1.71	1.03
Achse 4 (0°, -120°, 120°)	0.74	13.56	1.58	2.97	2.69	5.67	2.85	0.76
Achse 5 (0°, -120°, 120°)	0.74	13.70	1.44	1.22	2.54	12.27	3.63	2.55
Achse 6 (0°, -120°, 120°)	1.35	4.47	1.98	0.92	2.41	1.14	2.55	0.96
Trajektorie	1.61	12.15	1.47	10.63	1.87	3.45	1.59	2.20

Tabelle 7-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Validierung des physikbasierten Modells eines sechsachsigen Industrieroboters

Die Ursachen der Abweichungen zwischen den Ergebnissen des physikbasierten Simulationsmodells und der herstellereigenen Software liegen einerseits in der begrenzten Modellierungstiefe und zum anderen in der Unsicherheit beeinflussender Parameter bei der Modellierung. So sind bspw. vereinfachende Annahmen bzgl. der physikbasierten Modellierung des mechanischen Aufbaus getroffen worden (steife Roboterachsen, starre Gelenke) oder die Modellierung des Antriebs basiert auf einer eindeutigen Zuordnung eines Motors zu einer Achse. Darüber hinaus wird die Reibung über ein vereinfachtes Reibmodell in Form eines Reibmoments abgebildet und rekuperative Energieanteile (Motor im Generatorbetrieb während eines Abbremsvorgangs) werden nicht berücksichtigt. Eine weitere Quelle der Ergebnisdiskrepanz stellt die Modellierung der zweiten Achse dar, die aufgrund der komplexen Kinematik des Gewichtsausgleichs teilweise starke Abweichungen verursacht. Die Unsicherheit bei der Angabe der dynamischen Parameter der einzelnen Achsen ($m_i, x_{i,com}$) sowie der Konstanten (bspw. $k_{GA}, F_{GA,0}, r_G$), die einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnung des Energiebedarfs besitzen, können ebenfalls als Ursache für Abweichungen ausgemacht werden.

Die Validierung der Ergebnisse der physikbasierten Modelle zur Energieverbrauchsberechnung erfolgt sowohl bei den pneumatischen Aktoren als auch bei dem sechsachsigen Industrieroboter auf Basis einer vergleichenden Bewertung mit herstellerspezifischen Softwaretools. Eine weitere Möglichkeit der Validierung besteht im Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messergebnissen an einem realen Anlagenaufbau. Diese Möglichkeit konnte aus Kostengründen nicht realisiert werden, so dass die Qualität der Validierung nur relativ zu den herstellerspezifischen Softwaretools ermittelt werden kann und somit nur eine eingeschränkte Tragfähigkeit besitzt.

KAPITEL 8: BEWERTUNG DER INDUSTRIELLEN RELEVANZ

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik für eine energieeffizienzorientierte Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen im Kontext der physikbasierten mechanischen Absicherung wird unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet und ein konzeptioneller Ansatz für eine industrielle Nutzbarmachung wird präsentiert. Zudem wird eine abschließende Bewertung des Forschungsvorhabens unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.3.3 formulierten Forschungsfragen vorgenommen.

8.1. Technisch-wirtschaftliche Bewertung

Der in der Methodik verfolgte operative bottom-up Ansatz führt zu der energieeffizienzorientierten Optimierung einer einzelnen Station bzw. einzelner Funktionsgruppen. Eine energieeffizienzorientierte Auslegung einer einzelnen Station stellt eine lokale Optimierung dar und bedeutet bei der Betrachtung einer gesamten Montagelinie oder -halle nicht zwangsläufig die beste Lösung. Hierfür sollten alle Stationen und Anlagen einer Montagelinie gemeinsam betrachtet werden.

Die physikbasierte Modellierung der ECUs ist gerade bei den variablen ECUs mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Zudem wird die Modellierung derzeit in Form einer skriptbasierten Programmierung in einem industriell nur sehr begrenzt einsetzbaren Tool umgesetzt. Allerdings stellt es derzeit die einzige Möglichkeit dar, Energieverbräuche unterschiedlicher Energieträger auf Basis der 3D-Konstruktionsdaten der ECUs in einer integrierten Darstellung zu berechnen und zu visualisieren. Alternativ könnte es hier zielführend sein, die aufwendige individuelle physikbasierte Modellierung durch die Nutzung eines objektorientierten Programmierungsansatzes zu ersetzen. Idealerweise könnten die ECU-Hersteller bei der Modellierung verstärkt miteinbezogen werden. Eine Möglichkeit besteht hier in der Bereitstellung gekapselter ECU-Verhaltensmodelle, die an die physikbasierte Simulationsumgebung angebunden werden können.

Der Datenimport in die physikbasierte Simulationsumgebung, die physikbasierte Modellierung der Gesamtanlage sowie die Modellierung des Montageprozesses erfordern zudem hohe Aufwände. Eine in die CAD-Konstruktionsumgebung integrierte Lösung mit einer

möglichst automatisierten Erstellung der kinematischen Ablaufsimulation könnte hier Abhilfe schaffen.

Der Export der Energieverbrauchsdaten für die EEIM-Analyse nach Excel erscheint unnötig aufwendig und sollte idealerweise automatisiert innerhalb des Tools zur physikbasierten Simulation erfolgen. Die Identifikation potentiell anwendbarer EEIMs ist stark von der Kompetenz und dem Erfahrungswissen des Planers und Konstrukteurs abhängig. Idealerweise könnte hier eine softwarebasierte Unterstützung des Anwenders bei der Auswahl und Untersuchung der EEIMs innerhalb des Tools zur physikbasierten Simulation erfolgen.

Bei der EEIM-Implementierung kann es durch die iterative Vorgehensweise dazu kommen, dass ein bereits implementierter EEIM die Implementierung eines anderen EEIMs behindert oder ausschließt. Demzufolge basiert es auf der EEIM-Priorisierung, in welcher Reihenfolge welcher EEIM zur Anwendung kommt. Demzufolge wird eventuell nicht die bestmögliche Lösung bei der Implementierung gefunden. Darüber hinaus erfolgt die wirtschaftliche Bewertung des EEIM nur auf Basis des Kapitalbarwerts und erfolgt unter stark vereinfachten Annahmen. Daher ist die Aussage zur Wirtschaftlichkeit eines EEIMs mit Unsicherheit verbunden und könnte zusätzlich noch mit anderen dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnungsmethoden abgesichert werden.

Die ökonomische Bewertung der unterschiedlichen Anlagendesignvarianten im Rahmen der LCC erfolgt auf dem ursprünglich veranschlagten Nutzungsprofil der Anlage. Im Fall einer Abweichung von diesem Nutzungsprofil (bspw. einer Änderung der Anlagenlaufzeit) oder neuer Rahmenbedingungen (bspw. vorzeitiger Umbau der Anlage durch Integration einer zusätzlichen Produktmodellvariante) ist die Aussage hinsichtlich der gesamtheitlichen Wirtschaftlichkeit nicht mehr gültig. Zudem existieren häufig Abweichungen zwischen den in der Produktionsplanung verabschiedeten Planungsständen und den letztendlichen Realisierungen in der Montagehalle. In diesen Fällen ist die Wirksamkeit der entwickelten Methodik stark eingeschränkt.

8.2. Konzeptioneller Ansatz zur industriellen Nutzbarmachung

Die Machbarkeit der Methode wurde anhand der Anwendungsbeispiele in Kapitel 7.1 und 7.2 dargelegt. Unter Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Limitationen wird folgend ein Ansatz für eine potentielle industrielle Nutzbarmachung der Methode vorgestellt und konzeptionell ausgestaltet.

8.2.1. Konzeptioneller Ansatz einer softwaretechnischen Umsetzung

Bei der softwaretechnischen Umsetzung wird die Fragestellung adressiert, wie die Methode in die derzeitige Vorgehensweise bei der digitalen Planung und Absicherung automatisierter Montageanlagen integriert werden kann. Hierbei steht im Wesentlichen die Nutzung und Adaption des erweiterten 3D-Geometriemodells der Virtuellen Inbetriebnahme mit dem

Zweck einer energieeffizienzorientierten Gestaltung und Auslegung der automatisierten Montageanlage im Vordergrund. Ziel ist bei der technischen Nutzbarmachung den Aufwand für die an der Umsetzung beteiligten Produktionsplaner des OEMs und der Konstrukteure des Anlagenbauers zu minimieren.

Bei der Wahl der physikbasierten Simulationsumgebung gelten die in Kapitel 4.2 formulierten Anforderungen, wobei diese um die zusätzliche Anforderung der industriellen Einsetzbarkeit des Tools ergänzt wird. Für eine breitflächige industrielle Einsetzbarkeit sind bspw. Faktoren wie Gewährleistung von Support und Hilfe bei der Toolbedienung, die Benutzerfreundlichkeit, Möglichkeiten zur individuellen funktionalen Erweiterung sowie die erforderlichen Lizenzkosten relevant. Darüber hinaus ist die bisherig verwendete Toollandschaft sowie der zusätzliche Aufwand bei der Weiterverwendung der Konstruktionsdaten bei der Modellerstellung zu berücksichtigen. Eine Softwarelösung, die diesen Anforderungen gerecht wird, ist die Simulationsumgebung Mechatronics Concept Designer (MCD) auf Basis des CAD-Konstruktionstools NX der Firma Siemens PLM (vgl. Kapitel 3.3.3). Basierend auf den CAD-Konstruktionsdaten der automatisierten Montageanlage kann in der Anwendung MCD mit Hilfe der Definition von Kollisionskörpern, Gelenken und Operationen eine physikbasierte Montageprozesssimulation erstellt werden. Die für die Energieverbrauchssimulation erforderlichen ECU-Modelle müssen allerdings zusätzlich implementiert und an die Prozesssimulation angebunden werden. Für die Umsetzung der Methode ist eine zusätzliche Unterstützung des Nutzers bei der EEIM-Analyse und Implementierung erforderlich.

Eine Möglichkeit zur softwaretechnischen Umsetzung der Methode für eine industrielle Nutzung ist in Abbildung 8-1 dargestellt. In der integrierten Konstruktions- und Simulationsumgebung NX/MCD wird das erweiterte 3D-Geometriemodell der Anlage visualisiert (5). Der Prozessablauf des Montageprozesses (Taktzeitdiagramm) ist in Form eines Gantt-Diagramms im Sequence-Editor dargestellt (4). Die einzelnen Funktionsgruppen, Komponenten und Bauteile werden in der Baumstruktur nach spezifizierten Benamungsvorgaben gelistet. Für die ECU-Modellierung kann eine zusätzliche dll-Datei (Dynamic Link Library) an NX angebunden werden, die das Verhalten der einzelnen ECUs auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten gleichungsbasiert abbildet (1).

Dabei soll die Abbildung des Verhaltens mit Hilfe objektorientierter Programmierung erfolgen, so dass die einzelnen ECUs infolgedessen nur einzelne Instanzen ihrer jeweiligen Bauart darstellen. Dafür sind für jede unterschiedliche Bauart der ECUs eigene Modelle erforderlich. Das physikalische Verhalten einer ECU-Bauart, bspw. eines einfachwirkender Linearzylinders, kann für jedes Modell mit den gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten abgebildet werden. Die typspezifischen Informationen (Modellparameterspezifikation), bei einem einfachwirkenden Zylinder bspw. die Federkonstante, kann durch die Angabe eines zusätzlichen Parameters in dem NX-Konstruktionsmodell erfolgen und an die dll übergeben werden. Die Modellierung des physikalischen Verhaltens der ECUs kann dabei analog zu den

in Kapitel 6.1 vorgestellten Ansätzen erfolgen. Die für die Berechnung des physikalischen Verhaltens erforderlichen physikalischen Eigenschaften (Masse, Trägheiten, etc.) können aus den Konstruktionsdaten abgeleitet werden. Das physikalische Verhalten der ECUs wird demnach über individuelle Modelle simuliert, wohingegen das physikalische Verhalten der einzelnen Komponenten untereinander auf Anlagenebene (bspw. Kollision einzelner Baugruppen) mittels der Physik-Engine abgebildet wird.

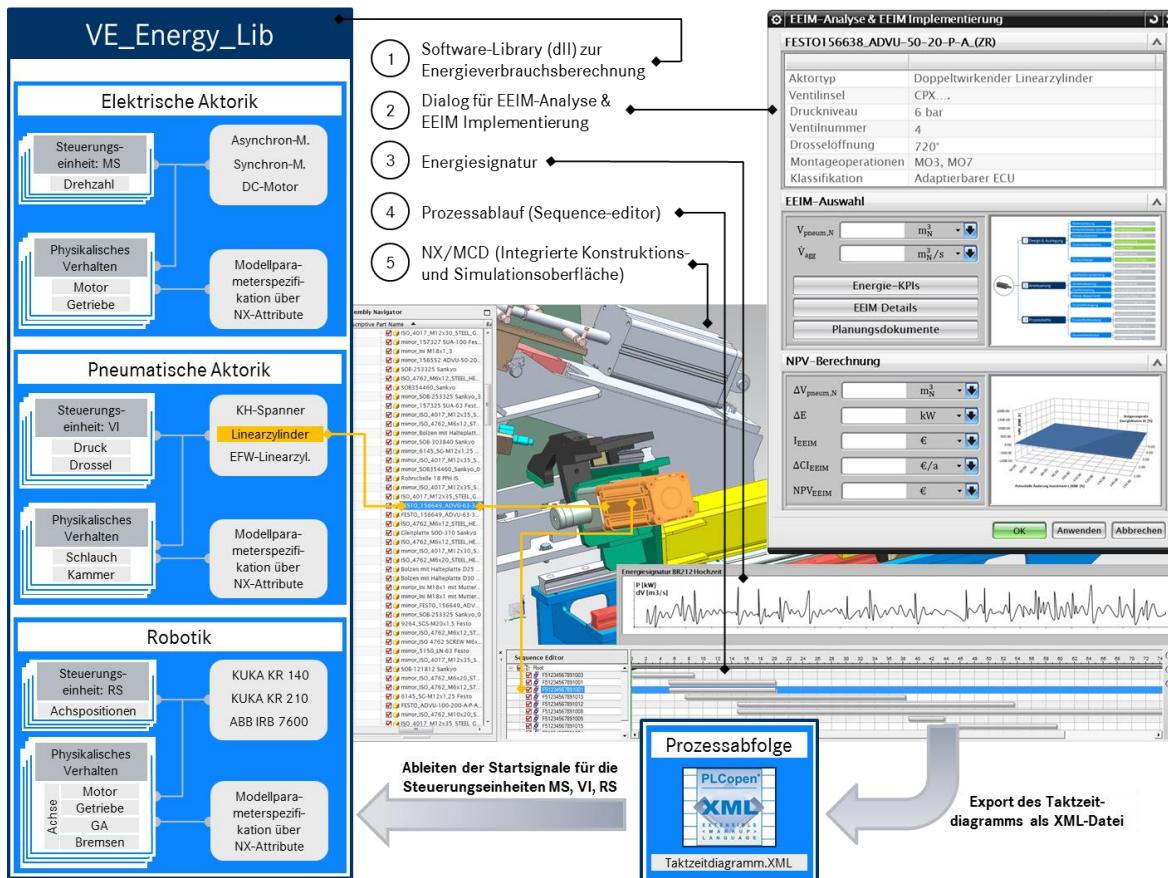


Abbildung 8-1: Exemplarische Darstellung eines konzeptionellen Ansatzes

für eine softwaretechnische Umsetzung

Neben der Abbildung des physikalischen Verhaltens muss jede ECU an eine Steuerungseinheit angebunden werden. Die Steuerungseinheit gibt die Steuerungsgrößen für den jeweiligen Aktor vor. Die Realisierung der Steuerungseinheiten kann analog zu den in den Anwendungsbeispielen erarbeiteten Umsetzungen vorgenommen werden. Dabei müssen die Steuerungseinheiten zusätzlich an die Prozessabfolge angebunden werden, um die Aktivitäten der einzelnen ECUs in den verschiedenen Montageoperationen zu veranlassen. Hierbei muss das in Kapitel 5.3.2 beschriebene Mapping der ECU-Aktivitäten mit den Montageoperationen erfolgen. Die Prozessfolge kann aus MCD mittels einer XML-Datei (Extensible Markup Language) exportiert werden, aus der die Startsignale extrahiert und an die Steuerungseinheiten übergeben werden müssen. Die Energiesignatur (3) kann als zusätzlich

einblendbares Diagrammfenster über dem Prozessablauf dargestellt werden. Dabei muss die Energiesignatur mit den aggregierten Werten der Energieverbräuche aus den Instanzen der einzelnen ECUs versorgt werden.

Die Kernschritte der Methode EEIM-Analyse und EEIM-Implementierung können mit Hilfe einer zusätzlichen Dialogform in NX realisiert werden (2). Bei Auswahl der zu untersuchenden ECU werden im oberen Teil der Dialogform zunächst beschreibende Planungsdaten des ECUs dargestellt (vgl. Abbildung 8-1). Neben der Bezeichnung sind die Zuordnung zu einer Steuerungseinheit (hier: Ventilinsel) sowie die anderen Steuerungsparameter (hier Druck und Drosselöffnungswinkel) von Relevanz. Darüber hinaus werden die Montageoperationen, an denen die ECU beteiligt ist, sowie die ECU-Klassifikation spezifiziert. Im mittleren Bereich soll der Benutzer bei der EEIM-Auswahl unterstützt werden. Hierbei werden einerseits die den Energieverbrauch beschreibenden Parameter und zum anderen die potentiell anwendbaren EEIMs dargestellt. Darüber hinaus wird der Zugriff auf die Energie-KPIs des initialen Anlagendesigns und auf zusätzliche Planungsdokumente (bspw. Pneumatikplan) ermöglicht. Details über die potentiell anwendbaren EEIMs soll durch die Bereitstellung des EEIM-Katalogs in Form von standardisierten Templates realisiert werden (vgl. Kapitel 5.4.2.2). Der untere Abschnitt stellt eine Unterstützung bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des zu implementierenden EEIMs in Form der NPV-Berechnung bereit. Die Modellspezifikationsparameter (bspw. Anlagenlaufzeit, Energiekostensätze) können extern spezifiziert werden und als Basis für die NPV-Berechnung herangezogen werden. Die Einsparungen müssen vom Benutzer mittels Simulation auf Komponentenebene quantifiziert werden und die zusätzlich erforderlichen Investments abgeschätzt werden. Die Sensitivitätsanalyse unterstützt den Benutzer bei der Bestimmung der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit der EEIM-Implementierung bei sich ändernden Rahmenbedingungen.

Änderungen in der Konstruktion oder der Auslegung können in der Entwicklungsumgebung NX-Modeling eingepflegt werden, die dazugehörigen Eigenschaften für die geänderten Bauteile und Komponenten werden häufig ohne zusätzlichen Aufwand in die physikbasierte Simulationsumgebung übernommen. Dadurch können Medienbrüche und Datenqualitätsverluste bei der Nutzung unterschiedlicher Tools vermieden werden. Die Weiterverwendung des energieeffizienten erweiterten 3D-Geometriemodells im Rahmen der VIBN muss durch die Datenübertragung in das Softwaretool für die VIBN gewährleistet werden (bspw. über eine AML-Exportschnittstelle).

8.2.2. Konzeptioneller Ansatz einer organisatorischen Umsetzung im Entwicklungsprojekt

An einem Entwicklungsprojekt einer automatisierten Montageanlage sind neben dem Auftraggeber (OEM) der Anlagenbauer/Anlagenlieferant (GU) und die spezialisierten Unterauftragnehmer beteiligt. Zwischen den beteiligten Entwicklungspartnern kann ein Interessenskonflikt entstehen im Spannungsfeld zwischen kostenorientierter und

funktionssicherheitsorientierter Anlagenentwicklung und der Folgekosten in der Betriebs- bzw. Nutzungsphase. Zudem besteht bei einem OEM häufig ein innerorganisatorischer Interessenskonflikt zwischen Mitarbeitern der Produktionsplanung und den verantwortlichen Anlagenbetreibern (vgl. Kapitel 2.3.1, Themenfeld 2). Das Ziel dieses konzeptionellen Ansatzes für eine organisatorische Umsetzung der Methode besteht in der Überwindung dieser Konflikte durch das Aufzeigen potentieller organisatorischer Stellhebel.

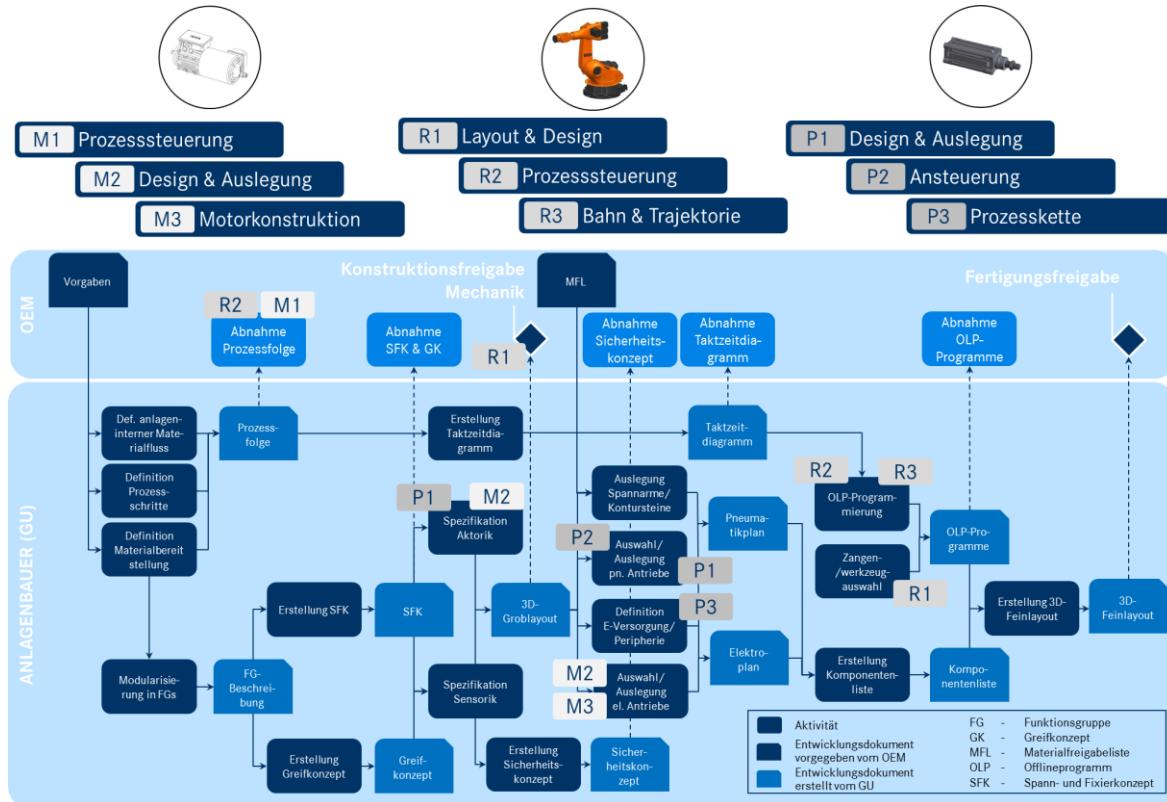


Abbildung 8-2: Zuordnung der EEIM-Kategorien zu den potentiellen Anwendungsfeldern bei der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen

Die Produktionsplaner und die Mitarbeiter des Anlagenlieferanten müssen bei der energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung hinreichend softwaretechnisch mit einer integrierten Bewertung der Energieeffizienz eines Anlagendesigns unterstützt werden. Diese Unterstützung könnte als fester Bestandteil bei den Meilensteinen und Konstruktionsdurchsprachen genutzt werden (vgl. Abbildung 3-5). Hier können bei gemeinsamen Begutachtungen des zu dem Zeitpunkt vorliegenden Designs der Anlage bzw. der einzelnen Funktionsgruppen potentielle EEIMs identifiziert und bewertet werden. Hierbei könnte eine Zuordnung der einzelnen EEIM-Kategorien zu den individuellen Schritten der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung im Entwicklungsprozess wie folgt gestaltet werden (vgl. Abbildung 8-2).

Für elektrische Motoren und Roboter können die EEIMs bzgl. der Prozesssteuerung bei der Abnahme der Prozessfolge eingepflegt werden. Hierbei stehen im Wesentlichen die Definition der Zeiträume im Vordergrund, in denen die elektrischen Verbraucher in energieeffiziente Zustände geschaltet werden können. Die EEIMs bzgl. des Designs und der Auslegung elektrischer und pneumatischer Anriebe müssen bei der Spezifikation der Aktorik berücksichtigt werden. Hierzu gehört essentiell die korrekte Dimensionierung der Aktorik für die jeweilige Montageaufgabe oder die korrekte Auslegung eines Elektromotors für einen designierten Lastzustand. Bei der Abnahme des 3D-Groblayouts können die EEIMs bzgl. des Layouts und Designs eines Industrieroboters berücksichtigt werden. Dabei spielen die Wahl des korrekten Robotertyps für die geplante Montageoperation und dessen energieeffizienzorientierte Platzierung innerhalb des Anlagenlayouts eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus kann eine energieeffizienzorientierte Optimierung des Roboterwerkzeugs bei der Zangenauswahl bzw. Werkzeugauswahl erfolgen. In der OLP-Programmierung können die EEIM Kategorien Prozesssteuerung sowie Bahn & Trajektorie Anwendung finden. Die EEIM Kategorie Prozesskette bzgl. der Drucklufterzeugung, -aufbereitung und -distribution kann bei der Definition der Energieversorgungseinrichtungen und der Peripherie angewendet werden. Die restlichen EEIM Kategorien müssen bei der detaillierten Auswahl und Auslegung der Aktorik angewendet werden.

Für eine vereinfachte Anwendung der EEIMs bei den jeweiligen Schritten der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung können von dem OEM Richtlinien für eine energieeffizienzorientierte Gestaltung von automatisierten Montageanlagen formuliert und dem Anlagenlieferanten bereitgestellt werden. Die Richtlinien können dabei aus dem EEIM-Template-Katalog erzeugt werden und dem Anlagenbauer als verbindliche Vorgabe präsentiert werden. In diesen Richtlinien können analog zu der Formulierung von Lastenheften Kriterien spezifiziert werden, die in den Konstruktionsgesprächen und Abnahmen simulationsgestützt überprüft werden müssen. Die Einhaltung der Kriterien muss zudem bei der finalen Abnahme der Anlage in Form von Abnahmemessungen überprüft werden.

Die Umsetzung der EEIMs im Entwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen ist mit einem Mehraufwand für den Anlagenlieferanten verbunden. Nachweisbar umsetzungswillige Anlagenlieferanten könnten daher bei zukünftigen Neuvergaben von Anlagenentwicklungsprojekten im Rahmen eines Bonus/Malus-Bewertungssystems mit einer positiven Bewertung belohnt werden. Zudem könnten Zahlungsmodalitäten des Entwicklungsprojekts von dem OEM an den Anlagenlieferanten mit den prognostizierten Energieverbrauchswerten gekoppelt werden. Innerorganisatorisch könnten die Bewertungskriterien für die Produktionsplaner mit dem Energieverbrauch der von ihnen geplanten Anlagen verbunden werden. Damit würde eine stärkere Verantwortung der

Produktionsplaner für die von ihnen geplanten Anlagen über das Ende des Anlagenentwicklungsprojekts hinaus einhergehen.

8.3. Abschließende Bewertung des Forschungsvorhabens

Die abschließende Bewertung des Forschungsvorhabens erfolgt zum einen auf Basis der in Kapitel 2.3.3 aufgestellten Forschungsfragen bzw. der wissenschaftlichen Hypothese und zum anderen durch die kontextuelle Einordnung auf Basis der Evaluation themenverwandter Forschungsaktivitäten (vgl. Kapitel 3.4).

Forschungsfrage 1: Wie und mit welcher Qualität können Energieverbräuche von automatisierten Montageanlagen mit Hilfe der physikbasierten Simulation berechnet und visualisiert werden?

Die erste Forschungsfrage zielt auf die Abbildungsgüte der Energieverbräuche von automatisierten Montageanlagen mit Hilfe der Methode der physikbasierten Simulationsmethodik. Es kann festgestellt werden, dass die Energieverbräuche von Komponenten automatisierter Montageanlagen des Automobilbaus auf Basis der verwendeten 3D-Konstruktionsdaten mit Hilfe der physikbasierten Simulation abgebildet werden können. Hierfür sind individuell programmierte, skriptbasierte Algorithmen erforderlich, die das physikalische Verhalten im Hinblick auf den Energieverbrauch der Komponente auf unterschiedlichen Detaillierungsniveaus abbilden (vgl. Abbildung 5-3 bzw. Kapitel 6.1). Eine Aggregation der einzelnen komponentenbasierten Energieverbräuche in Abhängigkeit der Aktivität der einzelnen Komponenten während des Montageprozesses liefert dann den Energieverbrauch einer Montageanlage für den Zeitraum eines Takts, der mit der Kenntnis der Anlagennutzungscharakteristik für Energiebetrachtungen über mittel- und langfristige Zeiträume genutzt werden kann. Die Qualität der Abbildung der mittels der physikbasierten Simulation ermittelten Energieverbräuche wurde exemplarisch durch die Validierung der Simulationsergebnisse in Relation zu den herstellerspezifischen Softwarewerkzeugen dargelegt (vgl. Kapitel 7.3). Hierdurch kann eine hinreichende Genauigkeit der physikbasierten Simulationsmodelle zur Abbildung und Optimierung der Energieverbräuche attestiert werden.

Forschungsfrage 2: Welche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz können im Rahmen der physikbasierten mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen in welcher Form angewendet werden?

Die zweite Forschungsfrage thematisiert die für automatisierte Montageanlagen der Automobilproduktion im Rahmen der physikbasierten mechanischen Absicherung anwendbaren Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Hierfür wurden die komponentenbasierten EEIMs für den Anwendungsbereich automatisierter Montageanlagen des Automobilbaus auf Basis einer Literaturrecherche extrahiert und kategorisiert (vgl. Kapitel

3.2.2). Darüber hinaus wurden die identifizierten EEIMs für eine effiziente Implementierung mit einer Umsetzungsvorschrift versehen und exemplarisch hinsichtlich der Anwendbarkeit und der potentiellen Energieersparnis ausdetailliert (vgl. Kapitel 5.4.2.2 bzw. Abbildung 5-10). Eine umfassende Entwicklung eines solchen Templatekatalogs kann auf Basis der Ergebnisse der Literaturrecherche sowie von Erfahrungswerten bei der Umsetzung der EEIMs erfolgen, würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings sprengen. Die Machbarkeit der Integration der EEIMs in den Prozess der physikbasierten mechanischen Absicherung konnte durch die prototypischen Anwendungsfälle belegt werden (vgl. Kapitel 7.1 und Kapitel 7.2).

Forschungsfrage 3: Wie kann die energieeffizienzorientierte Planung und Auslegung bei der mechanischen Absicherung im Anlagenentwicklungsprozess automatisierter Montageanlagen methodisch umgesetzt werden?

Die dritte Forschungsfrage umfasst die methodische Umsetzung der energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen in einem industriellen Kontext. Der Grundstein der methodischen Umsetzung wurde mit der Entwicklung der Methodik unter Ausdetaillierung der einzelnen Prozessschritte vorgenommen (vgl. Kapitel 5.1). Für die Erweiterung bzw. Verbesserung der Methodik im Hinblick auf eine industrielle Anwendbarkeit wurde zum einen ein softwaretechnisches und zum anderen ein organisatorisches Konzept entwickelt und auszugsweise erläutert (vgl. Kapitel 8.2). Die auf Basis der Forschungsfragen formulierte wissenschaftliche Hypothese konnte durch die Durchführung der Anwendungsbeispiele zumindest theoretisch belegt werden: die Ergebnisse basieren allerdings auf einer simulationsgestützten Berechnungsgrundlage sowie einer Reihe idealisierender Annahmen und Vereinfachungen. Eine Umsetzung der Methode im Kontext eines realen Anwendungsfalls erfordert die Betrachtung einer Anlage über ihren gesamten Lebenszyklus der Entwicklung, Nutzung und Entsorgung und konnte somit in dem zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Für eine finale Bewertung wird das Forschungsvorhaben zudem relativ zu themenverwandten Forschungsaktivitäten evaluiert (vgl. Tabelle 8-1). Hierfür wird die bei der abschließenden Bewertung des Stands der Technik und Forschung vorgeschlagene inhaltliche Strukturierung verwendet (vgl. Tabelle 3-11).

Name	Kontext & Konzept		Bezug zur PP	Implementation			Evaluation
	Scope Gebäudetechnik Anlagentechnik	Anwendungsfeld		Energieformen Elektrizität Druckluft Wärme	Software-Tools	Optimierungsmaßnahmen	
Damrath (2018)	x	Automobilproduktion (Montage)	+	x x	Physikbasierte Simulation	Verschiedene Maßnahmen	x x

Tabelle 8-1: Kontextuelle Einordnung des Forschungsvorhabens

Das Anwendungsfeld des Forschungsvorhabens beschränkt sich auf automatisierte Montageanlagen der Automobilproduktion und fokussiert sich auf die reine Anlagentechnik. Ein Bezug zur Produktionsplanung wird hergestellt, indem die Phase der mechanischen Absicherung als vorlaufender Prozess der VIBN gewählt wird, die als Bestandteil der Aktivitäten der Produktionsplanung aufgefasst werden kann. Die für die Aktorik von automatisierten Montageanlagen der Automobilproduktion relevanten Energieformen Elektrizität und Druckluft werden betrachtet und deren Verbräuche mit dem Ansatz der physikbasierten Simulationsmethodik berechnet und visualisiert. Multiple Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz werden komponentenbasiert aufgeführt und exemplarisch hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit bewertet. Die Evaluation der energetischen Optimierung erfolgt dabei unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten, wohingegen keine ökologische Bewertung erfolgt.

KAPITEL 9: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das finale Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung der Arbeit, die die Vorgehensweise bei der Entwicklung und Evaluation bündig rekapituliert. Abschließend werden Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Methode adressiert und weitere themenverwandte potentielle Forschungsfelder aufgezeigt.

9.1. Zusammenfassung

Politische Rahmenbedingungen, ein erhöhtes gesellschaftliches Umweltbewusstsein sowie eigene strategische Zielsetzungen erfordern von der Produktionsplanung eines Automobilherstellers die Sicherstellung eines ressourcenschonenden und energieeffizienten Herstellungsprozesses. Im Kontext des gewerkeorientierten Herstellungsprozesses werden im Rahmen dieser Arbeit automatisierte Produktionsanlagen der Endmontage fokussiert. Gegenstand der Arbeit ist die Entwicklung und prototypische Umsetzung einer Methode für eine energieeffizienzorientierte Auslegung automatisierter Montageanlagen im Rahmen des digitalen physikbasierten mechanischen Absicherungsprozesses.

Im ersten Teil der Arbeit wird neben der Gestalt und Funktionsweise automatisierter Montageanlagen vor dem Hintergrund produktionsprozessbedingter Energiebedarfe die derzeitige Vorgehensweise bei der digitalen Planung, Auslegung und Absicherung im Kontext eines unternehmensübergreifenden Entwicklungsprojekts herausgearbeitet. Anschließend werden bestehende komponentenbasierte Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz automatisierter Produktionsanlagen im Hinblick auf die Anwendbarkeit bei automatisierten Montageanlagen der Automobilproduktion identifiziert. Eine Analyse von digitalen Tools zur Energieverbrauchsanalyse dient als Grundlage für die Einführung der physikbasierten Simulationsmethodik mit dem Fokus auf deren Anwendung im Maschinen- und Anlagenbau. Die Analyse und Bewertung themenverwandter Forschungsarbeiten beschließt den ersten Teil der Arbeit.

Der zweite Teil der Arbeit umfasst die Konzeptentwicklung, bestehend aus der Formulierung von Anforderungen an die entwickelte Methode sowie deren konzeptionelle Ausgestaltung. Dabei erfolgt die Anforderungsformulierung auf Basis der im ersten Teil der Arbeit

gewonnenen Erkenntnisse sowie der Ergebnisse einer unter Produktionsplanern des Daimler-Werks Sindelfingen durchgeführten empirischer Datenerhebung. Die entwickelte Methode umfasst dabei fünf sequentiell zu durchlaufende Prozessschritte und erfordert neben den Konstruktionsdaten der automatisierten Montageanlage zusätzlich produktionsplanerische Informationen. Das Ergebnis der Methode besteht zum einen in den physikbasierten Systemmodellen unterschiedlicher Anlagendesignvarianten und zum anderen in einer produktlebenszyklusübergreifenden Wirtschaftlichkeitsanalyse zum Vergleich unterschiedlicher Analagenauslegungsvarianten aus Sicht des Anlagenbetreibers.

Im dritten Teil der Arbeit wird die Machbarkeit der entwickelten Methode anhand der Beispiele einer Wendestation und einer Dachmodulmontagestation gezeigt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der physikbasierten Simulationsmodelle im Hinblick auf die Berechnung des Energieverbrauchs validiert. Die Anwendbarkeit der Methode in einem industriellen Kontext wird evaluiert und ein konzeptioneller Ansatz für die industrielle Nutzbarmachung der Methode vorgestellt. Schließlich wird das Forschungsvorhaben abschließend bewertet und in den Kontext themenverwandter Forschungsaktivitäten eingeordnet.

9.2. Ausblick

Für eine vollständige Verifizierung der wissenschaftlichen Hypothese wäre die Anwendung der Methode im Rahmen eines realen Entwicklungsprojektes einer automatisierten Montagestation notwendig. Durch die Betrachtung eines gesamten Lebenszyklus einer Anlage könnten Rückschlüsse gezogen werden, inwiefern die hier theoretisch erarbeiteten Ergebnisse in die Realität übertragbar sind. Durch die Anwendung dieser Methode auf mehrere reale Anlagenentwicklungsprojekte könnte zudem der Katalog der energieeffizienzsteigernden Maßnahmen (EEIM) mit Erfahrungsgewissen gefüllt werden, um somit die Anwendbarkeit der einzelnen Maßnahmen und deren Einsparpotentiale zuverlässig zu quantifizieren.

Neben dem Anwendungsfeld der Neuentwicklung von automatisierten Montageanlagen besteht ein weiteres potentielles Anwendungsfeld der Methode im Fall der Wiederverwendung von Anlagen für neue Baureihen (Re-use). Hierbei könnten ebenfalls energieeffizienzsteigernde Maßnahmen in das hinsichtlich des neuen Verwendungszwecks angepassten Anlagendesigns eingepflegt werden. Darüber hinaus ist die Anwendung der Methode auf den Fall einer einzelnen automatisierten Montagestation limitiert. Hier wäre eine Erweiterung der Methode auf eine gesamte Montagelinie denkbar, um der Gefahr einer lokalen Energieverbrauchsoptimierung vorzubeugen. Des Weiteren können innovative Konzepte der Energiezwischenspeicherung und bedarfsgerechten Energiebereitstellung und -Verteilung auch über Anlagengrenzen hinweg in den Maßnahmenkatalog aufgenommen werden. Eine Erweiterung der Methode hinsichtlich einer ökologischen Evaluierung der

implementierten energieeffizienzsteigernden Maßnahmen zusätzlich zu der bestehenden technischen und ökonomischen Evaluierung könnte angestrebt werden.

Des Weiteren könnte untersucht werden, inwiefern die vorgestellte Methode auf halbautomatisierte Montageanlagen der Automobilproduktion bzw. auf automatisierte Montagestationen außerhalb dem Gebiet der Automobilproduktion angewendet werden kann. Eine Miteinbeziehung von Wechselwirkungen zwischen der Anlagentechnik und der Gebäudetechnik könnte auch einen interessanten Ansatz im Sinne einer ganzheitlichen Energieverbrauchsoptimierung darstellen.

Darüber hinaus können Erfahrungswerte einer energieeffizienten Montage zudem in der Produktentwicklung mit dem Ziel einer montagegerechten, energieeffizienzorientieren Gestaltung der zu fertigenden Produkte erfolgen. Das Schaffen einer Relation zwischen einer Produktgestalt bzw. einer Produkteigenschaft mit dem für die Produktherstellung dieser Eigenschaft erforderlichen Energiebedarf wäre ein erster Schritt in Richtung einer integrierten, energieeffizienzorientierten Produkt- und Produktionsentwicklung.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Herausforderungen für die Automobilproduktion in Deutschland und ein daraus resultierendes Umsetzungsziel für die Produktionsplanung eines Automobilherstellers	1
Abbildung 1-2: DRM Framework (nach [35])	5
Abbildung 1-3: Inhaltlicher Aufbau der Arbeit.....	6
Abbildung 2-1: Produktionsprozess in der Automobilindustrie.....	9
Abbildung 2-2: Exemplarische Montagelinie in der Automobilproduktion (eigene Darstellung in Anlehnung an [52]).....	10
Abbildung 2-3: Anlagenentstehungsprozess automatisierter Montageanlagen (eigene Darstellung basierend auf [57], [69])	13
Abbildung 2-4: Mechatronisches Anlagenmodell für die Virtuelle Inbetriebnahme (eigene Darstellung basierend auf [91])	15
Abbildung 2-5: Energieverbrauch zur Produktion eines Fahrzeugs bei unterschiedlichen Herstellern (links) und zeitliche Entwicklung des Gesamtenergieverbrauchs deutscher Fahrzeughersteller pro Fahrzeug (rechts).....	18
Abbildung 2-6: Schematische Darstellung des Initial Impact Models.....	23
Abbildung 2-7: Areas of Relevance and Contribution (ARC) Diagramm	25
Abbildung 3-1: Ressourcenumsatzorientierte Darstellung einer automatisierten Montageanlage	28
Abbildung 3-2: Strukturübersicht automatisierter Montageanlagen	29
Abbildung 3-3: Generalisierte Struktur eines Aktors (oben) sowie exemplarische Struktur eines elektrischen (Mitte) und eines pneumatischen Aktors (unten) (eigene Darstellung in Anlehnung an [163], [164])	30
Abbildung 3-4: Beispiel eines Taktzeitdiagramms zur Prozessbeschreibung einer automatisierten Montageanlage in Form eines Gantt-Charts	32
Abbildung 3-5: Schematische Darstellung des Prozesses der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen der Automobilproduktion (eigene Darstellung auf Basis von [170], [172], [173], [174], [175])	34

Abbildung 3-6: Morphologie betriebswirtschaftlicher Produktionsfaktoren (eigene Darstellung basierend auf [185], [186], [68])	37
Abbildung 3-7: Zusammensetzung Industriestrompreis (eigene Darstellung basierend auf [26], [190])	39
Abbildung 3-8: Energiewertschöpfungskette (eigene Darstellung basierend auf [228], [229], [230]).....	45
Abbildung 3-9: Innerbetriebliches Energieversorgungssystem (eigene Darstellung basierend auf [232], [233], [234]).....	45
Abbildung 3-10: Prozentualer Anteil von Energieträgern in der Automobilmontage zweier Automobilproduktionswerke unterschiedlicher Hersteller (Erhebungsjahr 2013 bzw. 2011) (interne Datenerhebung Daimler AG und [236]).....	46
Abbildung 3-11: Wirkungskette der Drucklufterzeugung, -aufbereitung, -verteilung und -anwendung (eigene Darstellung basierend auf [127], [246])	49
Abbildung 3-12: Energieeffizienzprinzipien von Produktionsanlagen (eigene Darstellung basierend auf [127], [39])	53
Abbildung 3-13: Klassifizierung digitaler Tools zur Energieverbrauchsanalyse (eigene Darstellung basierend auf [13], [98], [256])	57
Abbildung 3-14: Ingenieurwissenschaftliche Simulationsmethoden (eigene Darstellung basierend auf [297]).....	61
Abbildung 3-15: Vereinfachte Darstellung der prinzipiellen Schritte einer physikbasierten Simulation	64
Abbildung 4-1: Priorisierte Planungsprämissen bei der Planung automatisierter Montageanlagen (interne Datenerhebung Daimler AG)	78
Abbildung 4-2: Potentielle Faktoren und Hilfsmittel zur Unterstützung einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung (interne Datenerhebung Daimler AG)	79
Abbildung 4-3: Anteile der wesentlichen Kategorien von Energieverbrauchern am Gesamtenergieverbrauch einer Montagehalle (interne Datenerhebung Daimler AG und adaptierte Vergleichswerte aus [236])	80
Abbildung 4-4: Wesentliche Stellhebel zur methodischen Etablierung eines energieeffizienzorientierten Anlagenplanungsprozesses (interne Datenerhebung Daimler AG).....	81

Abbildung 4-5: Hemmnisse bei der Umsetzung einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung (interne Datenerhebung Daimler AG)	82
Abbildung 4-6: Verwendung von ganzheitlichen Kostenbetrachtungskonzepten in der Praxis bei der Vergabe automatisierter Montageanlagen (interne Datenerhebung Daimler AG)	83
Abbildung 5-1: Methodik zur energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung bei der physikbasierten mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen.....	89
Abbildung 5-2: BPMN-Darstellung Prozessschritt ECU-Modellierung	90
Abbildung 5-3: Klassifizierung und korrespondierende Modellierungstiefe der ECUs.....	91
Abbildung 5-4: BPMN-Darstellung Prozessschritt physikbasierte Modellierung des Gesamtsystems	94
Abbildung 5-5: Exemplarische Darstellung eines Taktzeitdiagramms inklusive der Relation zwischen Montageoperationen und ECU-Aktivitäten	95
Abbildung 5-6: Exemplarische Energiesignatur einer automatisierten Montageanlage.....	96
Abbildung 5-7: BPMN-Darstellung der EEIM-Analyse.....	97
Abbildung 5-8: Exemplarischer Prozesskasten einer Montageoperation bei einer Wertstromanalyse	100
Abbildung 5-9: Potentielle EEIMs für pneumatische Aktoren mit Umsetzungsvorschriften	101
Abbildung 5-10: Template zur Beschreibung eines EEIMs.....	102
Abbildung 5-11: BPMN-Darstellung Prozessschritt EEIM-Implementierung	104
Abbildung 5-12: Vorgehen bei der LCC-Entwicklung für automatisierte Montageanlagen ..	107
Abbildung 6-1: Schematische Darstellung des erweiterten physikbasierten Modells für pneumatische Aktoren (basierend auf [169], [341], [369]).....	110
Abbildung 6-2: Schematische technische Darstellung der betrachteten Elemente bei der physikbasierten Modellierung des Energieverbrauchs eines Industrieroboters.....	114
Abbildung 6-3: Schematische Darstellung des physikbasierten Modells zur Berechnung des Energieverbrauchs eines Roboterantriebsstrangs.....	116
Abbildung 6-4: d/q-Ersatzschaltbild einer PMSM	117

Abbildung 6-5: Schematische Darstellung des physikbasierten Modells zur Berechnung des Energieverbrauchs einer frequenzgesteuerten Drehstromasynchronmaschine mit Getriebe	119
Abbildung 6-6: Anlagencharakteristik bei der Modellspezifikation der LCC	121
Abbildung 6-7: Verrechnungssätze bei der Modellspezifikation LCC	121
Abbildung 6-8: Kostenstruktur im Rahmen der LCC	122
Abbildung 6-9: Beispielhafte Umsetzung einer Energiesignatur für einen Roboter mit Einspannwerkzeug	124
Abbildung 6-10: Exemplarische Darstellung Energie-KPIs	125
Abbildung 6-11: Umsetzung der NPV-Berechnung zur wirtschaftlichen Bewertung eines technisch machbaren EEIMs	126
Abbildung 6-12: Beispielhafte Darstellung der Sensitivitätsanalyse bei der EEIM-Berechnung	127
Abbildung 7-1: Reduziertes Taktzeitdiagramm der Wendestation	129
Abbildung 7-2: Struktur der Funktionsgruppen für den Anwendungsfall Wendestation	130
Abbildung 7-3: Energiesignatur der Wendestation	131
Abbildung 7-4: Energie-KPIs des initialen Designs der Wendestation.....	132
Abbildung 7-5: Auswertung Implementierung EEIM Druckniveaureduzierung (Volumenstrom bei Versorgungsdruck von 8 bar und 12 bar, Sensitivitätsanalyse der NPV-Kalkulation, Vergleich der Gesamtkosten beider Anlagendesignvarianten)	134
Abbildung 7-6: Reduziertes Taktzeitdiagramm der Montagestation Dachmodul.....	136
Abbildung 7-7: Struktur der betrachteten Funktionsgruppen des Anwendungsfalls Dachapplikation mit den dazugehörigen ECUs.....	137
Abbildung 7-8: Kinematische Kette und Prozesskette Anwendungsfall Dachapplikation....	137
Abbildung 7-9: Energiesignatur des betrachteten Ausschnitts der Anlage zur Dachmontage	138
Abbildung 7-10: Energie-KPIs des Anwendungsfalls Dachapplikation.....	139
Abbildung 7-11: Auswertungsübersicht Implementierung EEIM Trajektorienoptimierung (Leistungsbedarf bei zwei Verfahrgeschwindigkeiten, Energieverbrauch bei	

Abbildungsverzeichnis

unterschiedlichen Verfahrgeschwindigkeiten, Sensitivitätsanalyse der NPV-Kalkulation)	142
.....	
Abbildung 7-12: Vergleich der Simulationsergebnisse für einen Expansionsvorgang eines Linearzylinders bei unterschiedlichen Versorgungsdrücken und konstanter Drosselöffnung (40%).....	145
Abbildung 7-13: Vergleich der Simulationsergebnisse für einen Expansionsvorgang eines Linearzylinders mit Zuleitung bei unterschiedlichen Versorgungsdrücken und konstanter Drosselöffnung (40%).....	146
Abbildung 7-14: Vergleich der Simulationsergebnisse des mechanischen Leistungs- und Energiebedarfs für definierte Roboterbewegungen mit einem Effektorgewicht von 100 kg (Validierungsszenario 3)	148
Abbildung 8-1: Exemplarische Darstellung eines konzeptionellen Ansatzes für eine softwaretechnische Umsetzung	154
Abbildung 8-2: Zuordnung der EEIM-Kategorien zu den potentiellen Anwendungsfeldern bei der Planung, Auslegung und mechanischen Absicherung automatisierter Montageanlagen	156

X

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Forschungsfragen und Erfolgskriterien für die Bewertung des Forschungsvorhabens	24
Tabelle 3-1: Methoden der Investitionsrechnung (eigene Darstellung basierend auf [196], [197], [198])	40
Tabelle 3-2: Vergleich von Normen im Zusammenhang mit LCC [205], [206].....	41
Tabelle 3-3: Kennzahlen zur Beschreibung des Energieverbrauchs einer automatisierten Montageanlage	47
Tabelle 3-4: EEIMs für pneumatische Aktoren automatisierter Montageanlagen.....	54
Tabelle 3-5: EEIMs für Elektromotoren in automatisierten Montageanlagen	55
Tabelle 3-6: EEIMs für Industrieroboter in automatisierten Montageanlagen	56
Tabelle 3-7: Eigenschaften von Simulationsmethoden und -modellen.....	60
Tabelle 3-8: Relevante Gelenkkarten für die dynamische Starrkörpersimulation automatisierter Montageanlagen (eigene Darstellung basierend auf [299])	62
Tabelle 3-9: Vergleichende Betrachtung von Verfahren der Kollisionsbehandlung bei Physik- Engines (eigene Darstellung basierend auf [102], [303], [311], [316], [317])	65
Tabelle 3-10: Kriterien für die Auswahl zur Evaluierung von Forschungsaktivitäten	71
Tabelle 3-11: Evaluation themenverwandter Forschungsaktivitäten.....	73
Tabelle 4-1: Zusammenstellung der Anforderungen an die Methode zur energieeffizienzorientierten Auslegung automatisierter Montageanlagen im Rahmen der physikbasierten mechanischen Absicherung.....	85
Tabelle 4-2: Technische Anforderungsspezifikation bzgl. der physikbasierten Simulationsumgebung bzw. der Physik-Engine	87
Tabelle 6-1: Schematische technische Darstellung der modellierten pneumatischen Aktoren	112
Tabelle 7-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Validierungsszenarien des physikbasierten Modells für pneumatische Aktoren	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 7-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Validierung des physikbasierten Modells eines sechsachsigen Industrieroboters.....	150
Tabelle 8-1: Kontextuelle Einordnung des Forschungsvorhabens	159

Abkürzungsverzeichnis

AABB	Axis Aligned Bounding Box
AHP	Analytischer Hierarchieprozess
BHKW	Blockheizkraftwerk
BOM	Bill of Materials (Stückliste)
BZ	Bearbeitungszeit
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFM	Constraint Force Mixing
DL	Druckluft
DS I	Descriptive Study I
DS II	Descriptive Study II
ECU	Energy Consumption Unit
EE	Elektrische Energie
EEIM	Energy Efficiency Improvement Measure
EOL	End of Line
ERP	Error Reduction Parameter (<i>Kontext</i>)
ERP	Enterprise Ressource Planning (<i>Kontext</i>)
FEM	Finite Elemente Methode
FG	Freiheitsgrade (<i>Kontext</i>)
FG	Funktionsgruppe (<i>Kontext</i>)
GA	Gewichtsausgleich
GJK	Gilbert-Johnson-Keerthi Algorithmus
GK	Greifkonzept
GPU	Graphics Processing Unit
GU	Generalunternehmer
IR	Industrieroboter
KPI	Key Performance Indicator
LCC	Life Cycle Costing
LCP	Linear Complementary Problem
LZK	Lebenszykluskosten
MES	Manufacturing Execution System
MFL	Materialfreigabeliste
MKS	Mehrköpersimulation
MO	Montageoperation
NPV	Net Present Value
NWA	Nutzwertanalyse
OBB	Oriented Bounding Box
ODE	Open Dynamics Engine
OEM	Original Equipment Manufacturer (Automobilhersteller)
OLP	Offlineprogramm
PLZ	Produktlebenszyklus
PMSM	Permanentmagneterregter Synchronmotor

Abkürzungsverzeichnis

PP	Produktionsplanung
PS	Prescriptive Study
PZ	Prozesszeit
RC	Research Clarification
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SE	Systems Engineering
SFK	Spann- und Fixierkonzept
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCO	Total Cost of Ownership
TCP	Tool Center Point
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
VE	Virtuelles Engineering
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
vrep	Virtual Robot Experimentation Platform
XML	Extensible Markup Language

Verzeichnis der Formelzeichen

A	m^2	Kolbenfläche
A_k	m^2	Fläche Kolbenstange
AB_T	—	Ausbringung pro Takt
AP	ct/kWh	Arbeitspreis
$\cos \varphi_N$	—	Nennleistungsfaktor
$\cos \varphi_l$	—	(Wirk-)Leistungsfaktor
DP	ct/kWh	Durchschnittsnetzentgeltpreis
DR	—	Kalkulationszinssatz
E	J	Energie
E_{An}	J	Anergie
E_{elektr}	kWh	Gesamtenergieverbrauch Elektrik für Kostenberechnung
E_{Ex}	J	Exergie
E_{Int}	—	(Kennzahl) Energieintensität
$E_{prozess}$	kWh	Energieverbrauch eines Teilprozesses
E_{spez}	$kWh/unit$	(Kennzahl) Spezifischer Energieverbrauch
E_{total}	kWh	(Kennzahl) Gesamtenergieverbrauch
E_x	kWh	Energieeinsatz einer funktionalen Einheit

EC	—	Energiepreisseigerungsrate
ET_x	—	(Kennzahl) Energieträgeranteil
F	N	Kolbenkraft
F_F	N	Federkraft bei einem einfachwirkenden Zylinder
F_{GA}	N	Kraft des Gewichtsausgleichs
$F_{GA,0}$	N	Kraft des Gewichtsausgleichs in Grundstellung
f_s	rad/s	Statorgeschwindigkeit
g_{ben}	—	(Kennzahl) Benutzungsgrad
i	A	Strom
i_d	A	Statorstrom (direkt)
i_q	A	Statorstrom (quadratisch)
I_{EEIM}	€	Erforderlicher EEIM Investitionsbetrag
I_{eff}	A	Effektivwert des Stroms
I_N	A	Nennstrom
I_x	A	Strom (Drehstromasynchronmotor)
$J_{i,mn}$	kgm^2	Massenträgheitsmoment der Achse i
J_M	kgm^2	Motorträgheitsmoment
k	N/m	Federkonstante
K_{elektr}	€	Elektrische Energiegesamtkosten

k_{elektr}	$\text{€}/\text{kWh}$	Kostenfaktor Elektrik
k_{GA}	N/m	Federkonstante der Gewichtsausgleichfeder
K_{pneum}	€	Pneumatische Energiegesamtkosten
k_{pneum}	$\text{€}/\text{m}_N^3$	Kostenfaktor Pneumatik
$K_{R,A}$	€	Maschinenstundensatzbezogene Abschreibungskosten
$K_{R,E}$	€	Maschinenstundensatzbezogene Energiekosten
$K_{R,h}$	$\text{€}/\text{h}$	Ressourcenstundensatz (Maschinenstundensatz)
$K_{R,I}$	€	Maschinenstundensatzbezogene Instandhaltungskosten
$K_{R,R}$	€	Maschinenstundensatzbezogene Raumkosten
$K_{R,Z}$	€	Maschinenstundensatzbezogene Zinskosten
k_t	—	Motorkonstante
L	H	Induktivität
l	m	Schlauchlänge
l_{GA}	m	Länge der Gewichtsausgleichfeder
$l_{GA,0}$	m	Ursprüngliche Länge der Gewichtsausgleichfeder
LP	$\text{€}/\text{kWa}$	Leistungspreis
m	kg	Luftmasse Zylinder
m_i	kg	Masse der Achse i
N_G	%	Nutzungsgrad

n_l	1/min	Motordrehzahl
n_N	1/min	Nenndrehzahl
n_{tar}	1/min	Solldrehzahl
NPV_{EEIM}	€	Kapitalwert EEIM
P	W	Leistung
p	bar	Kammerdruck
P_{ab}	W	Abgegebene Leistung zur Berechnung des Wirkungsgrads
P_{Br}	W	Bremsleistung
P_{elec}	W	Elektrische Leistung
$P_{Cu,L}$	W	Kupferverlustleistung
$P_{elec,L}$	W	Elektrische Verlustleistung
$P_{Fe,L}$	W	Eisenverlustleistung
P_M	W	Motorleistung
P_{max}	W	Maximalleistung zur Berechnung der Benutzungsdauer
$P_{max,t}$	MWa	Jahreshöchstlast
P_{mech}	W	Mechanische (Achs-)Leistung
p	—	Anzahl Polpaare
p_s	bar	Schlauchdruck
p_U	bar	Umgebungsdruck

p_V	<i>bar</i>	Versorgungsdruck
P_{zu}	<i>W</i>	Zugeführte Leistung zur Berechnung des Wirkungsgrads
Q	<i>VAR</i>	Blindleistung
R_C	Ω	Widerstand Eisenverluste
r_G	—	Getriebeübersetzung
R_{Ing}	$\text{€}/h$	Stundensatz Ingenieur
R_{Mas}	$\text{€}/h$	Stundensatz Maschinenführer
R_{Mon}	$\text{€}/h$	Stundensatz Monteur
R_S	Ω	Statorwiderstand
R_{Ser}	$\text{€}/h$	Stundensatz Servicetechniker
R_{spez}	J/kgK	Spezifische Gaskonstante
S	<i>VA</i>	Scheinleistung
T	<i>s</i>	Periodendauer
t_{ALZ}	<i>a</i>	Anlagenlaufzeit
T_B	<i>h</i>	Geplante Belegungszeit
T_{ben}	<i>h, min, s</i>	(Kennzahl) Benutzungsdauer
t_J	h/a	Jahresbetriebsstunden
$T_{R,h}$	€	Maschinenstundensatzbezogene Ressourcennutzungszeit
T_t	h/a	Jährliche Benutzungsdauer

t_T	—	Wochenarbeitstage
t_{TZ}	s	Taktzeit
t_W	—	Einsatzzeit
u	V	Spannung
U_{abN}	%	Nennspannungsabweichung
U_{eff}	V	Effektivwert der Spannung
U_N	V	Nennspannung
V	m^3	Zylinderkammervolumen
$V_{pneum,N}$	m_N^3	Gesamtenergieverbrauch Pneumatik für Kostenberechnung
\dot{V}_S	m_N^3/s	Normvolumenstrom Schlauch
\dot{V}_Z	m_N^3/s	Normvolumenstrom Zylinder
W_t	MWh	Gesamtstromabnahme
$x_{i,com}$	m	Massenschwerpunkt der Achse i
ΔCI_{EEIM}	$\text{€}/a$	Monetäres zeitlich (jährlich) verteiltes EEIM Investment
ΔE	kWh/a	Energetische EEIM Ersparnis (Elektrik) pro Jahr
ΔES_{EEIM}	$\text{€}/a$	Monetäre EEIM Ersparnis pro Jahr
ΔES_{elektr}	$\text{€}/a$	Monetäre EEIM Ersparnis (Elektrik) pro Jahr
ΔES_{pneum}	$\text{€}/a$	Monetäre EEIM Ersparnis (Pneumatik) pro Jahr
Δh_{Entw}	h	Zusätzliche Entwicklungsstunden

Δh_{Mont}	h	Zusätzliche Montagestunden
ΔK_{Bed}	h/a	Zusätzlicher Bedienungsaufwand pro Jahr
ΔK_{IH}	h/a	Zusätzliche Wartungsstunden pro Jahr
ΔK_{Mat}	ϵ	Zusätzliche Materialkosten
Δm_S	kg	Eingeströmte Luftmasse
$\Delta V_{pneum,N}$	m_N^3	Energetische EEIM Ersparnis (Pneumatik)
γ_0	$grad$	Offset für Winkelberechnung
η	—	Wirkungsgrad
η_G	—	Getriebewirkungsgrad
η_M	—	Motorwirkungsgrad
λ	Wb	Magnetischer Fluss
ν_c	—	Coulombscher Reibungskoeffizient
ν_v	—	Viskoser Reibungskoeffizient
τ_A	Nm	Achsmoment
τ_c	Nm	Coulombsches Reibmoment
τ_{GA}	Nm	Moment des Gewichtsausgleichs
τ_i	Nm	Inertiales Reibmoment (<i>Kontext</i>)
τ_i	Nm	Moment der Roboterachse i (<i>Kontext</i>)
τ_l	Nm	Lastmoment

τ_M	Nm	Motormoment
τ_N	Nm	Nenndrehmoment
$\tau_{mech, L}$	Nm	Mechanisches Verlustmoment
τ_{Reib}	Nm	Reibmoment
φ	rad	Phasenverschiebungswinkel
φ_i	rad	Achsposition der Roboterachse i
ω_A	rad/s	Achsgeschwindigkeit
ω_M	rad/s	Motorgeschwindigkeit
\emptyset	mm	Schlauchdurchmesser

Anhang

Anhang A: Online-Formular zur empirischen Untersuchung des Forschungsbedarfs

Umfrage für eine energieeffizienzorientierte Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen																																																																																																								
<p>Diese kurze Umfrage (Dauer: maximal 10 Minuten) soll die Einflusskriterien für Planer und Verantwortliche von automatisierten Montageanlagen darstellen und den Stellenwert des Themas Energieeffizienz im derzeitigen Anlagenplanungsprozess aufzeigen.</p>																																																																																																								
<p>1. Bitte gewichten Sie die folgenden Planungsvorgaben hinsichtlich ihrer Bedeutung für Ihre Planungsaktivitäten (0: niedrigste Priorität, 5: höchste Priorität).</p> <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>Nicht wichtig</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5 Sehr wichtig</td> </tr> <tr> <td>Taktzeit</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Anlageverfügbarkeit</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Ausbringungsqualität</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Platzbedarf</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Automatisierungsgrad</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Anschaffungskosten</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Materialbereitstellung</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Anlageninterner Materialfluss</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Betriebs- und Folgekosten</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Energieverbrauch</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Instandhaltung</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Arbeitssicherheit</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Technologievorgaben</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </table>							Nicht wichtig	0	1	2	3	4	5 Sehr wichtig	Taktzeit	<input type="radio"/>	Anlageverfügbarkeit	<input type="radio"/>	Ausbringungsqualität	<input type="radio"/>	Platzbedarf	<input type="radio"/>	Automatisierungsgrad	<input type="radio"/>	Anschaffungskosten	<input type="radio"/>	Materialbereitstellung	<input type="radio"/>	Anlageninterner Materialfluss	<input type="radio"/>	Betriebs- und Folgekosten	<input type="radio"/>	Energieverbrauch	<input type="radio"/>	Instandhaltung	<input type="radio"/>	Arbeitssicherheit	<input type="radio"/>	Technologievorgaben	<input type="radio"/>																																																																	
Nicht wichtig	0	1	2	3	4	5 Sehr wichtig																																																																																																		
Taktzeit	<input type="radio"/>																																																																																																							
Anlageverfügbarkeit	<input type="radio"/>																																																																																																							
Ausbringungsqualität	<input type="radio"/>																																																																																																							
Platzbedarf	<input type="radio"/>																																																																																																							
Automatisierungsgrad	<input type="radio"/>																																																																																																							
Anschaffungskosten	<input type="radio"/>																																																																																																							
Materialbereitstellung	<input type="radio"/>																																																																																																							
Anlageninterner Materialfluss	<input type="radio"/>																																																																																																							
Betriebs- und Folgekosten	<input type="radio"/>																																																																																																							
Energieverbrauch	<input type="radio"/>																																																																																																							
Instandhaltung	<input type="radio"/>																																																																																																							
Arbeitssicherheit	<input type="radio"/>																																																																																																							
Technologievorgaben	<input type="radio"/>																																																																																																							
<p>2. Welche Faktoren und Hilfsmittel können zu einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung beitragen? Bitte gewichten Sie die Faktoren bzgl. ihres Potentials (0: niedrigstes Potential, 5: höchstes Potential).</p> <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>Niedriges Potential</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5 Hohes Potential</td> </tr> <tr> <td>Standards und Richtlinien</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Digitale Planungstools</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Verbrauchsangaben</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>Abnahmemessungen</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> <tr> <td>SPS-Schnittstellen</td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> <td><input type="radio"/></td> </tr> </table>							Niedriges Potential	0	1	2	3	4	5 Hohes Potential	Standards und Richtlinien	<input type="radio"/>	Digitale Planungstools	<input type="radio"/>	Verbrauchsangaben	<input type="radio"/>	Abnahmemessungen	<input type="radio"/>	SPS-Schnittstellen	<input type="radio"/>																																																																																	
Niedriges Potential	0	1	2	3	4	5 Hohes Potential																																																																																																		
Standards und Richtlinien	<input type="radio"/>																																																																																																							
Digitale Planungstools	<input type="radio"/>																																																																																																							
Verbrauchsangaben	<input type="radio"/>																																																																																																							
Abnahmemessungen	<input type="radio"/>																																																																																																							
SPS-Schnittstellen	<input type="radio"/>																																																																																																							

3. In einer Montagehalle gibt es vier wesentliche Kategorien von Energieverbrauchern: Anlagentechnik, Be- und Entlüftung, IT und Beleuchtung. Bitte schätzen Sie die prozentualen Anteile der vier Kategorien am Gesamtenergiebedarf einer Montagehalle.

<input type="text"/>	% Anlagentechnik
<input type="text"/>	% Be- und Entlüftung
<input type="text"/>	% IT
<input type="text"/>	% Beleuchtung
Σ 100 %	

4. Wo sehen Sie die wesentlichen Hebel und Ansatzpunkte für die Etablierung eines energieeffizienzorientierten Anlagenplanungsprozesses? (Mehrfachnennungen möglich)

<input type="checkbox"/> Standards	<input type="checkbox"/> Infrastruktur
<input type="checkbox"/> Technologie	<input type="checkbox"/> Kommunikation
<input type="checkbox"/> Organisation	<input type="checkbox"/> Andere, nämlich _____

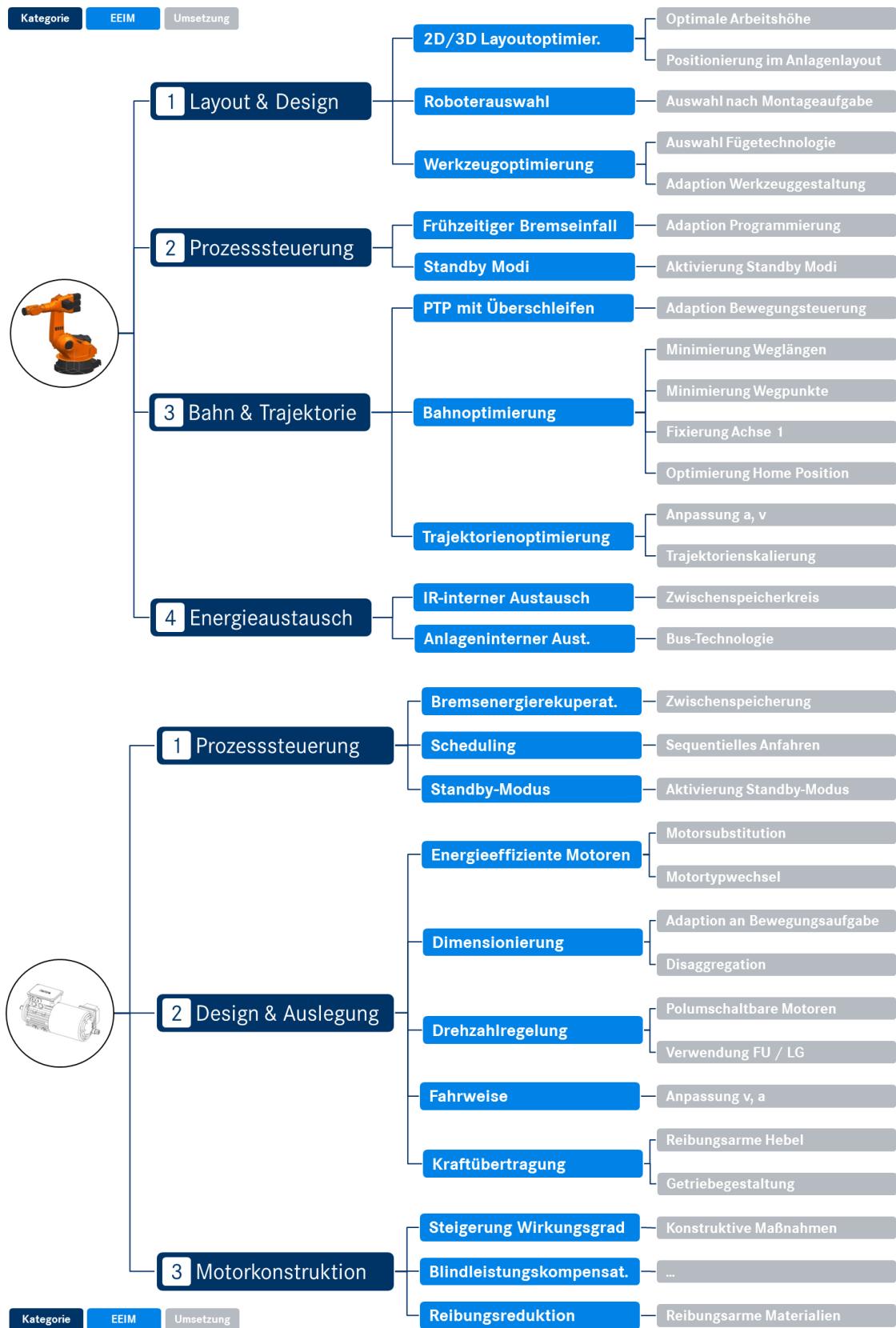
5. Wo sehen Sie die größten Hemmnisse bei der Umsetzung einer energieeffizienzorientierten Anlagenplanung? (Mehrfachnennungen möglich)

<input type="checkbox"/> Planungszeit	<input type="checkbox"/> Erfahrung, Wissen, Informationen
<input type="checkbox"/> Technologierestriktionen	<input type="checkbox"/> Kosten
<input type="checkbox"/> Zielkonflikte	<input type="checkbox"/> Andere, nämlich _____

6. Werden derzeit bei der Anlagenvergabe Konzepte der ganzheitlichen Kostenbetrachtungen über den gesamten Lebenszyklus der Anlage (TCO - Total Cost of Ownership oder LCC – Life Cycle Costing) miteinbezogen?

<input type="radio"/> Ja
<input type="radio"/> Nein
<input type="radio"/> Vereinzelt, in ca. _____ % der Fälle

Anhang B: Potentielle EEIMs für Elektromotoren und Roboter mit Umsetzungsvorschriften



Literaturverzeichnis

- [1] McKinsey & Company, Deutschland 2020 - Zukunftsperspektiven für die deutsche Wirtschaft, Frankfurt a.M.: McKinsey & Company Inc., 2008.
- [2] Ernst & Young, The digitisation of everything - How organisations must adapt to changing consumer behaviour, London: Ernst & Young LLP, 2011.
- [3] Roland Berger, Digitization and the market expansion services industry: driving omni-channel growth, Zürich: Roland Berger AG, 2014.
- [4] Z_punkt - The Foresight Company, Megatrends, Rheinauhafen: Z_punkt GmbH, 2008.
- [5] Arthur D. Little, Zukunft der Mobilität 2020 - Die Automobilindustrie im Umbruch?, Arthur D. Little, 2009.
- [6] Europäische Kommission, Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen, Brüssel: Europäische Kommission, 2007.
- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen, Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2009.
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014), Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2014.
- [9] M. Schulz, Der Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie - Eine Betrachtung aus Sicht der Logistik, Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- [10] Barthel, K.; Böhler-Baedeker, S.; Bormann, R.; Dispan, J.; Fink, P.; Koska, T.; Meißner, H.-R.; Pronold, F., Zukunft der deutschen Automobilindustrie - Herausforderungen und Perspektiven für den Strukturwandel im Automobilsektor, Bonn: Friedrich-Ebert-Stiftung, 2010.

- [11] L. Weyand, Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie, Saarbrücken: Universität des Saarlandes , 2010.
 - [12] T. Birger, D. Knyphausen-Aufseß und C. Krys, „Geschäftsmodellwandel in der Automobilindustrie - Determinanten, zukünftige Optionen, Implikationen“, in *Innovative Geschäftsmodelle - Konzeptionelle Grundlagen, Gestaltungsfelder und unternehmerische Praxis*, Berlin Heidelberg, Springer, 2011, pp. 277 - 298.
 - [13] M. Kropik, Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung, Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
 - [14] F. Wuttke, Robuste Auslegung von Mehrkörpersystemen - Frühzeitige Robustheitsoptimierung von Fahrzeugmodulen im Kontext modulbasierter Entwicklungsprozesse, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012.
 - [15] M. Schlick, K. Moser und M. Schenk, Flexible Produktionskapazität innovativ managen, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
 - [16] D. Steegmüller und M. Zürm, „Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft“, in *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014, pp. 103 - 120.
 - [17] C. Brecher, Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer, Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
 - [18] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Industrie 4.0 - Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015.
 - [19] Siemens AG, Chancen für die deutsche Energiewende, München: Siemens AG, Corporate Communications and Government Affairs, 2013.
 - [20] VDI - Zentrum Ressourceneffizienz, Analyse von Potenzialen der Material- und Energieeffizienz in ausgewählten Branchen der Metall verarbeitenden Industrie, Berlin: VDI - Zentrum Ressourceneffizienz, 2013.
 - [21] AUDI AG, „Umwelterklärung 2012 Audi Standort Ingolstadt“, Ingolstadt, 2012.
 - [22] BMW AG, „Umwelterklärung BMW Group - Umweltschutz in der Produktion“, München, 2012.
 - [23] Volkswagen AG, „Sustainability Report 2013“, Wolfsburg, 2013.
-

- [24] Daimler AG, „Nachhaltigkeitsbericht 2012“, Stuttgart, 2012.
 - [25] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Energiedaten: Ausgewählte Grafiken, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2013.
 - [26] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., BDEW-Strompreisanalyse Juni 2014 - Haushalte und Industrie, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2014.
 - [27] Price Waterhouse Coopers, Kostenmanagement in der Automobilindustrie - Bestandsaufnahme und Zukunftspotentiale, Berlin: PWC, 2007.
 - [28] D. Gruden, Umweltschutz in der Automobilindustrie, Wiesbaden: GWV Fachverlag GmbH, 2008.
 - [29] C. Galitsky und E. Worrel, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Vehicle Assembly Industry, Berkely: University of California, 2008.
 - [30] Statistisches Bundesamt, Produzierendes Gewerbe - Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden, Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2014.
 - [31] E. Westkämper, Einführung in die Organisation der Produktion, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
 - [32] M. Gloßner, Integrierte Planungsmethodik für die Presswerkneutypplanung in der Automobilindustrie, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2007.
 - [33] K. Wack, T. Bär und S. Straßburger, „Grenzen einer digitalen Absicherung des Produktionsanlaufs“, in *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 2010, pp. 45 - 52.
 - [34] B. Gries, Design Flaws and Quality-Related Feedback in Product Development, Berlin: TU Berlin, Fakultät V, Verkehrs- und Maschinensysteme, 2007.
 - [35] L. T. M. Blessing und A. Chakrabarti, DRM, a Design Research Methodology, London: Springer, 2009.
 - [36] H. Ulrich, Management, Bern: Haupt Verlag, 1984.
-

- [37] S. Keil, Flussorientierte Gestaltung von Produktionssystemen - Anwendung am Beispiel von Halbleiterfabriken, Wiesbaden: Springer Gabler, 2012.
 - [38] N. Wemhöner, Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau, Aachen: RWTH Aachen - Fakultät für Maschinenwesen, 2005.
 - [39] J. Engelmann, Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken, Chemnitz: TU Chemnitz - Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, 2009.
 - [40] V. Gautam, Influence of cultural characteristics on designers' approaches – an empirical study, Berlin: TU Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, 2012.
 - [41] H.-O. Günther und H. Tempelmeier, Produktion und Logistik, Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
 - [42] S. Meissner, Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung, München: TU München - Fakultät für Maschinenwesen, 2009.
 - [43] J. Doermer, Produktionsprogrammplanung bei variantenreicher Fließproduktion, Wiesbaden: Springer Gabler, 2013.
 - [44] J. Golze, Materialbereitstellung bei Variantenfließlinien in der Automobilendmontage, Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
 - [45] F. Klug, Logistikmanagement in der Automobilindustrie - Grundlagen der Logistik im Automobilbau, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
 - [46] L. Czaja und K.-I. Voigt, „Störungen und Störungsauslöser in automobilen Wertschöpfungsnetzwerken - Ergebnisse einer empirischen Untersuchung in der deutschen Automobilzulieferindustrie“, in *Weiterentwicklung der Produktion*, Wiesbaden, Gabler Verlag, 2009, pp. 1 - 18.
 - [47] T. Gerberich, Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2011.
 - [48] T. Gudehus, Logistik - Grundlagen, Strategien, Anwendungen, Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
 - [49] J. Kiefer, Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungsstellen im Bereich Karosserierohbau, Saarbrücken: Universität des Saarlandes, 2007.
-

- [50] D. Rosenau-Tornow, Ganzheitlich prozessorientierte Entscheidungsunterstützung am Beispiel der Automobilackierung, Braunschweig: TU Braunschweig - Gemeinsame Naturwissenschaftliche Fakultät, 2005.
 - [51] U. Poth, Autolacke formulieren, Hannover: Vincentz Network, 2007.
 - [52] J. Roscher, Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie, Stuttgart: Universität Stuttgart - Fakultät für Maschinenbau, 2008.
 - [53] H. Braess und U. Seiffert, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011.
 - [54] K. Liebler, Eine prozess- und IT-gestützte Methode für die Produktionsplanung in der Automobilindustrie, Dortmund: TU Dortmund - Fakultät Maschinenbau, 2013.
 - [55] W. Herlyn, Produktionsplanung bei einer Quintillionen Produktvarianten - (wie) geht das?, München, Vortrag auf der Tagung der Arbeitsgruppe "Supply Chain Management": GOR - Gesellschaft für Operations Research e.V., 2012.
 - [56] A. Götz, „Zukunftsstandort Deutschland?“, *Automobilproduktion*, Nr. 2, pp. 16 - 19, 2007.
 - [57] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 4499:2008-02: Digitale Fabrik - Grundlagen, Berlin: Beuth Verlag, 2008.
 - [58] R. Schulte, Rechnergestütztes Normteilemanagement als Beitrag zu einem optimierten Produktionsplanungsprozess in der Automobilproduktion, Hamburg: Helmut Schmidt Universität Hamburg - Fakultät für Maschinenbau, 2013.
 - [59] M. Gebhard, Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit, Wiesbaden: Gabler, 2009.
 - [60] T. Sillekens, Aggregierte Produktionsplanung in der Automobilindustrie unter besonderer Berücksichtigung der Personalflexibilität, Paderborn: Universität Paderborn - Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, 2008.
 - [61] W. Dangelmaier, Theorie der Produktionsplanung und -steuerung - Im Sommer keine Kirschpralinen?, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
 - [62] K. Ehrlenspiel und H. Meerkamm, Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, München, Wien: Hanser Verlag, 2013.
-

- [63] M. Kokoschka, Verfahren zur Konzipierung imitationsgeschützter Produkte und Produktionssysteme, Paderborn: Universität Paderborn - Fakultät für Maschinenbau, 2013.
- [64] K. Wenzel und S. Lorenz, „Semantic Web zur Unterstützung der energetischen Analyse und Bewertung von Produktionssystemen“, in *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Chemnitz, TU Chemnitz, 2013, pp. 21 - 34.
- [65] U. Lindemann, Methodische Entwicklung technischer Produkte, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [66] H. Wiendahl, Auftragsmanagement in der industriellen Produktion, Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- [67] S. Kummer, O. Grün und W. Jammerlegg, Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik, München: Pearson Studium, 2009.
- [68] G. Fandel, Produktion I - Produktions- und Kostentheorie, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
- [69] B. Lotter und H.-P. Wiendahl, Montage in der industriellen Produktion, Berlin : Springer, 2006.
- [70] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 2206:2004-06: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [71] M. Junglas, Methodische Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme unter funktionalen, zuverlässigkeitstechnischen und sicherheitstechnischen Aspekten, Universität Duisburg-Essen - Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 2012.
- [72] M. Gehrke, Entwurf mechatronischer Systeme auf Basis von Funktionshierarchien und Systemstrukturen, Universität Paderborn - Institut für Informatik, 2005.
- [73] M. O. Friedrich, Funktionsorientiertes Konzept zur Unterstützung früher Phasen der Produktentwicklung in der Informationstechnik, München: TU München - Fakultät für Maschinenwesen, 2010.
- [74] P. Winzer, Generic Systems Engineering, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.

- [75] J. Ponn, Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte, München: Verlag Dr. Hut, 2007.
 - [76] R. Brandis, Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme, Münster: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG, 2014.
 - [77] J. Gausemeier, G. Lanza und U. Lindemann, Produkte und Produktionssysteme integrativ konzipieren - Modellbildung und Analyse in der frühen Phase der Produktentstehung, München: Carl Hanser Verlag, 2012.
 - [78] W. Daenzer und A. Büchel, Systems Engineering - Methodik und Praxis, Zürich: Verlag für industrielle Organisation, 2002.
 - [79] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V, VDI 2885:2003-12: Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und Ermittlung von Instandhaltungskosten - Daten und Datenermittlung, Berlin: Beuth Verlag, 2003.
 - [80] A. Syska, Produktionsmanagement - Das A - Z wichtiger Methoden für die Produktion von heute, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2006.
 - [81] M. Rabl, „Durchführunug von Entwicklungsprojekten und Simultaneous Engineering“, in *Praxisorientiertes Innovations- und Produkmanagement - Grundlagen und Fallstudien aus B-to-B-Märkten*, Wiesbaden, Gabler Verlag, 2009, pp. 227 - 238.
 - [82] G. Reinhart, Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug, Garching: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2001.
 - [83] R. Drath, Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
 - [84] B. Drescher, P. Stich, J. Kiefer, A. Strahilov, T. Bär und G. Reinhart, „Physikbasierte Simulation im Anlagenentstehungsprozess - Einsatzpotenziale bei der Entwicklung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau“, in *Simulation in Produktion und Logistik 2013*, Paderborn, HNI, 2013, pp. 270 - 281.
 - [85] J. Kiefer, M. Bergert und M. Rossdeutscher, „Mechatronic Objects in Production Engineering“, *atp edition*, pp. 36 - 44, 12 2010.
 - [86] E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu und J. Lentes, Digitale Produktion, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
-

- [87] VDA - Arbeitsgruppe VIBN, Arbeitsweisen und Ziele der übergreifenden Zusammenarbeit, Dresden: VDA, 2012.
- [88] S. Makris, G. Michalos und G. Chryssolouris, Virtual Commissioning of an Assembly Cell with Cooperating Robots, Hindawi Publishing Corporation, 2012.
- [89] A. Boespflug, Virtuelle Inbetriebnahme von Montagesystemen mit Man-Model-Simulation, Braunschweig: TU Braunschweig, 2007.
- [90] R. Eck und J. Kiefer, Potenziale im Sondermaschinenbau: Effizienzsteigerung in der Planung der PKW-Hochzeit, Regensburg: 8. Fachkongress Digitale Fabrik@Produktion, 2012.
- [91] M. Bergert, J. Höme und C. Fredowitz, „Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme im automobilen Karosseriebau – Ein Erfahrungsbericht“, in *Magdeburger Maschinebautage*, Magdeburg, Universität Magdeburg, 2009, pp. 388 - 397.
- [92] W. Walla und J. Kiefer, „Life Cycle Engineering – Integration of New Products on Existing Production Systems in Automotive Industry“, in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, Berlin, Springer, 2011, pp. 207 - 213.
- [93] F.-F. Lacour, Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen, München: Herbert Utz Verlag, 2011.
- [94] W. Schlägl und K. Schneiderwind, „Planungsfehler und Inbetriebnahmezeiten reduzieren“, 11 November 2006. [Online]. Available: <http://www.computer-automation.de/unternehmensebene/engineering/artikel/73354/>. [Zugriff am 29. April 2015].
- [95] U. Single, Virtuelle Inbetriebnahme - Potentiale einer modularen Softwarearchitektur für eine effiziente virtuelle Inbetriebnahme, Berlin: Fachkongress Digitale Fabrik@Produktion, 2013.
- [96] J. G. Ovtcharova, „Virtual Engineering: Principles, Methods and Applications“, in *DS 60: Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2010, pp. 1267 - 1274.
- [97] M. Schenk und S. Straßburger, „Virtual Engineering für die Automobilindustrie“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, pp. 507 - 509, September 2005.

- [98] M. Eigner, D. Roubanov und R. Zafirov, *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- [99] M. Oppelt, *Virtuelle Inbetriebnahme für die Anlagen-, Zellen- und Maschinenebene*, Regensburg: 8. Fachkongress Digitale Fabrik@Produktion, 2012.
- [100] G. Wünsch und M. Zäh, „Eine neue Methode für die schnelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen“, in *Tagungsband / Internationales Forum Mechatronik*, Augsburg, GKD, 2005, pp. 758 - 775.
- [101] G. Wünsch, *Methoden für die Virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme*, München: Herbert Utz Verlag, 2007.
- [102] M. Spitzweg, *Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen*, München: Herbert Utz Verlag, 2009.
- [103] T. Strigl, „Materialflusssimulation zur schnellen Inbetriebnahme realer Steuerungen“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, pp. 76 - 80, 2009.
- [104] K. H. Weber, *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen*, Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [105] F. König und J. Betker, „Änderungsmanagement im Anlauf am Beispiel des Mercedes-Benz-Werks Bremen“, in *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen*, Berlin Heidelberg, Springer, 2008, pp. 221 - 228.
- [106] W. Herlyn, *PPS im Automobilbau: Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten*, München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [107] D. Fitzek, *Anlaufmanagement in Netzwerken - Grundlagen, Erfolgsfaktoren und Gestaltungsempfehlungen für die Automobilindustrie*, Bern: Haupt-Verlag, 2006.
- [108] M. Schneider, „Taktische Logistikplanung vor Start-of-Production (SOP) - Aufgabenumfang und softwarebasierte Unterstützung im Rahmen der virtuellen Logistik bei der Audi AG“, in *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen*, Berlin Heidelberg, Springer, 2008, pp. 161 - 176.
- [109] A. Töpfer, *Betriebswirtschaftslehre: Anwendungs- und Prozessorientierte Grundlagen*, Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [110] H. Schierenbeck und C. B. Wöhle, *Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre*, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2008.

- [111] M. Pehnt, Energieeffizienz - ein Lehr- und Handbuch, Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- [112] J. Ludwig, Energieeffizienz durch Planung betriebsübergreifender Prozessintegration mit der Pinch-Analyse, Karlsruher Institut für Technologie - Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, 2012.
- [113] H.-U. Hahn und K. Schuhl, Aktualisierte Umwelterklärung 2014 - Daimler AG Standort Sindelfingen, Sindelfingen: Daimler AG, 2014.
- [114] U. Berger, D. Wolff und D. Kulus, „Einsatz digitaler Techniken zur Steigerung der Energieeffizienz in der Automobilindustrie“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, pp. 587 - 590, 2012.
- [115] S. Thiede, Energy Efficiency in Manufacturing Systems, Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- [116] A. Bierer und U. Götze, „Energiekosten als Betrachtungsobjekt der Kostenrechnung – eine Bestandsaufnahme“, in *Methoden der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung in der Produktionstechnik - Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 „Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung“ des Spitzentechnologieclusters eniPROD*, Chemnitz, 2011.
- [117] V. Scheuer, „Energiemanagement in der Automobilproduktion“, *Smart Energy*, pp. 38 - 40, 2013.
- [118] M. Lütjen, Modellierungskonzept zur integrierten Planung und Simulation von Produktionsszenarien entwickelt am Beispiel der CFK-Serienfertigung, Bremen: Universität Bremen - Fachbereich Produktionstechnik, 2014.
- [119] T. Riegmann, Eine Methode zur Implementierung der Digitalen Fabrik in einem Produktionsplanungsnetzwerk, Stuttgart: Steinbeis-Edition, 2011.
- [120] M. Engel, Digitale Fabrik Operating Reference - Integrierte digitale Planungsmethode in global verteilten Planungsbereichen, Stuttgart: Steinbeis-Edition, 2012.
- [121] J. Schallow, J. Ludevig, M. Schmidt, J. Deuse und G. Marczinski, „Zukunftsperspektiven der Digitalen Fabrik - Verständnis, Umsetzungsstand und Entwicklungsmöglichkeiten der digitalen Produktionsplanung“, *wt Werkstattstechnik online*, pp. 139 - 145, März 2014.

- [122] U. Bracht, D. Geckler und S. Wenzel, Digitale Fabrik - Methoden und Praxisbeispiele, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [123] A. Spillner, Entwicklung, Stand und Perspektiven der Digitalen Fabrik, Aachen: Shaker Verlag, 2012.
- [124] J. Schack, Methodik zur bewertungsorientierten Nutzung der Digitalen Fabrik, München: TU München - Fakultät für Maschinenwesen, 2007.
- [125] L. Kövari, Konzeption und Realisierung eines neuen Systems zur produktbegleitenden virtuellen Inbetriebnahme komplexer Förderanlagen, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2011.
- [126] M. Junge, Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung, Kassel: Kassel University Press, 2007.
- [127] E. Müller, J. Engelmann, T. Löffler und J. Strauch, Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben, Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [128] M. Putz, A. Schlegel, S. Lorenz, E. Franz und S. Schulz, „Gekoppelte Simulation von Material- und Energieflossen in der Automobilfertigung“, in *Nachhaltigkeit in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: 14. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs*, Chemnitz, Instituts für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, 2011, pp. 135 - 144.
- [129] R. Neugebauer, Innovationsallianz "Green Carbody Technologies" - InnoCaT: Forschung für die Energie- und Ressourceneffizienz im Automobilbau, Chemnitz: Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, 2014.
- [130] G. Schreck, Energieeffizienzcontrolling in der Automobilindustrie - Verbundvorhaben EnEffCo, Berlin: Fraunhofer IPK - Prozessautomatisierung und Robotik, 2011.
- [131] D. Wolff, D. Kulus und S. Dreher, „Simulating Energy Consumption in Automotive Industries“, in *Use Cases of Discrete Event Simulation*, Berlin Heidelberg, Springer, 2012, pp. 59 - 86.
- [132] VDI - Zentrum Ressourceneffizienz, Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Automobilbau, Berlin: VDI - Zentrum Ressourceneffizienz, 2014.

- [133] S. Bratzel, G. Retterath, V. Neubert und N. Hauke, Fahrzeugbau in der Europäischen Metropolregion München 2013, Bergisch Gladbach: Center of Automotive Management, 2013.
- [134] M. Strunz, Instandhaltung - Grundlagen, Strategien, Werkstätten, Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- [135] VDA - Verband der Automobilindustrie e.V., Unsere Werke - Nachhaltige Automobilproduktion in Deutschland, Berlin: Verband der Automobilindustrie e.V., 2014.
- [136] G. Pahl und W. Beitz, Konstruktionslehre, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [137] W. Engeln, Methoden der Produktentwicklung, Pforzheim: Pforzheim University of Applied Sciences, 2004.
- [138] H. Seeger, Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme - Industrial Design Engineering, Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- [139] B. Bender, Erfolgreiche individuelle Vorgehensstrategie in frühen Phasen der Produktentwicklung, Berlin: TU Berlin - Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, 2004.
- [140] K. Kalogerakis, Innovative Analogien in der Praxis der Produktentwicklung, Wiesbaden: Gabler, 2010.
- [141] K. Ehrlenspiel, Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, München: Hanser, 2007.
- [142] A. Töpfer, Six Sigma - Konzeption und Erfolgsbeispiele für praktizierte Null-Fehler-Qualität, Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [143] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V. Gesellschaft Produktionstechnik, VDI 2884:2005-012: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC), Berlin: Beuth Verlag, 2005.
- [144] N. Weinert, Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme, Berlin: TU Berlin - Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, 2010.
- [145] European Commission, ICT and Energy Efficiency - The Case for Manufacturing, Luxemburg: European Commission, 2009.
-

- [146] U. Tischner, E. Schminke, F. Rubik und M. Prösler, Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung, Frankfurt a.M.: form-praxis, 2000.
- [147] E. Abele, R. Anderl, H. Birkhofer und B. Rüttinger, EcoDesign - Von der Theorie in die Praxis, Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [148] W. Wimmer, K. Lee, F. Quella und J. Polak, EcoDesign - The Competitive Advantage, Dordrecht Heidelberg: Springer Science+Business Media, 2010.
- [149] Europäische Kommission, Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Neufassung), Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.
- [150] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz - EVPG), Berlin: Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, 2008.
- [151] Bundesverband der deutschen Industrie e.V. (BDI), EU-Ökodesign-Richtlinie: Augenmaß bei der politischen Steuerung des Produktdesigns, Berlin: BDI, 2014.
- [152] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN ISO 8580:2003-09 Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- [153] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN ISO 8593-0:2003-09: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Berlin: Beuth-Verlag, 2003.
- [154] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 2860:1990-05: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1990.
- [155] C. H. Mostert, Fabrik-Umfeld Simulationsmodell zur kennzahlbasierten Bewertung von Produktionsstrategien, Kassel: Kassel University Press, 2007.
- [156] H. Czichos und M. Hennecke, Hütte - Das Ingenieurwesen, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [157] W. Fratzscher und K. Michalek, Abfallenergie und Entropiewirtschaft, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

- [158] S. Rogalski, Entwicklung einer Methodik zur Flexibilisierung von Produktionssystemen, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [159] M. Schenk, S. Wirth und E. Müller, Fabrikplanung und Fabrikbetrieb - Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- [160] S. Mechs, Model-based Engineering for Energy-Efficient Operation of Factory Automation Systems within Unproductive Phases, Clausthal: TU Clausthal - Fakultät für Mathematik, Informatik und Maschinenbau, 2013.
- [161] W. Roddeck, Einführung in die Mechatronik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- [162] E. Kiel, Antriebslösungen - Mechatronik für Produktion und Logistik, Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [163] R. Isermann, Mechatronische Systeme, Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [164] T. Nosper, Mechatronische Anwendungen im KFZ, Weingarten: Hochschule Weingarten, 2010.
- [165] J. Bredau, „Initialzündung - Effizienz Initiativen“, *Trends in Automation*, Nr. 1, pp. 16 - 21, 2012.
- [166] Green Carbody - Projektkonsortium, Planung des effizienten Einsatzes von Druckluft im Karosseriebau, Karlsruhe: Green Carbody - Projektkonsortium, 2013.
- [167] S. Kortler, Absicherung von Eigenschaften komplexer und variantenreicher Produkte in der Produktentwicklung, München: TU München - Fakultät für Maschinenwesen, 2014.
- [168] M. Müller, Reifegradbasierte Optimierung von Entwicklungsprozessen am besonderen Beispiel der produktionsbezogenen Produktabsicherung in der Automobilindustrie, Saarbrücken: Universität des Saarlandes - Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD, 2007.
- [169] A. Strahilov, Simulation des physikalischen Verhaltens bei der digitalen Absicherung von automatisierten Montageanlagen, Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2015.
- [170] B. Grimm, „Virtuelle Inbetriebnahme von Produktionsanlagen - Neuer Prozessschritt beim Anlagenengineering“, *atp edition*, Bd. 54, Nr. 4, pp. 28 - 33, 2012.
-

- [171] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI/VDE 3693: Virtuelle Inbetriebnahme - Modellarten und Glossar, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.
- [172] J. Abulawi, Ansatz zur Beherrschung der Komplexität von vernetzten 3D-CAD-Modellen, Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität - Fakultät für Maschinenbau, 2012.
- [173] H. Burr, Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau, Saarbrücken: Universität des Saarlandes - Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD, 2008.
- [174] K. Schäfer, „Von der digitalen Anlage zur Virtuellen Inbetriebnahme“, *ATZ Produktion*, Nr. 1, pp. 20 - 25, Januar 2010.
- [175] O. Dierolf und J. Speidel, Von der digitalen Planung zur erweiterten Robotersimulation, Baden-Baden: Vortrag auf der AUTOMATION 2014, 2014.
- [176] J. Meling, Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik, München: Herbert Utz Verlag, 2012.
- [177] J. Deuse, D. Petzelt und R. Sackermann, „Modellbildung im Industrial Engineering“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 101, Nr. 1-2, pp. 66 - 69, 2006.
- [178] M. Eigner, F. Gerhardt, T. Gilz und F. Nem, Informationstechnologie für Ingenieure, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [179] T. Czichos, Grundlagen und Anwendung technischer Systeme, Wiesbaden: Vieweg+ Teubner Verlag, 2008.
- [180] K. Schäfer, „Von der digitalen Anlage zur Virtuellen Inbetriebnahme“, *ATZ produktion*, Nr. 1, pp. 20 - 25, 2010.
- [181] K. Straub und O. Riedel, „Virtuelle Absicherung im Produktprozess eines Premium-Automobilherstellers“, in *Innovationen durch IT - Erfolgsbeispiele aus der Praxis*, Berlin Heidelberg, Springer, 2006, pp. 189 - 206.
- [182] J. Niemann, Eine Methodik zum dynamischen Life Cycle Controlling von Produktionssystemen, Heimsheim: Jost Jetter Verlag, 2007.
- [183] J. Bloech, R. Bogaschewsky, U. Buscher, A. Daub, U. Götze und F. Roland, Einführung in die Produktion, Berlin Heidelberg: Springer, 2014.

- [184] N. Hastings, Physical Asset Management - With an introduction to ISO 55000, Heidelberg: Springer, 2015.
- [185] W. Domschke und A. Scholl, Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht, Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- [186] M. Hüttner und K. Heuer, Betriebswirtschaftslehre, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2004.
- [187] E. Hering, Kostenrechnung und Kostenmanagement für Ingenieure, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [188] U. Kohler, Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme, München: TU München - Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, 2007.
- [189] S. Bolay, C. Grajetzky, H. Hüwels, K. Andrae und S. Lechner, Faktenpapier Strompreise in Deutschland - Bestandteile, Entwicklungen, Strategien, Berlin: Deutscher Industrie- und Handelskammertag, 2012.
- [190] P. Konstantin, Praxisbuch Energiewirtschaft - Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt, Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- [191] E. Müller und T. Löffler, „Mess- und Automatisierungstechnik für die energieeffiziente Produktion“, in *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme - Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2013, pp. 69 - 80.
- [192] J. Weber und U. Schäffer, Einführung in das Controlling, Stuttgart: Schäffer Poeschl, 2011.
- [193] K. Mattes und M. Schröter, Wirtschaftlichkeitsbewertung: Bewertung der wirtschaftlichen Potenziale von energieeffizienten Anlagen und Maschinen, Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2012.
- [194] H. Grob, Einführung in die Investitionsrechnung, München: Vahlen, 2006.
- [195] H. Hirth, Grundzüge der Finanzierung und Investition, München: Oldenbourg, 2008.
- [196] E. Müller und B. Spanner-Ulmer, PEACH - Gemeinsamer Ergebnisbericht zum Verbundprojekt Projektierung und Steuerung energieeffizienter Anlagen, Chemnitz: TU Chemnitz - Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, 2010.
-

- [197] K. Poggensee, Investitionsrechnung - Konzepte, Aufgaben, Lösungen, Wiesbaden: Springer Gabler, 2015.
- [198] U. Götze, Investitionsrechnung - Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben, Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- [199] C. Herrmann, Ganzheitliches Life Cycle Management - Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen, Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- [200] M. Schröter, U. Weißfloh und D. Buschak, Energieeffizienz in der Produktion - Wunsch oder Wirklichkeit?, Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2009.
- [201] VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, VDMA 34160:2006-06: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen, Berlin: Beuth-Verlag, 2006.
- [202] K. Geißdörfer, Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing (LCC) – Einsatz und Modelle: Ein Vergleich zwischen Deutschland und USA, Berlin: LIT Verlag, 2008.
- [203] P. Bremen, Total Cost of Ownership - Kostenanalyse bei der globalen Beschaffung direkter Güter in produzierenden Unternehmen, Zürich: BWI - Betriebswissenschaftliches Zentrum der ETH Zürich, 2010.
- [204] G. Schuh, Einkaufsmanagement - Handbuch Produktion und Management 7, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- [205] M. Dervisopoulos, CO\$TRA - Life Cycle Costs Transparent, Darmstadt: TU Darmstadt - Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, 2008.
- [206] K. Geissdörfer, R. Gleich und A. Wald, „Standardisierungspotentiale lebenszyklusbasierter Modelle des strategischen Kostenmanagements“, *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Bd. 79, Nr. 6, pp. 693 - 715, Juni 2009.
- [207] H. Wildemann, Total Cost of Ownership, Leitfaden zur Optimierung der Gesamtkostenposition in Beschaffung, Produktion und Logistik, München: TCW Transfer – Centrum, 2010.
- [208] VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, Handbuch für das Excel-Berechnungs-Werkzeug zur Berechnung von Lebenszykluskosten in der Investitionsgüterindustrie, Frankfurt: VDMA, 2012.

- [209] VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, VDMA 34160 - Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen, Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [210] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 60300-3-3:2014-09 - Entwurf: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten (IEC 56/1549/CD:2014), Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [211] Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA), Das EU-Energielabel - Entscheidungshilfe für Verbraucher, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2013.
- [212] Europäische Kommission, Verordnung (EG) Nr. 643/2009 der Kommission zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltskühlgeräten, Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.
- [213] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Verordnung über Verbraucherinformationen zu Kraftstoffverbrauch, CO2-Emissionen und Stromverbrauch neuer Personenkraftwagen (Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung - Pkw-EnVKV), Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2004.
- [214] DENA - Deutsche Energie-Agentur, Hinweise zur Erstellung des Aushangs am Verkaufsort über Kraftstoffverbrauch, CO2-Emissionen und Stromverbrauch, Berlin: DENA - Deutsche Energie-Agentur, 2011.
- [215] VDA - Verband der Automobilindustrie e.V., Leitfaden über den Kraftstoffverbrauch, die CO2-Emissionen und den Stromverbrauch aller neuen Personenkraftwagenmodelle, die in Deutschland zum Verkauf angeboten werden, Ostfildern: Deutsche Automobil Treuhand GmbH, 2015.
- [216] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 4602:2007-03: Energiemanagement - Begriffe, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [217] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 50001:2011-12: Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [218] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 14001:2009-11: Umweltmanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung, Berlin: Beuth-Verlag, 2009.

- [219] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 4661:2003-09: Energiekenngrößen - Definitionen, Begriffe, Methodik, Düsseldorf: Beuth-Verlag, 2003.
- [220] R. A. Zahoransky, Energietechnik - Systeme zur Energiewandlung, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [221] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 4608:2005-03: Energiesysteme Kraft-Wärme-Kopplung - Begriffe, Definitionen, Beispiele, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005.
- [222] H. Stuart und G. Klages, Kurzes Lehrbuch der Physik, Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2010.
- [223] E. Hahne, Technische Thermodynamik - Einführung und Anwendung, München: Oldenbourg, 2004.
- [224] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren, Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- [225] N. L. Madureira, Key Concepts in Energy, Heidelberg: Springer, 2014.
- [226] D. Pelte, Die Zukunft unserer Energieversorgung - Eine Analyse aus mathematisch-naturwissenschaftlicher Sicht, Wiesbaden: Springer-Vieweg, 2014.
- [227] B. Schieferdecker, Energiemanagement-Tools, Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [228] W. Posch, Ganzheitliches Energiemanagement für Industriebetriebe, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2011.
- [229] M. Rudolph und U. Wagner, Energieanwendungstechnik - Wege und Techniken zur effizienteren Energienutzung, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [230] V. Crastan, Elektrische Energieversorgung 2 - Energie- und Elektrizitätswirtschaft, Kraftwerktechnik, alternative Stromversorgung, Dynamik, Regelung und Stabilität, Betriebsplanung und -führung, Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- [231] M. Rager, Energieorientierte Produktionsplanung - Analyse, Konzeption und Umsetzung, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2008.
- [232] S. Doty und W. Turner, Energy Management Handbook, Lilburn: Fairmont Press, 2012.

- [233] A. Ziolek, Erfolgsprognose und Auslegung technischer Optionen der rationellen Energieanwendung in kleinen und mittelständischen Industriebetrieben, Bochum: Universität Bochum, 1999.
- [234] C. Schmid, Energieeffizienz in Unternehmen - Eine wissensbasierte Analyse von Einflussfaktoren und Instrumenten, Zürich: Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2004.
- [235] E. Müller und T. Löffler, „Improving Energy Efficiency in Manufacturing Plants - Case Studies and Guidelines“, in *Proceedings of the 16th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Kairo, 2009, pp. 465 - 471.
- [236] C. Imgrund, „Ganzheitliche Nachhaltigkeit in der Fahrzeugmontage“, *ATZ Produktion*, März 2011.
- [237] R. Volk, Innovative Energieeffizienz-Konzepte – ein ganzheitlicher Ansatz, Fachforum SmartEnergy, 2012.
- [238] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 16212:2012-11: Energieeffizienz- und Einsparberechnung - Top-Down und Bottom-Up-Methoden, Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [239] W. Gladen, Kennzahlen und Berichtssysteme, Wiesbaden: Gabler Verlag, 2003.
- [240] M. Naana und H. Junker, „Entwicklung von strategischen Kennzahlen im Bereich der Produktion“, in *IT-gestütztes Ressourcen- und Energiemanagement - Konferenzband zu den 5. BUIS-Tagen*, Berlin Heidelberg, Springer Vieweg, 2013, pp. 183 - 190.
- [241] R. Neugebauer, M. Putz, J. Böhme, M. Todtermuschke und M. Pfeiffer, „New Aspects of Energy Consumption Analysis in Assembly Processes and Equipment“, in *Sustainable Manufacturing - Shaping Global Value Creation*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2012, pp. 197 - 202.
- [242] S. Hülsmann, Planung des effizienten Einsatzes von Druckluft im Karosseriebau, Karlsruhe: Projektkonsortium Green Carbody, 2013.
- [243] H.-W. Grollius, Grundlagen der Pneumatik, München: Carl Hanser Verlag, 2009.
- [244] ISO - Internationale Organisation für Normung, ISO 8573-1:2010-04: Compressed Air - Part 1: Contaminants and purity classes, Genf: ISO - Internationale Organisation für Normung, 2010.

- [245] H. Watter, Hydraulik und Pneumatik - Grundlagen und Übungen - Anwendungen und Simulation, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [246] G. Hinsenkamp, J. Reinhardt und M. Hager, Druckluft - Strörungsfreie, kostengünstige und energieeffiziente Bereitstellung, Wuppertal: Energieagentur NRW, 2003.
- [247] Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI, Druckluft effizient - Fakten zur Druckluft, Karlsruhe: Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI, 2003.
- [248] ISO - Internationale Organisation für Normung, ISO 6358-1:2013: Pneumatic fluid flow - Determination of flow-rate characteristics of components using compressible fluids, Gen: ISO - Internationale Organisation für Normung, 2013.
- [249] J. Paetzold, „Messung elektrischer Energie – Grundlagen und Erfahrungen“, in *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Auerbach, Wissenschaftliche Scripten, 2013, pp. 35 - 53.
- [250] P. Jungwirth, „Blindleistung verbrauchernah kompensieren“, *Energy 2.0*, Nr. 4, pp. 48 - 50, 2008.
- [251] T. Mühl, Einführung in die elektrische Messtechnik, Wiesbaden: Teubner, 2006.
- [252] ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., Energieeinsparung durch Blindleistungskompensation, Frankfurt a.M.: ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., 2008.
- [253] E. Müller, M. Krones und H. Hopf, „Analyse und Bewertung des Energieverbrauchs von Intralogistiksystemen“, in *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme - Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2013, pp. 359 - 374.
- [254] D. Pape und F. Mantwill, „Frühzeitige energetische Produktbeeinflussung durch Nutzung von Kausalverkettungen im Automobilbau“, in *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme - Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2013, pp. 215 - 229.

- [255] D. Pape und F. Mantwill, Ein Konzept zur Integration der Energieanforderungen für eine frühzeitige energetische Produktbeeinflussung am Beispiel des automobilen Karosseriebaus, Hamburg: TU Hamburg, 2014.
- [256] H.-J. Gevatter und U. Grünhaupt, Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik, Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [257] S. Wenzel, M. Junge, C. Pöge und S. Spiekermann, „Energieeffizienz in der Automobilindustrie - Ganzheitliche simulationsgestützte Planung und Bewertung“, *Productivity Management*, Nr. 18, pp. 21 - 24, 2013.
- [258] S. F. Wenzel, C. Pöge und S. Spiekermann, „Simulationsgestützte Planung energieeffizienter Produktionssysteme“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 110, Nr. 7-8, pp. 403, 2015.
- [259] R. Neugebauer, M. Putz, A. Schlegel, T. Langer, E. Franz und S. Lorenz, „Energy-Sensitive Production Control in Mixed Model Manufacturing Processes“, in *Leveraging Technology for a Sustainable World*, Berlin Heidelberg, Springer, 2012, pp. 399 - 404.
- [260] SIEMENS AG, Energiemanagement in der Produktion - Optimierte Energiebetriebsführung mit B.Data, Nürnberg: Siemens AG, 2012.
- [261] SIEMENS AG, SIMATIC powerrate für PCS 7 - Programmier- und Bedienhandbuch, Nürnberg: SIEMENS AG, 2012.
- [262] SIEMENS AG, SIMATIC - B.Data V5.3 - Systembeschreibung - Systemhandbuch, Nürnberg: SIEMENS AG, 2012.
- [263] D. Tobisch, „Energieeffizienz in der Automobilproduktion“, *A&D Kompendium 2010/2011*, pp. 87 - 90, 2011.
- [264] R. Traxler, b.data Energy Management - Energiedatenmanagementsystem bei Audi im Werk Ingolstadt, Linz: Siemens AG Österreich, 2007.
- [265] G. Mayer und C. Pöge, „Auf dem Weg zum Standard – Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens“, in *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 2010, pp. 29 - 36.

- [266] A. Schlegel, J. Stoldt und M. Putz, „Erweiterte Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation“, in *Simulation in der Produktion und Logistik*, Paderborn, HNI Verlagsschriftenreihe, 2013, pp. 187 - 196.
- [267] D. Kulus, D. Wolff, S. Ungerland und S. Dreher, „Energieverbrauchssimulation als Werkzeug der Digitalen Fabrik“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 106, Nr. 9, pp. 585 - 589, 2011.
- [268] M. Schacht, R. Schulte und F. Mantwill, „The aspects of energy in the Body in White process regarding product development and production planning“, in *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability - Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV)*, Heidelberg Dordrecht London New York, Springer, 2012, pp. 328 - 332.
- [269] J. Stoldt, A. Schlegel, E. Franz, T. Langer und M. Putz, „Generic Energy-Enhancement Module for Consumption Analysis of Manufacturing Processes in Discrete Event Simulation“, in *Re-engineering Manufacturing for Sustainability - Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Singapur, Springer Science+Business Media, 2013, pp. 165 - 170.
- [270] B. Stahl, M. Taisch, A. Cannata, F. Müller, S. Thiede, C. Herrmann, A. Cataldo und F. Cavadini Antonio, „Combined Energy, Material and Building Simulation for Green Factory Planning“, in *Reengineering Manufacturing for Sustainability*, Singapore, Springer Science+Business Media, 2013, pp. 493 - 498.
- [271] M. Heinicke, Optimized Energy Efficiency with Tecnomatix - Energy-related simulation and evaluation with Plant Simulation 11, Siemens AG, 2013.
- [272] U. Rossederer, Manufacturing Simulation - An Important Element for Improving the Energy Efficiency of Your Factory, Siemens AG, 2015.
- [273] B. Beinkmeier, Advanced Robotik mit Process Simulate, Stuttgart: Siemens AG, 2015.
- [274] Siemens PLM Software Inc., Premium-Automobilhersteller - Lebensdauer-Energieverbrauch von Automotoren mit Plant Simulation nachhaltig gesenkt, Steyr: Siemens PLM Software Inc., 2014.
- [275] D. Wolff, D. Kulus und J. Nagel, „Simulationsgestützte Bewertung von Energiesparstrategien“, *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Nr. 108, pp. 103 - 108, 2013.

- [276] A. Dietmair, A. Verl und P. Eberspaecher, „Predictive Simulation for Model Based Energy Consumption Optimisation in Manufacturing System and Machine Control“, in *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing - Proceedings of FAIM 2009*, Middlesbrough, 2009, pp. 226 - 233.
- [277] B. Krückhans und H. Meier, „Industrie 4.0 - Handlungsfelder der Digitalen Fabrik zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion“, in *Simulation in Produktion und Logistik*, Paderborn, HNI Verlagsschriftenreihe, 2013, pp. 31 - 40.
- [278] G. Mayer und C. Pöge, „Quo vadis Ablaufsimulation - Eine Zukunftsvision aus Sicht der Automobilindustrie“, in *Simulation in Produktion und Logistik*, Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, 2013, pp. 11 - 20.
- [279] A. Vergnano, C. Thorstensson, B. Lennartson, P. Falkman, M. Pellicciari, F. Leali und S. Biller, „Modeling and Optimization of Energy Consumption in Cooperative Multi-Robot Systems“, in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, IEEE, 2012, pp. 423 - 428.
- [280] P. Paryanto, M. Brossog, J. Kohl, J. Merhof, S. Spreng und J. Franke, „Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system“, in *Procedia CIRP Volume 23 - 5th CATS 2014 - CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, 2014, pp. 131 - 136.
- [281] M. Rudolph und M. Kaever, Energieeffiziente Produktionsmaschinen durch Simulation in der Produktentwicklung - Vorstellung des Softwarekonzepts und des Softwareprototypen, Erlangen: Siemens AG, 2012.
- [282] P. Vogt, Antriebssysteme mit dem Drive Solution Designer energieeffizient auslegen, Aerzen: Lenze Automation GmbH, 2010.
- [283] Lenze Automation GmbH, Drive Solution Designer - Software Handbuch, Aerzen: Lenze Automation GmbH, 2015.
- [284] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI 3633:2010-12: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen, Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [285] O. Rose und L. März, „Simulation“, in *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*, Berlin Heidelberg, Springer, 2011, pp. 13 - 19.
- [286] M. Kugler, CAD-integrierte Modellierung von agentenbasierten Simulationsmodellen für die Bauablaufsimulation im Hochbau, Kassel: Kassel University Press, 2012.

- [287] P. Mebes, Graphen-basierte Modellierungsmethode zur Materialflussverfolgung, Zürich: ETH Zürich, 2008.
- [288] H. Martin, Transport- und Lagerlogistik - Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik, Wiesbaden: GWV Fachverlag, 2009.
- [289] W. Kühn, Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner, München: Hanser, 2006.
- [290] S. Vajna, C. Weber, H. Bley und K. Zeman, CAx für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung, Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- [291] K.-P. Herber, Kopplung reduzierter Mehrkörpersysteme zur virtuellen Produktverifikation und -optimierung, Bochum: Ruhr-Universität Bochum - Fakultät für Maschinenbau, 2011.
- [292] R. Ostertag, Supply-Chain-Koordination im Auslauf in der Automobilindustrie - Koordinationsmodell auf Basis von Fortschrittszahlen zur dezentralen Planung bei zentraler Informationsbereitstellung, Wiesbaden: Gabler, 2008.
- [293] Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 44300 Informationsverarbeitung - Begriffe, Berlin: Beuth Verlag, 1972.
- [294] D. Zöbel, Echtzeitsysteme - Grundlagen der Planung, Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [295] H. Wörn und U. Brinkschulte, Echtzeitsysteme - Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen, Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- [296] D. Friedemann, Prognose zur Einsatzfähigkeit von Mehrkörpersimulationsmethoden im Fahrwerksentwicklungsprozess, Berlin: TU Berlin Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, 2012.
- [297] R. Anderl und P. Binde, Simulationen mit NX - Kinematik, FEM, CFD, EM und Datenmanagement, München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [298] P. Sekler, Modellbasierte Berechnung der Systemeigenschaften von Maschinenstrukturen auf der Steuerung, Stuttgart: Universität Stuttgart - Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, 2012.
- [299] H. Linnemann, Robotertechnik, Berlin: Beuth Hochschule für Technik Berlin - Fachbereich IV Informatik und Medien, 2013.

- [300] M. Wenz, Automatische Konfiguration der Bewegungssteuerung von Industrierobotern, Karlsruhe: Universität Fridericiana zu Karlsruhe - Fakultät für Informatik, 2008.
- [301] M. G. Coutinho, Guide to Dynamic Simulations of Rigid Bodies and Particle Systems, London: Springer, 2013.
- [302] C. Wienss, Simulation von Kabeln und Schläuchen - Anforderungen und Einflüsse, Koblenz-Landau: Universität Koblenz-Landau - Fachbereich Informatik - Dissertation, 2009.
- [303] A. Boeing, Design of a Physics Abstraction Layer for Improving the Validity of Evolved Robot Control Simulations, Perth: University of Western Australia - Faculty of Engineering, Computing and Mathematics, 2009.
- [304] T. Jung, Methoden der Mehrkörpersimulation als Grundlage realitätsnaher Virtueller Welten, Aachen: RWTH Aachen - Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2011.
- [305] I. Millington, Game Physics Engine Development, San Francisco: Morgan Kaufmann, 2007.
- [306] E. Weitnauer, R. Haschke und H. Ritter, „Evaluating a Physics Engine as an Ingredient for Physical Reasoning“, in *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots - Proceedings of the Second International Conference SIMPAR*, Berlin Heidelberg, Springer, 2010, pp. 144 - 155.
- [307] G. Badillo, H. Medellin-Castillo, T. Lim und V. Lopez, „Physics Engines Evaluation based on Model Representation Analysis“, in *Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Buffalo, New York, ASME, 2014.
- [308] A. Boeing und T. Bräunl, „Evaluation of real-time physics simulation systems“, in *Proceedings of the 5th international Conference on Computer Graphics and international*, Perth, Association of Computing Machinery, 2007, pp. 281 - 288.
- [309] L. Glondu, M. Marchal und G. Dumont, „Evaluation of physical simulation libraries for haptic rendering of contacts between rigid bodies“, in *Proceedings of ASME 2010 World Conference on Innovative Virtual Reality WINVR 2010*, Ames, Iowa, ASME, 2010.

- [310] S. Longshaw, M. Turner, E. Finch und R. Gawthorpe, „Analysing the use of Real-time Physics Engines for Scientific Simulation: Exploring the Theoretical and Practical Benefits for Discrete Element Modelling“, in *Proceedings of the 18th Conference on Computational Mechanics (ACME-UK)*, Southampton, ACME, 2010.
- [311] J. Bender, Impulsbasierte Dynamiksimulation von Mehrkörpersystemen in der virtuellen Realität, Karlsruhe: Technische Hochschule Karlsruhe - Fakultät für Informatik, 2007.
- [312] J. Bender, Dynamiksimulation in der Computergrafik, Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2014.
- [313] B. Laurell, „The inner workings of Real-Time Physics Simulation Engines“, in *IRCSE '08 IDT workshop on interesting results in computer science and engineering*, Västerås, Mälardalens University, 2008.
- [314] C. Ericson, Real-Time Collision Detection, San Francisco: Morgan Kaufmann, 2005.
- [315] I. R. Ballantyne, Collision Overload: Reducing the Impact in Real-time Physics, London: Imperial College London - Faculty of Engineering, 2007.
- [316] K. Erleben, Stable, Robust, and Versatile Multibody Dynamics Animation, Copenhagen: University of Copenhagen, 2004.
- [317] A. Seth, J. Vance und J. Oliver, „Virtual reality for assembly methods prototyping: a review“, in *Virtual Reality*, Berlin Heidelberg, Springer, 2011, pp. 5 - 20.
- [318] U. Völlinger, Adaptive physikbasierte Modelle für die interaktive Deformationssimulation in der Virtuellen Realität, Berlin: TU Berlin - Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme, 2011.
- [319] R. Smith, Open Dynamics Engine - v0.5 User Guide, 2006.
- [320] R. Kooijman, Evaluation of Open Dynamics Engine Software, Eindhoven: Eindhoven University of Technology - Department of Mechanical Engineering, Dynamics & Control, 2010.
- [321] J. Lagarto, Acceleration of Physics Simulation Engine through OpenGL, Lissabon: Neue Universität Lissabon - Fakultät der Wissenschaft und Technologie, 2011.
- [322] E. Coumans, „GPU Rigid Body Simulation“, in *Game Developers Conference, 25.-29. März San Francisco*, San Francisco, 2013.

- [323] C. Brecher, D. Özdemir, C. Ecker und W. Lohse, „Modellbasierte Rekonfigurierbarkeit - Planungssystematik für Montagesysteme auf Basis von Strukturmodellen und physikbasierter Simulation“, *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 103, Nr. 2, pp. 157 - 161, 2013.
- [324] A. Seugling und M. Rölin, Evaluation of Physics Engines and Implementation of a Physics Module in a 3d-Authoring Tool, Umea: Umea University - Department of Computing Science, 2006.
- [325] S. Ivaldi, J. Peters, V. Padois und F. Nori, „Tools for simulating humanoid robot dynamics: a survey based on user feedback“, in *Proceedings of the 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Madrid, 2014.
- [326] G. Reinhart und F.-F. Lacour, „Virtuelle Unterstützung in der Produktion“, *VDMA - Intelligenter Produzieren*, Nr. 2, pp. 4 - 7, 2008.
- [327] M. Rossdeutscher, Entwicklung eines Verfahrens zum Programmtest in der robotergestützten Montage, Aachen: Shaker Verlag, 2011.
- [328] G. Reinhart und M. Spitzweg, „Einsatz von Physikmodellen zur Simulation bei der Entwicklung von Maschinen und Anlagen“, in *6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality*, Paderborn, Heinz-Nixdorf-Institut Universität Paderborn, 2007, pp. 333 - 348.
- [329] G. Reinhart und F.-F. Lacour, „Physikbasierte mechatronische Simulation materialflussintensiver Produktionsanlagen“, in *7. Paderborner Workshop "Entwurf mechatronischer Systeme"*, Paderborn, Heinz-Nixdorf-Institut Universität Paderborn, 2010, pp. 85 - 97.
- [330] G. Reinhart und F.-F. Lacour, „Skalierbare Simulation kinematischer Strukturen in der physikbasierten Virtuellen Inbetriebnahme“, in *Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*, Paderborn, Heinz-Nixdorf-Institut Universität Paderborn, 2010, pp. 113 - 127.
- [331] S. Röck, „Hardware in the Loop Simulation of Production Systems Dynamics“, *Journal of Production Engineering Research & Development*, Bd. 5, Nr. 3, pp. 329 - 337, 2011.
- [332] S. Röck, Echtzeitsimulation von Produktionsanlagen mit realen Steuerungselementen, Stuttgart: Universität Stuttgart, 2007.

- [333] S. Hoher und A. Verl, „Multi-Simulator-Materialflusssimulation for die virtuelle Inbetriebnahme“, in *SPS IPC DRIVES 2012 Tagungsband*, VDE Verlag, 2012, pp. 387 - 396.
- [334] S. Hoher, P. Schindler, S. Göttlich, V. Schlepper und S. Röck, „System Dynamic Models and Real-time Simulation of Complex Material Flow Systems“, in *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, Berlin Heidelberg, Springer, 2011, pp. 316 - 321.
- [335] A. Dias, J. Almeida, N. Dias, P. Lima und E. Silava, „Simulation Environment for Multi-robot Cooperative 3D Target Perception“, in *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, Cham Heidelberg New York Dodrecht London, Springer , 2014, pp. 98 - 109.
- [336] N. Koenig und A. Howard, „Design and Use Paradigms for Gazebo, An Open-Source Multi-Robot Simulator“, in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, IEEE, 2004, pp. 2149 - 2154.
- [337] T. Kunz und M. Stilman, „Time-Optimal Trajectory Generation for Path Following with Bounded Acceleration and Velocity“, in *Robotics: Science and Systems VIII*, Cambridge, MIT Press, 2012, pp. 209 - 216.
- [338] W. Jiang, S. Murphy, A. Ekelund, V. Miegel, X. Yin und L. Qi, „Robot Program Validation using Virtualization, Components, and Physics Engines“, in *ISR / ROBOTIK 2010*, Berlin Offenbach, VDE Verlag GmbH, 2010, pp. 1083 - 1087.
- [339] F. Aichele, Kollisionserkennung für echtzeitfähige Starrkörpersimulationen in der Industrie- und Service-Robotik, Stuttgart: Universität Stuttgart, 2015.
- [340] F. Aichele, B. Eckstein und B. Schenke, „Teilautomatisierte Softwaretests mithilfe einer mechanisch plausiblen Robotersimulation“, in *Simulation in Production and Logistics 2015*, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2015, pp. 249 - 258.
- [341] A. Strahilov, D. Effmert, J. Ovtcharova und T. Bär, „Simulation of the Pneumatic Behaviour in the Virtual Commissioning of Automated Assembly Systems“, in *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems*, Berlin Heidelberg, Springer, 2013, pp. 207 - 218.
- [342] C. Özdemir, „Disziplinübergreifende Maschinenentwicklung - Mechatronics Concept Designer erprobt im Anwendungsszenario“, in *Tools - Informationen der Aachener*
-

Produktionstechniker, Aachen, RWTH Aachen - WZL Werkzeugmaschinenlabor, 2012, pp. 2 - 4.

[343] Siemens PLM Software, Mechatronics Concept Designer - Ein funktionsorientierter Ansatz für den Maschinen- und Anlagenbau, Siemens PLM Software, 2010.

[344] P. Stich, S. Krotil und G. Reinhart, „Interaktive simulationsgestützte Programmierung bei der Entwicklung mechatronischer Verpackungsanlagen“, in *Tagungsband : 8. wissenschaftliche Fachtagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik*, Dresden, TU Dresden, 2015.

[345] G. Reinhart und P. Stich, „Simulation of deformable Objects for physically based Virtual Commissioning“, in *16th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory*, Stuttgart, 2011.

[346] P. Stich und G. Reinhart, „Mechatronic Sketching of Manufacturing Systems using Physically based Models - A Novel Approach for Simulation-based Systems Engineering“, in *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*, Kuching, IEEE, 2013, pp. 1 - 6.

[347] C. Constantinescu und A. Bruns, TEEM - Total Energy Efficiency Management - Visualisierung und Simulation von Energiewerten in der Digitalen Fabrik, Stuttgart: Vortrag auf dem Workshop "Energiemanagement zur Kostensenkung in der Produktion", 2009.

[348] M. Hornberger, „Den Energieeinsatz in der Produktion optimieren“, *Intelligenter Produzieren*, Nr. 5, pp. 34 - 35, 2009.

[349] J. Krüger und G. Schreck, „Energieeffizienzcontrolling in der Automobilindustrie“, *Futur: Vision und Innovation*, Nr. 2, pp. 6 - 7, 2010.

[350] G. Schreck, Energieeffizienzcontrolling in der Automobilindustrie - Verbundvorhaben EnEffCo, Berlin: Vortrag im Rahmen der Veranstaltung „Die energieoptimierte und ressourcenschonende Fabrik“, 2011.

[351] M. Binder, Leitfaden zur Steigerung der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung, Aachen: Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen, 2012.

[352] M. Binder, Abschlussbericht für das Verbundprojekt BEAT - Bewertung der Energieeffizienz alternativer Prozesse und Technologieketten, Aachen: Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen, 2012.

- [353] S. Hirzel und M. Köpschall, EnEffAH – „Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik“, Stuttgart: EnEffAH-Projektkonsortium, 2012.
- [354] H. Haag, Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion, Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2013.
- [355] R. Neugebauer, U. Götze und W.-G. Drossel, Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD, Chemnitz: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2013.
- [356] E. Abele und F. Junge, „Betrachtung energieeffizienter Produktionsbetriebe: ETA- Fabrik“, *Maschinenbau und Metallbearbeitung*, pp. 36 - 38, 2013.
- [357] R. Porst, Fragebogen - Ein Arbeitsbuch, Wiesbaden: Springer VS, 2014.
- [358] C. Irmgrund, Ganzheitliche Ansätze und Methoden zur nachhaltigen Neuplanung einer energieeffizienten Fabrik mit besonderem Schwerpunkt auf die Automobilmontage, Chemnitz: TU Chemnitz - Fakultät für Maschinenbau, 2014.
- [359] F. Damrath, A. Strahilov, T. Bär und M. Vielhaber, „Method for Energy-efficient Assembly System Design within Physics-based Virtual Engineering in the Automotive Industry“, in *Procedia CIRP 41 - CIRP CMS 2015 – 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Research and Innovation in Manufacturing: Key Enabling Technologies for the Factories of the Future*, 2015, pp. 307 - 312.
- [360] K. Erlach, Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik, Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- [361] International Performance Research Institute, DesignLog - Erweitertes Wertstromdesign zur Umsetzung grüner Logistikstrategien - Abschlussbericht, Stuttgart: International Performance Research Institute, 2015.
- [362] K. Erlach und E. Westkämper, Energiewertstrom - Der Weg zur energieeffizienten Fabrik, Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2009.
- [363] S. Reinhardt, Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung, München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2014.
- [364] E. Müller, T. Stock und R. Schillig, „Energy Value-Stream Mapping - A Method to Optimize Value-Streams in Respect of Time and Energy Consumption“, in *Enabling*

Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, Cham Heidelberg, Springer International Publishing, 2013, pp. 285 - 290.

- [365] B. Esefeld, Numerische Integration von Mehrkörpersystemen mit mengenwertigen Kraftgesetzen, München: Herbert Utz Verlag, 2014.
 - [366] M. Blesl und A. Kessler, Energieeffizienz in der Industrie, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
 - [367] M. Freese, S. Singh, F. Ozaki und N. Matauhira, „Virtual Robot Experimentation Platform V-REP: A Versatile 3D Robot Simulator“, in *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots - Proceedings of the Third International Conference SIMPAR 2012*, Berlin Heidelberg, Springer, 2012, pp. 51 - 62.
 - [368] E. Rohmer, P. Surya und M. Freese, „V-REP: a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework“, in *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots - Proceedings of the Second International Conference SIMPAR 2010*, Berlin Heidelberg, Springer, 2010, pp. 51 - 62.
 - [369] H. Haberhauer und M. Kaczmarek, Taschenbuch der Antriebstechnik, München: Carl Hanser Verlag, 2014.
 - [370] R. Aarts, B. Jonker und R. Waiboer, „Realistic dynamic simulation of an industrial robot with joint friction“, in *Informatics in Control, Automation and Robotics I*, Dordrecht, Springer, 2006, pp. 187 - 194.
 - [371] A. Abu-Schäffer, Regelung von Robotern mit elastischen Gelenken am Beispiel der DLR-Leichtbauarme, München: TU München - Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2002.
 - [372] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani und G. Oriolo, *Robotics - Modelling, Planning and Control*, London: Springer, 2010.
 - [373] D. Meike, M. Pellicciari und G. Berselli, „Energy Efficient Use of Multirobot Production Lines in the Automotive Industry: Detailed System Modeling and Optimization“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Bd. 11, Nr. 3, pp. 798 - 809, 2013.
 - [374] M. Reiner, Modellierung und Steuerung von strukturelastischen Robotern, München: TU München - Fakultät für Maschinenwesen, 2010.
-

- [375] C. Hansen, J. Öltjen, D. Meike und T. Ortmaier, „Enhanced approach for energy-efficient trajectory generation of industrial robots“, in *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2012)*, Seoul, IEEE, 2012, pp. 1 - 7.
- [376] KUKA Roboter GmbH, KUKA KR210-2 Serie 2000: Die Allesköninger im Hochlastbereich, Gersthofen: KUKA Roboter GmbH, 2008.
- [377] H. Nitschke, Zur Bestimmung geometrischer Parameter von Industrierobotern, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C.H. Beck, 2002.
- [378] M. Tenerz, Parameter Estimation in a Permanent Magnet Synchronous Motor, Linköping: Linköping University - Department of Electrical Engineering, 2011.
- [379] M. Rabe, S. Spieckermann und S. Wenzel, Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [380] J. U. Fritz, Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik, Saarbrücken: Universität des Saarlandes - Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM, 2007.
- [381] J. Hummel, R. Wolff und T. Stein, „An Evaluation of Open Source Physics Engines for Use in Virtual Reality Assembly Simulations“, in *Lecture Notes in Computer Science - Proceedings of the International Symposium on Visual Computing (ISVC)*, Berlin Heidelberg, Springer, 2012, pp. 346 - 357.
- [382] F. Damrath, A. Strahilov, T. Bär und M. Vielhaber, „Experimental Validation of a Physics-based Simulation Approach for Pneumatic Components for Production Systems in the Automotive Industry“, in *Procedia CIRP 31 - CIRP CMMO 2015 - 15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations*, 2015, pp. 35 - 40.
- [383] A. Kuhn und S. Wenzel, „Simulation logistischer Systeme“, in *Handbuch Logistik*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2008, pp. 73 - 94.