Herausforderungen bei der Integration einer frühzeitigen energiesensitiven Produktentwicklung in den automobilen Karosseriebau

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität/ Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION
vorgelegt von

Dennis Pape

aus Ostercappeln

Hamburg 2021

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill
Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg

Tag der mündlichen Prüfung: 09.12.2021

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung des Instituts für Konstruktions- und Fertigungstechnik im Fachbereich Maschinenbau an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill, Inhaber des Lehrstuhls für Maschinenelemente und rechnergestützte Produktentwicklung, für die Chance, die vielen intensiven Diskussionen, die kontinuierliche Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie der Geduld.

Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungstechnik, für die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr. Oliver Niggemann danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich bedanke mich ebenfalls bei allen Arbeitskollegen, Mitarbeitern und Ehemaligen des Lehrstuhls für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die vielen fachlichen Diskussionen und die gegenseitige Unterstützung. Besonderer Dank gilt hierbei Dr.-Ing. Robert Schulte, Dr.-Ing. Michael Schacht, Michael Welsch, Mathias Tralau, Florian Tichla, Ingo Kaiser und Marc Oellrich für die vielen Gespräche und Anmerkungen. Zudem möchte ich Herrn Thomas Franz und Dr. Michael Klank für die moralische Unterstützung besonderen Dank aussprechen.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Familie und meiner Frau Anja für Ihre Unterstützung und den persönlichen Rückhalt.

Hamburg, im Dezember 2021

Dennis Pape

Wenn ich die Menschen gefragt hätte, was sie wollen,
hätten sie gesagt: „schnellere Pferde“.
Henry Ford

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... **vii**
Tabellenverzeichnis ..... **viii**
Abkürzungsverzeichnis ..... **ix**
1 Einleitung **1**
1.1 Hintergrund und Motivation 1
1.1.1 Sicht der Energiepolitik 1
1.1.2 Sicht des Kunden der Automobilindustrie 4
1.1.3 Sicht des fahrzeugproduzierenden Unternehmens 6
1.2 Ziel der Arbeit 8
1.3 Aufbau der Arbeit 9
2 Die frühe Phase im automobilen Produktentwicklungsprozess **11**
2.1 Entwicklung 12
2.2 Produktionsplanung 15
2.3 Technologiemanagement 16
2.4 Umweltabteilung 17
2.5 Empirische Kurzbefragung 18
2.6 Fügeäquivalente 19
2.7 Kritische Diskussion und Fazit 19
3 Stand der Forschung **22**
3.1 Vorstellung der Arbeiten 24
3.1.1 Fabrik-/Produktionsplanung 24
3.1.2 Entwicklung 26
3.1.3 Technologiemanagement 28
3.2 Forschungsbedarf 29
4 Diskussion allgemeiner Methoden und Instrumente **32**
4.1 Konstruktionsmethoden 32
4.1.1 Integrierte Produktentwicklung 32
4.1.2 Design for X 33
4.1.3 EcoDesign 34
4.1.4 Technikbewertung 36
4.1.5 Entscheidungsfindung 38
4.1.6 Kritische Diskussion und Fazit 39
4.2 Energieorientierte Bewertungsmöglichkeiten 40
4.2.1 Life Cycle Assessment 40
4.2.2 Kumulierter Energieaufwand 43
4.2.3 Kritische Diskussion und Fazit 44
4.3 Integration in technische Instrumente 45
4.3.1 LCA-Software 45
4.3.2 Integration in CAD-Software 46
4.3.3 Webbasierte Anwendungen 49

4.3.4 Kritische Diskussion und Fazit ... 50
4.4 Ableitung der Forschungsfragen aus der bisherigen Analyse und Forschungsdesign ... 51
5 Erhebung der individuellen Prozessdaten der Herstellungsphase ... 52
5.1 Auswahl des Untersuchungsgegenstandes ... 52
5.1.1 Untersuchungsgegenstand 1: Durchsetzfügen ... 55
5.1.2 Untersuchungsgegenstand 2: Halbhohlstanznieten ... 56
5.1.3 Untersuchungsgegenstand 3: Widerstandspunktschweißen ... 56
5.1.4 Untersuchungsgegenstand 4: Flow Drill Screwing ... 57
5.2 Erhebung und Klassifikation der Anforderungen ... 58
5.2.1 Restriktionen ... 62
5.2.2 Präferenzen ... 63
5.3 Quantifizierung der Präferenzen und Harmonisierung ... 65
5.3.1 Energiebedarf ... 65
5.3.2 Investitionskosten ... 68
5.3.3 Kosten pro Fügeelement ... 69
5.3.4 Prozesszeit ... 70
5.3.5 Festigkeit ... 71
5.3.6 Zusammenfassung und Fazit ... 73
6 Konzeption eines Prozesses ... 76
6.1 Eliminierung der Lösungsalternativen durch Restriktionen ... 79
6.2 Bewertung der Lösungsalternativen durch Präferenzen ... 80
6.3 Berechnung der Auswirkungen auf die Nutzungsphase ... 81
7 Umsetzung eines Demonstrators und Evaluierung ... 87
7.1 Qualitative Evaluation ... 90
7.2 Subjektive Evaluation ... 91
7.3 Fazit zur Evaluierung ... 94
8 Schlussbetrachtung ... 96
8.1 Beantwortung der Forschungsfragen ... 96
8.2 Zusammenfassung ... 98
8.3 Empfehlungen zur Weiterführung ... 99
8.3.1 Allgemeiner Ausbau der Datenbasis ... 99
8.3.2 Monetäre Größen als Indikator für den Energiebedarf ... 101
9 Literaturverzeichnis ... 104

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energiebedarf der Bundesrepublik Deutschland 2018 in Petajoule 2
Abbildung 2: Auszug industrielle Energieverbraucher in Deutschland 2018 3
Abbildung 3: Die wichtigsten Kriterien beim Autokauf in Deutschland im Jahr 2019 4
Abbildung 4: Entwicklung der Kraftstoffpreise von 2000 bis 2020 5
Abbildung 5: Entwicklung durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch eines Pkw 6
Abbildung 6: Entwicklung industrieller Strompreis in der Bundesrepublik Deutschland . 7
Abbildung 7: Unterschiedliche Sichtweisen auf den PEP 11
Abbildung 8: Der Produktentstehungsprozess 12
Abbildung 9: Allgemeine Anforderungen an einen Entwickler 13
Abbildung 10: Word Cloud bisheriger relevanter Schlagwörter 22
Abbildung 11: Vorteile durch Nutzung von Frontloading 33
Abbildung 12: Kategorisierung einer Auswahl von EcoDesign-Instrumenten 35
Abbildung 13: Entwicklung und Auswahl technischer Möglichkeiten 37
Abbildung 14: Die Phasen der Ökobilanzierung 41
Abbildung 15: Potenzielle Quellen für eine Datenbasis 41
Abbildung 16: Situation des LCA in frühen Phasen 42
Abbildung 17: Schema eines Materialstammbaums für die Herstellung 44
Abbildung 18: Energetisch bewertetes Modell eines Kniehebelspanners 47
Abbildung 19: Bedienoberfläche mit Eingabeparametern zum Fertigungsverfahren 48
Abbildung 20: EcoDesign Pilot online 49
Abbildung 21: Rohkarosserie eines Audi A3 53
Abbildung 22: Ausgewählte Fügetechniken 54
Abbildung 23: Prozess des Durchsetzfügens 55
Abbildung 24: Prozess des Halbhohlstanznietens 56
Abbildung 25: Prozess des Widerstandspunktschweißens 57
Abbildung 26: Phasen eines Verschraubungsprozesses mit FDS 58
Abbildung 27: Vorgehen zur Ermittlung der Restriktionen und Präferenzen 60
Abbildung 28: Exemplarische Messungen für die Fügetechnik: EMC 66
Abbildung 29: Normierter Energiebedarf pro Fügepunkt 68
Abbildung 30: Normierte Investitionskosten 69
Abbildung 31: Normierte Kosten pro Fügeelement 70
Abbildung 32: Normierte Prozesszeit pro Fügeverfahren 71
Abbildung 33: Scherzugfestigkeit der untersuchten Fügeverfahren 72
Abbildung 34: Zusammenfassung der Datenerhebung 73
Abbildung 35: Vorteil durch die Nutzung des Fügetechnikprofils 74
Abbildung 36: Konzipierter Prozessverlauf 77
Abbildung 37: Faktoren des Energiebedarfs in der Nutzungsphase 82
Abbildung 38: Energetische Wirkungsabschätzung 85
Abbildung 39: Oberfläche des Softwaretools 88
Abbildung 40: Proportionalität zwischen Preis und Energiebedarf 102

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kategorisierung der Forschungsarbeiten *23*
Tabelle 2: Allgemeine Entscheidungsmatrix *39*
Tabelle 3: Untersuchungsparameter für die Fügetechnik: Durchsetzfügen *55*
Tabelle 4: Untersuchungsparameter für die Fügetechnik: HSN *56*
Tabelle 5: Untersuchungsparameter für die Fügetechnik: WPS *57*
Tabelle 6: Untersuchungsparameter für die Fügetechnik: FDS *58*
Tabelle 7: Anforderungsmatrix am Beispiel der Hutablage *61*
Tabelle 8: Exemplarischer Logikaufbau für den Werkstoff *79*
Tabelle 9: Anhaltswerte für die Teilung und Randabstände pro Fügetechnik *79*
Tabelle 10: Bewertungstabelle in allgemeiner Form *80*
Tabelle 11: Paarweiser Vergleich in allgemeiner Form *81*
Tabelle 12: Berechnung der energetischen Wirkungsabschätzung *84*
Tabelle 13: Paarweiser Vergleich innerhalb des Tools *90*

Abkürzungsverzeichnis

CAD ..... *Computer aided Design (Rechnergestütztes Konstruieren)*
DfE ..... *Design for Energy (Efficiency)*
DfEv ..... *Design for Environment*
DfM ..... *Design for Manufacturability*
DfX ..... *Design for X*
DIN ..... *Deutsches Institut für Normung*
DMU ..... *Digital Mock-Up (Digitales Versuchsmodell)*
EMC ..... *Elektromechanisches Clinchen*
ETS ..... *EU-Emmissionshandelssystem*
FDS ..... *Flow Drill Screwing*
GAU ..... *Größter anzunehmender Unfall*
HSN ..... *Halbhohlstanznieten*
IoT ..... *Internet of things*
KEA ..... *Kumulierter Energieaufwand*
KNA ..... *Kumulierter nichtenergetischer Aufwand*
KVP ..... *Kontinuierlicher Verbesserungsprozess*
LCA ..... *Life Cycle Assessment*
LCAD ..... *Life Cycle Assessment for Computer Aided Design*
LCI ..... *Life Cycle Inventory*
LCIA ..... *Life Cycle Impact Assessment*
MLB ..... *Modularer Längsbaukasten*
MQB ..... *Modularer Querbaukasten*
MRA ..... *Modulare Hinterradantriebs-Architektur*
PEP ..... *Produktentstehungsprozess*
SE ..... *Simultaneous Engineering*
SEI ..... *Stoffgebundener Energieinhalt*
TEP ..... *Technologieentwicklungsprozess*
TGA ..... *Technische Gebäudeausrüstung*
TR ..... *Technische Richtlinie*
VDI ..... *Verband Deutscher Ingenieure*
WPS ..... *Widerstandspunktschweißen*

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die wachsende Weltbevölkerung und der gesellschaftliche Wandel zur Schnelllebigkeit sorgen für eine Überbeanspruchung der natürlichen Ressourcen der Erde. Die sogenannte Wegwerf- oder Überflussgesellschaft unterstützt diesen Prozess mit der stetigen Forderung nach wirtschaftlichem Wachstum sowie dem Bedarf an neuen und innovativen Produkten. Um diese Produkte herstellen zu können, ist Energie notwendig, die aus unterschiedlichen Quellen bezogen wird. Im Weltverbrauch bilden die fossilen Brennstoffe mit ca. 86% mit Abstand den größten Anteil der Energieträger gefolgt von den erneuerbaren Energien mit ca. 11% und der Kernkraft mit ca. 4% [Brit17]. Neben den erneuerbaren Energien soll Prognosen zufolge die Atomkraft bis 2040 deutlich an Bedeutung gewinnen, sodass ein jährliches Weltwachstum um 2,5% pro Jahr denkbar ist [Matt13]. Doch die Atomkraft ist umstritten. 2010 zeigte die Katastrophe von Fukushima, dass selbst ein hochtechnisiertes Land wie Japan nicht vollständig gegen einen atomaren GAU[1] abgesichert ist. Zudem wurde deutlich, dass sich eine Katastrophe wie in der Ukraine von 1986 trotz des technologischen Fortschritts und wachsender Sicherheitsbestimmungen wiederholen kann.

In Deutschland gelangte das Thema der nachhaltigen Energienutzung unter anderem durch den Vorfall in Fukushima verstärkt in das Bewusstsein der Politik [Gutt11]. Im Folgenden soll daher zunächst das Ziel der heutigen Energiepolitik mit Sicht auf diese Arbeit diskutiert werden. Darauf aufbauend findet eine allgemeine Darstellung der unterschiedlichen Sichten eines automobilen Kunden und Unternehmens statt. Diese verschiedenen Sichten sollen zum einen ein Verständnis für die Situation der verschiedenen Interessengruppen schaffen und zum anderen sollen Schwierigkeiten abgeleitet werden, die einer Verminderung des Energiebedarfs, hier im Speziellen des automobilen Karosseriebaus, im Wege stehen.

1.1.1 Sicht der Energiepolitik

Der Mensch hat seit einiger Zeit erkannt, dass er mit Ressourcen verantwortungsvoll umgehen muss, um die drohende Gefahr eines sozioökologischen Ungleichgewichts abzuwenden [Simo13]. Seit dem Vorfall in Fukushima wurde der Anteil an Kernenergie in Deutschland um 6,4% auf 15,8% gedrosselt. Neben dem Ziel, bis 2022 auf die Nutzung der Kernkraft vollständig zu verzichten [Stat20b], soll langfristig ausschließlich auf erneuerbare Energiequellen zurückgegriffen werden. Durch diesen Wandel und den gleichzeitigen Ausstieg aus der Atomenergie besteht daher ein volkswirtschaftliches Interesse, den Energiebedarf in Deutschland zu mindern. Die politischen Vertreter haben

[1] Größter anzunehmender Unfall.

ein gesteigertes Interesse, diesen Zielen nachhaltig nachzugehen. Ein Hauptinstrument ist hierbei die Gesetzgebung, die mithilfe von Sanktionen das Verhalten der Unternehmen und Endverbraucher in einem gewissen Maße lenken kann. Ein Beispiel hierfür ist das EU-Emissionshandelssystem (ETS). In diesem System muss gemäß der Emission eines Unternehmens eine bestimmte Anzahl an Zertifikaten erworben werden [Gerd13]. Ziel ist es, eine Verbesserung des Energiebedarfs bei den Verbrauchern zu bewirken. Der damit einhergehende reduzierte oder mindestens gleichbleibende Energiebedarf bei einer Erhöhung der Produktivität bedeutet volkswirtschaftlich gesehen eine geringere Notwendigkeit zur Bereitstellung von Energie. Der Energiebedarf findet dabei innerhalb der Bundesrepublik Deutschland unterschiedlichen Einsatz, wie in Abbildung 1 dargestellt.

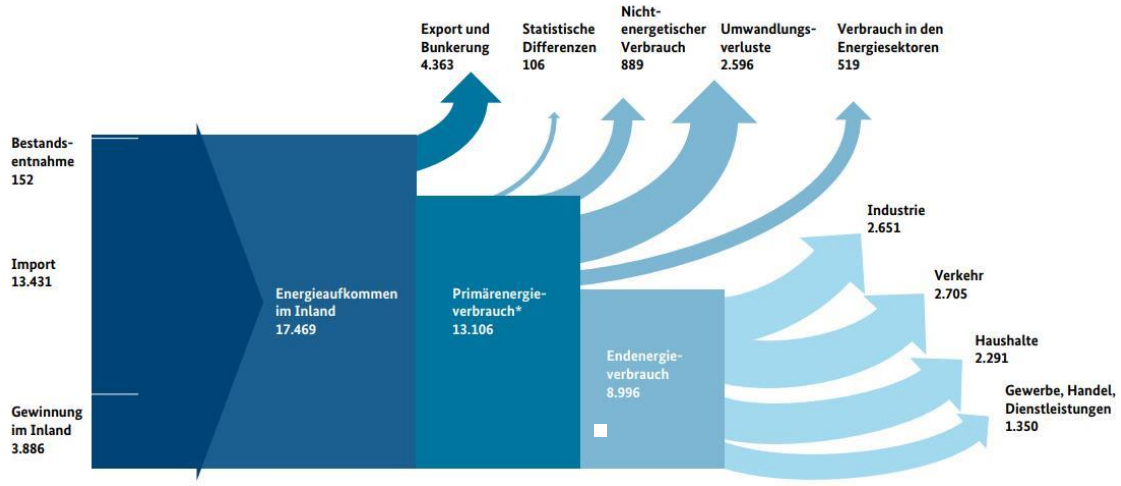

Abbildung 1: Energiebedarf der Bundesrepublik Deutschland 2018 in Petajoule [Arbe18]

Aufgrund der Rohstoffverknappung und der geringen Reserven Europas entsteht eine Abhängigkeit Deutschlands von anderen Ländern [Stat20b]. Diese Abhängigkeit bedeutet, wirtschaftlich steuerbar durch Lieferanten zu sein. Der Endenergiebedarf teilt sich in die Kategorien Industrie, Verkehr, Haushalte sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungssektor auf. Diese Bereiche sind elementare Bestandteile der Wirtschaft. Die Industrie macht dabei ca. 29% des Endenergiebedarfs aus und stellt somit den zweitgrößten Energieverbraucher[2] dar. Eine tiefer gehende Aufschlüsselung der Verbraucher der Industrie kann in den verschiedenen Wirtschaftszweigen erfolgen. Abbildung 2 zeigt einen Auszug der 13 größten industriellen Energieverbraucher in Deutschland.

[2] Physikalisch ist es nicht möglich, Energie zu verbrauchen. Unter Energieverbrauch wird daher innerhalb dieser Schrift der Verbrauch/ die Umwandlung von Exergie in Anergie verstanden.

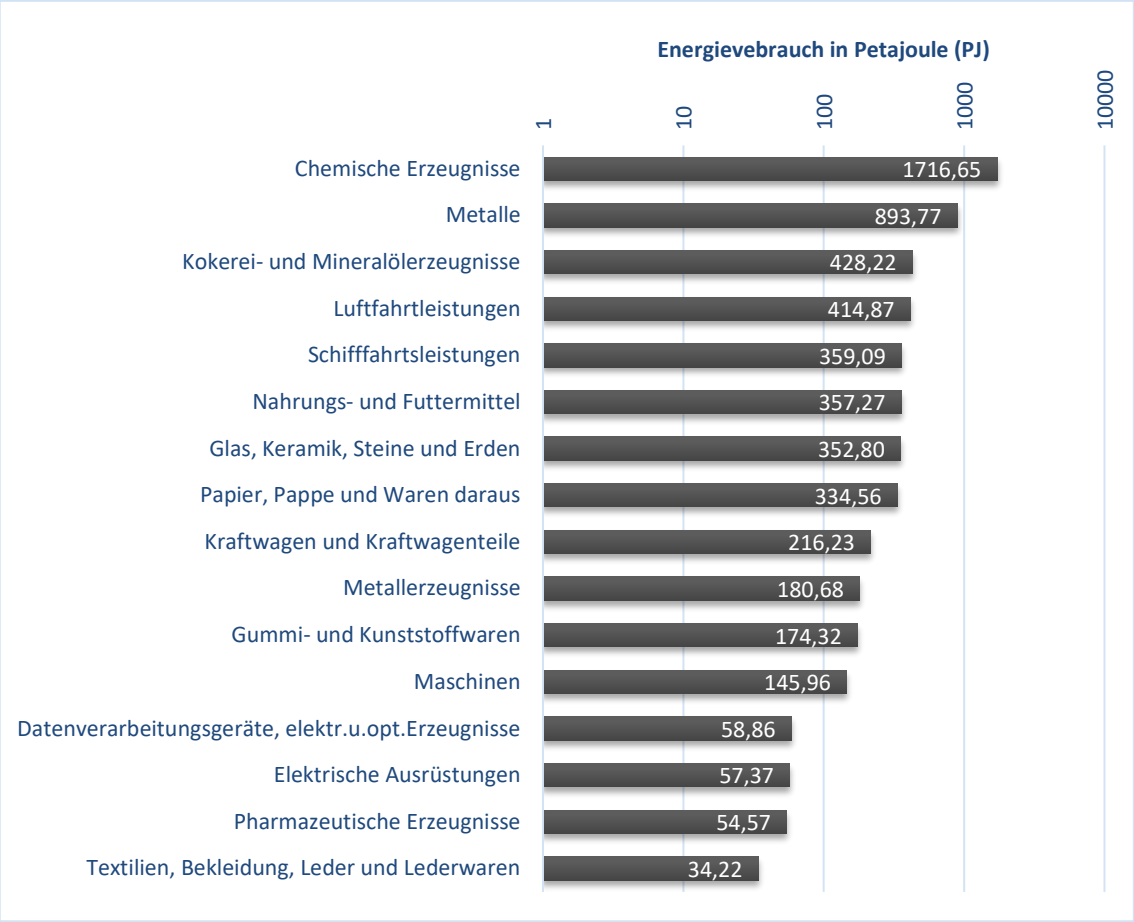

Abbildung 2: Auszug industrielle Energieverbraucher in Deutschland 2018 nach [Stat20a]

Die Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen stellt dabei einen Sonderbereich dar. Durch die Entwicklung der automobilen Produkte wird neben dem direkten Energiebedarf während der Herstellung auch der Verbrauch des Verkehrssektors beeinflusst. Zudem bildet die automobile Industrie in der Wertschöpfungskette das Schlussglied und beeinflusst mit einem Umsatzvolumen von ca. 436 Milliarden Euro [Stat20a] die vorgelagerten Veredlungsprozesse wie die Metallerzeugung und -bearbeitung sowie den Maschinenbau erheblich und stellt somit politisch einen strategischen Knotenpunkt dar, der durch die Instrumente der Politik adressiert werden kann. Werden politische Instrumente eingesetzt, könnte das Interesse der Unternehmen an einer Reduzierung des Energiebedarfs erhöht werden, jedoch würde dies zeitgleich die Gefahr der Deindustrialisierung in Deutschland vorantreiben [Konr13]. Da die Kosten zwangsläufig auf das Endprodukt umgelegt werden, muss das Unternehmen trotz dieser Preiserhöhung in der Lage sein, das Produkt am globalen Markt beim automobilen Endkunden erfolgreich absetzen zu können. Um die Situation des Endkunden zu verstehen, wird im Folgenden auf dessen Situation und Interessen eingegangen.

1.1.2 Sicht des Kunden der Automobilindustrie

Der Kunde der Automobilindustrie ist in der Rolle des Endverbrauchers daran interessiert, für das von ihm eingesetzte Kapital einen Pkw zu erwerben, welcher seine individuellen Bedürfnisse möglichst vollständig befriedigt. Er ist dabei in der Beurteilung, was die optimale Konsumlösung darstellt, subjektiver Wahrnehmung unterlegen. Dies führt dazu, dass unterschiedliche Anforderungen an das Produkt beziehungsweise an das Unternehmen gestellt werden. Die Anforderungen der Kunden werden regelmäßig durch Umfragen ermittelt. Ein Beispiel der Ergebnisse einer solchen Umfrage zeigt Abbildung 3.

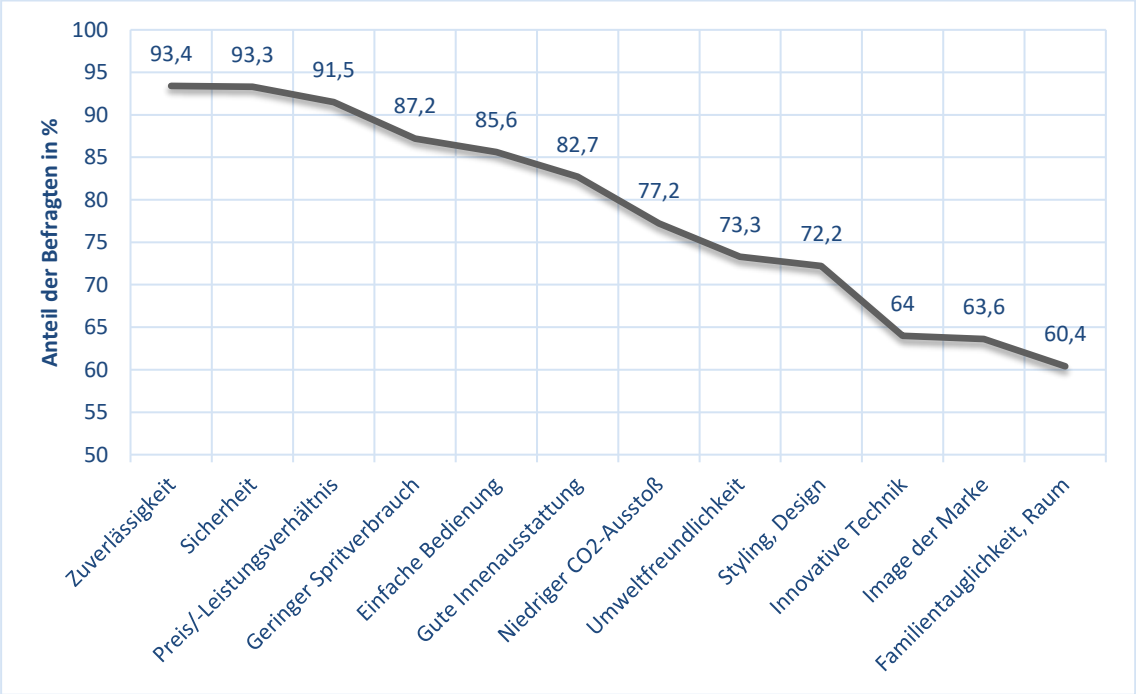

Abbildung 3: Die wichtigsten Kriterien beim Autokauf in Deutschland im Jahr 2019 [Stat19]

Neben den aufgeführten Kaufkriterien bildet der Spritverbrauch einen Sonderfall. Durch diese Größe werden zusätzlich der CO_2-Ausstoß und die Umweltfreundlichkeit beeinflusst. Der durchschnittliche Treibstoffverbrauch wird dem Kunden vor dem Kauf des Pkw als einzige energetische Größe seitens der Automobilindustrie dargestellt und stellt ein wichtiges Kaufkriterium dar, da er ebenfalls im hohen Maße die laufenden Kosten eines Fahrzeugs bestimmt. In Abbildung 4 wird die Kraftstoffpreisentwicklung seit 2000 bis 2018 gezeigt.

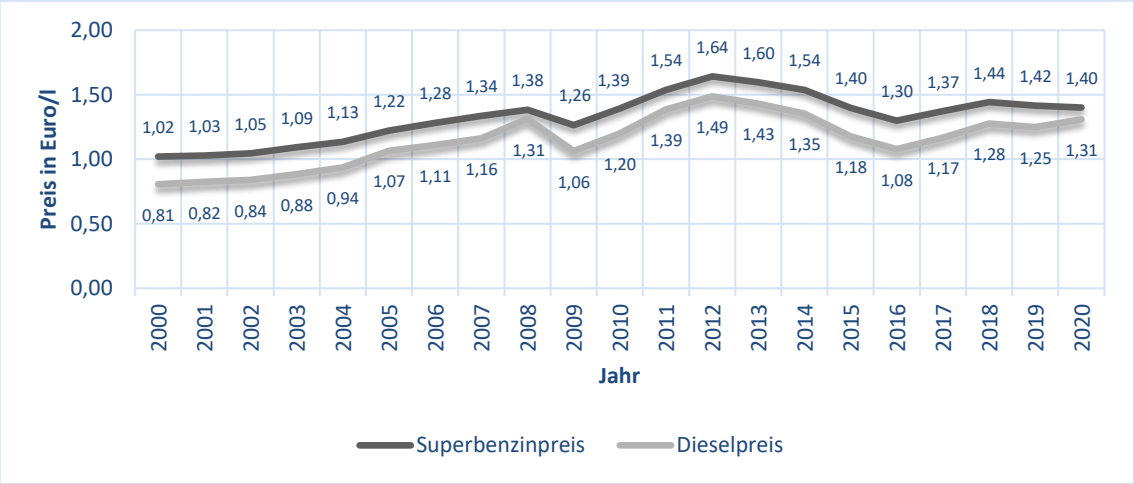

Abbildung 4: Entwicklung der Kraftstoffpreise von 2000 bis 2020 nach [Stat20b]

Bis 2008 ist ein stetiger Anstieg der Kraftstoffpreise zu beobachten. Dieser Trend setzt sich trotz kurzen Einbruchs insgesamt bis 2012 weiter fort. Erst ab 2013 kehrt sich der Trend um und der Kraftstoffpreis wird günstiger. Dennoch zeigt der Gesamttrend seit 2000 stetig aufwärts. Aufgrund der Unsicherheiten, wie sich in Zukunft der Kraftstoffpreis und der erkennbare Gesamttrend entwickeln werden, wird der Kraftstoffverbrauch in Zukunft weiterhin eine wichtige wirtschaftliche Größe darstellen. Dies ist hauptsächlich darin begründet, weil die Treibstoffkosten während eines Pkw-Produktlebenszyklus mindestens den Betrag der Anschaffungskosten betragen und teilweise sogar überschreiten[3].

Die Kaufkriterien können mittels Gesetzen und damit einhergehenden Sanktionen beziehungsweise Subventionen direkt beeinflusst werden. So wurde beispielsweise die Einführung des Dieselpartikelfilters durch Subventionen in der Vergangenheit vorangetrieben [Bund09]. Die Umwelt zu schonen brachte für den Kunden somit einen steuerlichen Kostenvorteil aufgrund der subventionierten Anschaffungskosten. Eine andere Möglichkeit der Beeinflussung durch monetäre Sanktionen nutzt das Kraftfahrzeug-Steuermodell. Hierbei findet seit Juli 2009 neben dem Hubraum eine gezielte Besteuerung der Schadstoffemissionen in Europa statt. Grundlage hierbei sind die sogenannten Schadstoffklassen [Euro13]. Eine Verminderung dieser Sanktionen durch den Erwerb eines Kraftfahrzeugs mit einer günstigen Schadstoffemission und einem nutzungsorientierten[4] Hubraum (Leistung) ist für den Kunden steuerlich attraktiv und stellt eine Anforderung an das automobile Unternehmen dar.

Das Kaufkriterium des Kunden bezüglich Umweltfreundlichkeit ist zudem weitestgehend subjektivem Empfinden unterlegen. Oftmals wird der Kunde durch das Marketing der

[3] Bei einem Verbrauch von 7,4 l/100 km, einer Gesamtlaufleistung von 250.000 km, einem Spritpreis von 143,4 Cent/l und einem Neuwagenpreis von 25.000 €/ Fahrzeug.

[4] Unter einem nutzungsorientierten Hubraum wird ein Hubraum verstanden, der so groß wie möglich und so klein wie nötig gewählt wurde. Hierbei kann das Fahrverhalten des Endkunden wie auch die geplante Nutzung des Fahrzeugs wie das Ziehen von Lasten einen Einfluss haben.

Unternehmen beeinflusst, sodass für eine Marke oder ein Produkt ein bestimmtes Image im Bewusstsein des Kunden entsteht [Stat19]. Es existieren jedoch neben dem Normverbrauch des Fahrzeugs kaum quantitative Größen, die dem Kunden eine Produktvergleichbarkeit ermöglichen. Eine Ausweisung des Energiebedarfs, der im Herstellungsprozess entsteht, findet derzeit nicht statt. Im Folgenden soll daher die Sicht des Unternehmens dargestellt werden, um festzustellen, ob Vorteile bei einer Ausweisung des Energiebedarfs während der Herstellung für ein Unternehmen entstehen.

1.1.3 Sicht des fahrzeugproduzierenden Unternehmens

Allgemein wird nach Expertenschätzung das Thema der Nachhaltigkeit von Unternehmen nur als Reaktion aufgrund von Kostendruck, allgemeinen politischen oder explizit rechtlichen Vorgaben beziehungsweise Imagegründen verfolgt [Künz16]. Das automobile Unternehmen, welches in der Regel eine Aktiengesellschaft repräsentiert, verfolgt die primäre Absicht, Kapital zu mehren. Um dieses Ziel erfolgreich zu verfolgen, muss das Unternehmen die Bedürfnisse der Kunden erfüllen. Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, besteht ein Kaufinteresse des Kunden darin, einen Pkw mit einem geringen Treibstoffverbrauch zu erwerben. Diese Tatsache haben Unternehmen erkannt und entwickeln Produkte mit diesbezüglichen Spezifikationen. Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauchs eines Pkw von 2000 bis 2018.

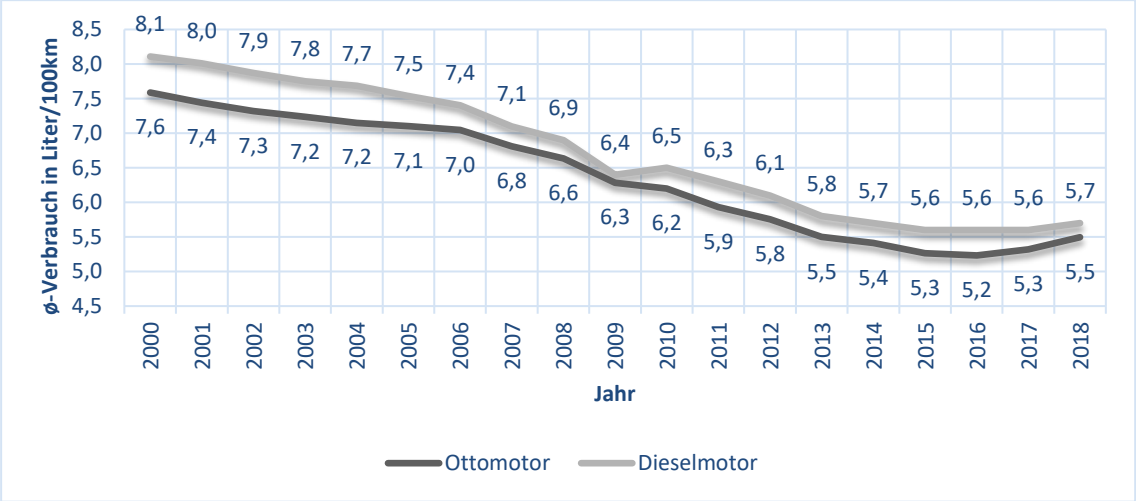

Abbildung 5: Entwicklung durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch eines Pkw nach [Stat20b]

Die Entwicklungsabteilungen des Unternehmens versuchen, die vom Kunden gestellten Anforderungen in technische Merkmale zu übersetzen. Ein technisches Merkmal, mit dem der Kraftstoffverbrauch direkt beeinflusst werden kann, ist das Gewicht [Wars12, Brae12]. Das Gewicht stellt einen wichtigen Parameter für den Automobilbau dar. Die Beratungsagentur McKinsey empfiehlt, bis 2030 den Anteil an Leichtbauteilen von 30 auf 70% zu erhöhen. Grund hierfür ist unter anderem die Kompensation des Fahrzeug-

gewichts durch den Einsatz zusätzlicher Elektroantriebe in zum Beispiel Hybridfahrzeugen. Der Jahresumsatz mit Leichtbauwerkstoffen und Halbzeugen soll sich von 70 Milliarden auf 300 Milliarden Euro erhöhen [McKi12]. Potential für eine Gewichtsreduzierung bietet hierbei auch die Karosserie. Das Gewicht einer Rohkarosserie eines Kleinwagens wie zum Beispiel des VW Polo liegt bei ca. 231 kg [Schw11] und stellt somit knapp 20% des gesamten Leergewichts dar. Das Potential durch die Substitution von Stahl durch höchstfeste Stähle, Aluminium, Magnesium und Kunststoffe wird nach Braess auf 10 bis 20% geschätzt [Brae12]. Die Aufwendungen von Leichtbaumaßnahmen müssen dabei jedoch immer in wirtschaftlicher Relation stehen [Müll09, Klei13, Busc13], sodass die Produkte weiterhin erfolgreich am Markt abgesetzt werden können. Doch Leichtbau allein reicht nicht aus, um sich als Automobilunternehmen einen Wettbewerbsvorteil zu sichern. Durch eine Marktsättigung befindet sich der automobile Wirtschaftszweig in einer schwierigen wirtschaftlichen Lage [Beck07, Luck12, Schu13]. Die automobilen Unternehmen sind somit gezwungen, Nischenmärkte zu bedienen und kleinere Potentiale auszuschöpfen. Im Zuge dessen wird neben der Verbesserung des Produkts auch in der Produktion intensiv nach Einsparpotentialen gesucht. Die Produktionskosten setzen sich dabei aus unterschiedlichen Kosten zusammen, wobei der Energiebedarf einen Anteil dieser Kosten ausmacht. Eine wirtschaftliche Verminderung des Energiebedarfs während der Herstellung ist daher generell anzustreben [Müll09, Busc13]. Das Interesse an der Reduktion des eigenen Energiebedarfs wird mit steigendem Energiepreis für Unternehmen immer attraktiver. Seit 2000 stieg der industrielle Strompreis um 54,5% und erreichte 2014 einen Spitzenwert von 11,38 Euro-Cent je kWh. Diese Entwicklung zeigt Abbildung 6.

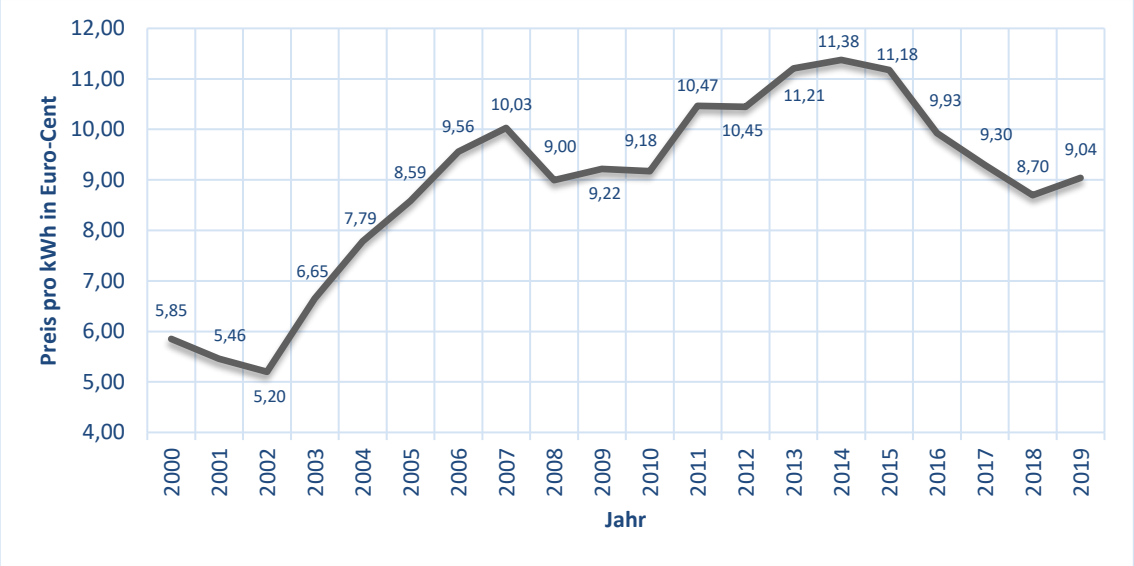

Abbildung 6: Entwicklung industrieller Strompreis in der Bundesrepublik Deutschland nach [Stat20b]

Der Trend des industriellen Strompreises ist zwar seit 2014 rückläufig, dennoch besteht in Zukunft ein erhöhtes Risiko steigender Strompreise aufgrund des immer größer werdenden Strompreisunterschieds zwischen Gewerbe- und Privatkunden [Ries13]. Die frühzeitige Ausrichtung auf einen steigenden Strompreis kann somit einen Wettbewerbsvorteil darstellen. Neben der Einsparung von Produktionskosten kann eine Senkung des Energiebedarfs zusätzlich als Marketing-Instrument benutzt werden, um mehr Produkte am Markt absetzen zu können und somit die Marktanteile zu steigern [Busc13, Beck14]. Die Unternehmen zielen hierbei auf das Kaufkriterium der Umweltfreundlichkeit ab. Der Dieselskandal 2016 von Volkswagen zeigte, wie verheerend eine falsche Ausweisung einer Umweltgröße sein kann. Analysten schätzen, dass der Dieselskandal Volkswagen zwischen 20 und 25 Milliarden Dollar kosten wird [Mana16]. Der Automobilbauer verliert dadurch umweltbewusste Kunden und zudem kann das Vertrauen in die Marke leiden [Welt15]. Hierdurch zeigt sich, dass der CO_2-Verbrauch und der damit einhergehende Energiebedarf eine nicht zu unterschätzende Größe darstellt.

Die frühe Phase der Entwicklung bildet einen wichtigen Stellhebel für den später anfallenden Energiebedarf in der Herstellungs- und der Nutzungsphase des Produkts. In der frühen Phase werden ca. 70% der Kosten festgelegt. Verursacht werden jedoch nur ca. 10% der gesamten Entwicklungskosten [Ehrl07a]. Diese Phase bietet somit besonders hohes Potential, um Produkte energieeffizient zu gestalten [Ponn11]. Im Falle des Karosserierohbaus[5] kann in der frühen Phase ein erheblicher Einfluss auf die eingesetzte Fügetechnik genommen werden. Zudem besteht im Karosseriebau eine hohe Eigenleistungstiefe [Wemh06], sodass eine direkte Beeinflussung des automobilen Unternehmens möglich ist. Eine Berücksichtigung der Prozessenergie der Fügetechnik kann derzeit für ein Unternehmen jedoch nur eingeschränkt und mit großem Aufwand durchgeführt werden. Um in einer frühen Phase geeignete Entscheidungen zu treffen, fehlt es laut Aussagen verschiedener wissenschaftlicher Untersuchungen allgemein an individuellen Daten, Prozessen und Instrumenten [Atik01, Schu02, Spei08, Zhao13, Beck14]. Neben diesem grundsätzlichen Problem existieren noch weitere Anforderungen an die Fügetechnik einer Karosserie [Broc10, Brae12, Luck12, Schu13], die zum Teil mit Maßnahmen zu einer Verminderung des Energiebedarfs im Zielkonflikt stehen. Aufbauend auf den bisher beschriebenen Sichten der unterschiedlichen Interessengruppen soll im folgenden Abschnitt das Ziel dieser Arbeit festgelegt werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Im vorangegangenen Kapitel wurde dargelegt, dass Energie in der frühen Phase der Entwicklung des automobilen Karosseriebaus nicht ausreichend berücksichtigt wird. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, ein Konzept aufzuzeigen, wie eine frühzeitige energiesensitive Produktentwicklung in den automobilen Karosseriebau integriert werden kann und welche Herausforderungen dabei entstehen.

[5] Im Folgenden wird der Karosserierohbau vereinfacht als Karosseriebau bezeichnet.

1.3 Aufbau der Arbeit

Kapitel 1, die Einleitung, beschrieb bereits die jeweilige Situation der Energiepolitik, des automobilen Kunden und des fahrzeugproduzierenden Unternehmens. Jede der beschriebenen Gruppen hat hierbei unterschiedliche Interessen und Ziele, die in dieser Arbeit Berücksichtigung finden. Die Darstellung der Interessen wurde genutzt, um ein Grundverständnis für die Abhängigkeiten zu schaffen, die zwischen den betrachteten Interessengruppen bestehen.

Kapitel 2 stellt die derzeitige Arbeitsweise der betrachteten Untersuchungsumgebung, des automobilen Karosseriebaus, dar. Hierbei findet eine Unterscheidung in die Bereiche Karosserieentwicklung, -rohbauplanung und das begleitende Technologiemanagement sowie das Umweltwesen statt. Es werden Grundlagen vermittelt, um dem Leser ein einheitliches Grundverständnis für die untersuchten Unternehmensbereiche zu vermitteln. Zudem wird eine zeitliche Einordnung innerhalb des automobilen Produktentstehungsprozesses durchgeführt, um die frühe Phase zu definieren. Neben diesen Grundlagen findet am Ende des Kapitels eine kritische Bewertung hinsichtlich der Berücksichtigung des Energiebedarfs statt.

Im Kapitel 3 wird der Stand der Forschung dargestellt. Dieses Kapitel zeigt, welche Ansätze und Methoden bereits im Forschungsumfeld existieren, jedoch noch nicht zwangsläufig im Arbeitsumfeld des automobilen Karosseriebaus angewandt werden. Gleichzeitig wird untersucht, warum es bisher noch nicht gelungen ist, eine Berücksichtigung des Energiebedarfs zu realisieren. Für diese Analyse werden wissenschaftliche Arbeiten aus einem breiten Forschungsfeld zusammengetragen. Am Ende findet eine kritische Betrachtung der gezeigten Vorgehensweisen statt und es wird diskutiert, warum eine flächendeckende Anwendung dieser Methoden bisher nicht oder nur unzureichend innerhalb des Untersuchungsgegenstandes Karosseriebau erfolgt ist. Diese Erkenntnisse stellen den Forschungsbedarf für diese Arbeit heraus.

In Kapitel 4 werden allgemeine Methoden beschrieben. Die Methoden wurden ausgewählt, da sie im Kapitel 3 von Forschungsarbeiten mehrfach genannt und verwendet wurden. Zudem wurden Methoden aufgenommen, die weiteres Potential für eine Betrachtung bieten. Diese ausgewählten Methoden werden anschließend hinsichtlich einer Berücksichtigung der Anforderung des Energiebedarfs kritisch bewertet. Anschließend werden technische Instrumente vorgestellt, die diese Methoden nutzen, und diskutiert, warum eine Integration in die Praxis des automobilen Karosseriebaus mit diesen Instrumenten bisher nicht gelungen ist, und Verbesserungspotentiale herausgestellt. Darauf aufbauend werden Forschungsfragen formuliert, die im Zuge der hier vorliegenden Arbeit beantwortet werden sollen.

Ein Grund für das Scheitern bisheriger Instrumente wird darin gesehen, dass individuelle Prozessdaten fehlen. Kapitel 5 behandelt daher die Erhebung dieser fehlenden Daten. Um zu analysieren, welche Prozessdaten dafür aufgenommen werden müssen, wird zunächst ein Untersuchungsgegenstand definiert. An diesem Gegenstand erfolgt exemp-

larisch eine Aufnahme allgemeiner Anforderungen an die verwendete Fügetechnik. Zudem werden exemplarisch vier Fügetechniken ausgewählt, die zur Erhebung der individuellen Prozessdaten dienen. Anhand dieser Fügetechniken und der erhobenen Anforderungen werden zielgerichtet die individuellen Prozessdaten aufgenommen.

In Kapitel 6 wird ein individueller Prozess für eine Berücksichtigung der Anforderung des Energiebedarfs im automobilen Karosseriebau konzipiert. Für diesen Prozess werden innerhalb des Kapitels Unterprozesse definiert, erklärt und Wirkzusammenhänge zwischen den betrachteten Lebensphasen mathematisch definiert.

Um den erarbeiteten Prozess in Form eines Demonstrators zu evaluieren, beschreibt Kapitel 7 die durchgeführte Untersuchung. Die Evaluation erfolgt in zwei Schritten. Zum einen findet eine qualitative Evaluation statt, wobei der erarbeitete Lösungsansatz mit den in Kapitel 4 herausgestellten Verbesserungspotentialen bewertet wird. In einem weiteren Schritt wurden Mitarbeiter aus einem interdisziplinären Team eines fahrzeugproduzierenden Unternehmens für eine subjektive Evaluation befragt. Darauffolgend wird aus beiden Evaluationen ein Fazit gezogen.

In Kapitel 8 werden aufbauend auf dem gezogenen Fazit allgemeine Herausforderungen identifiziert und die aufgestellten Forschungsfragen beantwortet. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und es werden Empfehlungen zur Weiterführung formuliert.

2 Die frühe Phase im automobilen Produktentwicklungsprozess

In diesem Kapitel soll die Betrachtungsweise des Produktentstehungsprozesses (PEP) vereinheitlicht und eine Einordnung des Betrachtungszeitraums für eine frühzeitige Integration des energetischen Ansatzes aufgezeigt werden. Auf dieser Basis können die unterschiedlichen Stakeholder[6] der Automobilindustrie identifiziert und darauffolgend die Arbeitsweise analysiert werden. Um die individuellen Eigenschaften des automobilen PEP darstellen zu können, wird zunächst auf den allgemeinen PEP eingegangen. Dieser wird in der Literatur unterschiedlich beschrieben. Die folgende Abbildung 7 zeigt die variierenden Definitionen des allgemeinen PEP.

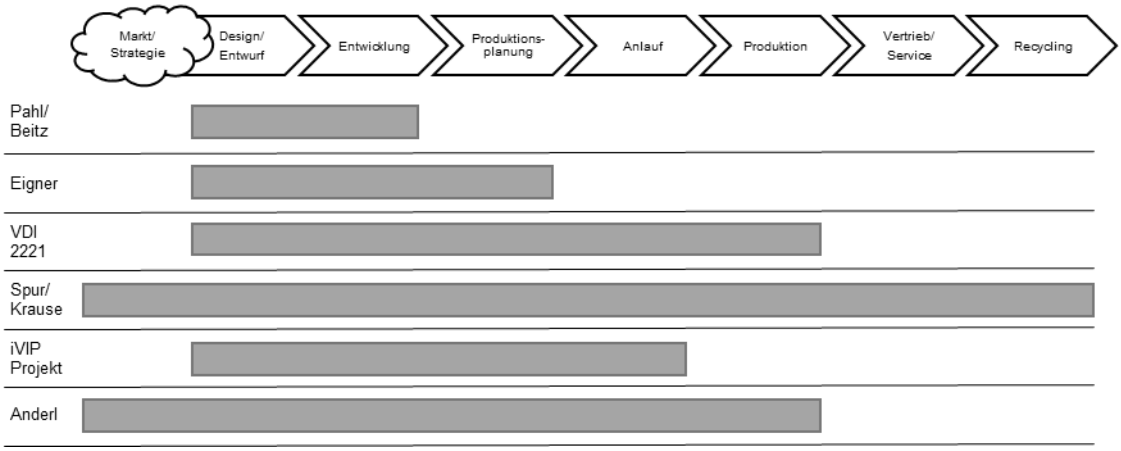

Abbildung 7: Unterschiedliche Sichtweisen auf den PEP [Burr08]

Abbildung 7 zeigt alle Hauptphasen des PEP. Die Betrachtungsräume der gezeigten Quellen wurden entsprechend den Hauptphasen zugeordnet. Der jeweilige Betrachtungsraum unterscheidet sich zum Teil sehr stark voneinander. Eine Betrachtung des allgemeinen PEP, wie er in der Literatur beschrieben wird, ist für diese Arbeit nicht zielführend, da individuelle Charakteristika bezüglich des Karosseriebaus fehlen. Für eine einheitliche Betrachtungsweise wurde daher ein automobiler PEP gemäß Abbildung 8 in einer wesentlich tieferen Detaillierung definiert. Dieser dient als Diskussionsgrundlage der weiteren Ausführungen.

Es findet hierbei eine Einteilung in die Konzept- und Serienphase statt. Eine weitere Unterteilung wird durch sogenannte Meilensteine vorgenommen (9-0). Neben diesen Meilensteinen findet eine weitere Differenzierung in Entwicklung, Produktionsplanung und Technologiemanagement statt. In der Praxis stehen hinter diesen Begriffen Abteilungen,

[6] Teilhaber – eine Gruppe oder Person, die ein Interesse am Ergebnis oder Verlauf eines Projekts oder Prozesses besitzt [Gess09].

die detaillierte Prozessschritte bearbeiten, um das Ziel zu erfüllen, ein Automobil zu entwickeln und zu produzieren. Im Schaubild findet dabei eine Unterscheidung zwischen Haupt- und Teilprozessen statt. Hauptprozesse werden als abgeschrägte Prozesse dargestellt und Teilprozesse als rechteckige.

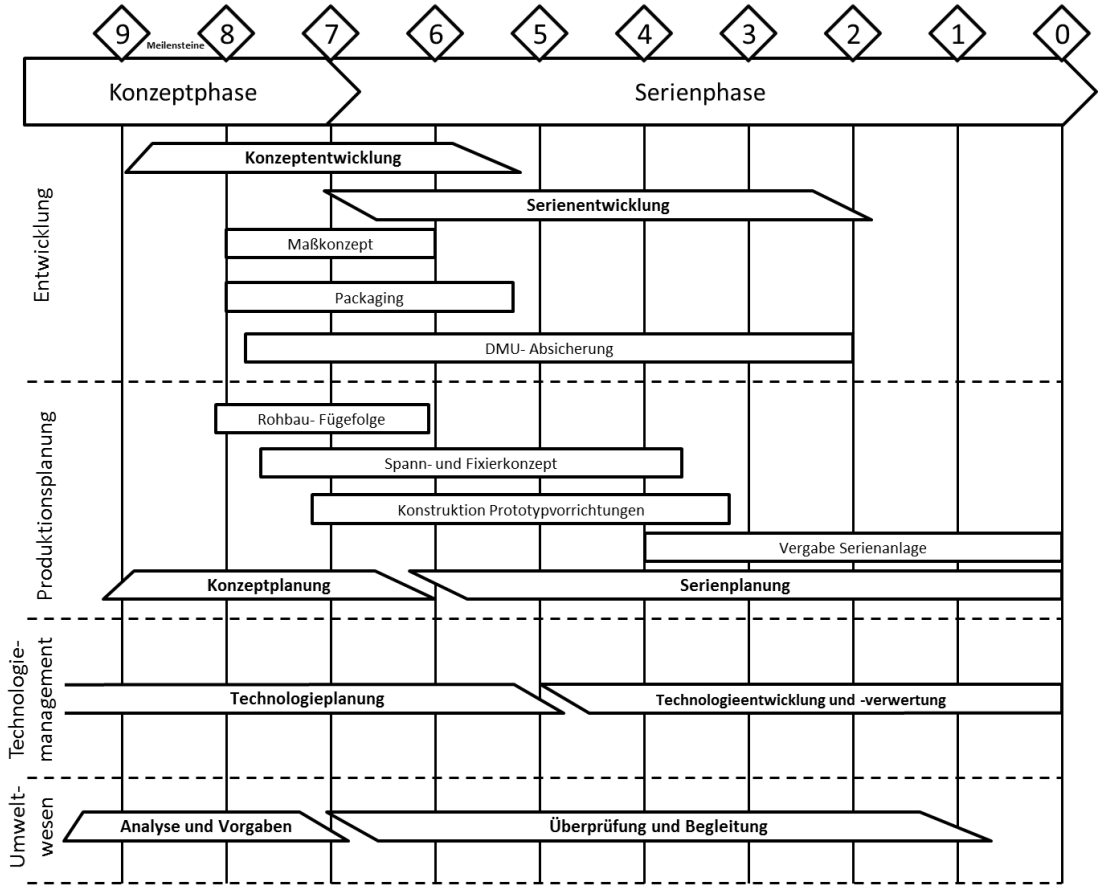

Abbildung 8: Der Produktentstehungsprozess ergänzt und angepasst nach [Burr08]

Während dieser Teilprozesse wird ein Austausch von Informationen durchgeführt, sodass insgesamt eine Verkürzung der Entwicklungszeit durch eine teilweise Parallelisierung der Arbeitsprozesse realisiert werden kann. Diese Art der Zusammenarbeit wird als Simultaneous Engineering (SE) bezeichnet [Ever95, Bull97, Gess01, Ever05, Burr08, Brae12]. Im Folgenden sollen anhand dieses Schaubildes und am Beispiel des Karosserierohbaus die Haupt- und Teilprozesse der Abteilungen beschrieben werden. Die vermittelten Informationen sollen am Ende des Kapitels als Grundlage dienen, um eine kritische Bewertung hinsichtlich der Berücksichtigung des Energiebedarfs im automobilen PEP zu ermöglichen.

2.1 Entwicklung

Die Entwicklung des Karosserierohbaus, im Folgenden als Karosserieentwicklung bezeichnet, kann gemäß den Phasen in Abbildung 8 in die Konzept- und Serienentwicklung

eingeteilt werden. Die Aufgabe dieser Unternehmensbereiche besteht darin, das Fahrzeug im Rahmen der Anforderungen zu definieren und auf Umsetzbarkeit zu prüfen [Brae12]. Durch die hohe Komplexität des Gesamtprodukts entsteht dabei ein hoher Abstimmungsbedarf. Diese Abstimmung erfolgt größtenteils mithilfe von Gesprächen in Meetings, welche in interdisziplinären Teams stattfinden [Schu13]. Um eine Übersicht zu erhalten, wie vielfältig sich diese Anforderungen gestalten, zeigt Abbildung 9 einen Auszug der allgemeinen Anforderungen, die ein Entwickler berücksichtigen muss.

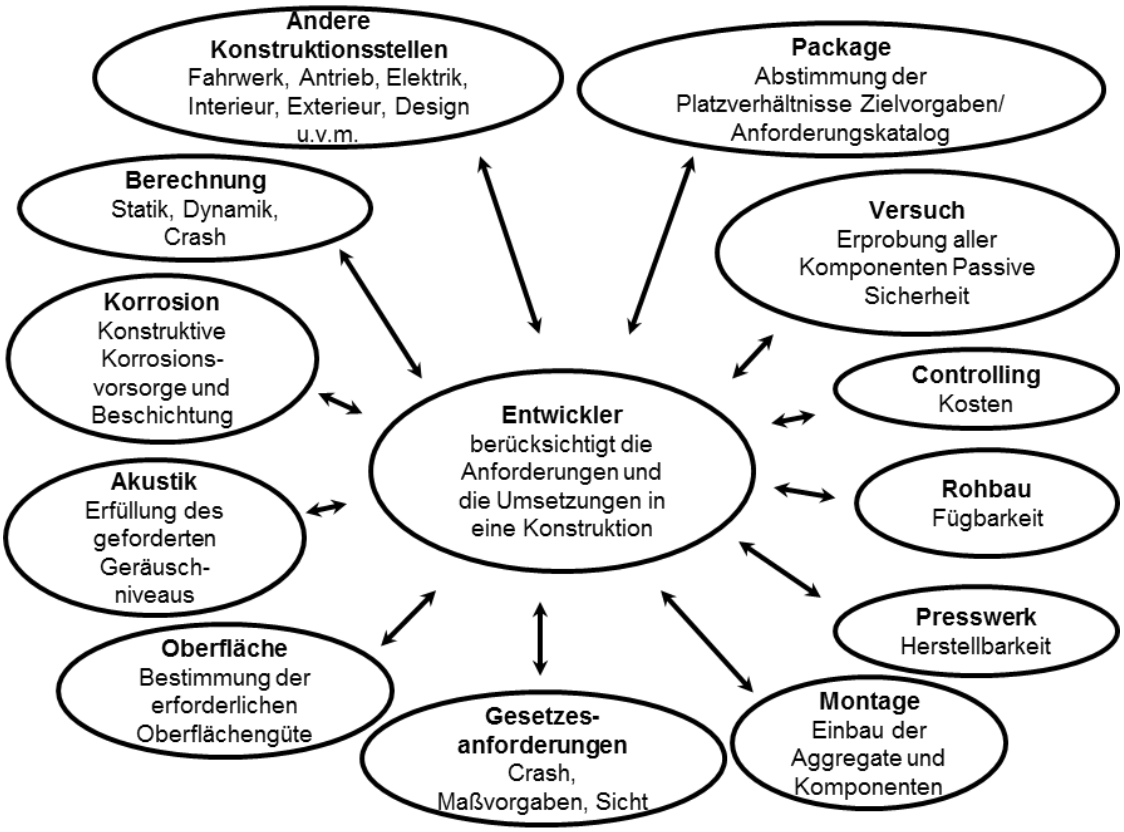

Abbildung 9: Allgemeine Anforderungen an einen Entwickler nach [Grab06]

Die Konzeptentwicklung ist bestrebt, die gestellten Anforderungen möglichst frühzeitig zu berücksichtigen. Dies hat den Vorteil, dass Änderungen aufgrund nicht berücksichtigter Anforderungen in späteren Phasen des PEP reduziert werden können. Kostenintensive Iterationsschleifen können somit begrenzt werden. Das frühzeitige Einbinden von Stakeholdern nachgelagerter Phasen wird auch als integrierte Produktentwicklung bezeichnet [Ever05, Ehrl07b], auf die in Abschnitt 4.1.1 detailliert eingegangen wird. Mittels frühzeitiger Integration der verantwortlichen Bereiche, wie beispielsweise der Produktion, des Kundendienstes oder der Qualitätsabsicherung, soll ein robustes Konzept[7] realisiert werden. Dieses Vorgehen ist wichtig, da die unterschiedlichen Bereiche zum

[7] Als ein robustes Konzept wird ein Konzept bezeichnet, welches kaum nachträglicher Anpassungen bedarf.

Teil gegensätzliche Ziele verfolgen. Für eine erfolgreiche Zielerfüllung ist es deshalb wichtig, Kompromisse zu erarbeiten [Brae12].

Innerhalb der Konzeptentwicklung werden weitreichende Entscheidungen getroffen, hierzu zählt unter anderem die Wahl der einzusetzenden Werkstoffe. Zudem erarbeitet die Konzeptentwicklung ein verbindliches Maßkonzept und Package. Hierbei wird die Karosserie anhand grober Maßvorgaben beschrieben und es werden Bauräume definiert. Das Package wird während der gesamten Entwicklung des Fahrzeugs schrittweise verfeinert, um ständig die technische Machbarkeit des geplanten Produkts und das maßhaltige Zusammenspiel aller Baugruppen sowie Komponenten zu überprüfen [Brae12]. Neben den Bauräumen werden auch die Ergonomie, das Design und die Gesetzesvorgaben berücksichtigt sowie harmonisiert [Broc10]. Dieser Vorgang erfolgt unter der Nutzung eines vollparametrischen CAD-Technikmodells[8] in der DMU-[9]Absicherung. Neben den aufgeführten Tätigkeiten steht die Konzeptentwicklung mit der Konzeptplanung im ständigen Austausch, sodass weitere Arbeitspakete und notwendige Entscheidungen in einem interdisziplinären Team gemeinsam erarbeitet werden können. Oftmals wird hierbei auf Daten und Strukturen von Vorgängermodellen oder vergleichbaren Fahrzeugen zurückgegriffen [Burr08, Brae12]. Hierdurch resultiert ein Zeitvorteil, weil bereits bestehende Informationen aus der Vergangenheit gemäß neuen Anforderungen angepasst werden können.

Ist das Maßkonzept und Package erarbeitet, findet eine Übergabe an die Serienentwicklung statt. Diese beginnt anschließend mit der ersten Detaillierung der Geometrien. Unterstützt wird die Abteilung unter anderem von CAx-Systemen. Innerhalb der CAx-Systeme, speziell des CAD, ist es möglich, erste Baubarkeitsuntersuchungen durchzuführen. Ziel der Serienentwicklung ist dabei die Erstellung eines DMU, welches später das zu fertigende Produkt repräsentiert. Dabei besteht, im Gegensatz zur Konzeptentwicklung, ein wesentlich tieferer Detaillierungsgrad in einer relativ späten Phase des PEP. Die Fügetechnik, die in der Konzeptphase bereits festgelegt wurde, wird in diesem Prozessabschnitt detailliert betrachtet und in die Baugruppen eingeplant. Hierzu müssen spezielle technische Restriktionen der jeweiligen Fügetechnik beachtet werden. Neben den geometrischen Festlegungen für die Fügetechnik ist die Prüfung der erforderlichen Festigkeit von großer Bedeutung für die Crash-Sicherheit. Hierbei findet eine Unterstützung der Berechnungsabteilung statt, die basierend auf Daten des DMU mithilfe von CAE[10]-Anwendungen Belastungen beaufschlagt und auf statische und dynamische Festigkeit prüft, sowie in einer späteren Phase virtuelle Crash-Simulationen durchführt. Sind Änderungen erforderlich, müssen diese in den interdisziplinären Teams diskutiert werden, sodass eine Lösung unter Berücksichtigung aller Interessensgemeinschaften erarbeitet werden kann. Ziel der Konzept- wie auch Serienentwicklung ist es dabei, ein Pro-

[8] Bei dem Technikmodell „handelt sich um eine Zusammenstellung von Schnitten und Strukturknoten, deren Konstruktionssystematik in Berechnungsprogrammen niedergelegt ist“ [Brae12].
[9] Digital Mock-up (digitales Versuchsmodell).
[10] Computer Aided Engineering.

dukt zu entwickeln, welches die Kundenwünsche unter Beachtung von Gesetzesvorlagen und Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit bestmöglich erfüllt. Die Entwicklung bildet dabei einen strategischen Knotenpunkt, da nahezu alle Anforderungen an die Karosserie zusammengetragen und diskutiert werden müssen. Ein wichtiger Partner zur Ausarbeitung dieser Anforderung ist in der Produktionsplanung zu sehen. Im Folgenden wird diese eingehend erläutert.

2.2 Produktionsplanung

Unter der Planung versteht Wöhe die gedankliche Vorwegnahme zukünftigen Handelns durch Abwägen verschiedener Handlungsalternativen und Entscheidungen für den günstigsten Weg [Wöhe13]. Innerhalb des automobilen Karosseriebaus findet analog zur Entwicklung, wie in Abbildung 8 gezeigt, eine Gliederung der Produktionsplanung in die Konzept- und die Serienplanung statt. Die Konzeptplanung trifft die ersten Entscheidungen in einer frühen Phase des PEP und beschäftigt sich allgemein mit der Klärung von Standort-, Infrastruktur- und Technologiefragen [Luck12]. Eine der ersten Entscheidungen, die dem Rohbau- und Fügefolgenkonzept vorausgeht, ist die Auswahl der Fügetechnik. Für das anschließende Fügefolgekonzept werden die Fügestellen in sogenannte Fügegruppen aufgeteilt, die im späteren Ablauf von einer Fertigungszelle bearbeitet werden können. Ist diese Einteilung erfolgt, befindet sich die Konzeptplanungsphase bereits in einem fortgeschrittenen Stadium. An dieser Stelle kann eine Unterstützung durch die Werkzeuge der Digitalen Fabrik stattfinden, wie beispielsweise die Überprüfung der Erreichbarkeit von Fügestellen unter Berücksichtigung der Störgeometrie und des Prozessgerätes. Diese Überprüfung ist wichtig, da durch das Maßkonzept geometrische Vorgaben existieren, die mit der Herstellbarkeit oftmals im Zielkonflikt stehen. Zeitversetzt begleitend wird das Spann- und Fixierkonzept erarbeitet. Darauf aufbauend kann eine erste Abschätzung der Investitionskosten und der Fertigungszeit in der zu diesem Zeitpunkt möglichen Genauigkeit stattfinden. Hierbei muss eine Überprüfung erfolgen, ob das Design in einem wirtschaftlich vertretbaren Verhältnis zur Herstellbarkeit steht. Nachfolgend startet die Konstruktion der Prototypenvorrichtungen, an denen die erarbeiteten Konzepte auf Prozessfähigkeit erprobt werden können. Parallel hierzu beginnt die Serienplanung mit der Detailplanung der späteren Produktion. Anzahl und Aufstellung von Betriebsmitteln werden mithilfe der Digitalen Fabrik ermittelt. Unterschieden wird hier zwischen der Grobplanung und der Feinplanung. Die Grobplanung befasst sich mit der Positionierung und der Anzahl der Fertigungszellen, der Planung des Layouts in der Produktionshalle und der Anzahl der Betriebsmittel, die für die Produktion notwendig sind. In dieser Planungsphase werden erste Abschätzungen der Infrastruktur vorgenommen. Während der Feinplanung werden hingegen die gezielten Bewegungsabläufe der Industrieroboter mithilfe von Software-Tools geplant, damit diese als Basis für die spätere Inbetriebnahme herangezogen werden können. Je nach Planungstiefe werden die Produktionsanlagen an Dienstleister vergeben, die sich mit der anschließenden Realisierung befassen. Ziel der Produktionsplanung ist es, das Produkt in einer vorgegebenen

Zeit, mit minimalen Kosten und bestmöglicher Qualität herstellen zu können. Um dieses Ziel zu erreichen und wettbewerbsfähig bleiben zu können, müssen Trends erkannt und geeignete Technologien bereitgestellt werden [Schu11]. Hierbei werden die beiden vorgestellten Bereiche aus Abschnitt 2.1 und 2.2 vom Technologiemanagement unterstützt. Im Folgenden wird eine Detaillierung dieser Unterstützung vorgenommen.

2.3 Technologiemanagement

Nach Brockhoff umfasst das Technologiemanagement die Beschaffung, Speicherung und Verwertung neuen technologischen Wissens [Broc99]. Der Bereich sieht sich dabei mit der Aufgabe konfrontiert, gezielte Änderungen an einer Technologie, einem Produkt oder der eingesetzten Produktionstechnologie durchzuführen [Bind96, Spur03]. Hat sich ein Unternehmen für die Strategie einer Technologie entschlossen, so muss das vorrangige Ziel sein, alle potenziellen Substitutionsmöglichkeiten vor den Mitbewerbern zu erkennen und zu bewerten [Bull94]. Hierbei steht die frühzeitige Schaffung einer transparenten Wissensbasis für Entwicklung und Produktionsplanung im Vordergrund [Bull94, Möhr08, Wörd08, Spei08, Wall09, Schu11, Schm11]. Das Technologiemanagement ist dabei in sechs Unterfunktionen eingeteilt [Schu11]:

- Technologiefrüherkennung
- Technologieplanung
- Technologieentwicklung
- Technologieverwertung
- Technologieschutz
- Technologiebewertung

Die Technologiefrüherkennung, oder auch Scouting genannt, verfolgt das Ziel, frühzeitig Chancen und Risiken durch neue Technologien aufzudecken [Bull94, Schu11]. Die Technologieplanung ermittelt und systematisiert alle Aktivitäten, Abläufe, Kosten, Ressourcen sowie Termine und stellt die geistige Vorwegnahme zukünftigen Handelns dar [Stre07]. Innerhalb dieser Tätigkeit definiert sie konkrete umsetzbare Vorgaben für den Einsatz und die Entwicklung von Technologien [Schu11]. Die Technologieentwicklung hat nachfolgend das Ziel, die Vorgaben aus der Technologieplanung effizient umzusetzen. Dabei kann eine Verbesserung von bestehenden als auch die Entwicklung neuer Technologien das Ziel sein [Wörd08]. Nach der erfolgreichen Entwicklung kann eine Technologieverwertung durchgeführt werden. Hierbei wird überprüft, ob die neue oder veränderte Technologie auch in weiteren Produkten eingesetzt werden kann oder eine erweiterte Nutzung in zum Beispiel Joint Ventures sinnvoll ist. Eine Maximierung des wirtschaftlichen Nutzens steht hierbei im Vordergrund [Schu11]. Des Weiteren wird für eine optimale Vermarktung der Technologie geprüft, ob im Sinne des Technologieschutzes Markteintrittsbarrieren für Mitbewerber aufgebaut werden können. Alle Phasen des Technologiemanagements werden ergänzt durch die Technologiebewertung. Entscheidungen, die eine Technologiebewertung erfordern, treten in allen der genannten Phasen

auf. Die Fähigkeit zur Auswahl, Anwendung und Beherrschung der angepassten Bewertungsansätze zur jeweiligen Entscheidungssituation ist von hoher Bedeutung [Schu11, Rumm14]. Der gesamte Prozess und das Zusammenwirken der einzelnen Phasen werden als Technologieentwicklungsprozess (TEP) bezeichnet, der im automobilen Karosseriebau begleitend zum PEP stattfindet. Der TEP soll für die Entwicklung und Produktionsplanung eine aktuelle Wissensbasis darstellen.

2.4 Umweltabteilung

Die Umweltabteilung begleitet den Produktentstehungsprozess bereits ab einer sehr frühen Phase. In dieser frühen Phase werden Umwelttargets festgelegt, die primär durch das Produkt selbst eingehalten werden müssen. Zur wichtigsten Aufgabe der Umweltabteilung zählt die Dokumentation der Umwelteinflüsse. Diese werden an den Vorstand berichtet und später öffentlich wirksam eingesetzt durch zum Beispiel Marketingkampagnen. Ziel ist dabei die Erstellung einer Ökobilanz zum Fahrzeug, welche durch eine technische Sicherheitskontrollinstanz wie beispielsweise den TÜV[11] zertifiziert wird. Das Umweltwesen analysiert zunächst den Wettbewerb und definiert auf dieser Basis CO_2-Targets. Dieses CO_2-Target richtet sich nach dem Verbrauch des Fahrzeugs. Hierbei ist das Umweltwesen auch an der Definition des Gewicht-Targets maßgeblich beteiligt. Nach der Konzeptphase findet eine Überprüfung der Targets statt. Hierbei findet in der Serienphase die Überprüfung durch die Ökobilanzierung statt. Mit dieser Methode ist es möglich, die vorgegebenen Umwelttargets reaktiv zu validieren. Die Ökobilanzierung betrachtet dabei alle Phasen der Herstellung, Nutzung und Entsorgung. Eine ganzheitliche Betrachtung der Lebensphasen ist erforderlich, da Entscheidungen aus vorgelagerten Prozessen spätere Phasen energetisch beeinflussen können. Ziel ist es, durch die ganzheitliche Betrachtung energetische Mehraufwendungen im Herstellungsprozess zu rechtfertigen, um den Energiebedarf in der Nutzungsphase zu senken. Ein Beispiel hierfür ist der Leichtbau. Die Umweltabteilung arbeitet dabei mit einer Bilanzierungssoftware, welche auf einer breiten Datenbank aufgebaut ist. Diese Datenbank bietet Informationen zu vielen Materialien und Prozessen und zeigt, welche Schadstoffe, Energien und weitere Hilfsstoffe bei der Produktion eingesetzt wurden und wie durch weitere Prozesse die Umwelt belastet wird. Die Bilanzierung ist dabei sehr komplex und muss durch geeignetes Fachpersonal auf Plausibilität geprüft und danach bewertet werden. Durch die Erstellung der Ökobilanz können die Informationen genutzt werden, um richtungsweisende Empfehlungen auszusprechen und daraus Wissen zu generieren. Ebenfalls ist eine Beurteilung möglich, ob sich die Ökobilanz zu einem automobilen Vorgängermodell verbessert oder verschlechtert hat. Die Produktionsphase, welche zur Realisierung des Produkts notwendig ist, findet erst seit kürzerer Zeit Berücksichtigung, wobei oft die genauen CO_2-Emissionen für den individuell verwendeten Herstellungsprozess fehlen.

[11] Technischer Überwachungsverein.

Im Bezug zu den hier aufgeführten Stakeholdern wurden Mitarbeiter zweier großer Automobilhersteller der Premium- und Mittelklasse zur Berücksichtigung der Größe „Energie“ befragt. Im folgenden Kapitel werden grundlegende Ergebnisse der Befragung dargestellt.

2.5 Empirische Kurzbefragung

In Kapitel 1 wurde dargestellt, dass der Energiebedarf in der Literatur als Größe beschrieben wird, die in der frühen Phase kaum Berücksichtigung findet. Als Hauptgrund dessen wurde vor allem der Mangel an individuellen Daten, Prozessen und Instrumenten genannt. Durch das Kapitel 2 konnte die derzeitige Arbeitsweise im automobilen Karosseriebau dargestellt und Interessengruppen identifiziert werden. Um zielgerichtet vorgehen zu können, wird die in Kapitel 1 erhobene These der Quellen zunächst mit den in Kapitel 2 identifizierten Interessengruppen auf Aktualität überprüft werden, sodass sichergestellt ist, dass sie auch für das Teilgebiet des automobilen Karosseriebaus zutrifft.

Für die Bewertung der Hypothese wurde eine Kurzbefragung in Form eines Workshops durchgeführt. Bei dem Workshop wurden mehrere Mitarbeiter der Konzeptentwicklung und -planung aus der Automobilindustrie involviert und ein Interview durchgeführt. Zudem wurden gemachte Beobachtungen ebenfalls dokumentiert [Bort06].

Am Anfang der Befragung fand für die Workshopteilnehmer eine Darstellung des Ziels statt, Energie bereits in frühen Phasen des Karosseriebaus berücksichtigen zu wollen. Hierfür wurde grundsätzlich gefragt, ob die Menge an Energie bekannt sei, die durch eine Baugruppe oder ein Bauteil während der Herstellung verbraucht wird. Die Antwort der Befragten war, dass der Energiebedarf in später anfallenden Prozessschritten nicht bekannt sei. In der Diskussion stellte sich zusätzlich heraus, dass keine Möglichkeit bekannt sei, Energie als quantitative oder qualitative Größe zu berücksichtigen. Eine Entscheidung zu treffen und gleichzeitig zu wissen, ob diese Entscheidung den Energiebedarf begünstigt oder nicht, ist demnach nicht gegeben. Es würden lediglich gewisse Entscheidungen hinsichtlich der Fügetechnik auf Basis der Fügeäquivalente nach dem Harbour-Report ausgewählt.

Zudem wurde erfragt, ob Methoden oder Instrumente bekannt seien, mit der eine Abschätzung des Energiebedarfs möglich wäre. Bei dieser Frage wurde darauf hingewiesen, dass innerhalb des Unternehmens der CO_2-Bedarf während der Nutzung des Produkts seitens des Umweltwesens ausgewiesen wird. Für Herstellungsprozesse, speziell der Fügetechnik, gäbe es auf Nachfrage in der entsprechenden Abteilung aber keine bekannte Datenbasis. Aufwände könnten allenfalls mit prozentualen Faktoren abgeschätzt werden.

Es wurde während der Diskussion dokumentiert, dass die Bemühungen zur Erreichung eines niedrigen Energiebedarfs vorwiegend in der Produktion gesehen werden. Es wurde erwähnt, dass Druckluftleckagen, der Einsatz effizienter Beleuchtungsmittel oder Schnelllauftore im Fokus der Bemühungen zur Energiebedarfsverminderung stehen.

Das Verständnis, den Energiebedarf in der frühen Phase beeinflussen zu können, wurde nicht gesehen.

Allgemein konnte beobachtet werden, dass das Ziel der Verminderung des Energiebedarfs mit wenig Interesse verfolgt wird und neben der eigentlichen Tätigkeit kaum bis gar nicht berücksichtigt wird. Aufgrund der Erwähnung des Harbour-Äquivalents soll im folgenden Abschnitt allgemein auf Fügeäquivalente eingegangen werden.

2.6 Fügeäquivalente

Fügeäquivalente ermöglichen generell den Vergleich von Fügeverfahren hinsichtlich einer bestimmten Basisgröße. Die Basisgröße ist eine bestimmte Eigenschaft von Fügeverfahren, wie zum Beispiel Festigkeit, Kosten oder eine Kombination daraus. Fügeäquivalente können eine Aussage darüber geben, wie viele Fügestellen eines Fügeverfahrens erforderlich sind, um eine Alternativlösung auf Grundlage der gewählten Basis zu ersetzen. Die Äquivalente werden pro Fügetechnik vergeben und bestehen aus einer einzigen quantitativen kumulierten Größe. Wird beispielsweise die Festigkeit als Basis gewählt, zeigt das Fügeäquivalent auf, welche Nahtlänge beim Laserschweißen zum Beispiel einen Widerstandsschweißpunkt ersetzt. Neben der Vergleichbarkeit der Fügeverfahren selbst können Fügeäquivalente auch dem internen Monitoring über verschiedene Fahrzeuggenerationen hinweg dienen. Ziel ist es dabei, die Anzahl an Äquivalenten von Generation zu Generation zu senken. Ein weiterer Nutzen ergibt sich aus dem möglichen Vergleich mit Fahrzeugen anderer Wettbewerber.

Der nach der amerikanischen Beratungsfirma Harbour Consulting genannte Harbour-Report stellt eine dieser Möglichkeiten dar. Hierbei wird die Anzahl an Fügestellen von Fahrzeugmodellen verschiedener OEMs erfragt und in einem Äquivalent zur jeweiligen Fügetechnik dargestellt. Der Fokus liegt dabei auf allen monetären Aufwendungen, die während der Erstellung einer Karosserie anfallen, normiert auf die günstigste Fügetechnik [Andr07]. Neben dem Harbour-Report gibt es auch firmenspezifische Äquivalente, bei denen die Festigkeit oder auch die Kosten eine Vergleichbarkeit ermöglichen. Kritik kann daran gefunden werden, dass über die genannten Äquivalente kaum eine Dokumentation existiert. Speziell für den Harbour-Report gibt es kaum Transparenz, daher kann eine Betrachtung auf das Äquivalent nur rudimentär erfolgen.

Im folgenden Abschnitt werden die gesammelten Erkenntnisse aus dem gesamten Kapitel kurz zusammengefasst, Definitionen getroffen und ein Fazit gezogen.

2.7 Kritische Diskussion und Fazit

Um eine einheitliche Definition über die frühe Phase zu treffen, wird innerhalb der vorliegenden Arbeit der Zeitraum gewählt, der sich zwischen dem Meilenstein 9 und 7 gemäß Abbildung 8 befindet. In dieser frühen Phase ist das Potential zur Beeinflussung des später anfallenden Energiebedarfs am höchsten, da richtungsweisende Entscheidungen

getroffen werden, die die nachfolgenden Prozesse erheblich beeinflussen. Es findet unter anderem die Festsetzung des Werkstoffs und der Fügetechnik statt, die weitreichenden Einfluss auf nachgelagerte Entscheidungen haben.

Wie bereits im Kapitel 1.1.3 dargestellt, fehlt es zur Berücksichtigung des Energiebedarfs in dieser frühen Phase an individuellen Daten, Prozessen und Instrumenten. Die Aktualität der These konnte durch eine gezielte Kurzbefragung von Experten aus dem automobilen Umfeld überprüft und bestätigt werden.

Für die Entscheidung zur Nutzung einer bestimmten Technologie besteht derzeit keine Möglichkeit, die energetische Auswirkung im automobilen Karosseriebau transparent darzustellen. Das Technologiemanagement hat die Aufgabe, neue Technologien auf die Einsetzbarkeit im Unternehmen zu überprüfen und das technologische Wissen zu beschaffen, zu speichern und zu verwerten. Dieser Aufgabe wird im energetischen Sinne derzeit nicht nachgekommen. Zudem müssen die potenziellen Substitutionsmöglichkeiten erkannt und bewertet werden können. Aus dem einleitenden Kapitel wird deutlich, dass der Energiebedarf eine strategische Größe darstellt. Das Technologiemanagement sollte demnach in die Lage versetzt werden, neue Technologien hinreichend genau bewerten zu können. Fehlt eine dafür notwendige Datenbasis, können energiesensitive[12] Entscheidungen nicht getroffen werden.

Die Umweltabteilung bilanziert derzeit bereits in einem gewissen Umfang Umweltgrößen wie den CO_2-Bedarf und den Energiebedarf des Fahrzeugs während der Nutzungsphase. Es wurde herausgestellt, dass eine ganzheitliche Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus des Produkts wichtig ist, um energetische Mehraufwendungen rechtfertigen zu können. Um dieses Ziel zu erreichen, besteht in der Umweltabteilung ebenfalls ein großes Interesse zur Nutzung individueller Prozessdaten.

Neben den benötigten Prozessdaten ist ungeklärt, welche Methoden derzeit für eine Entscheidungsfindung existieren und wie diese in die bestehenden Konstruktionsmethoden und Arbeitsweisen des automobilen Karosseriebaus integriert werden können. Die Entscheidungsträger des interdisziplinären Teams müssen in die Lage versetzt werden, Energie als Größe innerhalb einer Entscheidung berücksichtigen zu können. Fügeäquivalente können dabei als Ansatz gewertet werden, um Anforderungen zusammenzufassen und als eine einzelne quantitative Größe auszuweisen. Ein großer Nachteil wird innerhalb der Nutzung von Fügeäquivalenten darin gesehen, dass eine Betrachtung anderer Anforderungen und Sichten nicht ausreichend erfolgt und eine Berücksichtigung verschiedener Lebensphasen des Produkts nicht stattfindet, wie es die Umweltabteilung fordert. Der Darstellung einer energetischen Amortisation kann somit nicht nachgekommen werden.

Für eine unterstützende Wissensbasis muss daher analysiert werden, welche energetischen Kennzahlen für richtungsweisende Entscheidungen genutzt werden können. Eine

[12] Findet bei einer Entscheidung eine Berücksichtigung des Energiebedarfs statt, so wird im Rahmen dieser Arbeit von einer energiesensitiven Entscheidung gesprochen. Hierbei steht der Energiebedarf nicht im Vordergrund, sondern stellt lediglich ein Entscheidungskriterium dar, welches bei der Entscheidung berücksichtigt wurde.

Wissensbasis allein genügt an dieser Stelle nicht. Die Kennzahlen müssen aufgrund des bestehenden Zielkonflikts durch gegensätzliche Anforderungen von Entwicklung und Produktionsplanung in die Bewertungsmetrik der Entscheidungen mit geeigneten Methoden integriert werden. Durch die Kurzbefragung konnte der bestehende Zielkonflikt zwischen den Anforderungen rudimentär bestätigt werden. Demnach muss ein Kompromiss zwischen den unterschiedlichen Anforderungen gefunden werden.

Im folgenden Kapitel wird daher der Stand der Forschung aufgezeigt und recherchiert, ob Ansätze existieren, die für eine Lösung der fehlenden Methoden genutzt werden können.

3 Stand der Forschung

Das folgende Kapitel soll genutzt werden, um den derzeitigen Stand der Forschung zu beschreiben. Die vorliegende Arbeit beschreibt allgemeine Arbeitsprozesse sowie Methoden und fokussiert gleichzeitig einen detaillierten Anwendungsfall im Kontext der Fügetechniksubstitution im Karosseriebau. Hieraus entstehen eine Vielzahl an potenziell zu berücksichtigenden Forschungsarbeiten. Abbildung 10 zeigt in einer Word Cloud die Schlagwörter, welche bei der Literaturrecherche genutzt wurden.

Abbildung 10: Word Cloud bisheriger relevanter Schlagwörter

Neben den hier aufgezeigten Schlagwörtern wurde zudem nach interdisziplinärer Literatur recherchiert. Dennoch ist die Anzahl an Forschungsarbeiten nur als eine Auswahl zu betrachten und stellt eine Aufnahme wesentlicher Handlungsansätze dar. Die genannten Schlagworte wurden in einem weiteren Schritt kategorisiert. Im Folgenden werden die als relevant erachteten Forschungsarbeiten tabellarisch zugeordnet und darauffolgend kurz die wichtigsten Erkenntnisse inhaltlich zusammengefasst.

Tabelle 1: Kategorisierung der Forschungsarbeiten

	Phase im PEP	**Zeitliche Einordnung**	**Genutzte Methoden**	**Aufgabenbereich, Beispiel**
[Gudu10]	Entwicklung	Konzeptphase	Energiesensitiver Workflow	PDM und CAD
[Kamm17]	Entwicklung	Frühe Phase	Pareto Analyse	Beispielobjekt: Konsumprodukt
[Götz14]	Entwicklung	-	Prozesskettendar-stellung	Allgemeine Auswahl alternativer Prozess-ketten
[Pfah10]	Entwicklung	Frühe Phase	Life Cycle Assess-ment	Leichtbau
[Zhao13]	Entwicklung	Frühe Phase	EcoDesign	Profilprojektor, KMU
[Fuch14]	Entwicklung	Frühe Phase	TCO, CO_2-Bilanzierung, LCA	Gewichts-abschäzungen
[Müll09]	Fabrikpla-nung	-	-	Planung automobiler Fabriken
[BEAT12]	Produktions-planung	-	Prozessketten-darstellung	Spanende Fertigung
[Beck14]	Produktions-planung	-	-	Zylinderkopffertigung
[Björ10]	Produktions-planung	-	Prozessketten-darstellung	Powertrain
[Busc13]	Produktions-planung	-	Energie-management	Lackiererei
[Goec12]	Produktions-planung	-	Prozessketten-darstellung	Fügetechnik
[Götz13]	Produktions-planung	-	Betriebswirtschaftli-che Methoden	Automobilindustrie B-Säule
[Putz11]	Produktions-planung	-	Prozessketten-darstellung	Kurbelwellenherstel-lung
[Rein13]	Produktions-planung	-	Life Cycle Assess-ment, Prozessket-tendarstellung	Fügetechnik
[Swat15]	Produktions-planung		Energiemessungen	Prozessketten Feinbearbeitung
[Rein07]	Produktions-planung	-	Energiemessungen	Fügetechnik
[Step07]	Produktions-planung	-	Energiemessungen	Fügetechnik
[Scha14]	Produktions-planung	-	Energieverbrauchs-prognose	Automobiler Karos-seriebau
[Born16]	Produktions-planung	Frühe Phase	Energieplanung	Automobiler Karos-seriebau
[Schl04]	Entwicklung und Fertigung	Frühe Phase	Monetäres Kalkulationsmodell	Verschiedene
[Hopf16]	Fabrikpla-nung	-	Fabriksystemmo-dellierung	Fabrikplanung allge-mein
[Gome07]	Technolo-giemanage-ment	Frühe Phase	Technologiepla-nungsmethoden	KMU

Bei der Erstellung der Tabelle wurden Schwerpunkte berücksichtigt, die in der entsprechenden Arbeit hauptsächlich behandelt wurden. Es können durchaus weitere Bereiche behandelt worden sein, die jedoch nicht im Hauptfokus dieser Arbeit lagen. Bei der Literaturrecherche fiel vor allem der hohe Anteil der Arbeiten auf, die der Produktionsplanung zugeordnet werden können. Zudem wurde die Varianz der verwendeten Methoden deutlich.

3.1 Vorstellung der Arbeiten

Die in Tabelle 1 aufgeführten Arbeiten werden in diesem Kapitel kurz inhaltlich zusammengefasst und anschließend kritisch bewertet, um einen potenziellen Forschungsbedarf zu ermitteln. Die Nutzung der verschiedenen Methoden stellt die Basis für das darauffolgende Kapitel dar, in dem diese detailliert betrachtet werden.

3.1.1 Fabrik-/Produktionsplanung

Einige der genannten Arbeiten befassen sich hauptsächlich mit der energieeffizienten Modellierung von Produktionsanlagen [Busc13, Scha14] sowie ganzer Fabriken [Müll09, Hopf16]. Hierbei wird das Energiemanagement [Busc13] verstärkt eingesetzt, um Kennzahlen zu ermitteln.

Schacht zeigt verschiedene Methoden auf, um den späteren Energiebedarf einer Produktionsanlage und dessen Verbrauchscharakteristik in einer für die Serienplanung relativ frühen Phase zu prognostizieren. Hierfür werden detaillierte Messungen der eingesetzten Prozessgeräte in einer hohen Erfassungstiefe benötigt, um eine realitätsnahe Aussage treffen zu können. Ziel ist die wirtschaftliche Auslegung der technischen Gebäudeausrüstung [Scha14]. Darauf aufbauend beschreibt Bornschlegl eine Methode für die Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau [Born16]. Hierbei wird ein so genannter Methods-Energy Measurement Ansatz formuliert, bei dem der Fügeprozess in detaillierte Einzelschritte zerteilt wird. Der Fokus liegt hierbei auf die detaillierten Prozessschritte während des Fügeverfahrens, so dass der potentielle Energieverbrauch einer komplexen Fertigungszelle mit einer bestimmten Unsicherheit abgeschätzt werden kann.

Müller beschreibt umfassend die Planung und den Betrieb von energieeffizienten Fabriken. Hierbei geht er auf die anfallenden Energieverbraucher ein und klassifiziert diese. Die Parameter Druckluft, Beleuchtung, Wärmerückgewinnung liegen im Fokus der Planungsbestrebungen [Müll09]. Hopf geht darauf aufbauend noch einen Schritt weiter und wendet die Methodik der Systemmodellierung an. Er nutzt dabei die Life-Cycle-Assessment(LCA)-Software Umberto® [Hopf16]. Ein ähnliches Vorgehen wird von Swat genutzt [Swat15]. Individuelle Messungen zweier ausgewählter Fertigungsverfahren, hier im Bereich der Feinbearbeitung, werden genutzt, um ein Konzept zur Gliederung von Energieplanungsdaten zu erstellen. Der Energiebedarf von alternativen Fertigungsprozessket-

ten soll so frühzeitig abgeschätzt werden können und eine Berücksichtigung als ein Kriterium bei der Planung und Gestaltung der Prozessketten stattfinden. Unterschiedliche LCA Software findet hierbei Einsatz.

Buschmann fokussiert sich auf die systematische Optimierung eines bestehenden technischen Systems mittels effizienzfördernden Energiemanagements im Fabrikbetrieb. Als Untersuchungsobjekt wurde die automobile Lackiererei gewählt. Energiedaten werden dem Mitarbeiter mittels geeigneter Kennzahlen durch ein Informationssystem zur Verfügung gestellt. Hierbei werden Kennzahlen aus den verschiedenen Betriebszuständen der Produktionsanlage abgebildet, wie beispielsweise dem Stand-by [Busc13].

Besonders der Bereich der Werkzeugmaschinen beziehungsweise die spanende Fertigung [Putz11, BEAT12, Rein13, Götz13, Beck14] wird von einigen der genannten Forschungsarbeiten behandelt. In diesem Forschungsfeld steht vor allem die Auswahl von Prozessketten im Vordergrund, das heißt die intelligente Wahl von Prozessen, um das von der Entwicklung vorgegebene Design so ressourcenschonend beziehungsweise energieeffizient wie möglich herstellen zu können.

Für den Bereich der Werkzeugmaschinen wurden Instrumente kreiert, die es ermöglichen sollen, die energieeffizienteste Prozesskette auszuwählen. Das BEATool beispielsweise führt den Anwender auf Basis der generischen Datenbank GaBi durch die Sachbilanz und soll den Prozess somit vereinfachen. Bei diesem Vorgehen wurde auf den sehr zeit- und informationsintensiven Prozess der Sachbilanz der LCA reagiert. Durch die Bereitstellung einer Assistenz kann die Komplexität in einem gewissen Maße verringert werden [BEAT12].

Die Darstellung der Prozessketten und deren wirtschaftlichen Größen wie Abschreibungen, Raumkosten und Energie in der Form von Kosten werden in einigen Arbeiten thematisiert [Björ10, Putz11, Goec12, Rein13, Götz13]. Im Fokus stehen hierbei vor allem Umform-, Urform-, Füge- und Trennprozesse. Die Gestalt des Produkts wird indirekt als feste Größe angenommen. Auf die mögliche Einflussnahme im Bereich der Entwicklung wird jedoch häufig oberflächlich hingewiesen. Putz verfolgt das Ziel, durch die Darstellung der verschiedenen Prozessketten die Beteiligten für ein besseres Prozess- und Energieverständnis zu sensibilisieren [Putz11].

Reinhardt gliedert das Vorgehen seiner Forschung in vier Phasen auf. Zuerst werden alternative Prozessketten zur Herstellung ermittelt. In der zweiten Phase werden die Ressourcenströme modelliert und quantifiziert. In der dritten Phase findet eine Betrachtung der Wirkung von eingesetzten Ressourcen auf die Umwelt statt. In der vierten und letzten Phase werden Kennzahlen zur quantitativen Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung bestimmt, die die ersten drei Phasen in sich vereinen. Diese Kennzahl besteht aus detaillierten Vorgängen, die in der Fertigung ausgeführt werden. Zur Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit wurde, ähnlich wie beim BEAT-Projekt, eine Software entwickelt. Der Anwender wird durch die zugrunde liegende systemtheoretische Modellierung der jeweiligen Prozesskette geleitet und schrittweise zur Dateneingabe aufgefordert [Rein13].

Becker beschreibt seine Untersuchungen zur Energie- und Ressourceneffizienz am Beispiel der Zylinderkopffertigung. Hierzu identifiziert er Energieeinsparpotentiale mithilfe der Stoff- und Energieströme und stellt Energie- und Ressourcenverbräuche für einzelne Prozesselemente entlang der gesamten Prozesskette der Zylinderkopffertigung auf. Neben der Aufnahme der Energiebedarfsdaten stellt er die Abläufe mit der Software Plant Simulation von Siemens PLM dar. Hierbei arbeitet er neben der Produktionssteuerung, dem Produktionsprozess und dem Wirkungsgrad einzelner Maschinen den Handlungsansatz der Produktgestaltung heraus. Mit der Produktgestaltung kann durch die Reduzierung von Varianten ein positiver energetischer Effekt erzielt werden, wie auch die direkte Energieoptimierung der Produktgestalt. Zudem entfallen durch eine zielgerichtete Produktgestaltung bestimmte Arbeitsschritte und damit einhergehende Bearbeitungslinien, die im Vergleich zum Vorgängermodell nicht mehr benötigt werden [Beck14].

Reinstettel und Stephan beschäftigen sich mit der Messung der Energie während der Fügetechnik innerhalb des Karosseriebaus [Rein07], [Step07]. Stephan zieht in seiner Arbeit eine Systemgrenze innerhalb der Fabrik und schließt die Herstellung von Fügeelementen und Hilfsstoffen aus. Ziel der Untersuchung ist eine Bewertungsmethodik für Fertigungsverfahren im Karosseriebau. Die Bewertungsmethodik nutzt ein sogenanntes Greengate. Es stellt eine verkürzte Ökobilanzierung dar und verwendet die Datenbasis der Life-Cycle-Assessment-Software GaBi. Der Grund für die Nutzung dieser verkürzten LCA ist das Streben nach einer praktikablen Bewertungsmethodik [Step07]. Bei der verkürzten Bewertungsmethodik stehen neben dem Energiebedarf auch Umweltgrößen wie beispielsweise das Treibhaus- und das Ozonabbaupotential im Vordergrund. Eine Vergleichbarkeit der Fügetechnik wird unter der Nutzung der Scherzugfestigkeit realisiert. Begründet wird dieses Vorgehen durch die überwiegend im Karosseriebau eingesetzte Überlappverbindung (Schalenbauweise) [Step07]. Dieses Vorgehen wird auch von Reinstettel genutzt. Reinstettel verfolgt in seiner Forschungsarbeit nicht direkt das Ziel, Umwelt- oder Energiegrößen zu optimieren. Basierend auf seiner Zielstellung zur Laboruntersuchung der Prozessstabilität beim Niet-Clinchen erhebt er unterschiedliche Messgrößen während des Prozesses. Neben monetären Größen wie Fügeelementkosten werden auch die Energiekosten während des Fügeverfahrens dokumentiert. Im Fokus stehen jedoch die Prozesssicherheit des Niet-Clinch-Verfahrens und deren Verbesserung [Rein07].

3.1.2 Entwicklung

Gudula beschreibt in einem Bericht, wie eine IT-Unterstützung zur energiesensitiven Produktentwicklung erfolgen kann. Im Fokus stehen hierbei das PDM sowie das ERP-System. Am Beispiel der Werkzeugmaschinen beschreiben die Autoren einen Property-Driven-Design-Ansatz. Mittels Business-Process-Model-and-Notation-Modellierung wird ein Workflow definiert, der eine mögliche Vorgehensweise zur Berücksichtigung des Energiebedarfs vorschlägt. Hierbei werden verschiedene Hierarchien gebildet. Zuerst wird der gesamte Energiebedarf analysiert sowie danach optimiert, um anschließend eine Abschätzung erfolgen zu lassen [Gudu10].

Kammerl beschreibt in einem Beitrag, wie EcoDesign mithilfe eines Drei-Schichten-Vorgehensmodells im Produktentwicklungsprozess genutzt werden kann. Die erste Schicht wird als Problemebene bezeichnet. Hier werden die Eigenschaften identifiziert, die mit dem neuen Produkt verbessert werden sollen. In der zweiten Ebene werden Ziele festgelegt, die konkret zu erreichen sind. In der dritten Schicht werden Maßnahmen definiert, die durchgeführt werden können, um die vorher definierten Ziele einzuhalten. Das Schichtmodell wird am Beispiel eines Ice Crushers beschrieben [Kamm17].

Götze beschreibt in einem Beitrag, wie anhand von Produkt- und Prozesskettenalternativen verschiedene Szenarios im Bereich der Werkzeugmaschinen aufgebaut werden können. Als Basis dient hierbei die Entscheidungstheorie, die Ziele, Alternativen, Umweltzustände und die Ergebnisfunktion nutzt. Ähnlich wie bei Pape wird ein Vorgehensmodell formuliert, welches Lösungsalternativen basierend auf Restriktionen sukzessiv einschränkt und anhand von Präferenzen bewertet [Pape13, Pape14]. Hierzu werden im Beitrag unterschiedliche Bewertungsmöglichkeiten vorgeschlagen und ein Gesamtprozess beschrieben [Götz14].

Zhao behandelt in seiner Arbeit das integrierte Management von ökonomischen und ökologischen Produkteigenschaften in kleinen und mittleren Unternehmen. Hierbei setzt er den Fokus auf die Berücksichtigung weiterer Anforderungen, die neben den rein ökologischen bestehen und mit diesen gegebenenfalls in Konkurrenz stehen. Ziel seiner Arbeit ist die Integration der Anforderung „Umwelt“ in die Entwicklung trotz der bestehenden Zielkonflikte. Er nutzt die theoretische Basis der Eigenschaftstheorie, wobei er bei jedem neuen Produkt eine Eco-Bewertung durchführt, um ökonomische und ökologische Schwachstellen herauszustellen. Zusätzlich leitet er einen Kontinuierlichen Verbesserungsprozess (KVP) ab, indem er die erkannten Schwachstellen in einen Maßnahmenkatalog einpflegt. Als Instrument dient eine softwaretechnische Implementierung in Microsoft Access als eine sogenannte Maßnahmen-Eigenschafts-Matrix. Hierfür ist die detaillierte Eingabe von betriebswirtschaftlichen und technologischen Parametern nötig. Das Ergebnis ist die Möglichkeit, eine ökologische Bewertung mit relativ einfachen Mitteln durchzuführen, wobei neben den ökologischen auch ökonomische Größen Beachtung finden [Zhao13].

Pfahler beschreibt in seinem Beitrag, wie eine Bewertung von Leichtbaumaßnahmen in der frühen Phase der Produktentwicklung durchgeführt werden kann. Hierbei wird ein Vorgehen nach dem Lebenszyklusmodell empfohlen, wobei bei dieser Betrachtung von einem intelligenten Leichtbau gesprochen wird. Der Energiebedarf wird während der Herstellung in einem Schaubild der Nutzung gegenübergestellt. Somit ist sichergestellt, dass die Energie, welche in der Nutzungsphase eingespart wird, nicht in der Herstellungsphase verbraucht wird. Es werden mittlere Verbrauchskennzahlen genutzt, die mit der durchschnittlichen Fahrleistung eines Pkw in Relation gesetzt werden. Zudem werden Verbrauchseinsparungen des Pkw pro Gewicht ermittelt und in das Gesamtschaubild eingebracht. Mit diesen Kennzahlen ist die Errechnung einer energetischen Amortisation möglich [Pfah10].

Fuchs thematisiert in einer Dissertationsschrift eine Berechnungsmethode zur Ermittlung des Gesamtfahrzeuggewichts [Fuch14]. Hierbei finden auch CO_2-Emissionen Berücksichtigung. Neuartig ist hierbei, dass das Fahrzeug in Komponentengruppen unterteilt wird; die Gesamtfahrzeugmasse ergibt sich somit aus der Summe der Massen der genutzten Gruppen. Bei dem erarbeiteten Gesamtfahrzeug-Gewichtsmodell werden auch Längsdynamikeigenschaften berücksichtigt. Kenngrößen wie der Luft- und Rollwiderstandsbeiwert sowie das Massenträgheitsmoment werden dabei in einem parametrischen Modell hinterlegt. Die in der Arbeit vorgestellte Methode zur Masseabschätzung bietet dabei nach eigenen Aussagen eine deutlich höhere Genauigkeit als die zuvor verwendeten Abschätzungsmethoden.

Um der Problematik der Unsicherheit in frühen Phasen zu begegnen, beschreibt Schlößer ein eigenes Kalkulationsmodell, welches für unbekannte Produkte und Verfahren genutzt werden kann [Schl04]. Der Unterschied bei der entwickelten Methode besteht darin, dass auf die Eingabe von Kalkulationsparametern wie Stundensätze oder Taktzeiten eines bereits existierenden Prozesses verzichtet werden kann. Eine Nutzung von Datenbanken führt in seiner Methode zu einer technisch orientierten Kostenermittlung. Energie wird hierbei als Kostenfaktor betrachtet.

3.1.3 Technologiemanagement

Gomeringer beschreibt in seiner Dissertation eine integrative, prognosebasierte Vorgehensweise zur strategischen Technologieplanung für Produkte. Hierfür untersuchte er bestehende Technologieplanungsprozesse. Es zeigte sich, dass die Planung von Produkttechnologien in der Inventionsphase nicht ausreichend berücksichtigt wird und unter anderem Defizite bei der Integration der Prognoseaufgabe und der integrierten Planung der Technologieziele und -wege aufweisen. Es konnte weiter gezeigt werden, dass bestehende Ansätze und einzelmethodenbasierte Technologieplanungsansätze nicht alle notwendigen Aufgaben der Technologieplanung unterstützen und ebenfalls relevante Defizite aufweisen. Zur Optionsgenerierung werden vorwiegend Kreativitätstechniken verwendet und mit Workshop- und Moderationstechniken unterstützt. Da die Bewertungsaufgabe sehr vielfältig ist, wurden zur Bewertung der Technologien mehrere Technologieportfolios entwickelt und für die Ziele eine prognostische Bewertung sowie die Nutzwertanalyse verwendet. Die Umsetzungsplanung und Entscheidungsfindung konnten mit Projektportfolios unterstützt werden. Im Rahmen der Arbeit wurde gezeigt, dass für die Generierung der Technologieinformationen die Einbindung von externen Experten ein geeignetes Mittel ist. Damit fundierte Entscheidungen getroffen werden können, wurde darauf hingewiesen, dass die ermittelten Informationen verlässlich sein müssen. Um dies zu gewährleisten, besteht weiterer Forschungsbedarf in der Identifikation der „richtigen“ Experten, die für neue, mit großen Unsicherheiten behaftete Technologien, fundierte Aussagen treffen können [Gome07].

3.2 Forschungsbedarf

Jede der vorgestellten Arbeiten bringt Ansätze hervor, die für eine Verminderung des Energiebedarfs einen Nutzen bringen können. Tabelle 1 zeigt jedoch, dass keine Lösung existiert, die in der frühen Phase der Produktentwicklung im speziellen Umfeld des Karosseriebaus eingesetzt wird. Im Fokus dieser Arbeit steht die frühe Karosserieentwicklungsphase, die spezielle Anforderungen und Arbeitsweisen mit sich bringt. Anforderungen durch diese speziellen Arbeitsweisen in der frühen Entwicklungsphase werden in den vorgestellten Arbeiten nur unzureichend berücksichtigt. Wie im Kapitel 2 beschrieben, sind in der frühen Phase nur bestimmte Informationen verfügbar und können sich aufgrund der Iterationsschleifen durch das interdisziplinäre Team zudem häufig ändern.

Zudem wird in allen Arbeiten auf das Produkt „Karosserie“ kaum Rücksicht genommen. Eine automobile Karosserie stellt individuelle Anforderungen an die Produktentwicklung und es kommen Fertigungsprozesse zum Einsatz, die sich von der spanenden Fertigung stark unterscheiden, wie es von mehreren Arbeiten belegt wird [Putz11, BEAT12, Rein13, Götz13, Beck14]. Im automobilen Karosseriebau werden zum Großteil Anpassungskonstruktionen durchgeführt. Das bedeutet, dass einige Informationen bereits durch das Vorgängermodell beschrieben worden sind und zum Teil übernommen werden können. Zudem ist die Stückzahl sehr hoch, sodass sich auch geringe Energieeinsparungen summieren und beachtet werden sollten [Pisc16].

In nahezu allen Arbeiten wird der Lebenszyklus nur unzureichend betrachtet. Ein Automobil stellt ein Produkt dar, welches während der Nutzungsphase den Großteil an Energie verbraucht [Wars12]. Zudem beeinflussen die Bauteile und daraus resultierenden Baugruppen den Energiebedarf während der Nutzungsphase. Die Betrachtung und Darstellung der Auswirkungen von Entwicklungsentscheidungen auf diese Phase findet jedoch nur von Pfahler und Fuchs statt [Pfah10, Fuch14]. Fuchs nutzt hierbei stark pauschalisierte Kenngrößen und nutzt vorwiegend CO_2 oder monetäre Kennwerte. Die Nutzung von CO_2-Emissionen bringt den großen Nachteil mit sich, dass der Energieverbrauch nur indirekt in den Emissionen enthalten ist. Werden hauptsächlich regenerative Energien für den gleichen Prozess eingesetzt, dann reduziert sich augenblicklich die CO_2-Emission, obwohl der Energieverbrauch gleich bleibt. Auch monetäre Größen bringen den Nachteil mit sich, dass durch schwankende Energiepreise der tatsächliche Energieverbrauch in den Hintergrund gerät und die Vergleichbarkeit nicht gegeben ist. Ziel sollte es daher sein, die Grundgröße des Energieverbrauchs zu berücksichtigen.

Die Automobilisten bedienen sich unterschiedlicher Derivate, um einen breiten Kundenkreis zu bedienen. Von der Oberklasse bis zum Kompaktwagen spielt Energie eine unterschiedliche Rolle, da auch die Kunden unterschiedliche Wertvorstellungen haben. Eine Berücksichtigung dieser Interessen findet bei der Auswahl der Prozesskette, wenn sie denn Einfluss auf Anforderungen des Kunden hat, nicht statt.

Keine der aufgeführten Arbeiten beschreibt, wie die Auswahl energieeffizienter Prozessketten in die Entwicklung integriert werden kann. In vielen der genannten Arbeiten wer-

den energieeffiziente Prozessketten dargestellt und ermittelt, welche der Ketten hauptsächlich aufgrund ökonomischer Gesichtspunkte gewählt werden sollten [Björ10, Putz11, Goec12, Rein13, Götz13]. Wie jedoch eine Entscheidungsfindung in die heutige allgemeine Arbeitsweise beziehungsweise speziell in die Karosserieentwicklung integriert werden kann, bleibt unklar.

In einigen Arbeiten wird beschrieben, dass von der Entwicklung anzustrebende Energieziele formuliert werden sollen. Ein Lastenheft mit konkreten quantitativen Größen zu füllen und zu kommunizieren ist prinzipiell ein strukturiertes Vorgehen, was jedoch bedingt, dass die Größe der Energie transparent ist. Diese Transparenz ist jedoch oftmals durch fehlende Energiedaten nicht gegeben [Atik01, Schu02, Spei08, Zhao13, Beck14]. Durch die Arbeitsweise der integrierten Produktentwicklung ist es durch den auftretenden Zielkonflikt [Abel08] nötig, Kompromisse zu erarbeiten. Durch den hohen Automatisierungsgrad und die Anpassungskonstruktionen in dem automobilen Karosseriebau sind die verfügbaren Entscheidungsräume, die ein Karosserieentwickler wählen kann, stark eingeschränkt. Die Ziele würden zudem entsprechend eng auf Basis des Vorgängermodells definiert werden. Findet diese enge Definition mit allen Zielgrößen statt, muss durch die Kompromissfindungsphase zwangsläufig gegen einige dieser Größen wissentlich verstoßen werden. Wie sich die Größe des Energiebedarfs hier eingliedern lässt, wird nicht beschrieben.

Zudem ist ungeklärt, in welcher Form Daten erhoben werden müssen, um für die frühe Phase der Karosserieentwicklung eine richtungsweisende Transparenz zu erzeugen. Reinstettel identifiziert eine gemeinsame Basis, auf der eine Vergleichbarkeit der Fügetechnik bezüglich der Hauptaufgabe, Festigkeit zu schaffen, kreiert wird [Rein07]. Es werden keine Empfehlungen ausgesprochen, wie fehlende Energiewerte von einem Unternehmen aufgenommen werden müssen und wie eine Integration in den Produktentstehungsprozess erfolgen sollte.

Es wird keine Definition durchgeführt, welche Anforderungen an die Messgrößen gestellt werden. Findet eine Betrachtung der frühen Phase statt, muss herausgestellt werden, welche Messgenauigkeit zielführend ist. Der Energiebedarf ist zudem je nach Prozessgerät unterschiedlich, sodass eine zu detaillierte Betrachtung keinen Sinn macht. Reinhardt stellt zum Beispiel Energiewerte für den Transport beziehungsweise den Abtransport dar [Rein13]. Eine Aussage in einer Phase, an der Standort- sowie weitere Detailfragen noch nicht geklärt wurden, ist somit nicht zielführend und stellt eine Unsicherheit dar, die es zu berücksichtigen gilt. Eine Berücksichtigung kann demnach erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.

Findet eine Betrachtung des Energieverbrauchs in monetärer Form statt, wie es z.B. von Schlößer gemacht wird [Schl04]. Wird grundsätzlich die elementare Größe Energie umgerechnet. Eine Wandlung der Größe findet somit in eine Einheit statt, die von vielen Personen interpretiert werden kann und auf denen Entscheidungen getroffen werden können. In dieser Arbeit soll verstärkt der Energieaspekt betrachtet werden, der durch die Umwandlung in monetäre Größen verfälscht werden würde. Energiepreise sorgen

dafür, dass ggf. keine Vergleiche mit Daten aus der Vergangenheit gezogen werden können. Die Berücksichtigung der Umrechnungsfaktoren ist zwar bei einer guten Dokumentation jederzeit möglich, dennoch stellt es einen weiteren Schritt dar. Die direkte Berücksichtigung der Energie wird demnach in einem ersten Schritt als zielführend bewertet.

Zusammenfassend kann herausgestellt werden, dass derzeit noch keine individuelle Lösung für eine frühzeitige energiesensitive Karosserieentwicklung existiert und innerhalb dieses Feldes ein Forschungsbedarf vorliegt. Innerhalb dieses Abschnitts wurden einige Forschungsarbeiten genannt und kurz vorgestellt. Hierbei wurden Methoden genannt, die im folgenden Kapitel vorgestellt und darauffolgend hinsichtlich der Arbeitsweise des automobilen Karosseriebaus diskutiert werden. Ziel ist es herauszustellen, weshalb allgemeine Methoden bisher nicht zur Erreichung einer frühzeitigen energiesensitiven Produktentwicklung im Karosseriebau ausreichen.

4 Diskussion allgemeiner Methoden und Instrumente

Das folgende Kapitel dient dazu, allgemeine Konstruktionsmethoden darzustellen und zu bewerten, ob innerhalb dieser Methoden ein potenzieller Ansatz für eine Integration der Anforderung des Energiebedarfs in die frühe Phase zu finden ist. Die gewählten Konstruktionsmethoden werden im ersten Abschnitt zunächst erklärt und danach kritisch diskutiert. Im Abschnitt 4.2 wird dargestellt, welche grundsätzlichen Methoden bestehen, um eine Bewertung der Energie während des Produktlebenszyklus zu ermöglichen. Anschließend werden im dritten Unterkapitel umgesetzte Instrumente vorgestellt, in denen die genannten Methoden teilweise Anwendung finden und eine erste Unterstützungsmöglichkeit für die Entscheidungsträger bieten. Bei den gezeigten Methoden und Instrumenten handelt es sich jeweils um eine Auswahl, die zum Teil aus Kapitel 3 entstammen. Zusätzliche Methoden wurden ergänzt, weil sie für diese Arbeit als relevant eingestuft wurden. Die Auswahl erhebt dabei aufgrund der Vielzahl an Methoden keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

4.1 Konstruktionsmethoden

Neben der Methode der integrierten Produktentwicklung, die eine Berücksichtigung von allgemeinen Anforderungen in der Produktentwicklung ermöglicht, werden weitere Methoden vorgestellt, die es erlauben, spezielle Anforderungen wie zum Beispiel den Energiebedarf oder weitere Umweltgrößen in die frühe Phase der Produktentwicklung zu integrieren. Hierbei wurden für diese Arbeit das Design for X und das EcoDesign identifiziert. Neben diesen speziellen Methoden wurde aufgrund des bereits genannten Zielkonfliktes innerhalb der Karosserieentwicklung die Nutzung von Bewertungsmethoden als notwendig erachtet, um objektive Entscheidungen durch einen Kompromiss treffen zu können. Ansätze bieten hier die Technikbewertung und die Entscheidungstheorie, welche im vierten und fünften Unterkapitel beschrieben werden. Am Ende findet eine kritische Betrachtung der aufgenommenen Methoden hinsichtlich der Eignung einer frühzeitigen energiesensitiven Produktentwicklung statt.

4.1.1 Integrierte Produktentwicklung

Aus Kapitel 2.1 ging hervor, dass die integrierte Produktentwicklung die derzeitige Arbeitsweise im automobilen Karosseriebau darstellt. Die integrierte Produktentwicklung betrachtet alle Phasen des PEP [Ehrl07b], fokussiert aber vor allem die frühe Phase [Ever05]. Hierbei findet eine Integration nachgelagerter Prozesse statt, wobei der Entwickler Auswirkungen berücksichtigen muss, die über seinen eigenen Arbeitsbereich und Wissensstand hinausgehen. Daher ist bei dieser Methode eine enge Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Abteilungen notwendig. Während bei einer sequenziellen Arbeitsweise Meilensteine das Ende und den Start der Arbeitsprozesse bestimmen, ist der Übergang bei der integrierten Produktentwicklung weitestgehend fließend, jedoch nicht vollständig parallel. Die dabei nötige Abstimmung findet in interdisziplinären Teams

statt. Experten tauschen sich in Meetings aus und vertreten die Interessen der entsprechenden Abteilung, um zielgerichtete Entscheidungen zu treffen. Bullinger beschrieb bereits 1990 durch eine empirische Untersuchung die Notwendigkeit, verschiedene Abteilungen früh in den PEP einzubinden, um eine Verkürzung der Produktentwicklungszeit zu realisieren [Bull90]. Eine Verkürzung der Entwicklungszeit ist durch die frühzeitige Einbindung von Experten aber nicht der einzige positive Effekt. Zusätzlich können die Kosten durch das Fehlen von Iterationsschritten gesenkt und die Qualität verbessert werden [Ehrl07a], da potenzielle Fehler bereits frühzeitig aufgedeckt und proaktiv verhindert werden können. Dieses Vorgehen wird auch als Frontloading bezeichnet und ist in Abbildung 11 dargestellt.

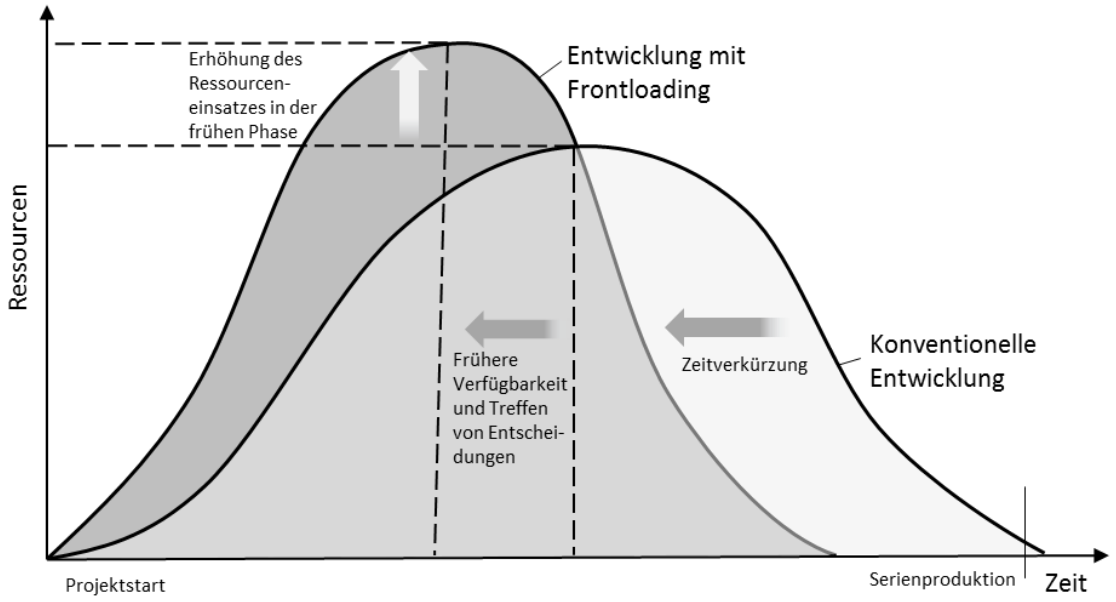

Abbildung 11: Vorteile durch Nutzung von Frontloading nach [Ovtc10]

Der später anfallende Energiebedarf wird als Größe eines nachgelagerten Prozesses verstanden und sollte demnach von einem Experten frühzeitig vertreten werden. Aufgrund des Zielkonflikts zwischen den einzelnen Interessensvertretern reicht es jedoch nicht aus, einen weiteren Experten in die Abstimmungsmeetings der interdisziplinären Teams zu integrieren. Die Anforderung des Energiebedarfs stellt eine weitere Anforderung dar, die sich neben vielen weiteren durchsetzen muss. Es wird demnach nach konkreteren Ansätzen gesucht, die die zielgerichtete Berücksichtigung dieser Größe erlaubt. Einen der identifizierten Ansätze stellt das Design for X dar, auf das im Folgenden eingegangen wird.

4.1.2 Design for X

Unter dem Begriff Design for X (DfX) oder auch Design to X subsumiert sich eine Reihe von Gestaltungsrichtlinien für die Produktentwicklung. Das „X“ stellt dabei einen Platzhalter für verschiedene Hauptzielsetzungen dar, die in der Produktentwicklung verfolgt

werden [Ponn11]. Um ein DfX durchzuführen, bedarf es einer Berücksichtigung der hierfür erforderlichen Anforderungen [Boot11]. Diese Berücksichtigung sollte idealerweise in der frühen Phase stattfinden [Ponn11, Meer00], da in diesem Prozessabschnitt die größte Wirksamkeit zu erwarten ist. Unterstützende Instrumente und Methoden gestalten sich vielfältig [Luck12]. Der umfangreichste Bereich des DfX ist das Design for Manufacturability (DfM) [Bral98, Tarr07, Ulri12]. Ein DfX kann umgesetzt werden, indem ein interdisziplinäres Team zielgerichtet, eng zusammenarbeitet und andere Unternehmensbereiche der Produktentwicklung beratend tätig sind [Bral98, Tarr07, Boot11, Ulri12, Luck12]. Im Zuge der Literaturrecherche wurde deutlich, dass weitere Kategorien im Bereich der Energie/Umwelt für DfX-Ansätze existieren. Für diese Arbeit wurde das Design for Environment (DfEv) als bedeutend identifiziert. Es beinhaltet unter anderem das Design for Energy (Efficiency) (DfE) [Zhao13]. Für die Unterkategorie DfE wurden jedoch keine Gestaltungsrichtlinien oder Methoden gefunden, die hinreichende Hilfestellungen bieten, um das beschriebene Forschungsproblem zu lösen. Für das DfEv existieren Methoden und Richtlinien in Form des EcoDesigns. Das folgende Kapitel geht daher näher auf die Methode des EcoDesigns ein und stellt die allgemeinen Ziele dar.

4.1.3 EcoDesign

Hinter dem Begriff EcoDesign verbirgt sich eine systematische Vorgehensweise, die das Ziel verfolgt, möglichst frühzeitig ökologische Aspekte in den Produktplanungs-, -entwicklungs- und -gestaltungsprozess einzubringen. Zu den Kriterien der Produktentwicklung wie Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Ergonomie, technische Machbarkeit und Design kommt die Anforderung von Umweltgrößen hinzu [Tisc00]. Die Herausforderung bei diesem Ansatz besteht darin, neben den im Fokus stehenden Anforderungen einen Kompromiss mit höher priorisierten Anforderungen zu erarbeiten, da diese oftmals in einem Zielkonflikt stehen [Abel08]. Der EcoDesign-Prozess soll vor allem Umweltaspekte überall dort in den Planungsvorgang integrieren, wo es sinnvoll und möglich ist [Tisc00]. Die dabei eingesetzten Instrumente können vielfältig sein. Das Life Cycle Assessment, die Prozesskettenanalyse, die Technikbewertung, die Qualitätsspinne, Matrizen, das IÖW-Ampelschema, das UBA-Prüfschema, Normen und Richtlinien, Handbücher oder Checklisten sind nur einige der Möglichkeiten, die dem Entwickler während seiner Arbeitsphase zur Verfügung gestellt werden [Hopf95]. Die Kategorisierung möglicher Instrumente wurde von Tischner vorgenommen und wird in Abbildung 12 gezeigt.

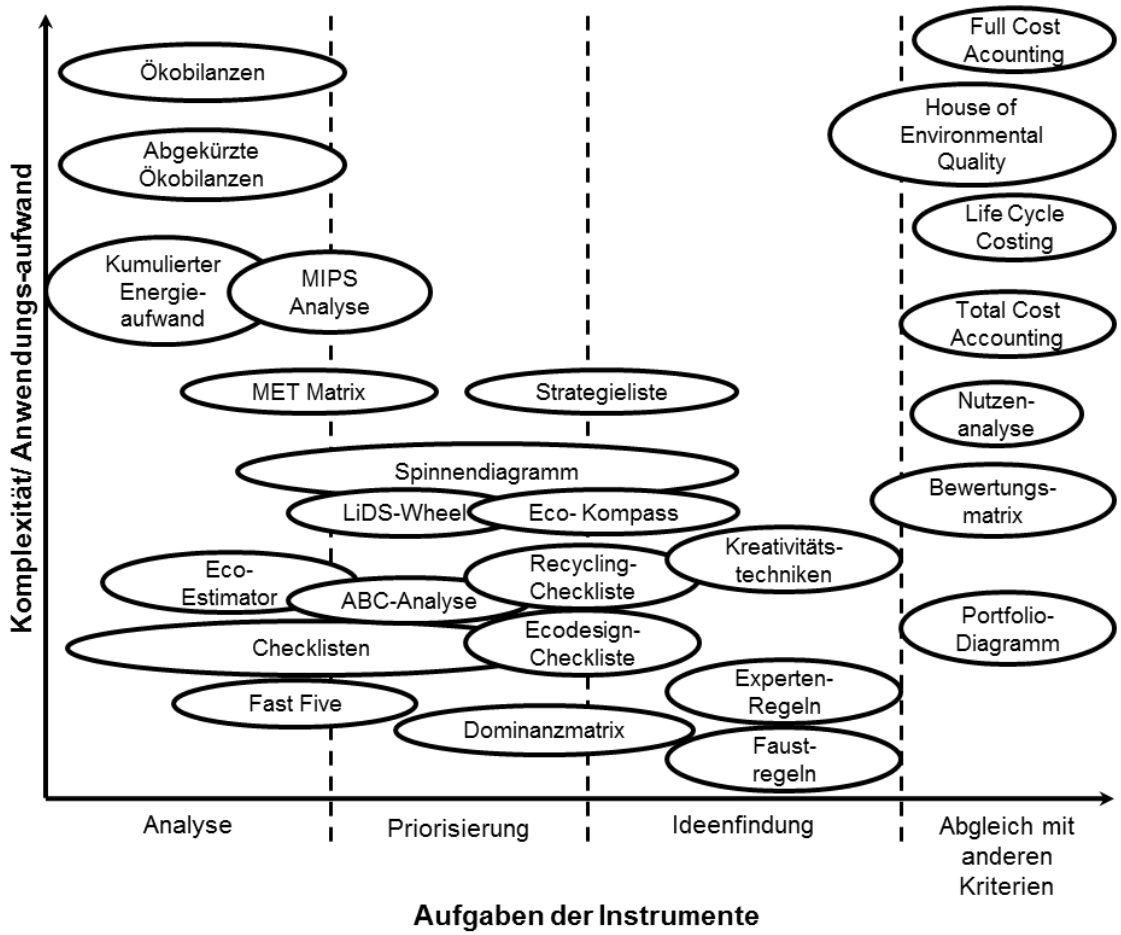

Abbildung 12: Kategorisierung einer Auswahl von EcoDesign-Instrumenten nach [Tisc00]

Bei der gezeigten Abbildung findet eine Gliederung in vier Bereiche statt. Der erste bildet die Phase der Analyse, mit deren Hilfe ökologische Schwächen und Stärken herausgestellt werden können. Die Phase der Priorisierung kann genutzt werden, um eine Rangfolge von zum Beispiel durchführbaren Maßnahmen zu erstellen. In der Phase der Ideenfindung können Kreativitätsmethoden genutzt werden, um weitere Potentiale und Lösungen zu erarbeiten. Innerhalb der letzten Phase soll ein Abgleich mit anderen Kriterien erfolgen, wie zum Beispiel die Kosten/Nutzen-Abschätzung.

Die gezeigten Instrumente stellen hierbei nur eine Auswahl von möglichen anwendbaren Hilfsmitteln dar. Prinzipiell kann jede Methode genutzt werden, wenn sie für das EcoDesign einen Nutzen erzeugt. Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb darauf verzichtet werden, auf jede Methode im Einzelnen detailliert einzugehen. Es wird jedoch festgehalten, dass die Vielzahl an anzuwendenden Methoden einen breiten Anwendungsspielraum zulässt und für ein weiteres Vorgehen eine Auswahl an Methoden getroffen werden kann.

Neben dem EcoDesign existiert die Technische Richtlinie (TR) zum Umweltmanagement – Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung [Deut02]. Die TR bestätigt viele Ansätze des EcoDesigns, da die frühestmögliche Integration von Umweltaspekten im PEP die Flexibilität bietet, an den Produkten Veränderungen und Verbesserungen durchzuführen. In späteren Stufen des PEP ist die Anwendung wünschenswerter umweltbezogener Optionen oft nicht mehr möglich, da alle wesentlichen technischen Entscheidungen bereits getroffen sind.

Dennoch bestehen immer noch Hemmnisse gegenüber dem Einsatz in heutigen Unternehmen. Ritzen und Beskow nennen Schlüsselkriterien, die genutzt werden müssen, um EcoDesign in ein Unternehmen zu implementieren. Hierzu werden klare Handlungsanweisungen und starke Signale durch das Management benötigt. Zudem wird eine aktive Integration von allen betroffenen Personen in den Implementierungsprozess sowie die Entwicklung von formellen Arbeitsprozeduren gefordert [Ritz01]. Tischner stellt heraus, dass der direkte Mehrwert von den Mitarbeitern des Unternehmens oft nicht gesehen wird. Etwas Bewährtes ändern zu müssen und sich Neuem zu öffnen ist eine Hürde, die zu bewältigen gilt. Ob sich EcoDesign wirtschaftlich rechnen wird und ob der Kunde das Produkt trotz des oft nicht direkt sichtbaren Mehrwertes auch honoriert, sind eine weitere Unsicherheit und ein Risiko, welches bei einer Anwendung abzuschätzen ist [Tisc00]. Von Collado-Ruiz wird zudem das Problem beschrieben, dass die Rechnerunterstützung in den unterschiedlichen Phasen des EcoDesigns nur unzureichende Anwendung findet. Viele Software-Tools nutzen die Methode der Ökobilanzierung und benötigen hierfür detaillierte Informationen, um gezielte Aussagen über die Umweltverträglichkeit zu generieren. Diese Informationen sind häufig nicht in ausreichender Form verfügbar [Coll13]. Zhao führt an, dass neben der preisintensiven Hürde anzuschaffender Software viele Mitarbeiter die laufenden Kosten und die zur Verfügung stehende Zeit als problematisch sehen. Diese Kosten werden mit den personellen Aufwendungen unterstrichen, da sich der Bediener im Fachgebiet und der Software detailliert auskennen muss [Zhao13].

Als Ergebnis wird daher aufgeführt, dass ein EcoDesign nur schwer in den Unternehmensprozess zu integrieren ist. Aus Sicht des Unternehmens muss jede Aufwendung einen entsprechenden zusätzlichen Nutzen erzeugen. Wird dieser Benefit nicht gesehen beziehungsweise kann dieser nicht erreicht oder nachgewiesen werden, werden die Aufwände nicht freigegeben. Es fehlt daher Transparenz, mit der die Auswirkungen von Entscheidungen in einem ausreichenden Maße aufgezeigt werden können.

Um diese Entscheidungen in einem gewissen Maße abschätzen zu können, bietet die Technikbewertung Ansätze, die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

4.1.4 Technikbewertung

Die Technikbewertung ist in der Richtlinie der VDI 3780 beschrieben und erschien 1989 erstmals als Entwurf. 1991 erschien sie dann als erste endgültige Fassung und wurde seitdem stetig erweitert. Wird die Technikbewertung als ein Instrument verstanden, welches regelnd in den Innovationsprozess der Technik eingreift, kann nach Ludwig

[Ludw95] der Anfang der Technikbewertung auf den Beginn der technischen Normung am Anfang des 19. Jahrhunderts zurückverfolgt werden.

Die Technikbewertung ist eine Methode, um zukunftsweisende Empfehlungen zu formulieren. Durch das systematische Analysieren von Zielen, Werten und Handlungsalternativen sollen rationale Entscheidungen ermöglicht werden. Das Ziel dieses Vorgehens besteht darin, unmittelbare und mittelbare technische, wirtschaftliche, gesundheitliche, ökologische, humane, soziale und andere Folgen dieser Technik und möglicher Alternativen abzuschätzen [Verb00]. Bei dem Vorgehen der Technikbewertung werden zunächst die Ziele definiert. Durch das Konzipieren werden denkbare technische Möglichkeiten erarbeitet, die für die Erfüllung der Aufgabe in Frage kommen. Im nächsten Schritt findet eine Eingrenzung dieser Möglichkeiten durch Restriktionen statt. Die noch übrig gebliebenen, machbaren technischen Möglichkeiten werden anschließend durch Präferenzen bewertet und in die technische Wirklichkeit überführt. Abbildung 13 zeigt hierzu ein Ablaufdiagramm.

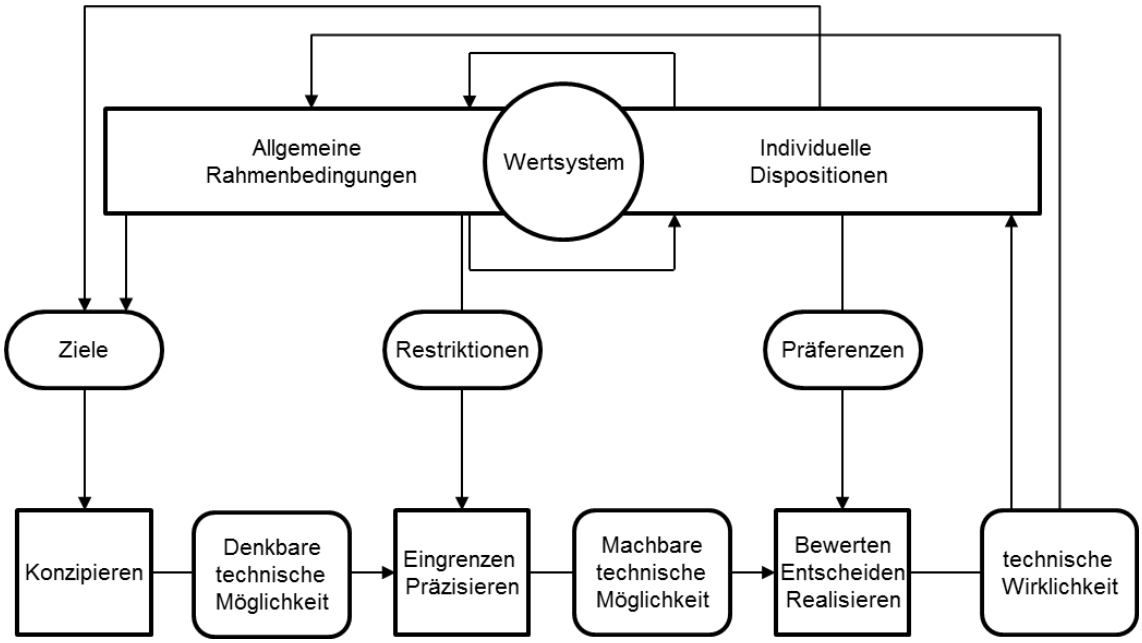

Abbildung 13: Entwicklung und Auswahl technischer Möglichkeiten [Verb00]

Durch dieses Vorgehen ist es möglich, eine Einschränkung der potenziell durchführbaren Möglichkeiten vorzunehmen und sukzessiv weitere Einschränkungen einzubringen, die den möglichen Lösungsraum verkleinern. Bei der Technikbewertung lassen sich verschiedene Phasen unterscheiden, die in der Praxis oft ineinander übergehen und durch Rückkopplung miteinander verbunden sein können [Verb00]:

- Definition und Strukturierung des Problems,
- Folgenabschätzung,
- Bewertung,
- Entscheidung.

Dabei ergeben sich für jede dieser Phasen besondere methodische Probleme. Die Technikbewertung lässt sich nicht durch eine einzige Methode erreichen. Durch ein mangelndes Methodenbewusstsein werden heutige Methoden teilweise nicht mehr mit der Technikbewertung in Verbindung gebracht, obwohl sie sich ebenfalls mit Chancen und Risiken der Technisierung befassen. Zu den Methoden der Technikbewertung gehört zum Beispiel die Ökobilanzierung [Rapp99], auf die im nachfolgenden Kapitel weiter eingegangen wird. Zusammenfassend bietet die Technikbewertung eine Möglichkeit, argumentativ nachvollziehbare Entschlüsse zu treffen. Durch die Eliminierung von möglichen Lösungsalternativen durch Restriktionen und die Bewertung durch Präferenzen wird ein Nutzen für diese Arbeit für die Durchführung energiesensitiver Entscheidungen gesehen. Um ein Verständnis dafür zu bekommen, wie eine Entscheidung getroffen wird, soll im nachfolgenden Abschnitt auf die Entscheidungsfindung eingegangen werden.

4.1.5 Entscheidungsfindung

Die moderne präskriptive Entscheidungstheorie findet hauptsächlich in folgenden Bereichen Anwendung [Eise03]:

- in der Energiewirtschaft,
- in der Sachgüterproduktion und bei Dienstleistungen,
- in medizinischen Anwendungen und
- in der öffentlichen Politik.

Eine Notwendigkeit zum Treffen einer Entscheidung ergibt sich aus zwei Merkmalen: zum einen aufgrund der Tatsache, dass eine Abweichung zwischen dem Ist- und Sollzustand besteht, und zum anderen, dass zur Änderung dieser Abweichung mindestens zwei Möglichkeiten existieren [Grün09]. Das Treffen einer Entscheidung aus den bestehenden Möglichkeiten wird als Entscheidungsproblem bezeichnet [Eise03, Laux05, Grün09]. Die Entscheidungsträger[13], die dieses Entscheidungsproblem lösen müssen, können dies auf verschiedenen Wegen tun. Zum einen kann ein intuitiver Ansatz verfolgt werden, wobei die rationale Nachvollziehbarkeit vollständig fehlt [Ette13]. Zum anderen bietet das Grundmodell der Entscheidungstheorie das Mittel der sogenannten Entscheidungsmatrix [Eise03, Laux05, Grün09]. Hierbei werden den Handlungsalternativen (A_1, A_2, …, A_A) bestimmte Zustände (S_1, S_2, …, S_S) gegenübergestellt. Zudem ist die Angabe von Eintrittswahrscheinlichkeiten ($w(S_1)$, $w(S_2)$, …, $w(S_S)$) möglich. Dabei kennzeichnet E_{AS} ($A = 1, 2, …, A$; $S = 1, 2, …, S$) das Ergebnis, welches erzielt wird, wenn die Alternative A_A gewählt wird und der Zustand S_S eintritt. Tabelle 2 zeigt den allgemeinen Aufbau einer Entscheidungsmatrix.

[13] Können eine Person oder auch eine Gruppe darstellen.

Tabelle 2: Allgemeine Entscheidungsmatrix [Laux05]

	$w(S_1)$	$w(S_2)$	…	$w(S_S)$
	S_1	S_2		S_S
A_1	E_{11}	E_{12}	…	E_{1S}
A_2	E_{21}	E_{22}	…	E_{2S}
⋮	⋮	⋮		⋮
A_A	E_{A1}	E_{A2}	…	E_{AS}

Einem Ergebnis E_{AS} muss dabei nicht unbedingt ein sicherer Zielgrößenwert zugeordnet werden. Je nach der Beschreibung von Alternativen und Zuständen können die Ergebnisse E_{AS} auch mehrwertig sein [Laux05]. Je nach Anwendungsfall wurden im Laufe der Zeit mehrere Abwandlungen der Entscheidungsmatrix entwickelt. Die Nutzwertanalyse, Kosten-Nutzen-Betrachtung, technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225 oder die Punktbewertung sind nur einige Beispiele von möglichen Bewertungsmethoden [Ehrl07a, Ehrl07b, Pahl07].

Das Ergebnis ist die Erkenntnis, dass unterschiedliche Methoden existieren, die das Treffen einer rationalen Entscheidung unterstützen. Hierfür sind jedoch Eingangsparameter notwendig, wozu Handlungsalternativen, erzielte Zustände und eine Beschreibung des Ergebnisses zählen. Zudem wird die Möglichkeit geboten, Eintrittswahrscheinlichkeiten bei Unsicherheiten oder Gewichtungen in die Methodik zu integrieren.

4.1.6 Kritische Diskussion und Fazit

In Kapitel 2 wurde herausgestellt, dass der Produktentwickler heutzutage eine Vielzahl an Anforderungen berücksichtigen muss. Der Grund ist das immer komplexer werdende Produkt aufgrund steigender Kundenanforderungen und Individualität. Um jeder dieser Anforderungen in einem höchstmöglichen Maße gerecht zu werden, wird die Methode der integrierten Produktentwicklung genutzt. Hierbei werden die entsprechenden Bereiche als Vertreter der Anforderungen frühzeitig in Entscheidungen eingebunden, um mögliche Probleme zu diskutieren und Zielkonflikte durch Kompromisse zu lösen. Ein Interessensvertreter der Umweltabteilung ist eine Person, die die Anforderung des geringen Energiebedarfs im Sinne der integrierten Produktentwicklung vertritt. Dennoch findet eine Berücksichtigung der Anforderung nur unzureichend statt. Ein Grund wird darin gesehen, dass die bloße Anwesenheit eines Experten in Abstimmungsrunden nicht zielführend ist. Es fehlt derzeit Transparenz aufgrund fehlender Prozessdaten, um eine hilfreiche Aussage über den späteren Energiebedarf tätigen zu können. Dies unterstreicht nochmals den Forschungsbedarf.

Das Design for X bietet Möglichkeiten und Ansätze, Anforderungen aus einer spezifischen Fachdisziplin frühzeitig berücksichtigen zu können. Für diese Arbeit wurde das DfE beziehungsweise DfEv als erster Ansatz für eine Berücksichtigung der Anforderung des Energiebedarfs identifiziert. Innerhalb des DfEv wurde das EcoDesign als Methodensammlung erkannt, die Ansätze bietet, um ökologische Aspekte frühzeitig in Entscheidungen berücksichtigen zu können. Dennoch konnte anhand mehrerer Quellen

nachgewiesen werden, dass EcoDesign nur unzureichend in Unternehmen eingesetzt wird. Tischner beschreibt, dass eine sehr große Auswahl an potenziell möglichen Methoden existiert und dass im EcoDesign kein festes Schema vorgegeben ist.

Um eine Kompromissfindung innerhalb des interdisziplinären Teams zu ermöglichen, bietet die Technikbewertung nach VDI 3780 einen Ansatz. Bei der Technikbewertung findet eine Einteilung der Anforderungen nach Restriktionen und Präferenzen statt. Mithilfe der Restriktionen können erste Einschränkungen vorgenommen werden. Durch eine Bewertung der verbleibenden Lösungsalternativen mittels Präferenzen können transparente Entscheidungen durch die Entscheidungsträger unter Zuhilfenahme von Instrumenten der Entscheidungsfindung getroffen werden.

Es wurde allgemein herausgestellt, dass es an Daten, individuellen Instrumenten und Methoden fehlt, die für eine energiesensitive Entscheidungsfindung genutzt werden können. Demnach kann auch der Interessensvertreter der Anforderung Energieeffizienz aufgrund dieser fehlenden Grundlagen seiner Tätigkeit nach der integrierten Produktentwicklung nicht nachkommen. Die Technikbewertung bietet hierbei jedoch für sich keine speziellen Möglichkeiten, den Energiebedarf zu bewerten, und ist deshalb nur in Kombination mit anderen Methoden wie dem EcoDesign zielführend. Der Energiebedarf stellt somit einen Ermittlungsumfang dar, der in dieser Arbeit aufgenommen werden muss. Das folgende Kapitel beschreibt daher die Möglichkeiten einer energieorientierten Bewertung anhand spezifischer Methoden als Basis für ein weiteres Vorgehen.

4.2 Energieorientierte Bewertungsmöglichkeiten

Um den Energiebedarf über den gesamten Produktlebenszyklus abschätzen zu können, bedarf es Methoden, mit denen eine Bilanzierung der später aufzubringenden Energie möglich ist. Für die vorliegende Arbeit wurde das Life Cycle Assessment identifiziert, auf welches in den folgenden Kapiteln jeweils eingegangen wird.

4.2.1 Life Cycle Assessment

Die Ökobilanzierung, welche im Englischen unter dem Namen Life Cycle Assessment bekannt ist, entwickelte sich Anfang 1970 zur einzigen international genormten Methode der ökologischen Produktanalyse [Klöp09].

Die LCA soll durch eine definierte Methodik Transparenz schaffen, damit Umweltwirkungen erkannt sowie die Größe und Bedeutung beurteilt werden können. Dies geschieht über den gesamten Lebensweg des Produkts. Das Ergebnis der LCA ist eine Ableitung von Schlussfolgerungen sowie die Aussprache von Empfehlungen. Durch die Festlegung der Ziele sowie die Definition des Untersuchungsrahmens kann ein Grundstein für die LCA gelegt werden. Die Zieldefinition muss sich an der Tiefe und Genauigkeit der Studie orientieren [Klöp09]. Darauf aufbauend kann eine Sachbilanz durchgeführt werden. Die Sachbilanz (Life Cycle Inventory – LCI) ist eine Stoff- und Energieanalyse auf der Basis einer vereinfachten (linearen) Systemanalyse [Klöp09]. Abbildung 14 zeigt hierzu ein Schaubild zum Vorgehen bei der LCA.

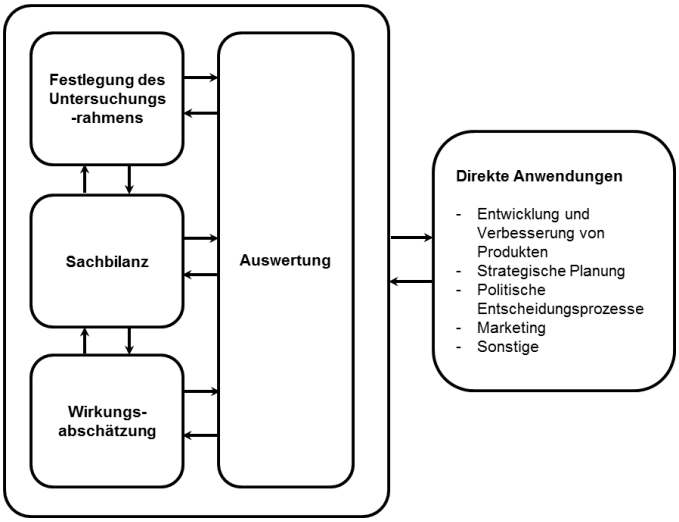

Abbildung 14: Die Phasen der Ökobilanzierung [Deut09]

Die Sachbilanz ist mit 80% die zeitintensivste Phase der LCA [Lund99], wobei sich die Gesamtzeit nach der Komplexität des zu untersuchenden Gesamtsystems richtet. Die Sachbilanz wird oft auf Basis von Datenbanken oder spezieller LCA-Software durchgeführt. Abbildung 15 zeigt hierzu, welche Rechnerunterstützung genutzt werden kann und welche Quellen für die generischen Daten existieren.

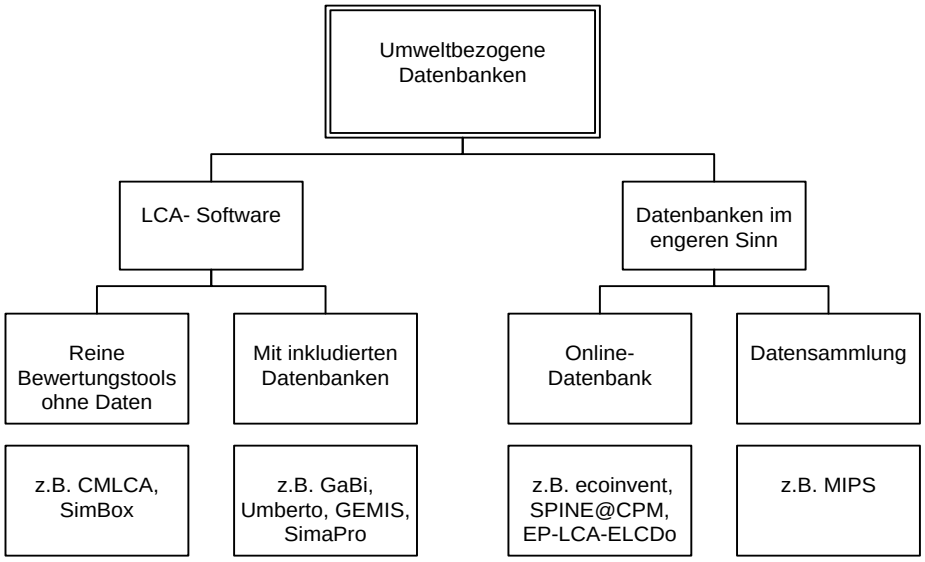

Abbildung 15: Potenzielle Quellen für eine Datenbasis nach [Mölt09]

Umweltbezogene Datenbanken bieten eine Möglichkeit, auf Daten von zum Beispiel Energieverbräuchen oder emittierten Stoffen zugreifen zu können. Zudem muss überprüft werden, wie sich ein Produkt oder ein Prozess innerhalb einer individuellen Umgebung auswirkt. Hierfür kann eine Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) erfolgen. Bei der LCIA werden in der Sachbilanz beispielsweise emittierte Stoffe

ermittelt und prognostiziert sowie deren Auswirkung auf die Umwelt eingeschätzt. So lässt sich das Schadensausmaß erst in der Wirkungsabschätzung vollständig erfassen [Klöp09].

Die Ergebnisse der LCA können vielseitig genutzt werden. So ist neben der Entwicklung und Verbesserung von Produkten auch die strategische Planung ein wichtiges Feld. Die Ergebnisse können für politische Entscheidungen sowie als Marketinginstrument verwendet werden. Tiefe und Breite einer LCA können dabei je nach Zielsetzung beträchtlich schwanken [Deut09]. Durch eine differierende Methodik, Datenqualität oder Systemgrenzen kann das Ergebnis einer LCA unterschiedlich ausfallen. Transparenz der Durchführung ist hierbei sehr wichtig. Die LCA ist zeitaufwendig und komplex. Sie benötigt Fachwissen und detaillierte Informationen über das Produkt. Viele dieser benötigten Informationen sind in einer frühen Phase jedoch nicht verfügbar, wie in Abbildung 16 dargestellt.

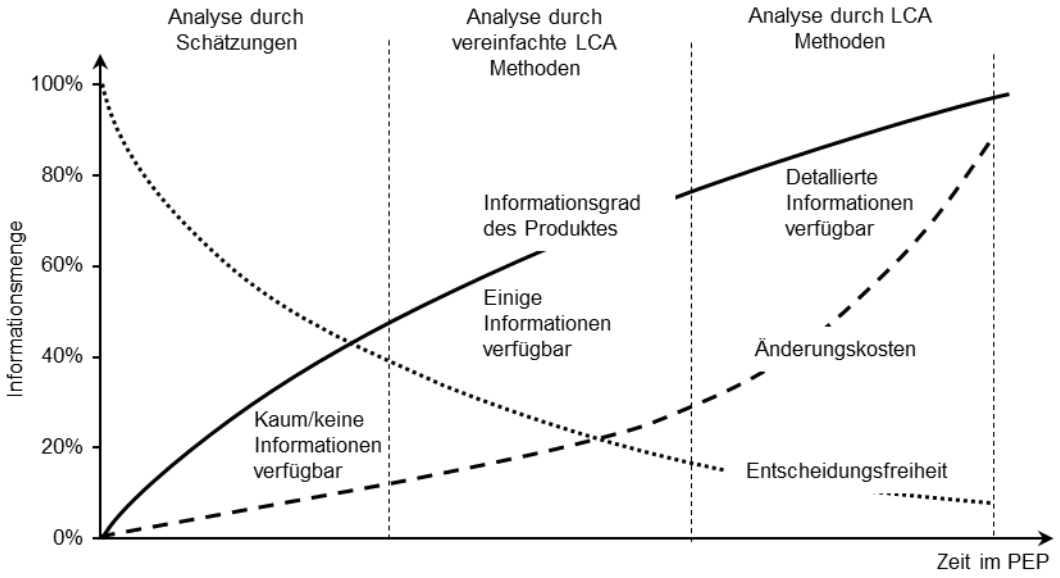

Abbildung 16: Situation des LCA in frühen Phasen nach [Schi99, Gess01, Coll13]

Wenn die Informationen in einer späteren Phase verfügbar sind, sind die Änderungsmöglichkeiten begrenzt [Sous06, Mill07]. In der frühen Phase können oftmals nur Schätzungen durchgeführt werden, auf deren Basis Entscheidungen getroffen werden. Erst in einer späteren Phase findet die LCA ihre Einsatzmöglichkeit. Daher ist diese Methode für die frühe Phase nur eingeschränkt geeignet.

Um speziell das Thema des Energiebedarfs weiter zu untersuchen, wird der Fokus im folgenden Kapitel auf den Kumulierten Energieaufwand (KEA) gerichtet. Der KEA ist unter anderem für die LCA ein wichtiger Kennwert für eine ökologische Bewertung des jeweils betrachteten Systems [Verb12]. Die Notwendigkeit für eine tiefere Betrachtung

wird darin gesehen, dass individuelle Daten fehlen und nicht in der frühen Phase verfügbar sind. Es soll daher die Methode des KEA analysiert werden und ob den Problemen mithilfe dieser Methodik begegnet werden kann.

4.2.2 Kumulierter Energieaufwand

Die Energiebilanzierung nach VDI 4600 beschreibt eine Möglichkeit, den KEA mithilfe der Prozesskettenanalyse zu ermitteln. Der KEA stellt eine Methode dar, die genutzt werden kann, um energetische Daten in einen einheitlichen Grundrahmen verfüg- und vergleichbar zu machen. Der KEA ermöglicht die energetische Beurteilung und den Vergleich von Produkten und Dienstleistungen und bildet eine wichtige Basis, um die Prioritäten von Energieeinsparpotentialen in einem komplexen Zusammenhang zwischen der verbrauchten Energie während der Herstellung (KEA_H), Nutzung (KEA_N) und Entsorgung (KEA_E) aufzuzeigen. Die folgende Formel zeigt die generelle Berechnung des KEA.

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad (1)$$

Mithilfe des KEA_H ist es möglich, eine Aussage über den Energiebedarf der Produktionsphase zu erhalten. Durch Betrachtung des KEA_N ergibt sich die Möglichkeit, zusätzliche energetische Aufwendungen während der Herstellung zu rechtfertigen, die den Energiebedarf in der Nutzungsphase begünstigen, sodass eine energetische Amortisierung[14] stattfinden kann. Durch den KEA_E wird die Energie berücksichtigt, die bei der Entsorgung des Produkts aus dem Nutzungskreislauf entsteht beziehungsweise rückgewonnen werden kann. Neben der Unterscheidung in den drei Phasen ist eine detailliertere Betrachtung von zum Beispiel nichtenergetischem Aufwand (KNA), stoffgebundenem Energieinhalt (SEI) und weiteren Kenngrößen möglich. Diese Unterscheidung wird jedoch in dieser Ausarbeitung nicht genutzt, da eine Differenzierung zwischen diesen Größen nicht Ziel dieser Arbeit ist.

Das Instrument für die Bilanzierung eines Produkts unter Berücksichtigung der Fertigungsebenen ist die Prozesskettenanalyse. Diese Methode schafft die Möglichkeit, den Energiebedarf skalierbar bis in die unterste Ebene, die der Rohstoffe, aufzuschlüsseln. Abbildung 17 zeigt ein Schema eines Materialstammbaums für die Herstellung. Die einzelnen Fertigungsebenen sind entsprechend ersichtlich.

[14] Von einer energetischen Amortisation wird gesprochen, wenn ein erhöhter Energieaufwand in einer frühen Phase in Kauf genommen wird, um den Gesamtenergieaufwand in späteren Phasen zu vermindern.

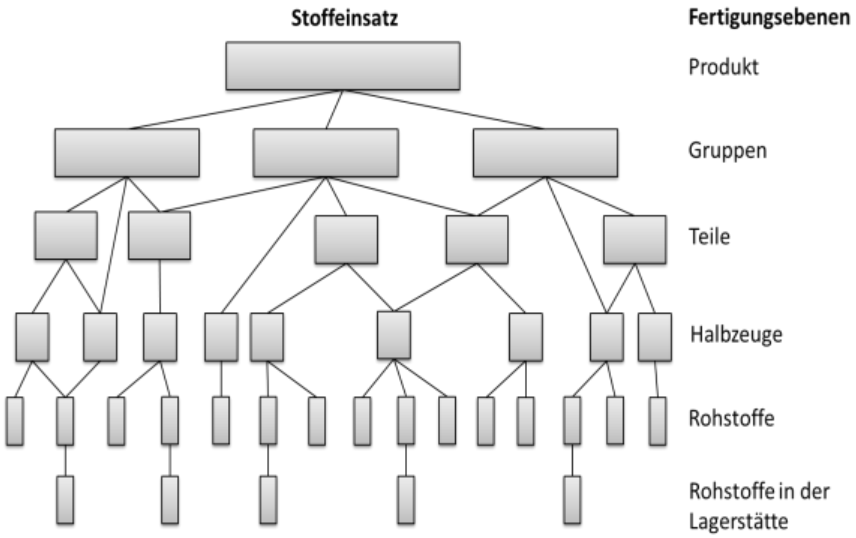

Abbildung 17: Schema eines Materialstammbaums für die Herstellung nach [Verb12]

In der Prozesskettenanalyse werden die Stufen des Veredlungsprozesses aufgeschlüsselt. Die Methode bietet einen Ansatz, durch die einzelnen Energieverbräuche der Prozesskette den KEA_H zu bestimmen. Dennoch handelt es sich bei der Prozesskettenanalyse nur um eine überschlägige Näherung an die tatsächlich verbrauchte Energie.

4.2.3 Kritische Diskussion und Fazit

Die LCA bietet ein grundsätzliches Vorgehen, ein Produkt ökologisch analysieren zu können. Kritik an diesem Vorgehen findet sich darin, dass sich die Daten sehr generisch darstellen. So müssen bei der Sachbilanz immer wieder Näherungen und Kompromisse bei der Auswahl der Daten in Kauf genommen werden, die das Gesamtergebnis des Untersuchungsgegenstandes verzerren. Der Grund ist die Vielzahl an unterschiedlichen Produkten, die sich teilweise sehr stark voneinander unterscheiden und nicht in einer Gesamtheit vermessen werden können. Zudem existieren Unterschiede in der Umgebung, in der das Produkt eingesetzt wird. Die Nutzung generischer Datenbanken als Datenbasis wird demnach als kritisch angesehen.

In den Untersuchungen mithilfe des KEA werden zudem bestimmte energetische Größen, wie die menschliche Arbeit, nicht berücksichtigt. Eine automatisierte Fertigung, welche mit manueller Arbeit verglichen wird, würde nach dieser Methode grundsätzlich mehr Energie benötigen. Zum anderen existieren wie bei der LCA für die Ermittlung des KEA keine exakt beschriebenen Systemgrenzen. Eine Überprüfung oder ein Vergleich zwischen Lösungsalternativen, die nicht aus einer Messquelle stammen, ist somit nur schwer möglich. Eine einheitliche Datenbasis sowie genormte Messprozesse für die generischen Daten fehlen. Dennoch stellt diese Methode eine verhältnismäßig einfache Möglichkeit dar, durch eine einfache Addition eine richtungsweisende Aussage über den

Gesamtenergiebedarf zu treffen. Eine Möglichkeit, weitere Anforderungen und Prozessgrößen zu berücksichtigen, wie es bei der Technikbewertung der Fall ist, ist innerhalb des KEA nicht gegeben. Auch die Vergleichbarkeit von Lösungsalternativen ist in dieser Methode sowie in der LCA nicht integriert und es bestehen nur wenige Möglichkeiten, prognosebasierte Entscheidungen zu treffen. Es kann daher das Zwischenfazit gezogen werden, dass eine allgemeine Methode nicht alleine für die frühe Phase der Produktentwicklung des automobilen Karosseriebaus angewendet werden kann. Für die Arbeit wird daher die Notwendigkeit abgeleitet, den KEA als Energiebilanzierungsmethode zu berücksichtigen, jedoch um entsprechende Funktionalitäten zu erweitern beziehungsweise mit weiteren bestehenden Methoden zu kombinieren. Potential wird hierbei in der Kombination der Technikbewertung und des KEA gesehen.

Um zu überprüfen, ob bereits technische Werkzeuge existieren, die bereits eine Anwendung von Kombinationen oder der Nutzung einzelner Methoden aufzeigen, werden im folgenden Kapitel einige identifizierte Instrumente beschrieben, in denen betrachtete Methoden integriert wurden.

4.3 Integration in technische Instrumente

Aus dem vorangegangenen Kapitel wurde deutlich, dass vor allem die Sachbilanz ein zeitlich intensiver Vorgang ist und es nach einer ersten Abschätzung durchaus zu Änderungen am Untersuchungsrahmen kommen kann. Um einen Zeitvorteil bei der LCA zu schaffen, kann die Rechnerunterstützung genutzt werden. Die Rechnerunterstützung bietet mehrere Vorteile. Zum einen müssen bei einer Automatisierung feste Prozesse im Programmcode hinterlegt werden, die immer gleich ausgeführt werden können. Dieser Umstand erhöht die Qualität der Vergleichbarkeit. Zum anderen erfolgt die Durchführung in einer Geschwindigkeit, die durch eine manuelle Ausführung wesentlich mehr Zeit in Anspruch nehmen würde. Des Weiteren können Änderungen im Nachhinein leicht nachgepflegt werden. Im folgenden Unterkapitel werden technische Werkzeuge vorgestellt, welche das Ziel verfolgen, den Energiebedarf möglichst frühzeitig in die Produktentwicklung einfließen zu lassen. Hierbei findet eine Einteilung in LCA-Software, CAD-Software und webbasierte Anwendungen statt.

4.3.1 LCA-Software

Die LCA-Software Umberto® der ifu[15] Hamburg GmbH und GaBi[16] von PE International sind Beispiele, die heutzutage in Unternehmen eingesetzt werden. Neben einer mitgelieferten Datenbank kann diese Software auch monetäre Größen berechnen, die im Laufe des Lebenszyklus anfallen. Für die Erstellung der Sachbilanz können virtuelle In-

[15] Institut für Umweltinformatik.
[16] Ganzheitliche Bilanzierung.

formationsbausteine durch Verbindungslinien in Relation gesetzt werden. Als Endergebnis kann ein detaillierter Umweltbericht[17] ausgegeben werden. Einen Teil des Umweltberichtes stellt der KEA dar und wird vor allem durch das Umweltwesen genutzt.

Trotz der Rechnerunterstützung bleibt die Erstellung eines detaillierten Lebenszyklus innerhalb der Software ein zeitaufwendiger Prozess. Oft sind unvollständige Angaben in der Datenbank zu finden oder es kann lediglich auf ähnliche Materialien oder Prozesse zurückgegriffen werden, welche das Ergebnis verfälschen. Individuelle Prozesse eines Unternehmens fehlen gänzlich und können nur durch Faktoren abgeschätzt werden. Daraus ergeben sich relevante Hemmnisse für die Anwendung. Zudem kann die Software oft erst eingesetzt werden, wenn das Produkt in einem detaillierten Maße beschrieben ist. Es sind beispielsweise Angaben notwendig, von welchem Ort Material angeliefert wird, um auch den Transportweg betrachten zu können. Diese Informationen sind jedoch erst zu einem relativ späten Zeitpunkt verfügbar und erzeugen somit Unsicherheiten bei einer frühen Bilanzierung. Eine Betrachtung von anderen Anforderungen außer Umweltgrößen findet nicht statt.

4.3.2 Integration in CAD-Software

Um den Produktentwicklern Werkzeuge für eine energiesensitive Produktentwicklung zur Verfügung zu stellen, werden Ansätze beschrieben, die es ermöglichen, Methoden des EcoDesigns in den Arbeitsprozess zu integrieren. Ziel des Konzeptes von Atik Alp war es beispielsweise, eine Ökobilanzierung als rechnergestütztes Werkzeug bereitzustellen [Atik01]. Dieses Werkzeug sollte dem Produktentwickler erlauben, auf schnelle Weise entwicklungsbegleitende, ökologische Beurteilungen im CAD durchzuführen, um somit die ökologischen Auswirkungen seines Handelns zu erkennen. Das ökologische Beurteilungssystem Life Cycle Assessment for Computer Aided Design (LCAD) wurde zu diesem Zweck entwickelt, wobei eine Integration in die Arbeitsumgebung durch eine CAD-Schnittstelle möglich war. Der Austausch der Daten erfolgte über Sachkennzahlen, die es dem Entwickler ermöglichten, mit entsprechendem Know-how erste richtungsweisende Abschätzungen der Umweltbeeinflussung vorzunehmen. Die Vorteile gegenüber kommerziellen Systemen zur Ökobilanzierung sind vor allem in der Zeitersparnis zu sehen [Atik01]. Das Konzept von Atik wurde teilweise in kommerzielle CAD-Software übernommen. Einen großflächigen Einzug in die Arbeitswelt des Entwicklers hat diese Software nach eigenen Beobachtungen bisher jedoch noch nicht erlangt und stellt somit nur eine Randfunktion des eigentlichen CAD dar.

Um das Thema des Energiebedarfs weiter in die Arbeitsumgebung des Konstrukteurs zu tragen, existieren Lösungen, die innerhalb eines Konstruktionssystems Bewertungen von eingesetzten Werkstoffen erlauben. In Abbildung 18 wird am Beispiel der Firma Dassault Systèmes im Konstruktionssystem Solid Works mit dem Sustainability Modul ein energetisch bewerteter Kniehebelspanner gezeigt. Aber auch die Software Inventor

[17] Ein Umweltbericht ist eine Veröffentlichung, in der ein Unternehmen Ziele, Maßnahmen und Ergebnisse im Bereich des Umweltschutzes beschreibt.

mit dem Modul Eco Materials Adviser der Firma Autodesk kann ein Bauteil hinsichtlich des verwendeten Werkstoffs ähnlich bewerten und eine erste Abschätzung des entstehenden Energiebedarfs in einem gewissen Umfang treffen.

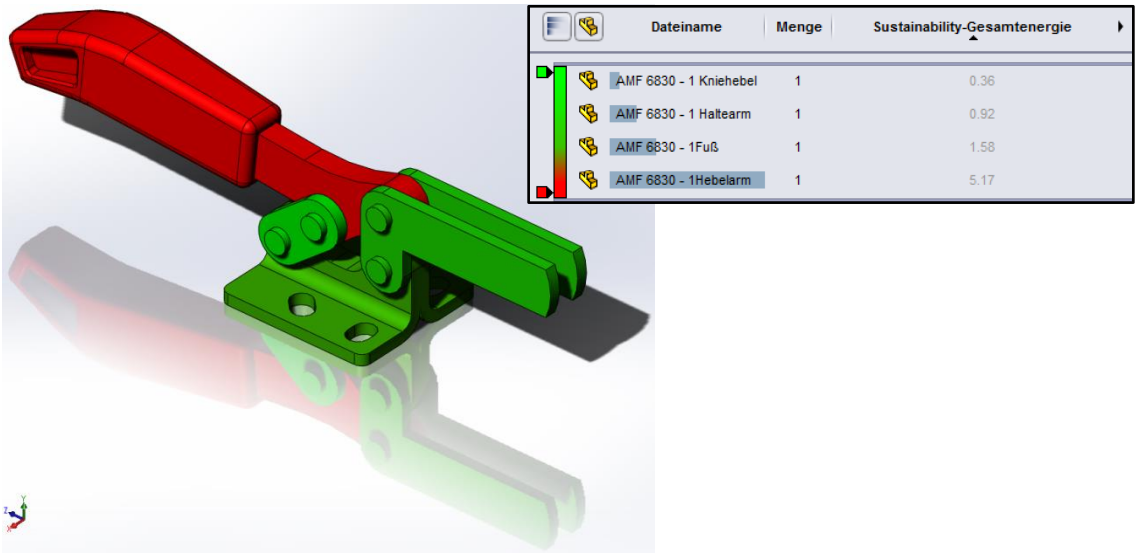

Abbildung 18: Energetisch bewertetes Modell eines Kniehebelspanners

Neben den relativen farblichen Kennzeichnungen des Gesamtenergiegehalts in MJ ist auch die quantitative Darstellung in einer Tabelle möglich. Diese Analyse basiert auf einer generischen Datenbank analog der Software GaBi oder Umberto sowie der Werkstoffdatenbank des CAD-Programms. Neben der Abfrage des Gesamtenergiebedarfs ist auch die Eingabe von weiterführenden Informationen möglich. Ein Beispiel zeigt Abbildung 19 zur Eingabe von weiterführenden Informationen zum Fertigungsverfahren.

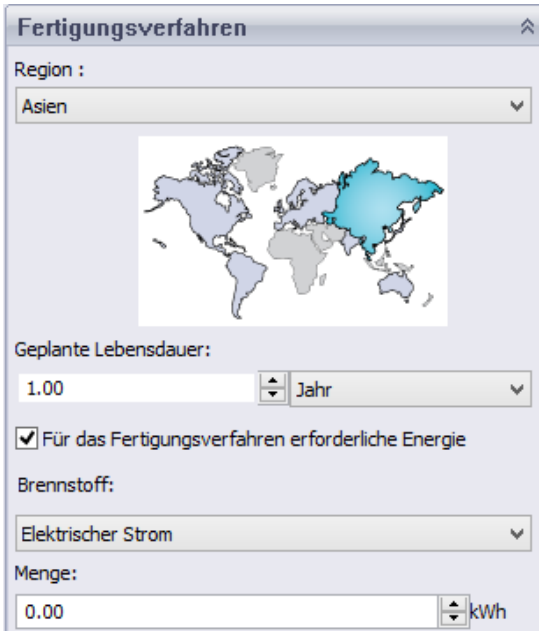

Abbildung 19: Bedienoberfläche mit Eingabeparametern zum Fertigungsverfahren

Die elektrische Energie, die hier als elektrischer Strom bezeichnet wird, stellt nach Definition des KEA den Energiebedarf dar, der während der Herstellung benötigt wird. Eine Differenzierung zwischen den einzelnen Energieträgern (Brennstoff) kann ebenfalls erfolgen. In einer weiteren Maske ist zudem eine Materialähnlichkeitssuche durchführbar, bei der die technischen Werkstoffkennwerte wie zum Beispiel das Elastizitätsmodul oder die Dichte genutzt werden, um nach geeigneten Substituten recherchieren zu können. Die durch die Substitute hervorgerufenen Änderungen des Energiebedarfs in MJ, des Kohlenstoffdioxidausstoßes, der Luftansäuerung sowie der Überdüngung von Gewässern werden in Diagrammen visualisiert. Das Ergebnis der Analyse kann, ähnlich wie in einer LCA-Software, durch die automatische Generierung eines Umweltberichts ausgegeben werden.

Mit dem gezeigten Instrument ist es möglich, die Ökobilanzierung in das Arbeitsumfeld des Konstrukteurs zu integrieren. Es ist erforderlich, dass bei der Untersuchung 3D-Modelle vorliegen, die das endgültige Produkt in einem stark ausdetaillierten Maß beschreiben. In dieser relativ späten Phase der Produktentwicklung muss die Wirksamkeit bei zum Beispiel der Wahl des Werkstoffs in Frage gestellt werden. Ein positiver Aspekt dieser Lösung stellt sich in der Möglichkeit dar, den Energiebedarf für Fertigungsverfahren zu berücksichtigen. Dennoch liefert die Datenbasis keine ausreichenden Informationen über individuelle Prozessdaten. Vom Bediener wird demnach verlangt, exakt zu wissen, welchen Energiebedarf die eingesetzten Fertigungsverfahren benötigen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die beschriebene Integration in ein CAD-System Defizite aufweist und für einen Einsatz in der frühen Phase nicht geeignet ist. Eine ähnliche Funktionsweise wird im folgenden Kapitel gezeigt, welche autark vom CAD genutzt werden kann.

4.3.3 Webbasierte Anwendungen

Der EcoDesign Pilot dient im Folgenden als ein Beispiel einer CAD-autarken Anwendung, um eine energiesensitive Produktentwicklung zu unterstützen. Die Pilotsoftware ist webbasiert und in der folgenden Abbildung 20 dargestellt.

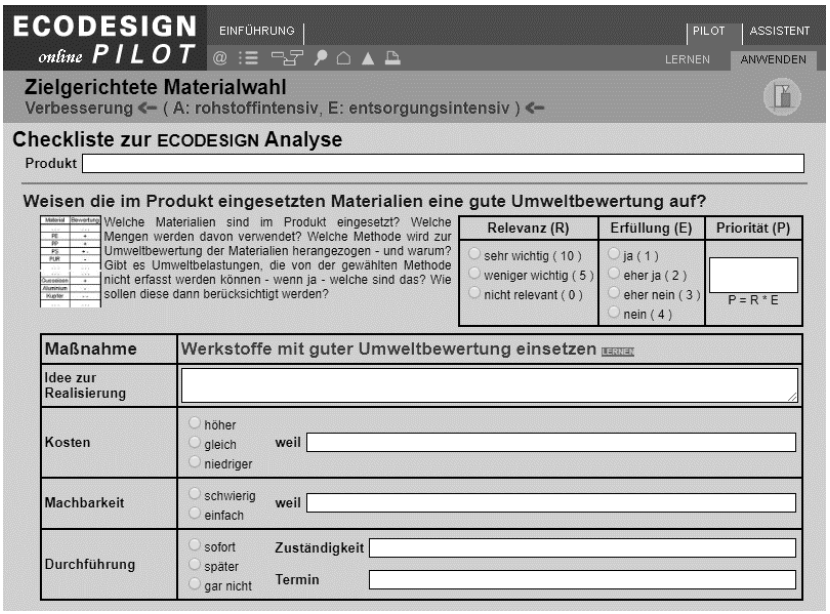

Abbildung 20: EcoDesign Pilot online [Wimm20]

Der EcoDesign Pilot soll mittels Produktverbesserungsstrategien vorhandene Produkte mit geeigneten EcoDesign-Maßnahmen verbessern. Hierbei wird der Produktlebenszyklus in allen Schritten berücksichtigt. Mithilfe der Software wird der Anwender strukturiert zu ökologischen Größen des Produkts befragt. Eine Einteilung der Befragung findet entlang des Produktlebensweges statt. Hierbei werden unter anderem die elektrische und thermische Energie aufgenommen, die in den unterschiedlichen Lebensphasen benötigt werden. Die einzugebenden Daten weisen zum Teil einen starken Detaillierungscharakter auf. Dies ist auch bei dem Tool „LCA to go“ der Fall, welches hier nicht explizit gezeigt wird [Pamm14]. Mit Experten aus Produktionsplanung und Entwicklung wurde diese Art der webbasierten Anwendungen getestet. Es wurde angeführt, dass die Daten, die für eine Analyse erforderlich sind, dem Experten des Fachbereichs nicht bekannt sind. Schätzungen konnten aufgrund der hohen Unsicherheit nicht durchgeführt werden. Es wurde bemängelt, dass die Anwendung sehr allgemein sei und den Ergebnissen kein großes Vertrauen entgegengebracht werden würde, da die Eingangsgrößen nicht fundiert seien. Als positiv wurde erkannt, dass sich die Anwendung ohne zusätzliche Kosten aus dem Internet abrufen lässt und dass keine Installation erforderlich ist. Hierdurch kann das Anwenderspektrum erhöht werden. Dennoch wurde die Anwendung als sehr aufwendig und nicht hilfreich für den automobilen Karosseriebau beschrieben. Bei der Recherche wurden weitere Tools entdeckt, die dem Benutzer helfen sollen, Energiebedarfe

oder Energiekosten zu berücksichtigen [Ulri16]. Hierbei müssen die quantitativen Größen vom Anwender eingegeben werden. In bestimmten Tools werden sogar gesamte finanzielle Bilanzen abgefragt. Für einen Entwickler eines automobilen Unternehmens sind die Informationen oft nicht verfügbar. Zudem werden verschiedene Branchen vereinheitlicht, sodass der Forderung nach Individualität nicht nachgekommen wird.

4.3.4 Kritische Diskussion und Fazit

Im vorangegangenen Abschnitt zeigte sich, dass Methoden und Instrumente existieren, mit denen es potenziell möglich ist, umweltrelevante Aspekte wie die Anforderung eines verminderten Energiebedarfs im Produktentwicklungsprozess zu berücksichtigen. Dennoch werden bereits einige Schwachstellen genannt, die einen flächendeckenden Einzug dieser Ansätze in die frühe Phase des Entwicklungsprozesses verhindern.

- Der Zeitaufwand stellt ein großes Hemmnis dar, der bei der Modellierung von zum Beispiel komplexen Umweltmodellen erfolgt.
- Es existiert keine Datenbank, die individuelle Prozessdaten bereitstellt. Oftmals wird vorausgesetzt, dass der Experte in der Lage ist, diese fehlenden Daten abzuschätzen, was sich in der Praxis als nicht möglich erweist.
- Ein integrativer Ansatz des Energiebedarfs findet nicht statt, wie es beispielsweise im EcoDesign verfolgt wird. Der Energiebedarf beziehungsweise Umweltgrößen werden als Anforderung über alle anderen Anforderungen gestellt.
- Die bisher existenten Softwarelösungen streben eine hohe Allgemeingültigkeit an. Durch dieses Ziel wird der Bediener nicht ausreichend in seiner individuellen Tätigkeit unterstützt.
- Im Fokus der Betrachtung liegt häufig die Materialauswahl. Die Fügetechnik, die eine hohe Bedeutung im Karosseriebau hat, wird jedoch nicht berücksichtigt.
- Es existiert keine Logik in der Software, die Auswirkungen von Entscheidungen aus der frühen Phase in nachgelagerte Phasen darstellt.
- Der Einsatz von CAD ist in dieser frühen Phase nur im geringen Maße geeignet, da das CAD ein hohes Maß an Detaillierung voraussetzt. Die Kombination des KEA mit dem CAD wird daher für das Ziel dieser Arbeit als ungeeignet bewertet.
- Die Nutzung von Vorgängermodellen findet nicht statt. In der Automobilindustrie findet oftmals die Nutzung von Anpassungskonstruktionen statt. Dieses Vorgehen wird nicht unterstützt.

Die hohe Beeinflussbarkeit in der frühen Phase kann somit nur unzureichend erschlossen werden. Ziel sollte es sein, eine Unterstützungsmöglichkeit in der Phase anzubieten, in der richtungsweisende Entscheidungen getroffen werden. Die genannten Fakten unterstreichen den Forschungsbedarf für die Untersuchung einer Methode oder einer Methodenkombination für die frühe Phase des automobilen Karosseriebaus. Aufbauend werden im folgenden Abschnitt Forschungsfragen aus den bisherigen Erkenntnissen abgeleitet, die im Zuge dieser Arbeit beantwortet werden sollen.

4.4 Ableitung der Forschungsfragen aus der bisherigen Analyse und Forschungsdesign

Aus den bisherigen Fazits geht hervor, dass keine individuellen Methoden und Instrumente für eine frühzeitige energiesensitive Produktentwicklung im Karosseriebau existieren und Energie in frühen Phasen nur unzureichend berücksichtigt wird. Für den Karosseriebau fehlt es zudem an individuellen Prozessdaten, um eine hinreichend genaue Aussage treffen zu können. Das grundsätzliche Problem wird demnach bereits in der fehlenden Datenbasis identifiziert. Hieraus leiten sich die zu beantwortenden Forschungsfragen ab:

- Wird der Energiebedarf als Anforderung im ausreichenden Maße berücksichtigt, wenn die fehlenden individuellen Prozessdaten bereitgestellt werden?
- Welche Herausforderungen können identifiziert werden, wenn der Energiebedarf in der frühen Phase der Karosserieentwicklung Berücksichtigung finden soll?

Kapitel 4.1.3 verdeutlicht, dass es eine Vielzahl an möglichen Methoden gibt, die für ein EcoDesign angewendet werden können. Um die Forschungsfragen beantworten zu können, ist demnach eine Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten gegeben. Um die Komplexität zu reduzieren, soll die Technikbewertung als eine allgemeine Methode als Ausgangsbasis genutzt werden. Durch die kritische Diskussion in Abschnitt 4.1.6 wurde herausgestellt, dass die Technikbewertung für sich keine Möglichkeit bietet, die Anforderung des Energiebedarfs zu berücksichtigen, und daher nur in Kombination mit einer energieorientierten Bewertungsmöglichkeit verwendet werden kann. Aufgrund der genannten Aspekte in Abschnitt 4.2.3 stellt der KEA eine geeignete Methodik dar, die sich für eine Kombination mit der Technikbewertung potentiell eignet.

Für die Kombination der Methoden sollen hierfür in einem ersten Schritt die individuellen Prozessdaten aufgenommen werden, welche für die Entscheidungsträger des Karosseriebaus bisher nicht verfügbar waren. In einem weiteren Schritt soll aufbauend auf den grundlegenden Daten eine für den Karosseriebau individuelle Lösung aus der genannten Kombination aus den allgemeinen Methoden detailliert erarbeitet werden. An der erarbeiteten Lösung soll anschließend evaluiert werden, welche Herausforderungen trotz der Aufnahme individueller Daten und einer individuellen Lösung existieren. Zudem soll die erarbeitete Lösung von den Entscheidungsträgern subjektiv bewertet werden.

5 Erhebung der individuellen Prozessdaten der Herstellungsphase

Um zu überprüfen, welche individuellen Daten notwendig sind, sollen die allgemeinen Anforderungen an das Produkt als Ausgangspunkt dienen. Die Berücksichtigung weiterer Anforderungen neben dem Energiebedarf ist ein fundamentaler Ansatz des EcoDesigns. Damit eine Betrachtung der gestellten Anforderungen ansatzweise stattfinden kann, ist die Wahl eines Untersuchungsgegenstandes nötig sowie die Auswahl einer Reihe von Fügetechniken, welche die Basisprozesse im Herstellungsprozess des Karosseriebaus bilden. In einem weiteren Schritt werden die Anforderungen erhoben und klassifiziert. Basis hierbei ist die Nutzung der Technikbewertung, wobei eine Einordnung der Anforderungen in Restriktionen und Präferenzen stattfindet. Die identifizierten Präferenzen stellen eine Bewertungsgrundlage bei der Auswahl der Fügetechnik dar und geben den Umfang der individuellen Prozessdaten vor, die im Rahmen dieser Arbeit erhoben werden sollen. Anschließend an diese Erhebung findet eine energetische Betrachtung der Wirkungszusammenhänge zwischen den Phasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung statt.

5.1 Auswahl des Untersuchungsgegenstandes

Bei der Wahl des Untersuchungsgegenstandes wurde darauf geachtet, dass verschiedene Fügetechniken zum Einsatz kommen. Hierbei fiel die Wahl auf die Hutablage eines Fahrzeugs der Oberklasse. Das in diesem Fall gewählte Cabriolet besitzt eine fest installierte Hutablage, die beim Öffnen des Kofferraums nicht bewegt wird. Die untersuchte Hutablage bietet einen geeigneten Untersuchungsgegenstand, da sie aus sieben verschiedenen Baugruppen besteht: dem Querträger, den Haltern für die Kindersitze in der Mitte und außen, dem Oberteil der Rückwand, der Aufnahme für die Gurtrolle, einer Versteifung für den Sicherheitsgurt und dem Scheibenquerträger. Aufgrund der Befestigung der Kindersitze handelt es sich bei der ausgewählten Baugruppe um eine sicherheitsrelevante Baugruppe. Zudem besitzt der Querträger eine Ladungssicherungsfunktion.

In diesem Fall soll die Hutablage einer Rohkarosserie verwendet werden, die der Abbildung 21 ähnlich ist und grün gekennzeichnet wurde.

Abbildung 21: Rohkarosserie eines Audi A3 nach [Auto17]

Die Hutablage ist in sechs verschiedene Fügegruppen aufgeteilt. Unter einer Fügegruppe wird eine Gruppierung mehrerer einzelner Fügestellen verstanden, die technologisch gleich eingebracht werden. Hierbei kommen unterschiedliche Materialien sowie Fügetechniken zum Einsatz. Innerhalb des Untersuchungsgegenstands beschränkt sich diese Arbeit auf vier unterschiedliche Fügetechniken, die beispielhaft betrachtet werden. In diesem Fall wurde für die Untersuchung das Durchsetzfügen (Clinchen) gewählt, da es ein mechanisches Fügen darstellt, welches kein Fügeelement benötigt und die Eigenschaft besitzt, unterschiedliche Werkstoffe miteinander zu verbinden. Die zweite Wahl fiel auf das Halbhohlstanznieten (HSN), da bei dieser mechanischen Fügetechnik – anders als beim Clinchen – ein Fügeelement eingesetzt wird. Des Weiteren wurde das Widerstandspunktschweißen (WPS) gewählt, da es sich um ein thermisches Verfahren handelt, welches überwiegend im Karosserierohbau eingesetzt wird und beim Schweißen von Stahl eingesetzt werden kann. Als vierte Fügetechnik wurde das Flow Drill Screwing (FDS) gewählt. Bei dieser Fügetechnik wird das Werkstück durch die Reibung eines schraubenähnlichen Fügeelements erwärmt, durchstoßen und anschließend lösbar verschraubt. Es wurden zwei Fügetechniken aufgenommen, die bereits in der gewählten Baugruppe eingesetzt werden: das HSN und das FDS. Zusätzlich wurden das Durchsetzfügen und das Stahl-Widerstandspunktschweißen gewählt. Die beiden weiteren Fügetechniken wurden ausgewählt, um die Substitutionsfähigkeit zu prüfen. Die Wahl die-

ser potenziellen Substitute wurde aufgrund der hohen Anwendung in der Automobilindustrie getroffen. Abbildung 22 zeigt die gewählten Fügetechniken anhand der Kategorisierung nach DIN 8593-0.

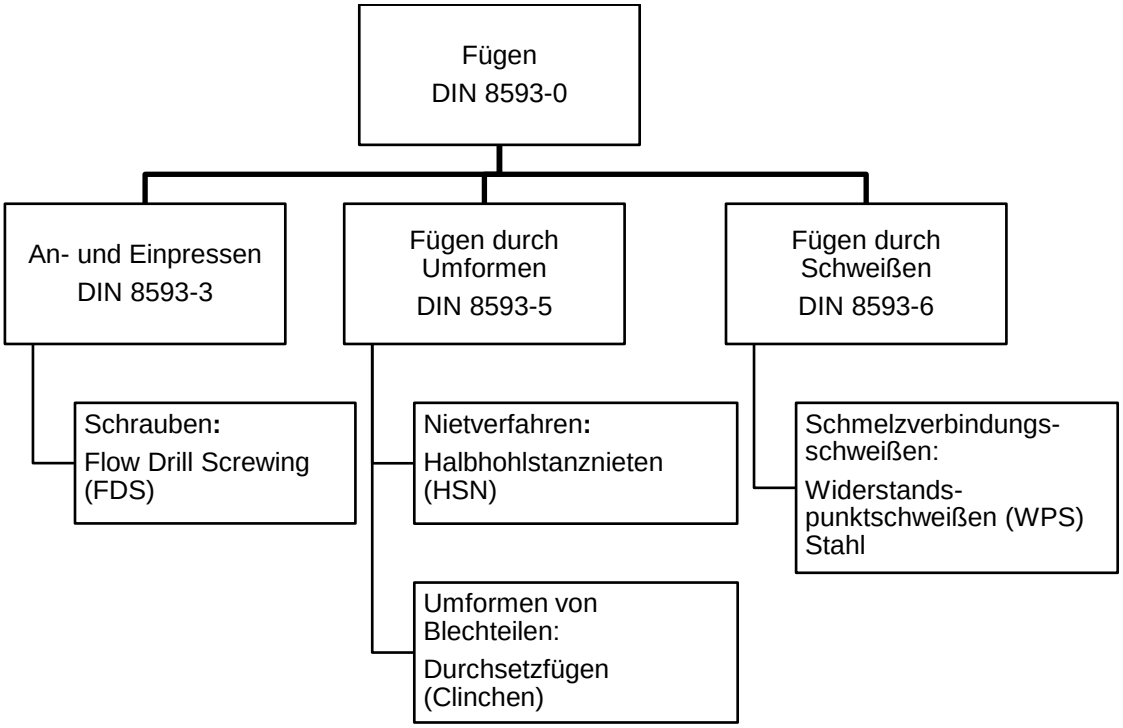

Abbildung 22: Ausgewählte Fügetechniken nach [Deut03]

Da eine geeignete Datenbasis für individuelle Prozesse des Karosserierohbaus nicht in einer ausreichenden Form existiert, muss für die Untersuchungen eine rudimentäre Datenbasis bereitgestellt werden. Die erarbeitete Datenbasis hat dabei keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Sie ist innerhalb dieser Forschungsarbeit als Hilfsmittel zu sehen, anhand derer die aufgestellten Forschungsfragen beantwortet werden sollen. Die Eingangsparameter wurden so gewählt, dass eine Vergleichbarkeit untereinander in einem gewissen Maße möglich ist. Diese Parameter werden für jede Fügetechnik am Ende des folgenden Unterkapitels einzeln aufgezeigt und sind für alle folgenden durchgeführten Messungen gültig. Jedes Unterkapitel beschreibt den genutzten Prozess und die verwendeten Prozessparameter. Später werden auf Basis dieser Parameter die Messungen abgeleitet. Bei den Prozessen kommen unterschiedliche Energieträger zum Einsatz, die entsprechend aufgenommen und vermessen worden sind. Bei den gefügten Proben handelte es sich jeweils um eine Materialdickenkombination von 1,5 mm Stahlblechen. Um eine rudimentäre Vergleichbarkeit zwischen den Fügetechniken zu erlangen, wurde auf die Nutzung unterschiedlicher Materialien verzichtet, da diese nicht bei allen Fügetechniken möglich ist. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Fügetechniken kurz erklärt und dargestellt, welche Abwandlungen des Prozesses untersucht wurden und welche unterschiedlichen Medien dabei zum Einsatz gekommen sind, um anschließend eine zielgerichtete Vermessung der Prozessdaten durchführen zu können.

5.1.1 Untersuchungsgegenstand 1: Durchsetzfügen

Beim Durchsetzfügen, welches auch als Clinchen bezeichnet wird, kann vollständig auf ein Fügeelement verzichtet werden. Bei dieser Fügetechnik wird ein Hinterschnitt zwischen den beiden Blechen erzeugt. Abbildung 23 zeigt den Prozess schrittweise.

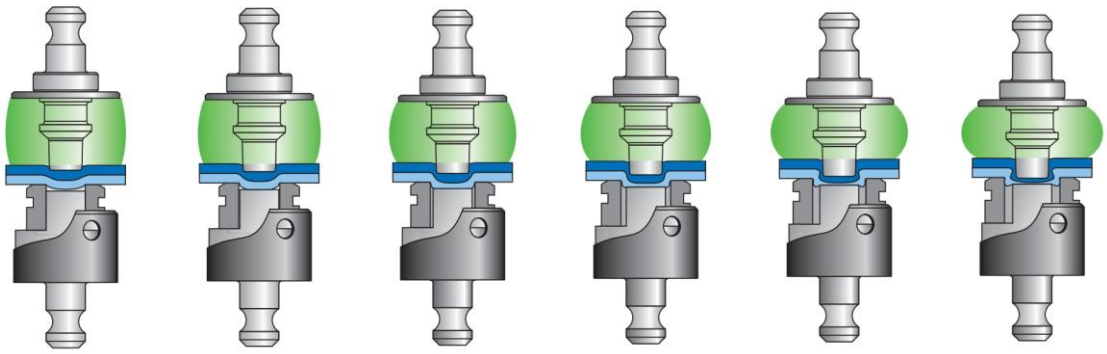

Abbildung 23: Prozess des Durchsetzfügens [Böll13]

Das Prozessgerät besteht aus Matrize und Stempel. Mit dem Stempel wird Druck erzeugt, sodass sich die Bleche in der Matrize verformen. Es entsteht eine form- und kraftschlüssige Verbindung. Zudem existieren einige Verfahrensvariationen, sodass neben runden Stempeln auch eine Vielzahl anderer Formen genutzt werden kann. Ebenso kommen unterschiedliche Prozessmedien zum Einsatz. Beim elektromechanischen Clinchen (EMC) wird elektrische Energie als Energieträger genutzt. Beim servopneumatischen Clinchen wird neben der elektrischen Energie für die Steuerung zudem Druckluft für den Fügeprozess benötigt. Des Weiteren kann beim Clinchen zwischen schneidendem und nicht schneidendem Prozess unterschieden werden. Ein Vorteil des Verfahrens ist eine sehr hohe Punktfestigkeit. Zudem wird kein Zusatzwerkstoff benötigt und es findet keine Verschmutzung der Fügestelle und keine Nacharbeit statt. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass verschiedene Materialkombinationen miteinander verbunden werden können. Zudem kann auf eine Wärmeeinbringung in den Werkstoff verzichtet werden. Außerdem ist eine hohe dynamische Festigkeit erreichbar. Der Nachteil besteht in einer beidseitigen Zugänglichkeit der Fügestelle und in einer geringeren Festigkeit im Gegensatz zum beispielsweise Widerstandspunktschweißen.

In diesem Fall wurde das elektromechanische Clinchen ohne Schneidanteil mit rundem Stempel untersucht. Vor Beginn der Messungen wurden einige Fügepunkte gesetzt, sodass die Anlage ihre Betriebstemperatur erreichen konnte. Die folgende Tabelle 3 zeigt die Untersuchungsparameter, die bei den Messungen verwendet wurden.

Tabelle 3: Untersuchungsparameter für die Fügetechnik: Durchsetzfügen

Materialdickenkombination	**Setzkraft [kN]**
1,5 mm/ 1,5 mm	20
	30

5.1.2 Untersuchungsgegenstand 2: Halbhohlstanznieten

Das HSN basiert auf Form- und Kraftschluss und ist ein rein mechanisches Fügeverfahren. Wie beim FDS wird auch bei diesem Verfahren ein Fügeelement benötigt. Abbildung 24 zeigt den Fügevorgang schrittweise.

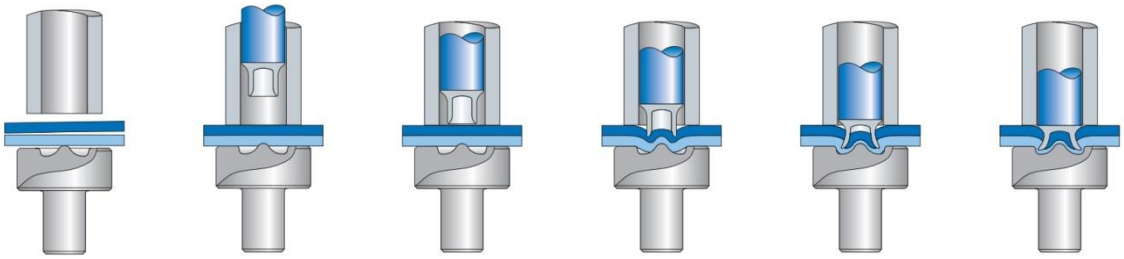

Abbildung 24: Prozess des Halbhohlstanznietens [Wilh13]

Zunächst wird das Prozessgerät positioniert. Hierzu gehört eine Nietzuführung sowie ein Gegenstück, die Matrize. In einem nächsten Schritt wird die Fügestelle fixiert und zwischen dem Prozessgerät verspannt. Der Hohlstanzniet wird daraufhin in Position gebracht und dringt durch den ausgeübten Druck in den Werkstoff ein. Im weiteren Verlauf wird der Niet gestanzt und danach in die Matrize geformt. Es entsteht ein Hinterschnitt, sodass die beiden Bleche unlösbar miteinander verbunden werden. Am Schluss wird die Verbindung gesetzt, sodass der Niet mit der Kopfseite schlüssig mit dem oberen Blech abschließt. Die Vorteile dieser Verbindung sind die sehr hohe Prozesssicherheit, keine Erwärmung des Bauteils, eine hohe Festigkeit und die Möglichkeit zur Nutzung verschiedener Blechwerkstoffe. Dennoch ist eine beidseitige Zugänglichkeit erforderlich und es werden hohe Fügekräfte benötigt. Das Setzen der Niete erfolgt mittels Hydraulik, die Zuführung der Niete mittels Druckluft. Bei der Hydraulik handelt es sich um einen geschlossenen Kreislauf, welcher mit elektrischer Energie angetrieben wird. Für die Messungen wurden die in Tabelle 4 gezeigten Parameter festgelegt.

Tabelle 4: Untersuchungsparameter für die Fügetechnik: HSN

Materialdickenkombination	Niet	Setzkraft [kN]
1,5 mm/ 1,5 mm	3,3 x 5 mm	20
		30

5.1.3 Untersuchungsgegenstand 3: Widerstandspunktschweißen

Das WPS gehört zu den Widerstandsschweißverfahren und wird vorwiegend in der Automobilindustrie eingesetzt, um Stahlbleche miteinander zu verbinden. Abbildung 25 zeigt die einzelnen Schritte des Schweißprozesses in einer Grafik.

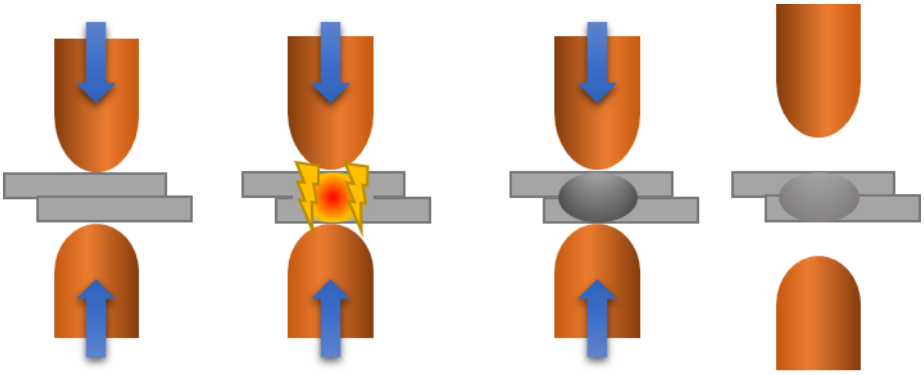

Abbildung 25: Prozess des Widerstandspunktschweißens

Mittels Elektroden eines zangenförmigen Prozessgerätes wird die Blechkombination an einem Punkt miteinander verspannt und der Druck aufrechterhalten. In einem weiteren Schritt wird elektrische Energie durch das Material geleitet, wodurch der Grundwerkstoff aufschmilzt und ein Schmelzbad bildet. Nach dem Erkalten entsteht eine unlösbare Verbindung. Um einem Überhitzen vorzubeugen, wird die Temperatur der Elektroden mittels Kühlflüssigkeit geregelt. Ein weiterer benötigter Nebenprozess ist das Kappenfräsen. Materialreste aus dem Schmelzbad verkleben nach einiger Betriebszeit die Kappen, sodass diese regelmäßig spanend bearbeitet oder ausgetauscht werden müssen. Der Spannprozess wird in der Regel mithilfe eines Elektromotors oder Druckluftzylinders realisiert. Die Vorteile des Punktschweißens liegen in der Fertigungsgeschwindigkeit und der hohen Festigkeit, die erreicht werden kann. Zudem ist das Verfahren sehr gut automatisierbar. Die Nachteile sind der Wärmeeintrag in den Werkstoff sowie die Notwendigkeit der beidseitigen Zugänglichkeit. Der Prozess ist zudem lediglich auf schweißbare Werkstoffkombinationen begrenzt. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass sich dieses Verfahren aufgrund der entstehenden Staubpartikel kritisch auf die Umgebungsluft auswirkt, sodass aufgrund der Gesundheitsvorschriften eine ausreichende Absaugung in der Fertigungshalle sichergestellt werden muss. In Tabelle 5 werden die untersuchten Parameter für das WPS gezeigt, mit denen weitere Messungen durchgeführt wurden.

Tabelle 5: Untersuchungsparameter für die Fügetechnik: WPS

Materialdickenkombination	**Basiskraft [kN]**	**Schweißzeit [ms]**	**Stromstärke [kA]**
1,5 mm/ 1,5 mm	2,6	340,0	8,0
			9,0

5.1.4 Untersuchungsgegenstand 4: Flow Drill Screwing

Das FDS, welches auch als fließlochformendes Schraubverfahren bezeichnet wird, findet vor allem Anwendung in der blechverarbeitenden Industrie. Einen Vorteil dieses Prozesses stellt die Fähigkeit dar, verschiedene Materialpaarungen miteinander zu verbinden. Die Abbildung 26 zeigt den FDS-Prozess schrittweise.

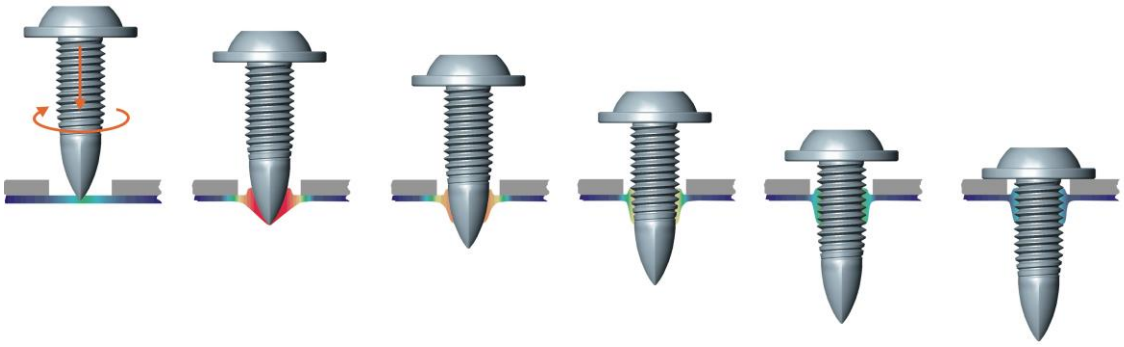

Abbildung 26: Phasen eines Verschraubungsprozesses mit FDS [EJOT09]

Das Fügeelement, welches als Schraube bezeichnet werden kann, wird auf das untere Blech aufgesetzt und in eine schnelle Rotationsbewegung versetzt. Hierbei wird zusätzlich eine axiale Kraft aufgebracht. Aufgrund der Reibung erwärmt sich das Blech und schmilzt lokal auf. Die eindringende Schraube furcht anschließend selbstständig das Gewinde. Bei diesem Vorgang können Verbindungen mit hoher Festigkeit erreicht werden. Für die Bereitstellung der Drehzahl und der Axialkraft wird zum einen elektrische Energie sowie Druckluft benötigt. Im Karosseriebau wird dieses Fügeverfahren überwiegend voll automatisiert eingesetzt. Hierbei wird das Prozessgerät zum Setzen der FDS-Verschraubung stetig mit neuen Fügeelementen versorgt. In der Regel wird diese Versorgung ebenfalls mit Druckluft realisiert. Die Vorteile des Fügeverfahrens sind unter anderem die einseitige Zugänglichkeit, die hohe erreichbare Festigkeit sowie die spätere Lösbarkeit der Verbindung.

Die Drehzahlen und die aufgebrachte Axialkraft während des Fügeprozesses können die Qualität der Verbindung beeinflussen. Aufgrund der Komplexität der daraus entstehenden Variationsmöglichkeiten wurde ein dreistufiges Fügeprogramm untersucht, wobei lediglich die erste Stufe verändert wurde. Hierbei ergibt sich ein verändertes Eindringverhalten des Fügeelements in den Werkstoff. Tabelle 6 zeigt die verwendeten Fügeparameter.

Tabelle 6: Untersuchungsparameter für die Fügetechnik: FDS

Materialdicken-kombination	**n_1 [min^{-1}]**	**F_{setz1} [kN]**	**n_2 [min^{-1}]**	**F_{setz2} [kN]**	**n_3 [min^{-1}]**	**F_{setz3} [kN]**
1,5 mm/ 1,5 mm	2000	1,6	1500	0,8	300	1,2
	2500	1,6	1500	0,8	300	1,2
	4000	1,3	1500	0,8	300	1,2

5.2 Erhebung und Klassifikation der Anforderungen

Um zu erheben, welche Anforderungen in der Produktentwicklung an Baugruppen gestellt werden, wurde ein Workshop mit den interdisziplinären Entscheidungsträgern der

Baugruppe initiiert. Dieses Team bestand aus Vertretern der Konzeptplanung (2), Konzeptentwicklung (2), Produktionsplanung (1) und dem Technologiemanagement (1). Bei diesem Workshop wurden zunächst in einem teilstrukturierten Interview Fragen bezüglich der Berücksichtigung von Energieverbräuchen bei der Auswahl der Fügetechnik gestellt. Um eine Technikbewertung nach VDI 3780 durchführen zu können, fand nachfolgend zunächst die methodische Erarbeitung der Restriktionen und darauffolgend die Erarbeitung von Präferenzen statt. Dieser Teil der Arbeit wurde von studentischen Arbeiten innerhalb eines automobilen Unternehmens unterstützt.

Um die Restriktionen zu ermitteln, wurde zunächst der Untersuchungsrahmen innerhalb des Karosseriebaus auf die vier Fügetechniken reduziert. Die bereits dargestellte Baugruppe der Hutablage wurde als Untersuchungsgegenstand genutzt, um die Substitutionsmöglichkeit der Fügetechnik untereinander zu vergleichen. Die kleinste Einheit der Substitution stellt eine Fügegruppe dar. Die Untersuchungen wurden innerhalb eines Forschungsprojekts im Umfeld eines Automobilherstellers durchgeführt. Aufgrund der Geheimhaltung kann auf die ausgewählte Baugruppe nur rudimentär eingegangen werden.

Am Anfang des Workshops wurde zunächst die Kreativitätsmethode des Brainstormings durchgeführt, um mit einer gewissen Anzahl an Restriktionen in die Erhebung zu starten. Hierbei wurden Anforderungen aus der Erfahrung der Workshopteilnehmer frei geäußert, diskutiert und gesammelt. Dieses Vorgehen erleichterte den Übergang in die systematische Vorgehensweise. Hierbei wurden am Anschluss des initialen Brainstormings die zu untersuchenden Fügetechniken tabellarisch den bereits erarbeiteten Anforderungen gegenübergestellt. Es erfolgt anschließend eine Bewertung, ob eine komplette Fügegruppe durch eine andere Fügetechnik substituiert werden kann. Dieses Vorgehen wurde anhand weiterer, hier nicht gezeigter Baugruppen durchgeführt, sodass die Anforderungen zudem aus anderen Untersuchungen ergänzt wurden. Abbildung 27 zeigt das Vorgehen grafisch.

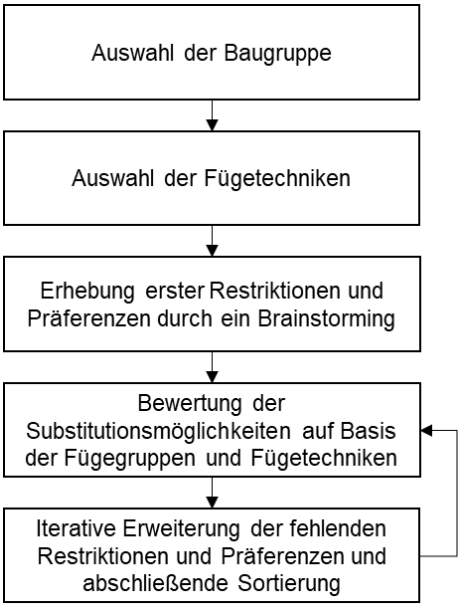

Abbildung 27: Vorgehen zur Ermittlung der Restriktionen und Präferenzen

Für die untersuchte Baugruppe wurde eine Tabelle angefertigt, die jede Fügegruppe mit jedem ausgewählten Fügeverfahren anhand der Anforderungen auf Durchführbarkeit prüft. Aus den genannten Geheimhaltungsgründen wurden die Fügegruppen nicht benannt, sondern lediglich nummeriert. Die genannten Anforderungen wurden direkt in Restriktionen und Präferenzen einsortiert. Tabelle 7 zeigt das Ergebnis der Betrachtung der Hutablage.

Tabelle 7: Anforderungsmatrix am Beispiel der Hutablage

Hutablage			Anforderungen														
			Werkstoffkombination	Materialdickenkombination	Zugänglichkeit	Flanschlänge	Fügeabstand	Design	Oberflächenbeschaffenheit	Korrosion	Flanschbreite	Energiebedarf	Investitionskosten	Kosten pro Fügeelement	Prozesszeit	Festigkeit	Wiederverwendbarkeit
Clinchen	Fügegruppe	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Präferenz	Präferenz	Präferenz	Präferenz	Präferenz	Präferenz
		2	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
		3	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
		4	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
		5	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
		6	1	1	0	/	/	/	/	/	/						
HSN	Fügegruppe	1	*	*	*	*	*	*	*	*	*						
		2	*	*	*	*	*	*	*	*	*						
		3	*	*	*	*	*	*	*	*	*						
		4	*	*	*	*	*	*	*	*	*						
		5	*	*	*	*	*	*	*	*	*						
		6	1	1	0	/	/	/	/	/	/						
WPS	Fügegruppe	1	0	/	/	/	/	/	/	/	/						
		2	0	/	/	/	/	/	/	/	/						
		3	0	/	/	/	/	/	/	/	/						
		4	0	/	/	/	/	/	/	/	/						
		5	0	/	/	/	/	/	/	/	/						
		6	0	/	/	/	/	/	/	/	/						
FDS	Fügegruppe	1	1	1	0	/	/	/	/	/	/						
		2	1	1	0	/	/	/	/	/	/						
		3	1	1	0	/	/	/	/	/	/						
		4	1	1	0	/	/	/	/	/	/						
		5	1	1	0	/	/	/	/	/	/						
		6	*	*	*	*	*	*	*	*	*						

*	derzeit eingesetzte Fügetechnik
1	durchführbare Fügetechnik
0	Ausschlusskriterium für diese Fügegruppe
/	Nicht weiter betrachtet auf Grund vorhergehender 0

Die gezeigte Tabelle stellt die sechs Fügegruppen der Hutablage mit jeweils einer Fügetechnik den erarbeiteten Anforderungen gegenüber. Aus der Tabelle kann entnommen werden, dass das derzeitig eingesetzte Fügeverfahren bei den Fügegruppen 1–5 das HSN darstellt. Als potenzielles Substitut ergibt sich das Clinchen. Das WPS ist durch die unterschiedlichen zu fügenden Werkstoffe keine Alternative. Weitere Anforderungen, die durch die Diskussion während der Befüllung der Tabelle genannt wurden, sind als weitere Spalte in die Tabelle eingefügt. Bei der Bewertung wurde auf Erfahrungswerte der Teilnehmer zurückgegriffen. Da eine bloße Nennung der Anforderungen Raum für

Interpretation bietet, wird im Folgenden eine Kategorisierung vorgenommen und jede einzelne Anforderung kurz definiert.

5.2.1 Restriktionen

Werkstoffkombination: Der Werkstoff beziehungsweise die Werkstoffkombination bestimmt in einem hohen Maße die einzusetzende Fügetechnologie. Ein Kunststoff- oder ein Aluminium-Bauteil kann nicht durch ein WPS-Verfahren bearbeitet werden und würde zu einem Ausschluss des Prozesses führen. Bei dieser Restriktion findet eine Prüfung statt, ob eine grundsätzliche physikalische Machbarkeit besteht.

Materialdickenkombination: Die Materialdicke bestimmt in einem hohen Maße die Prozessparameter des Prozessgerätes. Bestimmte Blechdickenkombinationen können nicht prozesssicher miteinander gefügt werden und führen somit zum Ausschluss des Fügeverfahrens. Im Bereich der thermischen Fügeverfahren wie zum Beispiel dem WPS muss bei einer hohen Materialstärke ein hoher Schweißstrom gewählt werden. Ein dünnes Blech würde in Kombination mit einem dickeren durch die hohe Wärmeeinflusszone zu weit aufbrennen, sodass keine sichere Verbindung zwischen den Bauteilen entstehen könnte.

Die **Zugänglichkeit** muss gewährleistet sein, um die entsprechende Fügestelle einzubringen. Bei der Schweißzange ist immer eine Zugänglichkeit von beiden Seiten erforderlich. Ist dies nicht gegeben, kann die Fügestelle nicht realisiert werden. Bei Fügeverfahren mit Flügelelementen wie dem HSN und dem FDS muss eine Zuführung des Elements gewährleistet werden können. Oft muss das Element axial zugeführt werden, was erhöhte Anforderungen an die umliegenden Konturen stellt. Ist die Fügestelle nicht mit dem Prozessgerät erreichbar, führt dies oftmals zu einem Ausschluss des Fügeverfahrens, wenn die Störgeometrie nicht geändert werden kann.

Flanschlänge: Um eine ausreichende Festigkeit zu erzeugen, werden die Fügestellen bei den punktuellen Fügetechniken auf der gesamten Flanschlänge verteilt. Hierbei muss ein gewisser Fügeabstand eingehalten werden, auf den im nachfolgenden Punkt detaillierter eingegangen wird. Hieraus ergibt sich eine minimale Flanschlänge, die garantiert werden muss, um die Bauteile ausreichend fügen zu können.

Fügeabstand: Fügeverfahren benötigen einen minimalen Abstand zwischen den jeweiligen Fügestellen. Ist ein Flansch nicht lang genug, kann eine bestimmte Festigkeit durch das Fehlen einiger Punkte nicht erreicht werden. Werden zum Beispiel Schweißpunkte zu nah gesetzt, fließt beim WPS der Strom durch eine bereits gesetzte Fügestelle (Nebenschluss). So wird die Bildung einer Schweißlinse verhindert. Bei mechanischen Verfahren wie dem HSN oder beim Clinchen kann es bei zu großem/kleinem Abstand dazu kommen, dass das Material Wellen schlägt.

Die Optik oder auch das **Design** wird vom Kunden als Kaufkriterium gestellt. Im weiteren Sinne ist Design eine subjektive Anforderung, die keinen binären Charakter besitzt. Hierbei ist in der gezeigten Tabelle jedoch nicht die Eigenschaft der Ästhetik direkt gemeint.

Die Fügestellen beeinflussen direkt die Ästhetik. In vielen Fällen dürfen diese Fügestellen nicht sichtbar sein. Daher besitzt dieses Kriterium innerhalb dieser Betrachtung einen binären Charakter – **sichtbar/unsichtbar**. Handelt es sich um eine Fügestelle, bei dem dieses Kriterium keine Rolle spielt, würde es entfallen.

Oberflächenbeschaffenheit: Halbzeuge weisen eine unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit auf. Verzinktes Blech ist zum Beispiel ein oft verwendetes Material, welches besondere Anforderungen an die Prozesse stellt. Wird die Oberfläche durch eine Fügetechnik beschädigt, kann dies zur Korrosion und somit langfristig zu einer Kundenunzufriedenheit sowie zu einer Verringerung der Produktlebenszeit führen.

Korrosion: Die Restriktion der Korrosion beziehungsweise Korrosionsbeständigkeit betrifft vor allem die Eigenschaft der Elektronegativität. Bei einer Verbindung von Aluminium und Stahl besteht beispielsweise eine erhöhte Korrosionsgefahr aufgrund der elektrochemischen Spannungsreihe. Im Nassbereich muss daher eine großflächige und umfassende Abdichtung der Bleche gewährleistet werden. Findet eine Abdichtung mit Klebstoff statt, schränkt dies die Auswahl an Fügetechniken ein, da thermische Fügeverfahren die Klebstoffabdichtung verbrennen würden.

Flanschbreite: Durch die Breite des Flansches kann die Fügetechnik eingeschränkt werden. Grund hierfür ist der Platzbedarf, der für eine Fügestelle benötigt wird. Bei thermischen Verfahren wie dem WPS kann bei zu geringem Abstand zur Außenkante das Blech aufschmelzen. Ist ein Bauteil abgekantet, kann es bei der Berührung des Prozesswerkzeugs mit dem Bauteil zu einem ungewollten Nebenschluss kommen. Ein gewisser Abstand muss daher grundsätzlich eingehalten werden. Eine fachgerechte Durchführung ist somit bei einer zu kleinen Flanschbreite nicht gewährleistet.

Die vorgestellten Restriktionen zeigen, wie komplex sich die Auswahl der Fügetechnik gestalten kann. Durch die Erarbeitung der Tabelle 7 stellt sich heraus, dass für bestimmte Fügestellen mehr als eine Lösungsalternative existiert. Dies ist die Grundlage dafür, eine Entscheidung treffen zu können [Grün09]. Um eine solche Entscheidung zu treffen, ist es notwendig, die verbleibenden Lösungsalternativen gemäß den Präferenzen zu bewerten, welche im Folgenden zunächst aufgenommen werden.

5.2.2 Präferenzen

Bei den Präferenzen handelt es sich um Anforderungen, welche in einem gewissen Umfang einer Toleranz unterliegen. Anhand dieser Anforderungen kann aufgrund des quantitativen Charakters eine Bewertung und darauffolgend eine Entscheidung vorgenommen werden. Ähnlich wie bei der Aufnahme der Restriktionen wurden die Präferenzen durch den Workshop mittels Brainstormings erarbeitet. Die Präferenzen werden analog zu den Restriktionen genannt und kurz erklärt, um zu definieren, was innerhalb der Arbeit unter den einzelnen Begriffen verstanden wird.

Der **Energiebedarf** kommt als neue Anforderung hinzu und repräsentiert die Energie, die bei der Erstellung der betrachteten Fügestelle benötigt wird.

Die **Investitionskosten** legen einen Anteil der späteren Produktkosten fest. Sie werden vor Planungsbeginn durch das Controlling festgelegt. Diese Vorgaben müssen eingehalten werden und besitzen somit einen restriktiven Charakter. Dennoch werden die Investitionskosten als Präferenz aufgeführt. Es existiert zwar ein vorgegebenes Kosten-Target, dennoch wird es nicht aufgrund einer einzelnen Entscheidung erreicht, sondern besteht aus vielen Einzelentscheidungen, die bewertet werden müssen.

Kosten pro Fügeelement machen einen großen Teil der variablen Kosten aus. Die Fügeelemente werden vom Automobilisten überwiegend von Zulieferern hinzugekauft, welche auf dem Gebiet eine tiefere Expertise besitzen.

Unter der Taktzeit wird die Zeit verstanden, die zwischen zwei Arbeitsgängen benötigt wird. Es gibt im Karosseriebau unterschiedliche Taktzeiten, welche das Aussehen der Produktionslinie zum großen Teil beeinflussen. Eine hohe Variantenvielfalt der eingesetzten Fügeverfahren kann dazu führen, dass sich die Taktzeit durch zusätzliche Handhabungs- oder Werkzeugwechselprozesse verlängert. Wichtige Einflussgröße ist die einzelne **Prozesszeit** des Fügeverfahrens. Eine Fügestelle, die mit dem Verfahren WPS erstellt wird, benötigt zum Erhärten nach dem eigentlichen Schweißprozess eine gewisse Zeit. Hierbei wird mit den Polkappen der Schweißzange ein bestimmter Druck erzeugt, damit die Schweißlinse geformt werden kann und die Bleche zusammengehalten werden.

Die **Festigkeit** ist bei der Karosserieentwicklung von zentraler Bedeutung. Die Einzelteile aus dem Presswerk müssen zu einer Gesamtkarosserie gefügt werden und gemäß den Festigkeitsanforderungen bestimmten Belastungen standhalten. Bei Crashtests ist es wichtig, durch geeignete Verbindungstechnik einen Widerstand gegen die Verformung zu erreichen. Die Erreichung der Festigkeit ist somit von zentraler Bedeutung. Kann die geforderte Festigkeit nicht erreicht werden, muss nach Alternativen gesucht werden. Daher handelt es sich um eine Restriktion. Ähnlich jedoch wie bei den Investitionskosten gibt es ein Target, welches erreicht werden muss. Wie sich dieses Target jedoch exakt zusammensetzt, ist als eine Präferenz zu verstehen.

Als **Wiederverwendbarkeit** wird die Möglichkeit bezeichnet, bestehende Anlagen für ein weiteres Produktrelease zu verwenden. Vorteil dieser Methode ist eine längere Nutzungsdauer der Betriebsmittel und somit eine Reduktion der Investitionskosten. Diese Eigenschaft muss bei jedem Anwendungsfall neu beurteilt werden. Die Möglichkeit der Wiederverwendung ist hauptsächlich auf Anpassungskonstruktionen zurückzuführen. Hierbei bleibt der Großteil der automobilen Karosserie bestehen, sodass die alten Produktionsanlagen teilweise weiter genutzt werden können.

Die herausgestellten Präferenzen müssen gemäß der Technikbewertung bewertet werden, um eine Entscheidung herbeiführen zu können. Da individuelle Daten der herausgestellten Präferenzen für den Karosseriebau nicht verfügbar sind, sollen diese Größen im folgenden Kapitel erarbeitet werden.

5.3 Quantifizierung der Präferenzen und Harmonisierung

Präferenzen besitzen im Gegensatz zu den Restriktionen keinen binären Charakter, sodass durch eine Quantifizierung eine Vergleichbarkeit der Fügetechniken realisiert werden kann. Grundlage hierfür ist die Aufnahme der quantitativen Eigenschaften je Fügetechnik der herausgestellten Präferenzen. In diesem Kapitel werden die Energiebedarfswerte, Investitionskosten, Fügeelementkosten, Prozesszeit und Festigkeit ermittelt. Die Präferenz der Wiederverwendbarkeit der Anlage kann aufgrund der Komplexität nur rudimentär berücksichtigt werden. Sie muss vom Entscheidungsträger nach einer Entscheidungsunterstützung gesondert bewertet werden. Die hier aufgenommenen Präferenzen sollen im Folgenden anhand der vier ausgewählten Fügeverfahren quantifiziert werden. Dies ist erforderlich, um eine rationale Entscheidung herbeizuführen.

Auf Basis einer Musterbauzelle wurden die Anlageninvestitionskosten für die vier Fügetechniken ermittelt. Eine Herausforderung stellt sich bei der Quantifizierung bei der Definition einer einheitlichen Systemgrenze. Sie muss im Sinne der Komplexität beherrschbar bleiben und dennoch richtungsweisende Ergebnisse liefern sowie gleichzeitig innerhalb des Untersuchungsrahmens einheitlich sein. Da die Kosten zwischen den Unternehmen stark variieren können, erheben die folgenden Darstellungen keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Soll eine vergleichbare Untersuchung in einem Unternehmen stattfinden, müssen individuelle Werte in einem einheitlichen Rahmen aufgenommen werden.

5.3.1 Energiebedarf

Um den Energiebedarf in einer frühen Phase zur Verfügung zu stellen, muss das Ergebnis der Energiemessung für diese Phase ausreichend sein. Das heißt, in einer Phase, in der detaillierte Informationen über das spätere Produkt nur zum Teil vorhanden sind. Aufgrund der hohen Komplexität und der Unsicherheiten werden Nebenprozesse in diesen Messungen nicht berücksichtigt. Der Energiebedarf der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA), von Wartung, Belüftung, Logistik und weiteren Nebenprozessen entfällt somit. Begründet wird die Entscheidung damit, dass detaillierte Informationen über zum Beispiel das Hallenbelüftungskonzept, logistische Wege und benötigte Vorrichtungen noch nicht in der frühen Phase ausdetailliert worden sind. Zudem wird die menschliche Arbeit nach dem KEA energetisch nicht bewertet. Berücksichtigt werden nur die Prozesse, die benötigt werden, um eine prozesssichere Fügestelle direkt zu erstellen.

Elektrische Leistungsmessung

Innerhalb der meisten Industrieanlagen in Deutschland kommt ein Dreiphasen-Wechselspannungsnetz mit 400 V und 50 Hz zum Einsatz. Ein Netz mit einer Dreiphasen-Wechselspannung bietet den Vorteil, dass die Leistung im Gegensatz zum einphasigen Wechselstrom harmonischer übertragen werden kann [Mari11]. Zudem beträgt die Spannungsebene 400 V (zwischen zwei Phasen) gegenüber einem einfachen Wechselstromnetz mit 230 V zwischen Phase und Neutralleiter. Um eine Aussage über die elektrische

Leistung während des Fügeprozesses zu treffen, wurden Messungen mithilfe von Strommesszangen durchgeführt. Diese Messtechnologie bietet den Vorteil, dass ein stromführender Leiter ohne Trennung vermessen werden kann. Abbildung 28 zeigt exemplarisch eine Messung für das EMC.

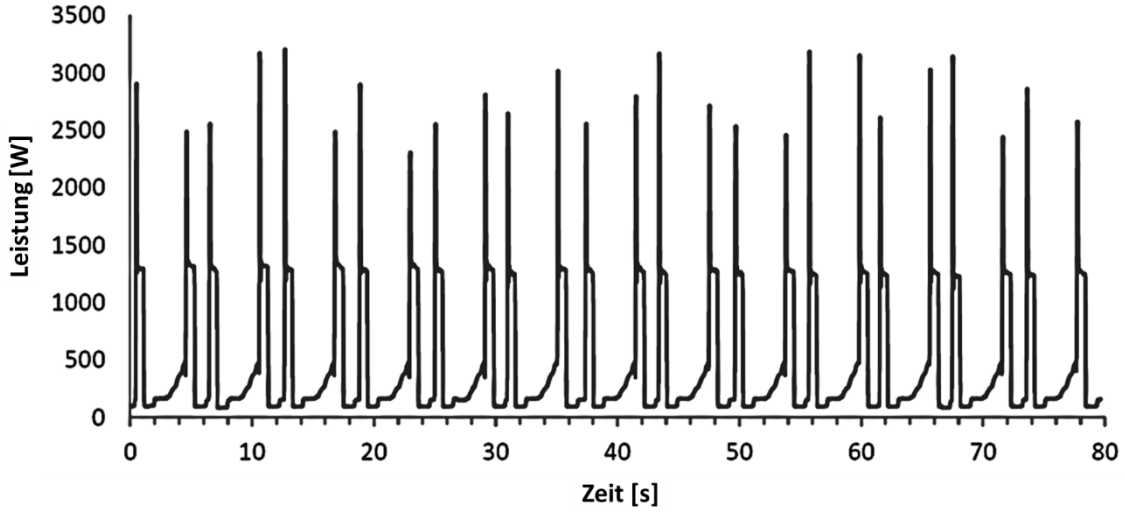

Abbildung 28: Exemplarische Messungen für die Fügetechnik: EMC

Abbildung 28 zeigt die sich immer wiederholende Charakteristik des EMC-Fügeverfahrens. Für die vorliegende Arbeit wurden zehn Charakteristiken aus den Messungen ermittelt und daraus ein Mittelwert gebildet. Dieses Vorgehen wurde als Parameter für die frühe Phase als ausreichend bewertet, da eine tiefere Detaillierung zu diesem Zeitpunkt nicht erforderlich ist. Eine Darstellung von Spannungsspitzen oder Standby-Verbräuchen und deren explizite Ausweisung ist hierfür nicht erforderlich, wie es zum Beispiel bei Schacht für die detaillierte Auslegung der TGA gemacht wurde [Scha14, Born16]. Neben der reinen Energiemessung während des Prozesses wurden auch Fügetechniken ausgewählt, die mittels Druckluft betrieben werden. Im Folgenden wird demnach auf den Energiebedarf durch die Druckluft eingegangen und wie diese erfasst werden kann.

Druckluft

Die Verwendung von Druckluft als Energieträger ist in aktuellen Produktionsanlagen vollständig etabliert. Der Druckluftverbrauch wurde innerhalb dieser Arbeit mit einem kalorimetrischen Messprinzip ermittelt. Dabei wird in der Druckluftleitung ein Heizwiderstand installiert. Die vorbeiströmende Druckluft kühlt den Widerstand, sodass durch die bestehende Proportionalität ein Rückschluss auf die Luftmenge erfolgen kann [Müll09].

Aufgrund des gewählten Messprinzips entfallen jegliche Art von Verlusten wie Reibung oder Undichtigkeiten/Leckagen bei der Zuführung der Druckluft, und der direkte Luftbe-

darf der Prozessgeräte kann aufgenommen werden. Die Aufnahme des Druckluftverbrauchs ist erforderlich, da das HSN und das FDS für den Prozess Druckluft benötigen. Neben der Druckluft kommt ein weiteres Medium zum Einsatz. Kühlwasser wird bei thermischen Prozessen eingesetzt, um die Überhitzung der Prozessgeräte zu verhindern. Demnach muss diese Größe zudem betrachtet werden.

Kühlwasser

Das WPS ist ein Fügeverfahren, welches mithilfe einer Wasserkühlung betrieben wird. Das übermäßige Erwärmen der Polkappen führt zu einem erhöhten Verschleiß und ist demnach zu verhindern. Der dabei oftmals genutzte geschlossene Kühlwasserkreislauf verbraucht selbst kein Kühlwasser, benötigt jedoch Energie zur Zirkulation des Kreislaufs. Durch den Einsatz von zum Beispiel offenen Sprinkleranlagen kann es zu Verdunstungseffekten kommen; diese werden in diesem Fall nicht berücksichtigt. Für eine Berechnung des Energiebedarfs wurde auf die betriebswirtschaftlichen Kosten der Prozessmedien ohne Abschreibung der Investitionskosten zurückgegriffen. Hierbei wurden die Kosten pro Kubikmeter Kühlwasser mithilfe der Energiekosten pro Kilowattstunde in Kilowattstunden pro Kubikmeter umgewandelt. Ein Faktor zum mittleren Durchfluss des Kühlwassersystems und die Prozesszeit für eine Fügestelle wurden in einem weiteren Schritt berücksichtigt und damit ein Energiebedarf pro Fügestelle ermittelt. Die genauen Energieverbräuche können nun im nächsten Schritt durch die Summe des direkten Energiebedarfs, Druckluft und Kühlwasser bestimmt werden.

Messungen

Die exemplarisch für die Arbeit ausgewählten vier Fügetechniken wurden energetisch unter den in Kapitel 5.1 gezeigten Betriebsparametern vermessen. Zudem wurde aus den Messungen pro Fügeverfahren ein Mittelwert gebildet, da in einer frühen Phase nicht bestimmt ist, welche genauen Prozessparameter gewählt werden. Um eine spätere Vergleichbarkeit der gemessenen Werte zu gewährleisten, wurden die Ergebnisse nach dem energetisch günstigsten Fügeverfahren linear normiert. Abbildung 29 stellt diese Ergebnisse grafisch dar. Zu sehen ist hier der normierte Energiebedarf pro Fügepunkt.

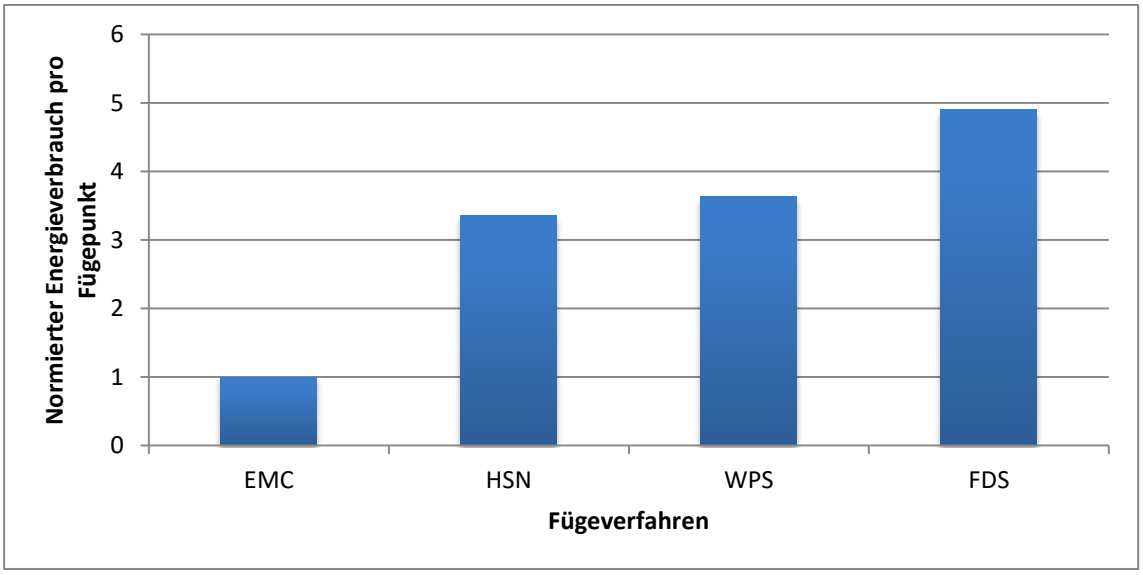

Abbildung 29: Normierter Energiebedarf pro Fügepunkt

Bei der Untersuchung stellte sich heraus, dass das FDS ca. fünf Mal mehr Energie verbraucht als das energieärmste Fügeverfahren. Ein Grund ist unter anderem die Nutzung von Druckluft für die axiale Anpresskraft zur Realisierung der Reibungswärme. Das HSN sowie das WPS unterscheiden sich um ca. 7%. Das EMC benötigt am wenigsten Energie. Die Begründung liegt in der reinen Nutzung mechanischer Energie ohne Einsatz von beispielsweise Druckluft. Die Energie, die für die Herstellung des Fügeelements benötigt wurde, wurde bei dieser Energiebedarfsbetrachtung nicht berücksichtigt und stellt eine Unschärfe dar, die im späteren Verlauf als Herausforderung mit aufgenommen wurde. In diesem Fall werden diese Aufwände als monetäre Kosten berücksichtigt.

5.3.2 Investitionskosten

Um die Investitionskosten zu berechnen, wurden die monetären Aufwendungen für eine Musterbauzelle erhoben. In diesem Beispiel wurden alle investitionsrelevanten Anlagenelemente berücksichtigt, die im direkten Zusammenhang mit der Erstellung einer Fügestelle stehen. Mit in die Kalkulation wurden die Arbeitsstunden pro Jahr, die Gesamtverfügbarkeit der Anlage, die Laufzeit in Jahren und die gemittelten Fügepunkte pro Minute eingerechnet. Auf die damit errechneten gesamten Fügepunkte während eines Lebenszyklus einer Anlage können die gesamten Investitionskosten umgelegt werden. Abbildung 30 stellt die damit ermittelten Investitionskosten grafisch dar.

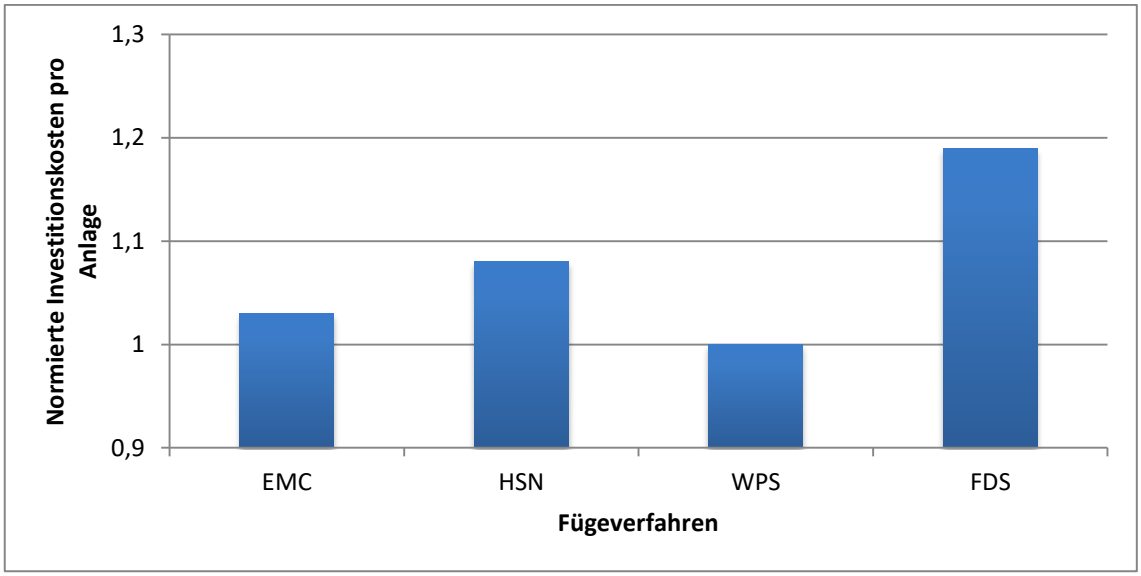

Abbildung 30: Normierte Investitionskosten

Das Fügeverfahren mit den geringsten Investitionskosten ist in diesem Fall das WPS. Alle anderen Fügeverfahren wurden darauf basierend normiert. Das investitionskostenintensivste Fügeverfahren ist das FDS.

5.3.3 Kosten pro Fügeelement

Um die Kosten des Fügeelements zu erheben, werden die direkten Kosten herangezogen, die das Unternehmen für die Anlieferung der Verbindungselemente aufbringen muss. Aufgezeigt werden hierbei die relativen Kosten, die pro Fügeelement einer Fügetechnik entstehen. Zwei der untersuchten Fügetechniken nutzen keine Fügeelemente, daher fehlen diese Kosten gänzlich. Abbildung 31 stellt die Kosten pro Fügeelement grafisch dar.

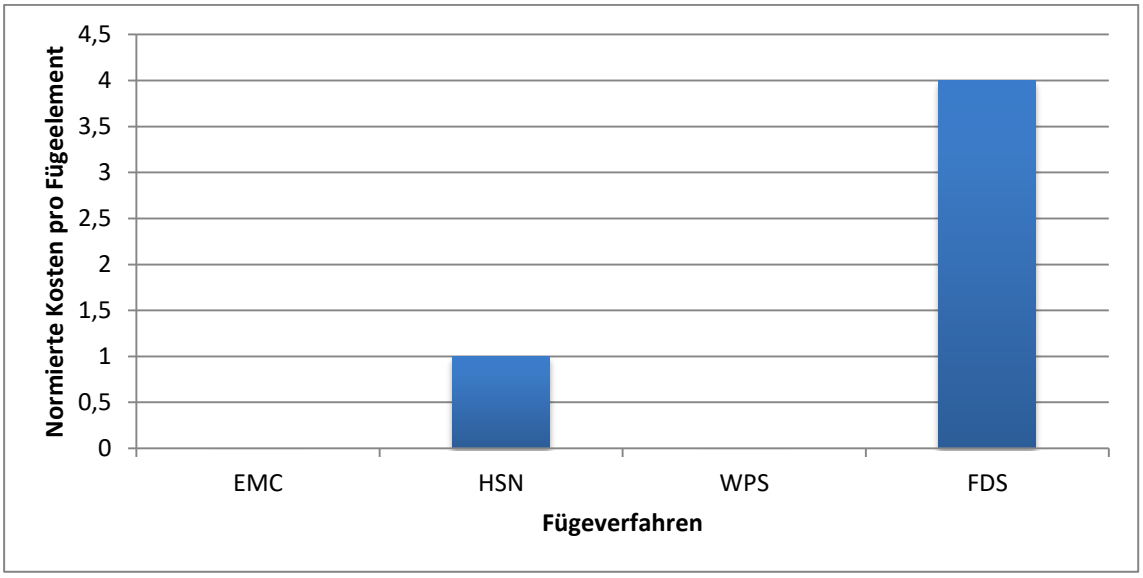

Abbildung 31: Normierte Kosten pro Fügeelement

Das EMC und das WPS benötigen kein Fügeelement und sind somit in diesem untersuchten Fall am kostengünstigsten. Das Fügeelement des FDS kostet vier Mal mehr als ein Halbhohlstanzniet.

5.3.4 Prozesszeit

Aufgezeigt wird die Prozesszeit, die pro Fügestelle einer Fügetechnik entsteht. Für die Ermittlung der Prozesszeit wurden die individuellen Fügetechniken vermessen und die mittlere Prozesszeit berechnet. Es wurden bei den Zeitmessungen zehn Fügepunkte in einer Linie vermessen, wobei auch das einmalige An- beziehungsweise Abfahren beziehungsweise das Verfahren zwischen den Fügestellen zeitlich erfasst wurde. Abbildung 32 stellt die mittlere Prozesszeit pro Fügeverfahren grafisch dar.

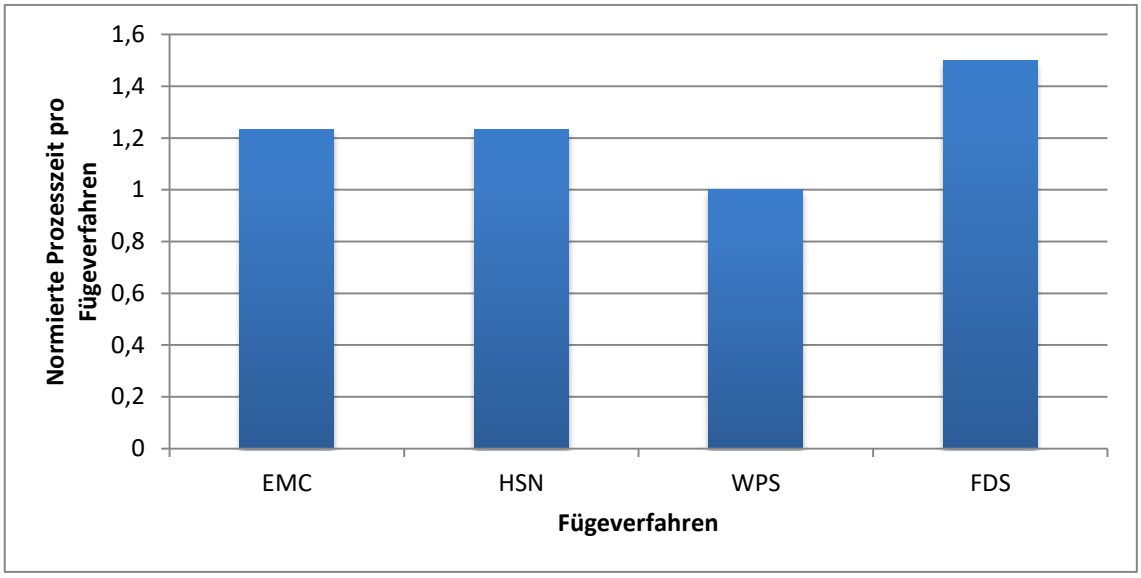

Abbildung 32: Normierte Prozesszeit pro Fügeverfahren

Das EMC sowie das HSN benötigen annähernd die gleiche Zeit. Das FDS benötigt 50% mehr Zeit als das schnellste Fügeverfahren, was in dieser Untersuchung das WPS darstellt. Es wurden individuelle Startpositionen des Roboters benutzt, die gegebenenfalls in der Realität unterschiedlich definiert sind.

5.3.5 Festigkeit

Zur Beschreibung der Festigkeit wird auf die im Kapitel 3 zum Stand der Forschung beschriebene Methodik von Reinstettel zurückgegriffen. Reinstettel nutzt die Vergleichsspannung der Scherzugfestigkeit, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Fügeverfahren herzustellen [Rein07]. Eine Fügestelle kann durch unterschiedliche Prüfverfahren bezüglich der Festigkeit geprüft werden. Die wichtigsten Beanspruchungsarten stellen der Scherzug, der Kopfzug, das Schälen und die Torsion dar [Fisc00]. Ein Schweißpunkt kann bei einer Beanspruchung auf Scherzug die höchsten Kräfte übertragen. Konstruktiv sollen daher andere Beanspruchungsarten so gering wie möglich gehalten werden [Fisc00]. Für diese Arbeit wird daher die Vergleichbarkeit auf Basis der Scherzugfestigkeit durchgeführt. Abbildung 33 zeigt die gewählten Scherzugfestigkeiten pro untersuchtem Fügeverfahren auf Basis der Untersuchungen von Reinstettel [Rein07].

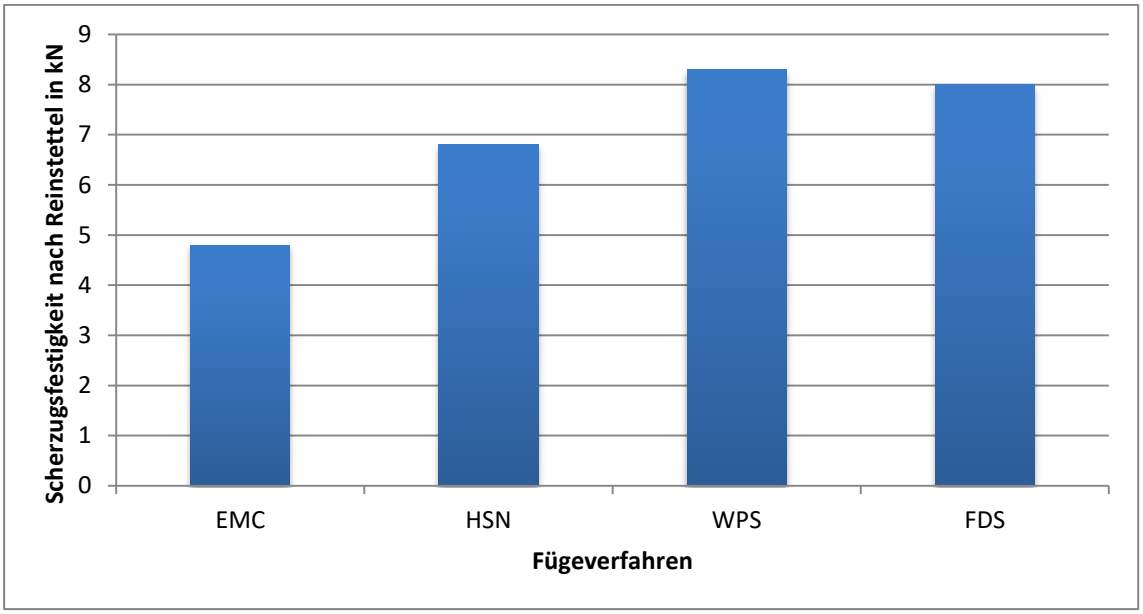

Abbildung 33: Scherzugfestigkeit der untersuchten Fügeverfahren [Rein07]

Reinstettel nutzte bei der Ermittlung der Festigkeitswerte zwei Stahlbleche mit jeweils zwei Fügestellen, die mit einer Kraft scherend auf Zug belastet wurden. Die dabei genutzten Prozessparameter sind vergleichbar zu den bereits durchgeführten individuellen Messungen. Es kann jedoch bereits an dieser Stelle festgehalten werden, dass für eine weiterführende Untersuchung diese Daten individuell und konsistent zu den bereits erhobenen Prozessdaten ermittelt werden müssen. Die von Reinstettel erzeugten Daten werden innerhalb dieser Arbeit als Basis für aufbauende Untersuchungen genutzt.

Die Festigkeitswerte des WPS und des FDS liegen im direkten Vergleich relativ nahe beieinander. Das EMC erreicht die geringste Festigkeit und das HSN erreicht ca. 2 kN mehr Scherzugfestigkeit als das EMC. Anders als bei den vorhergehenden Präferenzen wurde an dieser Stelle nicht normiert. Der Grund liegt darin, dass eine insgesamt zu erreichende Festigkeit als Anforderung angegeben werden muss. Diese muss durch die Fügetechnik erreicht werden. Die Vergleichbarkeit über die Scherzugfestigkeit nach Reinstettel bietet demnach eine Möglichkeit, die Fügetechnik untereinander in einem gewissen Maße vergleichbar zu machen und zu überprüfen, ob die Gesamtfestigkeit erreicht werden kann. Dabei spielt es keine Rolle, mit welchen unterschiedlichen Prozessparametern die Fügestellen erstellt worden sind. Bei einem Vergleich über die Scherzugfestigkeit entspricht der Lastzustand einer Vergleichsspannung, die nicht vollständig der Realität innerhalb einer Karosserie entspricht. Wissentlich wird dennoch innerhalb dieser Untersuchung auf dieser Größe aufgebaut. Dennoch wird dieser Punkt in der Empfehlung zur Weiterführung als Vorschlag für weitere Untersuchungen aufgenommen.

5.3.6 Zusammenfassung und Fazit

Die untersuchten Fügetechniken weisen individuelle Prozessparameter auf, die in diesem Kapitel zusammengetragen wurden. Das Ergebnis ist eine Zusammenstellung der Eigenschaften für ein Fügetechnikprofil oder auch Technologieportfolio [Gome07], an dem eine nachfolgende Bewertung stattfinden kann. Die vollständige Zusammenfassung der quantifizierten Präferenzen zeigt Abbildung 34.

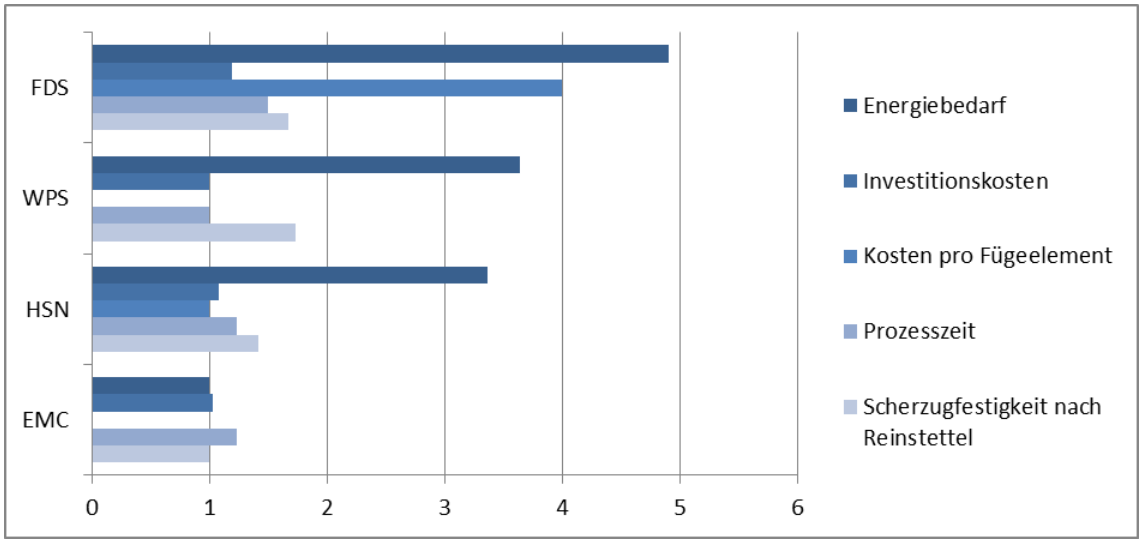

Abbildung 34: Zusammenfassung der Datenerhebung

In der Abbildung 34 zu sehen sind die untersuchten Fügeverfahren, die anhand der identifizierten Präferenzen quantitativ vermessen wurden. Die Scherzugfestigkeit wurde für das Schaubild normiert, um eine Übersicht zu erhalten, welche Stärken und Schwächen jede Fügetechnik mit sich bringt. Das Ergebnis des Abschnitts kann als ein Beispiel für die Erstellung einer individuellen Datenbasis gewertet werden.

Das gezeigte Fügetechnikprofil stellt eine Informationsbasis dar, die genutzt werden kann, um die fehlenden Prozessdaten in der Herstellungsphase bereitzustellen. In der frühen Phase sind Informationen über das Produkt nur in einem geringen Maße verfügbar. Abbildung 35 zeigt den möglichen Effekt grafisch.

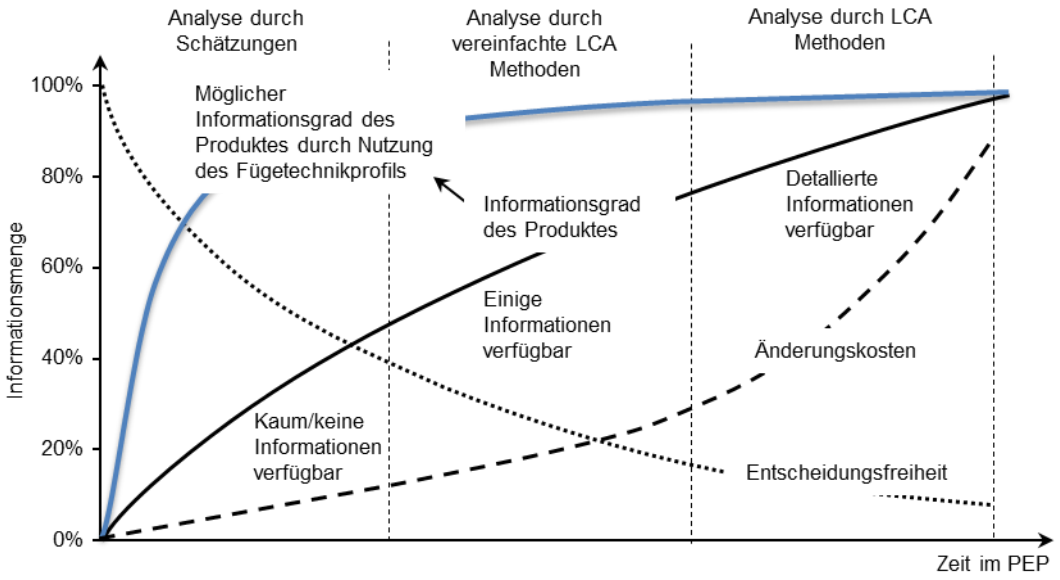

Abbildung 35: Vorteil durch die Nutzung des Fügetechnikprofils erweitert nach [Schi99, Gess01, Coll13]

Die Basis dieser grafischen Darstellung wurde bereits in Abbildung 16 gezeigt. Durch die Nutzung des Fügetechnikprofils kann eine weitaus genauere Beurteilung stattfinden, wie eine Entscheidung auf die Herstellungsphase wirken wird. Die in Blau gekennzeichnete obere Kurve stellt eine qualitative mögliche Verbesserung dar. Die erarbeiteten individuellen Prozessdaten bieten eine Informationsbasis, die dafür genutzt werden kann, genauere Schätzungen in der frühen Phase durchzuführen. Durch den definierten Standard kann ein Großteil der Folgen frühzeitig mit einer gewissen Unsicherheit abgeschätzt werden.

Durch die Aufnahme der Daten zeigte sich, wie komplex sich die Erstellung einer Datenbasis darstellt. Zum einen wurden bei den Messungen rudimentäre Systemgrenzen gezogen. Das heißt, es handelt sich bei den Messungen lediglich um einen Laborversuch, bei dem ein Mittelwert aus den gemessenen Größen gebildet wurde. Nebenprozesse wie Spannvorgänge, Einmessungen, Säuberungen der Prozessgeräte, Beleuchtung fanden hierbei keine Berücksichtigung. Aufgrund der Komplexität konnte die Messung der Energieaufnahme des Kühlwassers nur sehr unscharf ermittelt werden. Weitere kumulierte Aufwendungen wie die der Hallenbelüftung hätten nur mit einem erheblichen Aufwand und einer Berücksichtigung der gesamten Produktionshalle erfolgen können. Bei der Aufnahme der Messungen wurde mehrfach erkannt, dass Fügeverfahren grundsätzlich individuellen Abwandlungen unterliegen und sich technologisch stetig verändern. Somit wird es für notwendig erachtet, dass eine Aktualisierung der aufgenommenen Daten kontinuierlich erfolgen muss. Findet eine Betrachtung der automobilen Organisationsstruktur innerhalb des PEP statt, muss sich das Technologiemanagement der Aufgabe konfrontiert sehen, bei neuen Fügeverfahren oder einer Weiterentwicklung ein solches Fügeprofil zu erarbeiten.

Zusammenfassend wurde in diesem Kapitel eine individuelle Datenbasis anhand der ausgewählten Untersuchungsgegenstände erstellt. Diese Datenbasis kann im Weiteren genutzt werden, um die Auswirkungen von Entscheidungen auf die Herstellungsphase im Karosseriebau zu prognostizieren. Die Anforderung des Energiebedarfs kann sich somit als eine von weiteren Anforderungen in den Entscheidungsprozess eingliedern. Dennoch wurden bisher nur einzelne Daten ermittelt, die im nächsten Kapitel durch einen Prozess in einen Zusammenhang gebracht werden sollen.

6 Konzeption eines Prozesses

Die aufgenommenen Prozessdaten bilden die Datenbasis, um darauf aufbauend einen Prozess für eine frühzeitige energiesensitive Produktentwicklung im automobilen Karosseriebau zu definieren. Der Prozess soll dabei die zuvor beschriebene Methodik der Technikbewertung und des KEA nutzen. Bei der Beschreibung des Prozesses wurden zudem die Defizite berücksichtigt, die in Abschnitt 4.3.4 als kritisch an bisher bestehenden Lösungen bewertet wurden. Es wird vorausgesetzt, dass der Prozess innerhalb eines interdisziplinären Teams stattfindet, wobei von jeder Interessengruppe ein Vertreter verfügbar ist. Anders als bisherige Lösungen findet bei dem hier gezeigten Prozess ein direkter Vergleich zwischen Vorgänger und Nachfolger aufgrund der häufig verwendeten Anpassungskonstruktion statt. Unterschieden wird bei der Betrachtung zwischen dem Vorgänger, dem bestehenden Produkt, welches bereits hergestellt wurde, und dem Nachfolger, dem geplanten neuen Produkt. Bei der Betrachtung des Vorgängers wird vorausgesetzt, dass die benötigten Eigenschaften des Produkts nahezu vollständig bekannt sind. Beim Nachfolger müssen hingegen einige Parameter abgeschätzt werden. Neben der Unterscheidung in den Vorgänger und Nachfolger findet jeweils eine Einteilung in Produkt 1 und 2 statt. Der Übersichtlichkeit halber wurden beide zu fügende Produkte in einem Strang des Prozesses gezeigt, da für beide Produkte das gleiche Vorgehen gilt. Die Abbildung 36 zeigt den konzipierten Prozessverlauf, der im Folgenden detailliert beschrieben wird. Verschiedene Unterprozesse wurden mit Zahlen gekennzeichnet. Diese Unterprozesse werden aufgrund der Übersichtlichkeit im Nachfolgenden gesondert beschrieben.

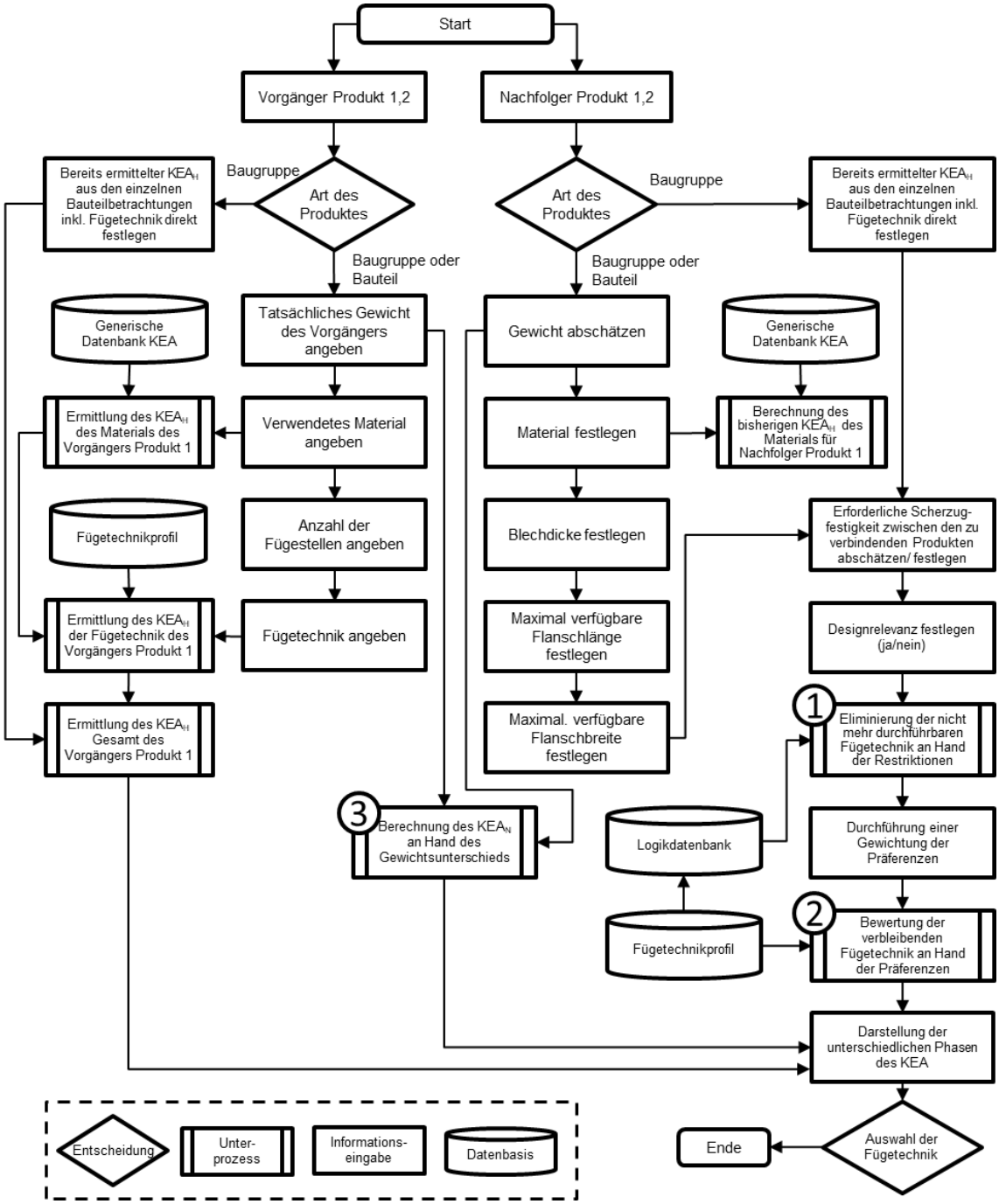

Abbildung 36: Konzipierter Prozessverlauf

Im ersten Schritt soll definiert werden, ob eine Baugruppe in den Vergleich mit einbezogen wird. Eine Baugruppe kann zum Beispiel aus einem Materialmix bestehen. In dem Fall einer Baugruppe muss der bereits im Vorfeld ermittelte KEA_H der Baugruppe inklusive der Fügetechnik ermittelt und anschließend zusätzlich berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung des KEA_H der Baugruppe ist wichtig, da diese auch durch ein Integralbauteil ohne Fügetechnik ersetzt werden kann. Um eine Basis für einen Vergleich dieser

beiden konstruktiven Möglichkeiten zu ermöglichen, ist die Angabe des KEA_H erforderlich.

Da das exakte Gewicht des Vorgängers durch die bereits erfolgte Herstellung als bekannt vorausgesetzt wird, kann das tatsächliche Gewicht des gesamten Produkts angegeben werden. Handelt es sich um zwei einzelne Bauteile, kann mithilfe des verwendeten Materials und der Verwendung einer generischen Datenbank wie zum Beispiel ProBas des Umweltbundesamtes der KEA_H direkt bestimmt werden. Ebenfalls ist beim Vorgänger die verwendete Fügetechnik zwischen den gefügten Produkten bekannt. Hierbei ist die Anzahl der Fügestellen anzugeben und die verwendete Fügetechnik. Mithilfe der aufgenommenen Prozessdaten ist es möglich, den KEA_H der Fügetechnik und durch Addition mit dem KEA_H des Materials den gesamten KEA_H innerhalb der betrachteten Systemgrenzen zu ermitteln. Analog hierzu finden die Prozessschritte für den Nachfolger statt. Im Gegensatz zum Vorgänger muss jedoch abgeschätzt werden, wie viel der Nachfolger wiegen wird. Hierbei kann eine Unterstützung mithilfe von Abschätzungen auf Basis des Vorgängermodells stattfinden. Zudem muss eine Entscheidung bei der Materialwahl getroffen werden, um auch hier den KEA_H analog zum Vorgänger errechnen zu können. Im Gegensatz zum Vorgänger sind für den Nachfolger weitere Angaben erforderlich. Für die in Abschnitt 5.2.1 ermittelten Restriktionen müssen hier Angaben erfolgen, damit eine Berücksichtigung der jeweiligen Restriktion stattfinden kann. Durch Wahl des Materials für Nachfolger 1 und 2 wird die Restriktion der Werkstoffkombination berücksichtigt. Zudem kann auch hieraus aus geschätztem Gewicht und Material unter Zuhilfenahme einer generischen Datenbank die Ermittlung des KEA_H des Materials erfolgen. Die Blechdickenkombination und die damit verbundene jeweilige Blechdicke, die maximal verfügbare Flanschlänge und die Flanschbreite stellen Restriktionen dar, die für die spätere Einschränkung der verwendbaren Fügetechnik berücksichtigt werden müssen. In einem nächsten Schritt findet die Angabe der Scherzugfestigkeit statt. Ist diese Größe nicht bekannt, muss sie abgeschätzt werden. Diese Abschätzung kann auf den Festigkeitswerten des Vorgängers erfolgen. In einem weiteren Schritt muss eine Entscheidung getroffen werden, ob die Fügetechnik designrelevant ist und eventuell im Sichtbereich liegt. Nachdem die Bestimmung der Parameter für die Berücksichtigung der Restriktionen erfolgt ist, kann eine Eliminierung der betrachteten Lösungsalternativen unter Zuhilfenahme einer Logikdatenbank erfolgen. In dieser Datenbank müssen folgende Informationen pro Fügetechnik unter Berücksichtigung der Fügeparameter hinterlegt sein:

- Die technologisch durchführbaren Materialkombinationen
- Das maximale Verhältnis der zu fügenden Blechstärken
- Der minimale Fügeabstand
- Der minimale Abstand zum Blechrand
- Informationen, ob es sich um eine sichtbare oder unsichtbare Fügetechnik handelt
- Kombinationsmöglichkeiten der Materialien aufgrund der Elektronegativität

Im Folgenden wird genauer auf den Prozessschritt der Logikdatenbank und deren Inhalte eingegangen und die damit einhergehende Eliminierung der Lösungsalternativen durch Restriktionen (gekennzeichnet mit ①). In den darauffolgenden Abschnitten werden die in Abbildung 36 mit weiteren Zahlen gekennzeichneten Prozessschritte detailliert erklärt.

6.1 Eliminierung der Lösungsalternativen durch Restriktionen

Für die technologisch durchführbaren Materialkombinationen und die Kombinationsmöglichkeiten der Materialien aufgrund der Elektronegativität kann eine Logiktabelle genutzt werden. Tabelle 8 zeigt anhand des Beispiels des Stahl-WPS, ob eine Kombination der Materialien möglich ist.

Tabelle 8: Exemplarischer Logikaufbau für den Werkstoff

Stahl-WPS	Stahlblech	CFK	Aluminium-blech	…
Stahlblech	1	0	0	…
CFK	0	0	0	…
Aluminiumblech	0	0	0	…
…	…	…	…	…

Eine Eins bedeutet in der Tabelle, dass eine Werkstoffpaarung mit der Fügetechnik gefügt werden kann. Eine Null zeigt, dass die Fügetechnik nicht geeignet ist. Analog zu diesem Beispiel kann eine Erweiterung durch eine jeweils weitere Tabelle hinsichtlich der zu fügenden Blechstärken und der Sichtbarkeit nach dem gleichen Schema stattfinden. Um den minimalen Fügeabstand sowie den Randabstand zu ermitteln, kann zum einen die Blechdicke oder die Fügestellengröße herangezogen werden. Tabelle 9 zeigt die Anhaltswerte für die Teilung und Randabstände pro betrachteter Fügetechnik.

Tabelle 9: Anhaltswerte für die Teilung und Randabstände pro Fügetechnik

	Errechnung durch Fügestellengröße (d)	Errechnung durch Blechdicke (t)
EMC [Saue16]	2d bis 4d	8t
HSN [Saue16]	2d bis 4d	8t
Stahl-WPS [Schi13]	2,5d bis 4,5d	4t mindestens 4mm
FDS [Saue16]	2d bis 4d	8t

In einem nächsten Schritt muss die erforderliche Scherzugfestigkeit bestimmt werden. Diese dient als Vergleichsgröße der Fügetechniken und ergibt für jede Fügetechnik eine Anzahl an erforderlichen Fügestellen. Der Quotient aus verfügbarer Flanschlänge und minimalem Fügeabstand eines Fügeverfahrens gibt somit die Anzahl der maximal möglichen Fügestellen an. Mittels Angabe der Flanschbreite kann eine Aussortierung der

Fügeverfahren erfolgen, die aufgrund eines zu kleinen Flansches nicht in Frage kommen. Ist es nicht möglich, eine Material- oder Blechdickenkombination von einem Fügeverfahren zu fügen, wird diese ebenfalls automatisch aussortiert. Ebenso verhält es sich mit der Designrelevanz: Wenn ein Fügeverfahren in einer designsensiblen Fügegruppe sichtbar wäre, würde diese als Lösungsalternative nicht berücksichtigt werden.

Zudem muss definiert sein, welche Oberflächenbeschaffenheit mit welchem Fügeverfahren prozesssicher gefügt werden kann. Die Zugänglichkeit der Fügestelle kann hierbei nur sehr schwer logisch abgelegt werden. Zwar gibt es Prüfmethoden, die im CAD eingesetzt werden können, um die Kollisionen mit zum Beispiel Störkonturen zu ermitteln [Schu13], dennoch existiert ein solches detailliertes CAD-Modell in dieser frühen Phase noch nicht oder ist unvollständig. Dementsprechend ist es erforderlich, dass der Entscheidungsträger eine Abschätzung trifft, ob die Fügestelle mit den vorhandenen Betriebsmitteln erreichbar ist. Diese Unschärfe impliziert in der frühen Phase ein Restrisiko. Ist die Detaillierung in einer späteren Phase erfolgt, muss nochmals geprüft werden, ob eine Kollision eintritt. Hier sind weitere Schritte zu diskutieren wie beispielsweise eine Anpassung des Betriebsmittels, wie zum Beispiel die Geometrieänderung einer Schweißzange beim Stahl-WPS.

Durch die berücksichtigten Restriktionen wird die Anzahl der möglichen Lösungsalternativen verringert. Im nächsten Schritt muss anschließend eine Bewertung der verbleibenden Lösungen erfolgen (gekennzeichnet mit ②).

6.2 Bewertung der Lösungsalternativen durch Präferenzen

Nachdem die Restriktionen berücksichtigt wurden, findet nach der Technikbewertung eine Bewertung der verbleibenden Lösungsalternativen auf Basis der Präferenzen statt. Hierbei werden die noch übrig gebliebenen Fügeverfahren anhand der Präferenzanforderungen bewertet. Für dieses Ziel soll eine geeignete Bewertungsmethode zur Verfügung gestellt werden. Da eine Prioritätensetzung der Präferenzanforderungen zwischen den Fahrzeugmodellen unterschiedlich sein kann, erfolgt bei diesen Untersuchungen der Einsatz einer Bewertungsmatrix mit individueller Gewichtung. Die folgende Tabelle 10 zeigt den tabellarischen Aufbau in allgemeiner Form.

Tabelle 10: Bewertungstabelle in allgemeiner Form

	Gewichtung	Lösungsalternative 1	Lösungsalternative 2	…	Lösungsalternative n
Präferenz 1					
Präferenz 2					
Präferenz 3					
…					
Präferenz n					
Summe					

Die Präferenzanforderungen werden innerhalb der Matrix den Lösungen gegenübergestellt. Die Gewichtung muss dabei von den Entscheidungsträgern im Vorfeld bestimmt werden. Je nach Derivat spielen verschiedene Anforderungen eine unterschiedliche Rolle und müssen daher mit einer Gewichtung individuell verknüpft werden. Hierfür kann die Methode des paarweisen Vergleichs genutzt werden. Tabelle 11 zeigt ein allgemeines Schema für den paarweisen Vergleich, um eine Gewichtung herleiten zu können.

Tabelle 11: Paarweiser Vergleich in allgemeiner Form

	Präferenz 1	Präferenz 2	Präferenz 3	Präferenz 4	…	Summe
Präferenz 1						
Präferenz 2						
Präferenz 3						
Präferenz 4						
…						

Bei der Methode des paarweisen Vergleichs werden die Präferenzanforderungen in einer Matrix gegenübergestellt. Diese werden dann entsprechend ihrer Wichtigkeit gegeneinander verglichen. Da eine Anforderung nicht mit sich selbst verglichen werden kann, wurden diese Felder bereits ausgegraut. Die Bewertung reicht hierbei von 0 bis 1, wobei eine Eins bedeutet, dass diese Anforderung wichtiger ist als die verglichene. Eine Null bedeutet, dass beide Anforderungen gleich wichtig sind. Durch die Summe der jeweiligen Reihe kann eine Aussage über die Gewichtung erfolgen. Je höher die Zahl, desto wichtiger die Anforderung.

Für eine Basis dieser Bewertung muss eine Gewichtung vorgenommen werden. Hierbei findet eine Erarbeitung dieser Gewichtung durch das interdisziplinäre Team statt. Aufgrund unterschiedlicher Fahrzeugderivate kann diese Gewichtung Schwankungen unterliegen und sollte demnach pro betrachtetem Endprodukt durchgeführt werden. Anschließend kann eine Bewertung anhand der Präferenzen erfolgen.

Die Berücksichtigung weiterer Anforderungen als derer des Energiebedarfs ist mit diesem Vorgehen möglich. Um jedoch eine ganzheitliche Betrachtung des Energiebedarfs realisieren zu können, soll aufbauend auf der direkten Bewertung der Fügetechnik auch eine Darstellung der Phasen des KEA erfolgen. Hierfür muss zunächst eine Logik erarbeitet werden, die die bisher getroffenen Entscheidungen auf die nachgelagerten Lebensphasen berechnet. Hierfür wurde der Gewichtungsunterschied herangezogen. Im nächsten Abschnitt wird das Vorgehen für diese Arbeit detailliert beschrieben (gekennzeichnet mit ③).

6.3 Berechnung der Auswirkungen auf die Nutzungsphase

Um eine energetische Betrachtung des gesamten Lebenszyklus durchführen zu können, muss eine Betrachtung aller energetischen Aufwendungen erfolgen, die mit dem Produkt

in Verbindung stehen. Innerhalb des konzipierten Prozessverlaufs in Abbildung 36 wird die Berechnung des KEA_N anhand des Gewichtsunterschieds durchgeführt. Bereits in der betrachteten Herstellungsphase wurde herausgestellt, dass eine Betrachtung aller Aufwendungen nur sehr schwer und mit viel Aufwand möglich ist. In der Nutzungsphase wird dieses Problem ebenfalls erwartet. Daher findet auch hier nur eine Betrachtung der Auswirkungen statt, die mit einer begrenzten Systemgrenze berücksichtigt werden können. Als Beispiel soll der direkte Treibstoffverbrauch während der Nutzungsphase durch den Gewichtsunterschied berücksichtigt werden. Nebenprozesse wie Werkstattaufenthalte und Reparaturmaßnahmen am Produkt, das Nachfüllen von Betriebsstoffen, deren Entsorgung und Ähnliches findet innerhalb dieser Arbeit keine Berücksichtigung.

Da heutzutage die angewandte Kreislaufwirtschaft durch eine Rückführung von bereits produzierten Produkten keinen eindeutigen Anfangspunkt besitzt, wird innerhalb des Unternehmens die Werkstoffauswahl als erste frühzeitige Entscheidung festgelegt und somit als Startpunkt angesehen. Die Materialauswahl ist eine Entscheidung mit weitreichender Auswirkung, denn sie beeinflusst nicht nur den Herstellungsprozess, sondern auch die Nutzungs- und Entsorgungsphase. Das Automobil stellt ein Produkt dar, welches den Großteil der Energie während seiner Nutzungsphase verbraucht [Wars12]. Vielfältige Eigenschaften eines Automobils sind an dem späteren Energiebedarf beteiligt. Abbildung 37 zeigt, dass der Energiebedarf während der Nutzung von mehreren Faktoren abhängt.

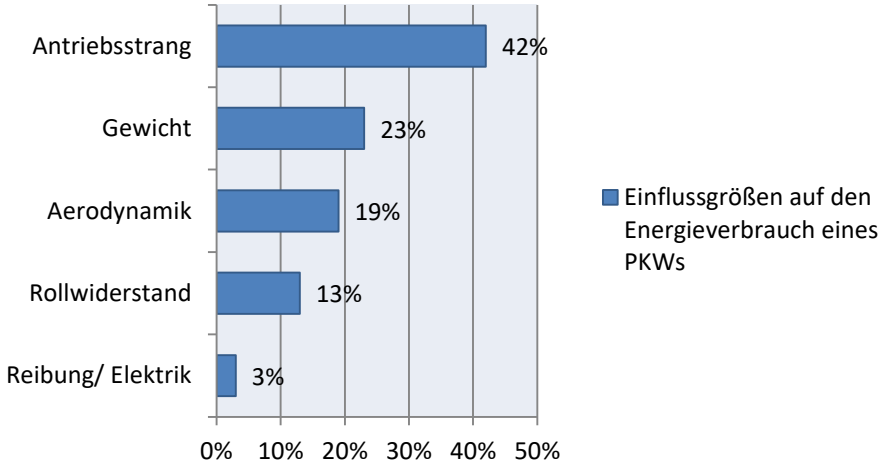

Abbildung 37: Faktoren des Energiebedarfs in der Nutzungsphase nach [Wars12]

Neben dem Antriebsstrang und der Aerodynamik stellt das Gewicht des Fahrzeugs eine der Hauptgrößen dar, die sich stark auf den Energiebedarf in der Nutzungsphase auswirken. Der Energiebedarf eines Fahrzeugs wird während der Laufzeit vom Gesamtfahrwiderstand bestimmt. Danach ist die Masse eine wesentliche, den Fahrwiderstand beeinflussende Größe [Pisc16]. Eine Reduzierung des Gewichts wird angestrebt, da der dadurch sinkende Verbrauch während der Nutzungsphase einen Wettbewerbsvorteil

und wie in Abschnitt 1.1.2 der Einleitung beschrieben, ein Kaufkriterium darstellt. So werden üblicherweise für 100 kg Mehrgewicht je nach Fahrzeugtyp und Motorbauart etwa 0,35 l Kraftstoffmehrverbrauch pro 100 km berechnet [Pisc16]. In der frühen Phase ist es daher bereits möglich, eine rudimentäre Aussage über den späteren Energiebedarf während der Nutzungsphase mithilfe von Gewichtsabschätzungen zu treffen. Für weitere Berechnungen wird daher der Mittelwert aus der Literatur verwendet. Aufgrund der Fokussierung auf den Karosseriebau werden Entscheidungen zu den anderen Einflussfaktoren nicht berücksichtigt.

Neben der Betrachtung der Nutzungsphase muss nach dem KEA auch eine energetische Berücksichtigung der Entsorgung stattfinden. Recyceltes Material benötigt oftmals weniger Energie als eine komplette Neuproduktion. Durch eine Beeinflussung der Recyclingfähigkeit können während der Entsorgung nachfolgende Prozessketten verkürzt und somit effizienter gestaltet werden. Die Wahl des Produktwerkstoffs hat hierbei großen Einfluss auf den Entsorgungs- beziehungsweise Recyclingprozess, da nicht jeder Werkstoff gleich gut wiederverwertet werden kann. Durch die Wahl eines Werkstoffs mit einer guten Recyclingfähigkeit entsteht ein Energiebonus für die Wiederaufbereitung, welcher auch in der Gesamtbilanzierung berücksichtigt werden muss. Bestimmte Kunststoffe besitzen beispielsweise nur eine eingeschränkte Recyclingfähigkeit, sodass in der Entsorgungsphase weniger Energie zurückgeführt werden kann, wenn nicht sogar zusätzliche Energie anfällt. Soll ein Produkt recyclinggerecht entwickelt werden, schränkt dieser Umstand bereits die Materialauswahl ein. Die Materialauswahl hat wiederum Einfluss auf die potenziell durchführbare Fügetechnik, welche bei einer energieeffizienten Produktion mit ganzheitlicher Sicht auf den Produktlebenszyklus berücksichtigt werden muss.

Eine ganzheitliche Betrachtung ist notwendig, da eine Materialauswahl zugunsten einer energieeffizienteren Fügetechnik den Energiebedarf während einer nachgelagerten Phase anheben könnte. Das Resultat wäre insgesamt eine Verschlechterung der Energiebilanz und somit nicht zielführend. Diese Wirkungsabschätzung ist ein elementarer Teil der LCA, dessen mathematische Grundlagen in Tabelle 12 näher beschrieben und nachfolgend erklärt werden.

Tabelle 12: Berechnung der energetischen Wirkungsabschätzung

KEA_H		
Werkstoff 1	Stahl (Elektrostahl)	
Gewicht 1	1,036	kg
Spezifische Energie	7,221	MJ/kg
KEA_H Bauteil 1	**7,48**	**MJ**
Werkstoff 2	Stahl (Elektrostahl)	
Gewicht 2	0,507	kg
Spezifische Energie 2	7,221	MJ/kg
KEA_H Bauteil 2	**3,66**	**MJ**
Geforderte Scherzugfestigkeit	20.000	N
Gewählt: Schweißpunkt: Scherzugfestigkeit	8.300	N/stk
Anzahl Schweißpunkte aufgerundet	3	stk
Energieverbrauch pro Schweißpunkt	0,012	MJ
Energieverbrauch Fügeverfahren	0,036	MJ
Baugruppenenergie Gesamt	**11,18**	**MJ**
KEA_N		
Durschnittliche Laufleistung PKW	150.000	km
Durchschnittlicher Verbrauch Ottomotor	7,7	l/100km
Spezifischer Brennwert Ottomotor	34,9	MJ/l
Spezifischer Brennwert Dieselmotor	37,4	MJ/l
Verbrauch Nutzung Ottomotor	403.095	MJ
Verbrauch Nutzung Dieselmotor	381.480	MJ
KEA_E		
Pauschale Energierückgewinnung	20	%

KEA_H (Alternative)		
Werkstoff 1	Aluminium	
Gewicht 1a	0,6	kg
Spezifische Energie	140,7	MJ/kg
KEA_H Bauteil 1	**84,42**	**MJ**
Werkstoff 2	Stahl (Elektrostahl)	
Gewicht 2	0,507	kg
Spezifische Energie 2	7,221	MJ/kg
KEA_H Bauteil 2	**3,66**	**MJ**
Geforderte Scherzugfestigkeit	20.000	N
Gewählt: Clinchpunkt: Scherzugfestigkeit	4.800	N/stk
Anzahl Clinchpunkte aufgerundet	5	stk
Energieverbrauch pro Schweißpunkt	0,013	MJ
Energieverbrauch Fügeverfahren	0,065	MJ
Baugruppenenergie Gesamt	**88,15**	**MJ**
KEA_N		
Einsparung durch Gewichtsreduktion	0,35	l/100km/100kg
Reduziertes Gewicht	0,436	kg
Durchschnittlicher Verbrauch Dieselmotor	6,8	l/100km
Spezifischer Brennwert Benzin	34,9	MJ/l
Spezifischer Brennwert Diesel	37,4	MJ/l
Einsparungen Ottomotor	**79,89**	**MJ**
Einsparungen Dieselmotor	**85,61**	**MJ**
KEA_E		
Pauschale Energierückgewinnung	20	%

Die Berechnung nutzt die Methodik des KEA und beginnt demnach mit dem KEA_H. Hierbei werden beispielhaft zwei zu verbindende Bauteile definiert und dessen spezifische Energiemenge bestimmt. Als Basis hierfür wurde die Datenbank des Umweltbundesamtes ProBas genutzt. Das Produkt aus Gewicht und spezifischer Energie ergibt den Gesamtenergiegehalt der einzelnen Bauteile. Dies geschieht in dem oben gezeigten Beispiel jeweils für zwei Paarungen: die Werkstoffpaarung Stahl-Stahl und die Paarung Aluminium-Stahl. In einem weiteren Schritt wird exemplarisch ein technologisch mögliches Fügeverfahren gewählt. Es handelt sich hierbei um das Stahl-WPS (Stahl-Stahl) und einmal um das EMC (Aluminium-Stahl)[18]. Die geforderte Scherzugfestigkeit wird festgelegt. Anschließend wird ermittelt, wie viele Fügestellen nötig sind, um die geforderte Scherzugfestigkeit zu erreichen. Mithilfe des Energiebedarfs pro Fügepunkt kann eine Bestimmung des Energiebedarfs für alle benötigten Fügestellen erfolgen. Werden die Bauteilenergie und die Energie für die Fügetechnik addiert, kann die Baugruppenenergie ermittelt werden. In der gezeigten Rechnung wurden die Energie des Presswerks, der

[18] Bei der Berechnung wurden die ermittelten Prozessdaten für eine Stahl-Stahl-Paarung des EMC genutzt.

Logistik und weitere Prozesse aufgrund der Komplexitätsminimierung nicht berücksichtigt. In einem nächsten Schritt erfolgt die Abschätzung des Energiebedarfs auf die Nutzungsphase. Bei der rechten Alternative der Tabelle 12 entsteht ein Gewichtsvorteil durch die Nutzung des Werkstoffs Aluminium. Die Gewichtsreduktion beeinflusst den gesamten Treibstoffverbrauch über die Laufzeit des Automobils. In der aufgestellten Rechnung wird zudem zwischen den Technologien Otto- und Dieselmotor unterschieden. Je nach Technologie ergeben sich aufgrund verschiedener Durchschnittsverbräuche und spezifischer Energiemengen unterschiedliche Energiebedarfe. Um die Energiemengen zu berücksichtigen, wurden die durchschnittlichen Verbrauchswerte wie auch die spezifischen Brennwerte des Treibstoffs als Berechnungsgrundlage herangezogen. Auf der linken Seite wurde zudem die Energie errechnet, die während der gesamten Laufleistung für jeweils das höhere Gewicht der Bauteile benötigt wird. Die potenzielle Lösung mit weniger Gewicht wird als Basis der Lösung mit höherem Gewicht gegenübergestellt. Dabei wird nur der Mehrverbrauch der gewichtsintensiveren Lösung betrachtet. Dies ist erforderlich, da die Kennwerte aus der Literatur nur eine Aussage für den Mehrverbrauch bei Gewichtseinsparungen erlauben. Für die Entsorgung existieren derzeit kaum Prozessdaten, daher wurde eine pauschale Energierückgewinnung durch ein Recycling von 20% festgelegt. Aus der quantitativen Darstellung der Tabelle 5 wurde die grafische Abbildung 38 erstellt, die die Ergebnisschritte grafisch darstellt.

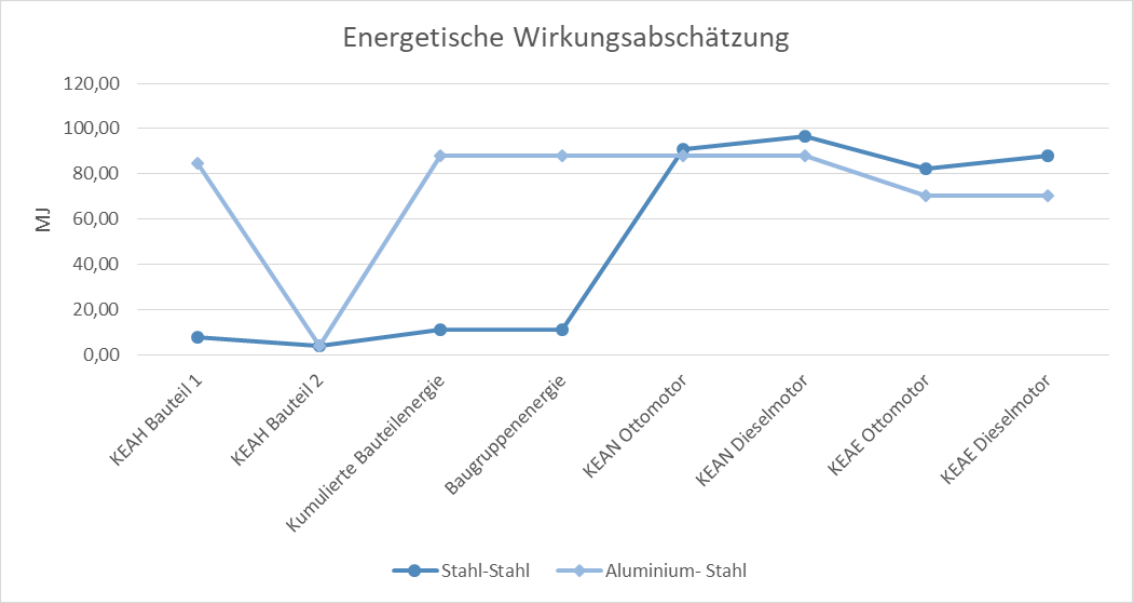

Abbildung 38: Energetische Wirkungsabschätzung

Es zeigt sich, dass bei der Darstellung des relativen Verbrauchs das zusätzliche Gewicht in der Nutzungsphase den größten Energiebedarf ausmacht. Die Energie der Fügetechnik fällt bei einer ganzheitlichen Betrachtung kaum ins Gewicht. Zur Errechnung des KEA_E wurden die Materialverbräuche pauschal mit 20% Energiebonus berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass das Material wieder in den Energiekreislauf eingebracht

und somit Energie eingespart wird. Dieser Energiebonus kann auch am Anfang verrechnet werden, indem recyceltes Material mit weniger Energie in die Betrachtung aufgenommen wird. Zur detaillierteren Betrachtung der genauen Einsparungen durch den Recycling- beziehungsweise den Entsorgungsprozess konnten von den generischen Datenbanken wie beispielsweise ProBas des Umweltbundesamtes keine allgemeinen Daten abgerufen werden. Die Tatsache, dass Daten an dieser Stelle fehlen, wird an dieser Stelle bereits als eine Herausforderung bei der ganzheitlichen Betrachtung des Energiebedarfs festgehalten.

Um weiter zu verfahren und eine ganzheitliche Betrachtung in der frühen Phase des automobilen Karosseriebaus zu integrieren, soll im nachfolgenden Kapitel ein Demonstrator für eine frühzeitige energiesensitive Produktentwicklung konzipiert werden. Durch diese Vorgehensweise kann der konzipierte Prozess auf Umsetzung geprüft und eine kritische Bewertung durch objektive und subjektive Fakten durchgeführt werden. Daran anschließend soll eine Beantwortung der gestellten Forschungsfragen erfolgen.

7 Umsetzung eines Demonstrators und Evaluierung

Aus Kapitel 4.3 wurde deutlich, dass in der frühen Phase von einer Rechnerunterstützung wenig Gebrauch gemacht werden kann. Die Nutzung von CAD-Systemen findet zu diesem Zeitpunkt nur vereinzelt statt. Als Ursache wurde identifiziert, dass unter anderem ein geringer Detaillierungsgrad in der frühen Phase vorliegt. Wichtige Entscheidungen, die den späteren Energiebedarf bestimmen, werden vor dem Einsatz von CAD-Systemen getroffen. Eine Unterstützung während dieser Phase durch eine Anwendung außerhalb des CADs erscheint daher sinnvoll, da die Entscheidungsträger dadurch in die Lage versetzt werden, transparente Entscheidungen anhand von hinreichenden Informationen zu treffen. Der konzipierte Prozessverlauf zeigt, dass viele Daten aus unterschiedlichen Datenbanken herangezogen werden und diese in ein mathematisches Verhältnis gesetzt werden müssen. Durch die Rechnerunterstützung können diese Operationen zeitnah durchgeführt werden. Neben diesem Vorteil lässt sich die Logik in einem Computersystem darstellen, da es sich um feste und rationale Routinen handelt. Im Folgenden soll daher ein Konzept erstellt werden, wie eine frühzeitige energiesensitive Produktentwicklung durch eine Rechnerunterstützung gefördert werden kann. Aus den erarbeiteten Erkenntnissen wird ein Demonstrator abgeleitet, der die Machbarkeit zeigen und als Validierungsobjekt dienen soll.

Für die Umsetzung in einem Demonstrator wurde ein Programm entworfen, welches die einzelnen Schritte des konzipierten Prozessverlaufs miteinander vereint. Ein Mehrwert wird für diese Arbeit darin gesehen, die Kombination der gezeigten Methoden wie den KEA und die Technikbewertung auf Umsetzbarkeit zu prüfen und gleichzeitig Expertenmeinungen einzuholen, gegebenenfalls Empfehlungen für eine Erweiterung aufzunehmen sowie die Eignung der gewählten Methoden innerhalb des Karosseriebaus aufzuzeigen. Letztendlich wird anhand der Evaluation ein Gesamtfazit gezogen und Antworten auf die Forschungsfragen gegeben. Der Demonstrator ist hierbei als Hilfsmittel zu verstehen. Abbildung 39 zeigt die Oberfläche des Demonstrators, welcher im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde.

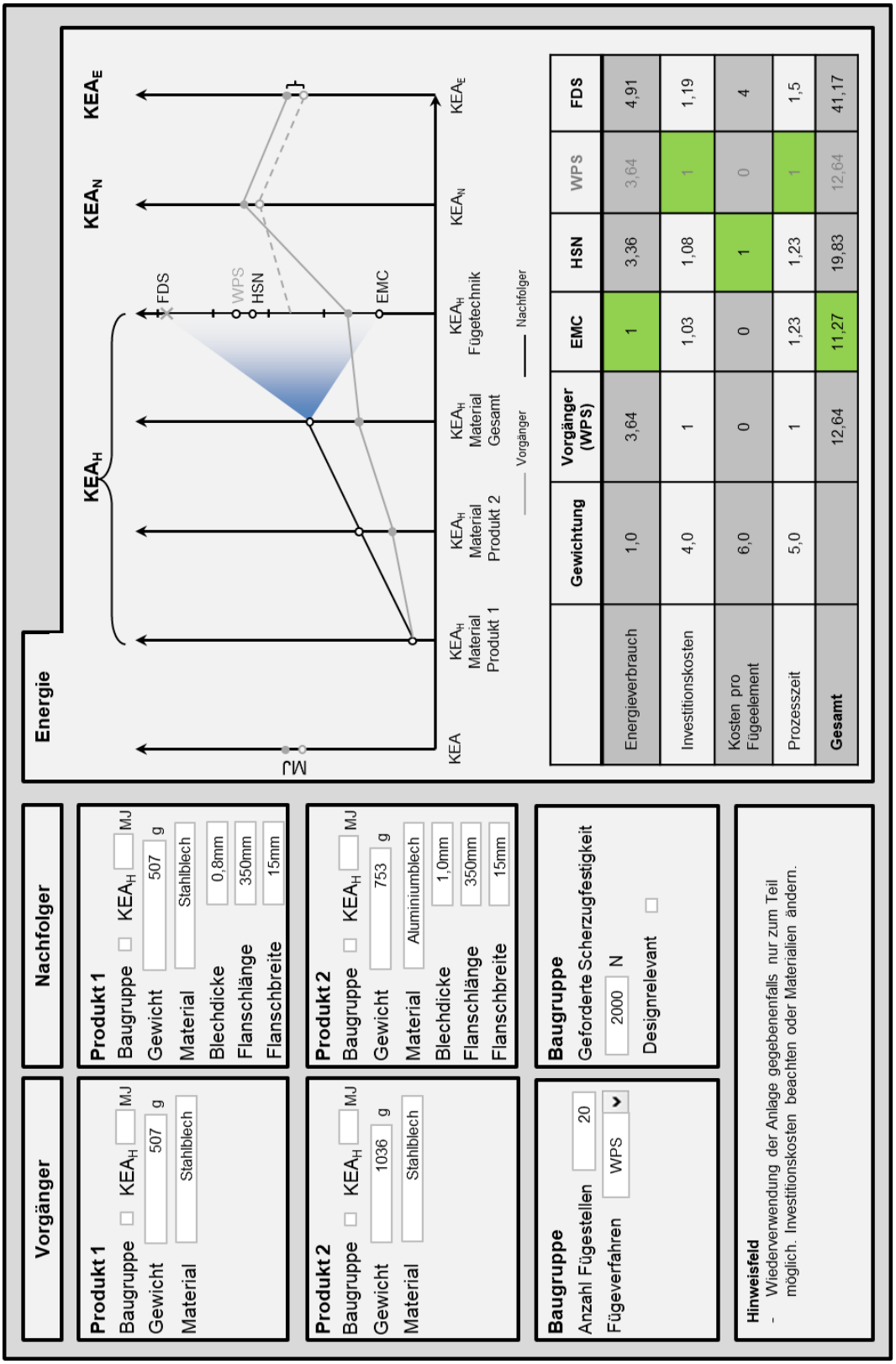

Abbildung 39: Oberfläche des Softwaretools

Die Oberfläche des Tools zeigt mehrere Bereiche. Der Dialog führt den Anwender von links nach rechts. Auf der linken Seite können Parametereingaben durchgeführt werden, die zum frühen Zeitpunkt verfügbar sind. Diese Seite versteht sich als Steuerfläche. Da es sich in der automobilen Industrie weitestgehend um Anpassungskonstruktionen handelt, können die Parameter des Vorgängermodells eingegeben werden, um die direkten Auswirkungen von Entscheidungen für Bauteile/-gruppen des neuen Fahrzeugrelease zu überprüfen. Das Gewicht der Bauteile muss zwingend angegeben werden. In Verbindung mit dem Material kann eine Abschätzung des Energiebedarfs über eine generische Datenbank erfolgen. Zusätzlich zum Gewicht kann die Angabe der Flanschbreite und Flanschlänge erfolgen. Diese Angabe ist optional, da die genaue Angabe des Flansches in einer frühen Phase gegebenenfalls noch nicht möglich ist. Ein Hinweistext erscheint bei Nichtangabe in einem Hinweisfenster unten auf der linken Seite. Der Min.-Fügeabstand kann in diesem Fall nicht berücksichtigt werden. Innerhalb dieser Arbeit wurden diese Parameter zwar als Restriktion beschrieben. Dennoch wurde durch die vorhergehende Untersuchung festgestellt, dass die Akzeptanz sinkt, wenn Informationen abgerufen werden, die dem Bediener nicht vorliegen. Das Programm versucht demnach, trotz geringer Informationen ein hinreichend genaues Ergebnis zu generieren, und weist gleichzeitig den Bediener auf eine notwendige spätere Kontrolle und die mit der Vereinfachung einhergehende Unschärfe hin.

Der Demonstrator wurde hauptsächlich dazu entworfen, die Untersuchung zwischen zwei zu verbindenden Bauteilen durchzuführen. Dennoch kann eine Berücksichtigung von Baugruppen stattfinden. Handelt es sich bei den zu fügenden Elementen um Baugruppen, dann kann der KEA_H von einer vorherigen Untersuchung beziehungsweise die manuelle Bilanzierung des Vorgängers angegeben werden. Dieser Wert wird dann mit dem zu fügenden Bauteil summiert und ergibt den KEA_H der entstandenen Baugruppe. Durch eine Abfrage nach der Designrelevanz mittels Checkbox können die noch verfügbaren Fügetechniken weiter eingeschränkt werden. Der Vergleich der Fügetechniken findet über die Scherzugfestigkeit statt. Diese Größe muss angegeben werden, damit eine Berechnung und ein Vergleich der Fügetechniken untereinander stattfinden kann. Die Wiederverwendung der Anlage ist nur dann sichergestellt, wenn die vorherige Entwicklung nicht verändert wird. Ein Hinweistext macht hierauf aufmerksam.

Die rechte Seite zeigt grafisch die Auswirkungen der Nutzereingaben. Das Diagramm zeigt alle Teile des KEA und führt bei relevanten Entscheidungen einen Dialog mit dem Anwender durch. Beispielsweise ist bei der Auswahl der Fügetechniken eine Entscheidung zu treffen. Durch die in einem ersten Schritt eliminierten Lösungsalternativen durch die Restriktionen entsteht durch die verbleibenden ein Streubereich der aufzuwendenden Energie. Bewegt der Benutzer den Mauszeiger über eine Fügetechnik, dann erscheint der weitere Energiebedarf prospektiv als gestrichelte Linie. Während der Auswahl der möglichen Fügetechniken ändert sich die Skalierung gemäß den noch verfügbaren Fügetechniken, um eine bessere Übersicht zu erhalten. Erst nach der Auswahl kehrt die Skalierung zum absoluten Energiebedarf zurück.

Wie in Abschnitt 6.3 beschrieben, berechnet sich der KEA_N ausschließlich über den Gewichtsunterschied der Bauteile und Baugruppen. Vernachlässigt wird dabei das Gewicht der Fügetechnik, da sie nur einen Bruchteil des Gewichts ausmacht. Bei der KEA_E findet pauschal eine Energierückgewinnung von 20% der Bauteilenergie statt, da eine ausreichende Datenbasis fehlt.

Unter der grafischen Darstellung befindet sich die Bewertungsmatrix, welche die genauen Kennzahlen für die entsprechende Fügetechnik zeigt. Nicht nutzbare Fügetechniken werden ausgegraut. Durch die Gewichtung ist es möglich, Einfluss auf Prioritäten unterschiedlicher Fahrzeugklassen zu nehmen. Hierbei wird der Anwender unterstützt, indem er innerhalb des Programms eine Rechnerunterstützung zum paarweisen Vergleich erhalten kann. Tabelle 13 zeigt den paarweisen Vergleich, der vom Anwender ausgefüllt werden kann, grafisch.

Tabelle 13: Paarweiser Vergleich innerhalb des Tools

	Energie-verbrauch	Investitions-kosten	Kosten pro Fügeelement	Prozesszeit	Summe	Gewichtung
Energieverbrauch		1	1	1	3	1,0
Investitionskosten	-1		0	1	0	4,0
Kosten pro Fügeelement	-1	0		-1	-2	6,0
Prozesszeit	-1	-1	1		-1	5,0

In diesem Fall wurde das Ergebnis auf die wichtigste Präferenz normiert, um negative Ergebnisse zu eliminieren. Die errechnete Gewichtung wird nach Bestätigung in die Maske übertragen. Das Produkt aus Kennzahl und Gewichtung sowie anschließender Aufsummierung ergibt den Gesamtwert. Hierdurch wird eine Entscheidungshilfe realisiert.

Das Ergebnis ist ein Ranking, welches einen Kompromiss unter Berücksichtigung der Gewichtung darstellt. Verzichtet wurde dabei auf eine vollständige Automatisierung, sodass der Mensch in der Rolle des Entscheidungsträgers in der Kompromissfindungsphase unterstützt, jedoch nicht bevormundet wird.

7.1 Qualitative Evaluation

Im folgenden Kapitel soll der erarbeitete Demonstrator auf Nutzbarkeit überprüft werden. Aus Kapitel 4.3.4, der kritischen Diskussion bereits bestehender Lösungen, wurden Punkte aufgezeigt, aus denen Verbesserungsmöglichkeiten abgeleitet werden können, diese Punkte werden an dieser Stelle nochmals aufgenommen und ein neuer qualitativer Ist-Zustand evaluiert.

- Der Zeitaufwand kann durch die fehlende notwendige Modellierung eines kompletten Energiemodells vermindert werden.
- Eine Datenbank wurde erstellt, auf die der Bediener mithilfe des Demonstrators zurückgreifen kann. Individuelle Prozessdaten sind verfügbar. Eine Abschätzung des Energiebedarfs muss nun nicht mehr erfolgen.
- Ein integrativer Ansatz der Anforderung des Energiebedarfs kann nun durch die Aufnahme weiterer, individueller Prozessdaten stattfinden. Der Energiebedarf kann neben weiteren Anforderungen eine Berücksichtigung finden.
- Die hohe Allgemeingültigkeit des Tools wurde vermindert und die Entscheidungsträger können in ihrer individuellen Tätigkeit unterstützt werden.
- Die Fügetechnik wird als individueller Prozess des Karosseriebaus fokussiert, ohne die Betrachtung der Materialauswahl zu verlieren.
- Die energetischen Auswirkungen der getroffenen Entscheidungen können den Entscheidungsträgern nun dargestellt werden.
- Auf den Einsatz von detaillierten CAD-Modellen wurde verzichtet und die frühe Phase wird unterstützt. Durch die genutzte Weboberfläche kann während der Diskussion in den interdisziplinären Teams der Einsatz des Demonstrators erfolgen.
- Die Nutzung der Informationen von Vorgängermodellen kann erfolgen. Durch die Veränderung des Bauteils findet ein Hinweis statt, dass bereits bestehende Anlagen gegebenenfalls nicht wiederverwendet werden können. Zudem werden die energetischen Auswirkungen der Änderung dem Vorgängermodell gegenübergestellt.

Die aufgezeigten Probleme, die beim Einsatz derzeitiger Lösungen existieren, konnten mithilfe des konzipierten Prozesses und der Überführung in einen Demonstrator rudimentär gelöst werden. Neben der qualitativen Untersuchung soll auch evaluiert werden, wie die Zielgruppe auf die erarbeiteten Ansätze subjektiv reagiert. Hierfür wurden im folgenden Kapitel Experteninterviews durchgeführt.

7.2 Subjektive Evaluation

Bei der Validierung wurde der Demonstrator den Mitarbeitern aus unterschiedlichen Bereichen zur Verfügung gestellt. Da das Tool die Zielgruppe des interdisziplinären Teams adressiert, wurden zur Befragung insgesamt sechs Mitarbeiter aus einem solchen Team ausgewählt. Diese stammen anteilig aus der Konzeptplanung (2), Konzeptentwicklung (2), Produktionsplanung (1) und dem Technologiemanagement (1). Alle Mitarbeiter haben in ihrem Arbeitsumfeld Berührungspunkte mit der Fügetechnik. Die ausgewählten Mitarbeiter sollten das Tool bezüglich der Funktionalität testen und eine subjektive Meinung hierzu formulieren. Neben den subjektiven Meinungen wurden zusätzlich Beobachtungen protokolliert. Da keine Hilfefunktion zum Tool existiert, fand eine Betreuung und Erklärung der Funktionen in einem persönlichen bidirektionalen Dialog statt.

Das Tool wurde mithilfe der Webtechnologie bereitgestellt und in Java programmiert. Es konnte demnach mithilfe einer Webadresse direkt auf die Oberfläche zugegriffen werden. Dies wurde als positiv empfunden, da keine Installation notwendig ist.

Bei der Befüllung der Parameterfelder wurden exemplarische Vorgaben gemacht, wie beispielsweise die Größe der Scherzugfestigkeit. Allgemein konnte beobachtet werden, dass eine Befüllung der Parameterfelder einige Überlegungen und Diskussionen verursachte. Dies hatte unter anderem den Grund, dass im Vorfeld keine Informationen über ein bestimmtes Bauteil ausgegeben wurden. Die beiden Mitarbeiter aus der Konzeptentwicklung konnten nach einer kurzen Diskussion auf Bauteile des Tagegeschäfts zurückgreifen und das Gewicht sowie die Flanschbreite abschätzen. Das Parameterfeld des KEA_H wurde jedoch nicht befüllt, da in einem ersten Schritt davon ausgegangen wurde, dass zwei Bauteile miteinander gefügt werden.

Als positiv wurde bewertet, dass die Möglichkeit besteht, Vorgänger und Nachfolger bewerten zu können. Hierbei sei eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den Lösungen gegeben und ein, so wörtlich, „Herumspielen“ mit den Auswirkungen möglich. Dies führe zu einer Sensibilisierung der Anforderung „Energie“.

Der Haken für die Designrelevanz wurde hinterfragt. Diese Option stellt grundsätzlich ein Problem dar. Der Untersuchungsumfang der gewählten Fügetechniken umfasst im Kontext dieser Arbeit ausschließlich sichtbare Fügetechniken. Es wurde während der Untersuchung diskutiert, dass die Auswahl bei nicht sichtbarer Fügetechnik sehr eingeschränkt sei. Das Kleben ist eine der Techniken, die nicht sichtbar sind. Insgesamt wird die Anforderung der Sichtbarkeit oftmals durch abgewinkelte Flansche gelöst, die sich dem Sichtbereich des Kunden entziehen. Darauf aufbauend kann eine Fügetechnik genutzt werden, die die Eigenschaft der Sichtbarkeit besitzt.

Das Hinweisfeld mit den entsprechenden Einträgen wurde als hilfreich empfunden. Dennoch entstand die Diskussion, die Funktionen des Tools zu erweitern, um die Hinweistexte in exaktere Unterstützungsmöglichkeiten umwandeln zu können. Es wurde die Idee geäußert, eine „Einkaufsliste“ anzuzeigen. Hierbei sollte visualisiert werden, welche Anlagenteile bereits bestehen und welche Anlagen nach Änderung der Fügetechnik noch nutzbar seien. Hierfür wären Verknüpfungen zwischen der realen Anlage oder Verlinkungen in die Digitale Fabrik denkbar.

Für die Erarbeitung der Gewichtung wurde die Assistenz genutzt. Diese Funktion wurde als positiv empfunden. Es wurde jedoch angemerkt, dass eine Bearbeitung eines paarweisen Vergleichs je nach Eingangsparameter sehr zeitintensiv werden kann. Nach der Erarbeitung der Gewichtung wurde das Ergebnis bewertet.

Es wurde von den Teilnehmern darauf hingewiesen, dass bestimmte Fügetechniken gegebenenfalls nicht durchführbar sind, da die Erreichbarkeit durch Störkonturen höchstwahrscheinlich nicht möglich sei. Hieraufhin wurde erklärt, dass dieses Tool lediglich eine Entscheidungshilfe darstellt und somit auf eine Einschränkung der Lösungsalternativen abzielt. Danach können weitere Einschränkungen durch die Mitarbeiter und deren Erfahrungen und Einschätzungen gemacht werden. Diese Freiheit wurde generell als

positiv empfunden. Es konnten zudem Akzeptanzhürden abgebaut werden, da von den Mitarbeitern der Konzept- und Produktionsplanung die Frage gestellt wurde, ob es das Ziel sei, den Menschen als Entscheidungsträger komplett zu ersetzen. Zudem wurde Skepsis geäußert, sich blind auf ein Ranking zu verlassen, ohne die Ergebnisse mit „gesundem Menschenverstand“ zu hinterfragen. Das beschriebene Vorgehen verhindert genau diesen Effekt, da die Entscheidungsträger am Schluss eine Plausibilitätsprüfung durchführen müssen.

Als Kritik wurde angegeben, dass es nicht nachvollziehbar sei, warum eine Fügetechnik ausgeschlossen beziehungsweise ausgegraut wurde. Das Programm gibt hierzu keine Rückmeldung und lässt die Bediener im Ungewissen. Denkbar wäre ein Protokoll, welches dem Teilnehmer die einzelnen Schritte der Eliminierung transparent darstellt und auch eine Begründung angibt.

Die Visualisierung der Energie führte bei allen Teilnehmern zu einer Diskussion. Der KEA stellt eine neue Größe für die Probanden dar, und obwohl einige Vorkenntnisse vorlagen, war eine Erklärung dieser Kennzahl notwendig. Es wurde von den Teilnehmern als verbesserungswürdig bewertet, dass die Bauteile/-gruppen 1 und 2 einzeln angegeben sowie danach separat addiert werden. Dies sei eine ungewöhnliche Darstellungsweise im Diagramm des KEA. Die Änderung der Skala während der grafischen Auswahl der Fügetechnik kann zu Komplikationen führen, da nur eine qualitative Darstellung erfolgt. Es fehlen die quantitativen Werte des Energiebedarfs.

Bei der Entsorgung wurde erwähnt, dass diese Kenngröße nur begrenzte Zeit Gültigkeit besitzt. Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von ca. zehn Jahren für einen Pkw sind die Verfahren für das Recycling weiter vorangeschritten. Diese Anmerkung wurde aufgenommen. Dennoch muss hierbei beachtet werden, dass die Entscheidung auf Basis des heutigen Wissens getroffen werden muss.

Zudem wurden zahlreiche Visualisierungen vorgeschlagen, wie die Präferenzen dargestellt werden können. So wurde beispielsweise ein Spinnennetzdiagramm vorgeschlagen, um das Fügetechnikprofil direkt bei der Auswahl der Fügetechniken anzeigen zu können. Es wurde zudem als hilfreich empfunden, dass sich die Anforderung des Energiebedarfs neben anderen Anforderungen eingliedert und sich der Fokus, wie bei anderen Anwendungen, nicht starr auf nur diese Anforderung richtet.

Neben den gezeigten Funktionen wurden auch Erweiterungsmöglichkeiten hinsichtlich weiterer Anwendungsfälle empfohlen. Beispielsweise wurde genannt, dass auch Drei-Blech-Schweißungen durchgeführt werden, die in diesem Fall nicht berücksichtigt werden. EMC und WPS werden häufig in Verbindung mit Kleben durchgeführt, wobei es sich um ein sogenanntes Hybridfügeverfahren handelt. Hierbei steht die Korrosionsbeständigkeit im Vordergrund, da der Kleber die Hohlräume vor Feuchtigkeit und weiteren Umwelteinflüssen schützen kann. Der Teilnehmer aus der Produktionsplanung brachte hierbei auch die Abhängigkeit der Fügetechnik von der Schmauchbildung mit ein. Schmauch entsteht, wenn bereits eingebrachter Kleber durch das WPS erhitzt wird.

Diese Dämpfe sind gesundheitlich nicht unbedenklich und wirken sich stark auf die Dimensionierung der Hallenbelüftung aus. Diese hat indirekt wiederum Einfluss auf den Energiebedarf der Fügetechnik. Diese Abhängigkeiten könnten ebenfalls dargestellt werden, sodass eine Berücksichtigung bei der Auswahl der Fügetechnik erfolgen kann.

Es konnte bei allen Probanden beobachtet werden, dass der Größe des Energiebedarfs immer zuerst die geringste Gewichtung zugewiesen wurde. Die Auswahl der Fügetechnik wurde demnach hauptsächlich nach den monetären Kosten vorgenommen. Der Energiebedarf spielte grundsätzlich eine untergeordnete Rolle. Auf Rückfrage, warum dies so sei, wurde erklärt, dass es keine Forderungen nach der Ausweisung beziehungsweise Berücksichtigung dieser Größe gäbe. Bei den Kosten gäbe es einen hohen Druck, der die Auswahl hauptsächlich bestimmt.

Neben dem Feedback aus der Industrie wurde zudem ein Expertenurteil aus dem akademischen Umfeld eingeholt.

„Die größten Beeinflussungseffekte sind in den ersten Entwicklungsphasen zu erwarten. Durch das Tool wird Transparenz über die Wirkung gewisser Entwicklungsentscheidungen für die Produktion erreicht.“[19]

7.3 Fazit zur Evaluierung

Der hier gezeigte Lösungsansatz ist als ein Demonstrator zu werten, der mit eingeschränkten Funktionen die Anwendbarkeit allgemeiner Methoden in Kombination bestätigt. Zusammenfassend wurde von den Teilnehmern bewertet, dass dieses Vorgehen einen weiteren Schritt in Richtung einer frühzeitigen energiesensitiven Karosserieentwicklung darstellt und grundsätzliches Potential für eine Weiterentwicklung bietet. Der Demonstrator wird daher aufgrund der Verbesserungsmöglichkeiten als Ansatz für einen weiterführenden Ausbau bewertet. Der zugrunde liegende Prozess berücksichtigt die Unschärfe, die in einer frühen Phase vorliegt, und den Arbeitsprozess der integrierten Produktentwicklung, bei dem die verschiedenen Stakeholder-Entscheidungen in einem Gesamtkontext zusammentreffen. Durch die Berücksichtigung der individuellen Anforderungen ist es möglich, unter Beachtung des Fahrzeugderivats den besten Kompromiss darzustellen. Findet eine Abstimmung in einem interdisziplinären Team statt, kann durch den paarweisen Vergleich eine Gewichtung erarbeitet werden, die der Bewertung zugrunde gelegt wird. Dennoch wird den Entscheidungsträgern die Freiheit eingeräumt, eine Entscheidung zu treffen, die gegebenenfalls vom Programm nicht eingeschlossene Faktoren berücksichtigt. Der Energiebedarf, der bei dieser Ausarbeitung im Fokus steht, gliedert sich als eine von vielen Größen in den Entscheidungsprozess ein und kann von allen Beteiligten individuell begutachtet werden. Findet eine geringe Gewichtung des

[19] Quelle: Prof. Dr.-Ing. Henning Albers, Fakultät 2 – Abteilung Umweltingenieurwesen, Internationaler Studiengang für Umwelttechnik, Hochschule Bremen, und Dipl.-Ing. Sandra Eilmus, PKT Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg.

Energiebedarfs statt und liegen verschiedene Alternativen quantitativ relativ gleichwertig vor, kann eine Entscheidung zugunsten des Energiebedarfs getroffen werden.

Soll der Energiebedarf eine Rolle bei einer Entscheidung in der frühen Phase spielen, dann fehlt derzeit eine großflächige individuelle Datenbasis. Hierfür wurde innerhalb der Arbeit im Rahmen der Organisationsstruktur des automobilen Karosseriebaus das Technologiemanagement als verantwortlich erachtet. Die dort angesiedelte Technologieplanung sollte die erforderlichen Daten der zu berücksichtigenden Präferenzen aufnehmen und den anderen Bereichen bereits in einer frühen Phase zur Verfügung stellen. Die genannten Fügeprofile können als eine Wissensbasis ausgebaut werden.

Dennoch fehlen einige Aspekte und Abhängigkeiten, die in eine Weiterentwicklung des Tools integriert werden können. So fehlt zum Beispiel die Verknüpfung zur bereits bestehenden Anlage, sodass die Wiederverwendung von Anlagenkomponenten weiterhin auf manuellem Wege zu prüfen ist. Die Wiederverwendung beeinflusst erheblich die Investitionskosten einer neuen Produktionsanlage.

Neben den detaillierten Erkenntnissen zum Demonstrator muss allgemein festgestellt werden, dass die Anforderung des Energiebedarfs eine untergeordnete Rolle bei der Auswahl der Fügetechnik spielt. Diese Tatsache wird in den fehlenden Anreizen gesehen, die der Energiebedarf bietet. Es existieren keine Gesetze, die vorschreiben, den Energiebedarf während der Herstellung auszuweisen. Die industriellen Energiekosten werden in einer Industrienation wie Deutschland seit langem auf einem niedrigen Preis gehalten, wie in Abbildung 6 gezeigt. Es wird vermutet, dass durch einen hohen Energiepreis die Gefahr der Deindustrialisierung zunimmt und eine Schwächung der Wirtschaft folgt. Dies sorgt dafür, dass der Energiebedarf als Kostentreiber nicht von den Entscheidungsträgern eines Unternehmens erkannt wird. Jedoch kann der Energiebedarf gegebenenfalls für die Zukunft eine strategische Größe darstellen. Ein Unternehmen ist demnach langfristig wettbewerbsfähig, wenn bereits heute der Energiebedarf in der frühen Phase berücksichtigt findet.

Neben den detaillierten Erkenntnissen, die direkt dem konzipierten Prozess und dem darauf aufbauenden Demonstrator zuzuweisen sind, werden im nächsten Kapitel mithilfe der bisherigen Erkenntnisse allgemeine Herausforderungen bei der Berücksichtigung der Größe Energie beschrieben und am Ende die aufgestellten Forschungsfragen beantwortet.

8 Schlussbetrachtung

Im letzten Hauptkapitel dieser Arbeit soll eine allgemeine Betrachtung der Erkenntnisse erfolgen. Hierfür werden die in Kapitel 4.4 aufgestellten Forschungsfragen zunächst beantwortet. Anschließend werden eine Zusammenfassung und ein Gesamtfazit gezogen. Aufbauend darauf werden Empfehlungen für eine Weiterführung des Themas gegeben.

8.1 Beantwortung der Forschungsfragen

- Wird die Größe des Energiebedarfs als Anforderung in einem ausreichenden Maße berücksichtigt, wenn die fehlenden individuellen Prozessdaten bereitgestellt werden?

Die Energiedaten aufzunehmen und den Entscheidungsträgern in der frühen Phase zur Verfügung zu stellen ist ein wichtiger Schritt in Richtung einer frühzeitigen energiesensitiven Karosserieentwicklung. Dennoch ist der Energiebedarf nicht die einzige Größe, die Berücksichtigung finden muss. Daher ist eine Berücksichtigung dieser Anforderung nur in Verbindung mit weiteren, individuellen Prozessdaten möglich. Durch die fehlenden Anreize, Entscheidungen zugunsten eines niedrigen Energiebedarfs zu treffen, wird auch bei der Bereitstellung von Energiedaten die Anforderung des Energiebedarfs nur in Ausnahmefällen berücksichtigt. Anforderungen wie die monetären Kosten überwiegen oftmals bei einer Entscheidung. Der Energiebedarf wird demnach weder mit erweiterten Methoden noch mit einer größeren Prozessdatenbank stärkere Berücksichtigung finden, sondern mit Stellhebeln wie gesetzlichen Regelungen, Managementvorgaben und/oder einer verstärkten Kundenforderung nach energieärmeren Produkten und einer Ausweisung dieser Größe. Dennoch stellt die Berücksichtigung des Energiebedarfs in der frühen Phase eine strategische Möglichkeit dar, langfristig als Unternehmen am Markt zu bestehen, da auf steigende Energiepreise flexibel reagiert werden kann und somit ein Wettbewerbsvorteil in Zukunft zu erwarten ist.

- Welche Herausforderungen entstehen, wenn der Energiebedarf in der frühen Phase der Karosserieentwicklung Berücksichtigung finden soll?

Der Energiebedarf stellt eine weitere Anforderung an die frühe Phase dar, welche langfristig Potential für eine strategische Größe bietet. Aufgrund fehlender Anregungen durch zum Beispiel Subventionen oder Sanktionen seitens der Gesetzgebung existieren Anforderungen, die innerhalb der frühen Phase durch das interdisziplinäre Team höher priorisiert werden. Energie wird somit derzeit nur unzureichend betrachtet. Die einzige Möglichkeit, energiesensitive Entscheidungen zu treffen, wird bei mehreren in Frage kommenden Lösungen gesehen, die nahezu die gleichen Vorteile bieten.

Wenn Energie als Größe berücksichtigt werden soll, reicht es nicht, nur den Energiebedarf während der Herstellung zu betrachten. Es müssen hierfür weitere Zusammenhänge definiert werden, um der Betrachtung des Lebenszyklus nach dem KEA oder mit ökologischen Größen dem LCA gerecht zu werden. Eine Darstellung in einer einzelnen

Kennzahl wie der des Harbour-Reports reicht für eine umfassende Betrachtung des Lebenszyklus nicht aus. Für den Energiebedarf während der Herstellung existieren bisher nur unzureichende Daten.

Ein Automobil verbraucht einen Großteil des gesamten Energiebedarfs während der Nutzungsphase. Um eine geeignete Aussage über diesen Wirkzusammenhang zu erlangen, gibt es derzeit nur ungenaue Ansätze, indem das Gewicht und der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch berücksichtigt werden. Je nach Motor- und Getriebeart entstehen weitere Ungenauigkeiten, die derzeit nicht berücksichtigt werden. Bei der Wiederverwendung der eingesetzten Bauteile existieren kaum Daten, die für eine Berechnung herangezogen werden können. Zudem besteht ein Zeitunterschied zwischen Herstellung und Verwertung von mehreren Jahren, sodass eine voranschreitende Technologie ebenfalls einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor bildet.

Neben den genannten Punkten nutzt die automobile Industrie intensiv die Zusammenarbeit mit Zulieferern, die zum Teil auch weitere Zulieferer beschäftigen. Eine vergleichbare Durchgängigkeit der Vermessung der Energiebedarfe während der Herstellung und die Ausweisung dieser sind nur mit großem Aufwand zu erreichen. Zudem fehlen genormte Messverfahren und Equipment wie auch Systemgrenzen, um vergleichbare Messungen durchführen zu können. Soll demnach der Energiebedarf ermittelt werden, werden erhebliche Mehraufwände in Form von Investition und Pflege der IT-Systeme in der Produktion erwartet. Besteht kein zwingender Bedarf, diese Größe auszuweisen, kann das Unternehmen keine konkurrenzfähigen Preise für die Produkte anbieten und wird unter einem Wettbewerbsnachteil leiden. Ob der Kunde den ausgewiesenen Energiebedarf während der Herstellung als Kaufargument honoriert, wird derzeit als kritisch eingeschätzt.

Aufgrund der hohen Variantenvielfalt und die damit verbundenen unterschiedlichen Prozessparameter stellt sich die Erhebung einer umfassenden Datenbasis als sehr aufwendig dar. Zudem entsteht eine Unschärfe bei der Betrachtung der kombinierten Fügetechniken. Das Kombinieren von punktuellen Fügetechniken mit dem Kleben ist eine gängige Methode für den Korrosionsschutz. Der Kleber bringt zudem Energie für dessen Herstellung mit sich, die Berücksichtigung finden muss. Zudem kann bei thermischen Fügeverfahren in der Nähe des Klebers zusätzlicher Schmauch entstehen, der dafür sorgt, dass die Hallenbelüftung erweitert werden muss. Diese energetischen Mehraufwände werden derzeit nicht erfasst. Zudem kann eine einmal installierte Hallenbelüftung in der Zukunft für folgende Produkte weiterverwendet werden.

Menschliche Arbeit ist eine energetische Größe, die in den angewandten Methoden nicht bilanziert wird. Eine Vergleichbarkeit zwischen einer vollautomatischen Fertigungsstraße und einer Manufaktur, in der hauptsächlich Menschen arbeiten, ist somit nicht gegeben. Eine Anwendung der Methode auf ein solches Konstrukt würde zu falschen Schlüssen führen und wäre somit kontraproduktiv. Ebenfalls werden Mehraufwendungen während der Entwicklung/Planung nicht berücksichtigt. Der Aufwand in den genannten Bereichen

wird durch Frontloading und die integrierte Produktentwicklung erhöht, jedoch energetisch in fast allen Methoden und Modellen nicht ausreichend einbezogen.

Innerhalb der in dieser Arbeit gezogenen Systemgrenzen wurde auf die Gewerke Presswerk, Lackiererei und Vorrichtungsbau sowie Endmontage verzichtet. Grund hierfür ist die Komplexitätsreduzierung. Durch die bereits im Karosseriebau fehlenden Daten, Unsicherheiten und die Erkenntnisse, dass es an Anreizen mangelt, ist es nicht zielführend, die Betrachtung auf weitere Gewerke zu erweitern. Der Karosseriebau wurde für eine erste Betrachtung und das Herausstellen der Herausforderungen für eine frühzeitige energiesensitive Produktentwicklung als vorerst ausreichend eingeschätzt. Für eine umfassende Betrachtung des Energiebedarfs ist die Betrachtung dieser Gewerke jedoch erforderlich. Hierbei werden zusätzliche Herausforderungen und gewerkspezifische Herausforderungen erwartet.

8.2 Zusammenfassung

Aufgrund der immer knapper werdenden Rohstoffe sieht sich die stetig wachsende Weltbevölkerung mit weitreichenden Herausforderungen konfrontiert. Innovative Produkte dürfen die natürlichen Ressourcen nicht übermäßig belasten. Durch den starken Wettbewerbsdruck sind die automobilen Unternehmen gezwungen, Nischenmärkte zu bedienen und auch kleinere wirtschaftliche Potentiale zu erschließen. Der Energiebedarf stellt derzeit ein solches Potential dar. Dennoch wird der Energiebedarf heutzutage nur unzureichend im frühen Produktentwicklungsprozess berücksichtigt. Die frühe Phase bietet dabei die größten Vorteile, da die Beeinflussbarkeit zu dieser Zeit am höchsten ist.

Um zu analysieren, warum Energie derzeit nur unzureichend berücksichtigt wird, wurde zunächst der automobile Karosseriebau untersucht und die dort durchgeführte Arbeitsweise aufgenommen. Durch eine anschließende Recherche konnten allgemeine Methoden ermittelt werden, mit denen eine energetische Bewertung durchgeführt werden kann. Es wurde herausgestellt, dass die beschriebenen Methoden nicht ausreichend angewendet werden. Die Ursache wurde in den fehlenden Energiedaten gesehen, welche für eine frühzeitige Betrachtung genutzt werden können, und der fehlenden Integration des Energiebedarfs in den Entscheidungsprozess. Neben diesem Umstand wurde erkannt, dass weitere Anforderungen berücksichtigt werden müssen, die unter Umständen mit der Anforderung des Energiebedarfs in einem Zielkonflikt stehen. Zudem stellt der Produktentwicklungsprozess des automobilen Karosseriebaus Anforderungen an individuelle Arbeitsweisen, sodass einzeln angewendete Methoden diese Bedürfnisse nur unzureichend betrachten. Innerhalb dieser Arbeit wurden die Technikbewertung und der Kumulierte Energieaufwand als eine Kombination mit Potential für ein weiteres Vorgehen identifiziert. Um eine Eliminierung bestehender Lösungsmöglichkeiten und eine Bewertung der verbleibenden durchzuführen, wurden grundlegende Anforderungen innerhalb der Untersuchung systematisch aufgenommen. Diese wurden gemäß der Technikbewertung in Restriktionen und Präferenzen aufgeteilt. Für die Präferenzen wurden in ei-

nem gewissen Umfang Messungen innerhalb eines automobilen Unternehmens durchgeführt und Daten aufgenommen. Mit dieser Aufnahme konnte die benötigte Datenbasis rudimentär beschrieben und als Grundlage für weitere Schritte genutzt werden.

Durch den konzipierten Prozess und die anschließende Realisierung in Form eines Demonstrators konnte der Energiebedarf in den Entscheidungsprozess rudimentär integriert werden. Um die identifizierten Methoden bezüglich ihrer Anwendbarkeit zu validieren, wurde ein Demonstrator umgesetzt, welcher durch Entscheidungsträger aus einem interdisziplinären Team subjektiv validiert wurde. Die Validierung zeigte, dass der Demonstrator einen ersten Schritt in Richtung einer frühzeitigen energiesensitiven Karosserieentwicklung darstellt und weiter ausgebaut werden kann.

Die Erhebung der Datenbasis stellte sich dabei jedoch als sehr aufwendig dar. Aufgrund der vielen Kombinationsmöglichkeiten von Prozessparametern sowie Abhängigkeiten zu Nebenprozessen stellt sich eine einheitliche Aufnahme der notwendigen quantitativen Präferenzen als eine Herausforderung dar. Eine weitere Unschärfe besteht in der frühen Phase, da noch einige Detaillierungen erfolgen, die den späteren Energiebedarf beeinflussen. Durch diese Unschärfe während der frühen Phase besteht das Risiko, dass falsche Entscheidungen getroffen werden. Wenn das Thema Energie berücksichtigt werden soll, muss daher eine einheitliche Systemgrenze gezogen werden, die eine umfassende und nahezu vollständige Bilanzierung ermöglicht. Als Gesamtfazit mit Blick auf die hier dargestellten notwendigen Schritte wird behauptet, dass die Methoden wie der KEA beziehungsweise die LCA derzeit nicht zielgerichtet angewandt werden können, da es zu viel Unschärfe in den erhobenen Daten gibt. Der Aufwand, der hinter einer nahezu vollständigen Datenerhebung steht, steht derzeit in keinem Verhältnis mit dem Mehrwert für den Kunden. Als weiteres Fazit kann daher angegeben werden, dass der Anreiz eines solchen Aufwands vermutlich kurzfristig nicht vom Kunden honoriert wird. Die Berücksichtigung kann jedoch in Zukunft eine strategische Bedeutung bekommen, wenn der Energiepreis weiter ansteigt. Ein weiteres Potential wird darin gesehen, den Energiebedarf mit weiteren Größen oder Zielen zu kombinieren, sodass ein Synergieeffekt genutzt werden kann. Möglichkeiten dieser Synergieeffekte werden daher im folgenden Abschnitt vorgestellt, sodass Empfehlungen zur Weiterführung der Thematik vorgestellt und Thesen aufgestellt werden.

8.3 Empfehlungen zur Weiterführung

8.3.1 Allgemeiner Ausbau der Datenbasis

Trotz des Mangels an Anreizen wird eine Empfehlung zum Ausbau der Datenbasis gegeben. Der Energiebedarf kann in Zukunft eine strategische Größe darstellen, da die fossilen Brennstoffe der Welt endlich sind. Ein steigender Energiepreis ist daher in den kommenden Jahren nahezu unausweichlich. Daher kann bereits heute ein Beitrag für die Zukunft geleistet werden, um später Produkte energieeffizienter fertigen zu können und somit aus Unternehmenssicht einen Wettbewerbsvorteil zu erschließen.

Für eine flächendeckende Nutzung muss eine Wissensbasis vorliegen, auf der Entscheidungen getroffen werden können. Diese Datenbasis muss stetig weiter ausgebaut werden und neue Technologien zeitnah berücksichtigen. Hierbei sollte eine hinreichende Datenbank vorliegen, die verschiedene Werkstoffpaarungen berücksichtigt wie auch unterschiedliche Materialdickenkombinationen und unterschiedliche Prozessparameter. Da es sich durch die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten um eine sehr große Menge an Energiedaten handelt und Prozessgeräte nahezu beliebig kombiniert werden können und somit eine große Variantenvielfalt bilden, stellt die Bereitstellung von Energiebedarfsdaten seitens des Prozessgeräteherstellers keine Alternative dar. Eine Möglichkeit stellt die Ausstattung der Geräte mit Sensoren dar, die den Energiebedarf direkt und individuell zum Einsatzzweck aufzeichnen. Neben dem Energiebedarf können weitere Prozessparameter aufgenommen werden. Das Internet of Things (IoT) bietet einen Ansatz, um Prozessdaten aus der realen Fabrik flächendeckend zu erfassen. Das IoT hat das grundsätzliche Ziel, die Informationslücke zwischen der realen und virtuellen Welt zu minimieren [Flei05]. Hierbei kann von unterschiedlichsten Sensoren und Microcontrollern Gebrauch gemacht werden, die die Kennzahlen für die Zustände der Maschinen übermitteln. Eine Anwendung dieses Trends ist im Bereich des Energiebedarfs denkbar. Sind Maschinen grundsätzlich mit IoT-Sensoren ausgestattet, können jederzeit geeignete Messwerte der realen Fabrik abgerufen und in die frühe Phase des in Planung befindlichen Nachfolgers eingebracht werden. Diese Messaufwände sollten jedoch immer in einem wirtschaftlich vertretbaren Verhältnis zum Nutzen stehen. Hierbei können Synergieeffekte gehoben werden, wenn die Energieaufnahme zum Beispiel für ein Predictive Maintenance oder Condition Monitoring genutzt werden kann. Hierbei kann ein hoher Energiebedarf zum Beispiel als Indikator für ein verschlissenes Prozessgerät herangezogen werden.

Um weitere Synergieeffekte zu nutzen, kann eine Erweiterung auf die Plattformstrategien wie den MQB[20] (große Teile des VW-Konzerns), MLB[21] (hauptsächlich Audi AG) und MRA[22] (Mercedes-Benz) durchgeführt werden. Durch die hohe Stückzahl durch die Plattformstrategie ist es wirtschaftlich sinnvoll, den Energiebedarf detailliert zu betrachten und zu optimieren. Durch den modularen Ansatz der Produktionsanlagen können Messungen an exemplarischen Musterbauzellen durchgeführt werden. Aufwendungen zur Energiebetrachtung wie zum Beispiel die notwendigen Energiemessungen verteilen sich auf eine hohe Produktstückzahl und können sich daher eher amortisieren.

Es zeigte sich zudem, dass eine erweiterte Betrachtung des direkten Energiebedarfs innerhalb der Unternehmensgrenzen nötig ist, damit die Gesamtenergiebilanz erfasst werden kann. Für die Phase der Nutzung wurden für diese Untersuchung das Gewicht und das Material der Alternativen ermittelt und welchen Einfluss ein Bauteil oder eine Baugruppe auf den späteren Treibstoffverbrauch des Pkw in der Nutzungsphase hat.

[20] Modularer Querbaukasten.
[21] Modularer Längsbaukasten.
[22] Modulare Hinterradantriebs-Architektur.

Diese Abhängigkeit sollte überprüft und genauer definiert werden, damit eine rationale Entscheidung auf Basis von hinreichenden Fakten getroffen werden kann.

Für den KEA der Entsorgungsphase existiert bisher kaum eine Datenbasis. Eine Untersuchung in diesem Gebiet wird als sinnvoll erachtet, damit ein Leichtbau zielgerichtet durchgeführt werden kann und in einem volkswirtschaftlichen Interesse steht.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Firmen- und Produktionsstandorten zu erreichen, ist zudem eine Definition von einheitlichen Systemgrenzen sinnvoll. Es sollte ein Schema erarbeitet werden, nach dem das Produkt über den gesamten Lebenszyklus hinweg einheitlich bewertet werden kann. Hierbei ist eine einheitliche Datenbasis zu nutzen, um eine generelle Vergleichbarkeit zu erzeugen.

8.3.2 Monetäre Größen als Indikator für den Energiebedarf

Die Betrachtung von monetären Kosten ist für Unternehmen unverzichtbar. Durch eine Bilanzierung der Kosten ist es allgemein möglich, Kostentreiber zu identifizieren und die Wirtschaftlichkeit bestimmter Investitionen darzustellen. Hierbei werden große Aufwände betrieben, um eine transparente Buchführung garantieren zu können. Wird vereinfacht zugrunde gelegt, dass die monetären Kosten den Aufwand reflektieren, der entstanden ist, um ein Produkt zu fertigen, dann ist der Energiebedarf in den Kosten bereits enthalten. Mit Blick auf den automobilen Karosseriebau wird auch dort eine monetäre Bewertung der Prozesse, Medien und – wenn benötigt – eines Verbindungselements durchgeführt. Ein Hohlstanzniet kostet einen bestimmten Betrag und reflektiert somit zusätzliche Energie (Aufwand), welcher in die monetäre Bewertung einfließt. Abstrakt gesehen reflektieren die Kosten auch menschliche Aufwände. Durch den Lohn, der in den Kosten eines Produkts anteilig enthalten ist, werden weitere Produkte gekauft und somit Energie durch die Nachfrage des Menschen aufgewandt. Der Mensch kostet demnach mehr Energie, als die physikalischen direkten Aufwände während der direkten Tätigkeit an einem Produkt zunächst erscheinen lassen. Dieses abstrakte Konzept lässt mit bereits bestehender Bilanzierung in einem gewissen Umfang eine Bilanzierung zu. Für Märkte, in denen ein Wettbewerb herrscht und die Preise einen festen Bezug zu den Kosten besitzen, konnte bereits in einer rudimentären Untersuchung die Linearität zwischen Preis und Energiebedarf am Beispiel von unterschiedlich großen Zylinderkopfschrauben nachgewiesen werden. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt Abbildung 40.

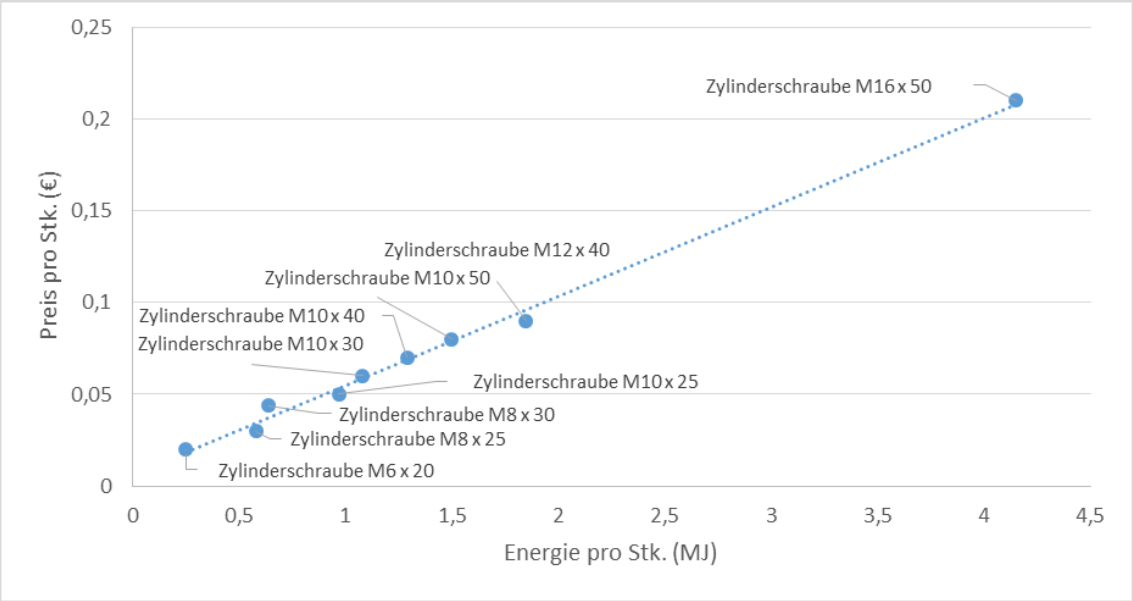

Abbildung 40: Proportionalität zwischen Preis und Energiebedarf

In dem gezeigten Diagramm steht jeder Punkt für eine Zylinderkopfschraube einer von links nach rechts zunehmenden Größe. Auf der X-Achse wurde dessen Energiebedarf während der Herstellung aus generischen Datenbanken ermittelt. Zu sehen ist eine Proportionalität zu dem auf der Y-Achse aufgetragenen Preis pro Stück. Zu untersuchen wäre, inwieweit eine generelle Aussage auch bei anderen Produkten möglich ist und wo es zu einer Unschärfe kommt.

Ansätze hierzu werden unter anderem in der VDI-Richtlinie 2225 formuliert, wobei hier die Ermittlung der monetären Kosten im Vordergrund steht. Um mit geringem Rechenaufwand in der frühen Phase der Entwicklung eine Aussage über die später anfallenden Kosten treffen zu können, wird in der genannten Richtlinie ein Verhältnis zwischen den Kosten eines Vergleichsmaterials und des Bezugsmaterials gebildet. Dieses Verhältnis wird mit dem Volumen des eingesetzten Materials und den volumenbezogenen Materialkosten multipliziert. Findet nun noch eine Multiplikation mit dem Werkstoffgemeinkostenzuschlag statt, können die Materialkosten überschlägig berechnet werden. Innerhalb der Richtlinie werden relative Werkstoffkosten in Tabellenform angeboten, die für eine überschlägige Materialkostenkalkulation genutzt werden können. Um neben den Materialkosten auch die Herstellungskosten zu ermitteln, muss von vorherigen Produkten der mittlere prozentuale Materialkostenanteil bekannt sein. Hiermit kann dann auf Basis der Materialkosten auf die Herstellkosten zurückgerechnet werden. Nach VDI-Richtlinie 2225 ist eine Abweichung von ± 10% als gutes Ergebnis zu betrachten. Auch eine Abweichung von ± 20% sei noch hinzunehmen. Neben der rein wirtschaftlichen Bewertung bietet die Richtlinie zudem Ansätze für eine anschließende technische Bewertung analog zu den in dieser Arbeit durchgeführten Bewertungen. Ziel ist hierbei eine Bewertung zwischen technischer und wirtschaftlicher Wertigkeit. Wird diese Methode mit einem

Energiefaktor erweitert, wäre aus der Referenzkostenkalkulation eine direkte Ableitung auf energetische Größen denkbar.

Auch hier zeigt sich, dass viele Faktoren und prozentuale Zuschläge genutzt werden, um in der frühen Phase zu einer quantitativen Aussage zu kommen. Als kritisch hierbei werden unter anderem Subventionen, Steuern/Zölle, Wechselkurse und Preisbildung durch Angebot und Nachfrage gesehen. Demnach bietet ein Ansatz, über monetäre Kosten auf die Energie zu schließen, ebenfalls Potential für energetische Fehlentscheidungen. Dennoch birgt diese Bilanzierung Potential für weitere Untersuchungen, da der hohe Aufwand für den Aufbau einer parallelen Bilanzierung für den Energiebedarf nahezu obsolet wäre. Dennoch bleibt ein gewisses Maß an Ungewissheit bestehen.

9 Literaturverzeichnis

[Abel08] Abele, E. et al.: EcoDesign. Von der Theorie in die Praxis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.

[Andr07] André Robert Richter: Entwicklung und Umsetzung eines Kennzahlensystems zur Leistungsmessung im Karosseriebau, 2007.

[Arbe18] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Energieflussbild 2018 für die Bundesrepublik Deutschland in PJ. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=40, 04.05.2020.

[Atik01] Atik, A.: Entscheidungsunterstützende Methoden für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Techn. Univ., Diss. Darmstadt, 2000. Shaker, Aachen, 2001.

[Auto17] AutoBild.de: Die Karosserie des Audi A3 Cabriolet. http://www.autobild.de/bilder/die-karosserie-des-audi-a3-cabriolet-594974.html#bild3.

[BEAT12] BEAT Projekt: Bewertung der Energieeffizienz alternativer Prozesse und Technologieketten (BEAT). http://www.effizienzfabrik.de/ecomaXL/files/PS_BEAT_Abschlussbericht.pdf&download=1, 21.08.2017.

[Beck07] Becker, H.: Auf Crashkurs. Automobilindustrie im globalen Verdrängungswettbewerb ; mit 29 Tabellen. Springer, Berlin, 2007.

[Beck14] Becker, T.; Bähr, R.: Energie- und Ressourceneffizienz in der Zylinderkopffertigung. Logos-Verl. Berlin, Berlin, Magdeburg, 2014.

[Bind96] Binder, V. A.; Kantowsky, J.: Technologiepotentiale. DUV Dt. Univ.-Verl, Wiesbaden, St. Gallen, 1996.

[Björ10] Björn Krellner, Gudula Rünger, Daniel Steger: Anforderungen an ein Datenmodell für energiesensitive Prozessketten von Powertrain-Komponenten, 2010.

[Böll13] Böllhoff GmbH & Co. KG: Werkstoffe hochfest und prozesssicher verbinden. https://www.boellhoff.com, 21.08.2017.

[Boot11] Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W. A.: Product design for manufacture and assembly. CRC Press, Boca Raton, Fla., 2011.

[Born16] Bornschlegl, M.: Methods-Energy Measurement. Dissertation, 2016.

[Bort06] Bortz, J.; Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler ; mit 87 Tabellen. Springer-Medizin-Verl., Heidelberg, 2006.

[Brae12] Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Mit 122 Tabellen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.

[Bral98] Bralla, J.G. Hrsg.Design for manufacturability handbook, New York: McGraw-Hill, 1998.

[Brit17] British Petroleum: Statistical Review of World Energy 2017. http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf, 21.08.2017.

[Broc10] Brockmeyer, H.: Rechnergestützte Methoden zur frühzeitigen Produktbeeinflussung und Produktabsicherung im Karosseriebau. Helmut-Schmidt-Univ., Diss.--Hamburg, 2010. Shaker, Aachen, 2010.

[Broc99] Brockhoff, K.: Forschung und Entwicklung. Planung und Kontrolle. Oldenbourg, München, 1999.

[Bull90] Bullinger, H.-J.: F&E heute, München, 1990.

[Bull94] Bullinger, H.-J.: Einführung in das Technologiemanagement. Modelle, Methoden, Praxisbeispiele, 1994.

[Bull97] Bullinger, H.-J.; Warschat, J.: Forschungs- und Entwicklungsmanagement. Simultaneous Engineering, Projektmanagement, Produktplanung, Rapid Product Development, 1997.

[Bund09] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Nachrüstung mit Partikelfiltern soll auch 2010 gefördert werden. http://www.bmu.de/bmu/presse-reden/pressemitteilungen/pm/artikel/nachruestung-mit-partikelfiltern-soll-auch-2010-gefoerdert-werden/, 21.08.2017.

[Burr08] Burr, H.: Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung im Karosserierohbau. LKT Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD Univ. des Saarlandes, Saarbrücken, Saarbrücken, 2008.

[Busc13] Buschmann, M.: Planung und Betrieb von Energiedatenerfassungssystemen. IBF, Chemnitz, Chemnitz, 2013.

[Coll13] Collado-Ruiz, D.; Ostad-Ahmad-Ghorabi, H.: Estimating Environmental Behavior Without Performing a Life Cycle Assessment. In Journal of industrial ecology, 2013, 17S. 31–42].

[Deut02] Deutsches Institut für Normung: Umweltmanagement-Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung ; deutsche und englische Fassung. Beuth, Berlin, 2002.

[Deut03] Deutsches Institut für Normung: Fertigungsverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.

[Deut09] Deutsches Institut für Normung: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.

[Ehrl07a] Ehrlenspiel, K. et al.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007a.

[Ehrl07b] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser, München, 2007b.

[Eise03] Eisenführ, F.; Weber, M.: Rationales Entscheiden. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l, 2003.

[EJOT09] EJOT GmbH & Co. KG: EJOT FDS Schraube. Die fließlochformende Schraube für höherfeste Verbindungen. http://www.pressebox.de/presscorner/firma/ejot-gmbh-co-kg/meldung/boxid/265233/iframe/386, 21.08.2017.

[Ette13] Etterich, H. J.: Informationen und Wissen. Die Folgen der Verwechselung bei Entscheidungen im Management. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 2013.

[Euro13] Europäisches Parlament: Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge, 2013.

[Ever05] Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005.

[Ever95] Eversheim, W. Hrsg.Simultaneous engineering. Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie, 1995.

[Fisc00] Fischer, K.-H.; Schreiber, S.; Wüstenberg, H.: Möglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen, Celle, 2000.

[Flei05] Fleisch, E.; Mattern, F. Hrsg.Das Internet der Dinge. Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen ; mit 21 Tabellen. Springer, Berlin, 2005.

[Fuch14] Fuchs, S.: Verfahren zur parameterbasierten Gewichtsabschätzung neuer Fahrzeugkonzepte, München, 2014.

[Gerd13] Gerden, O.: Schöne Klimaziele, nichts dahinter. http://www.zeit.de/wirtschaft/2013-12/geden-klimaschutz, 21.08.2017.

[Gess01] Gessner, K.: Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung, Berlin, 2001.

[Gess09] Gessler, M.: Kompetenzbasiertes Projektmanagement (PM 3). Handbuch für die Projektarbeit, Qualifizierung und Zertifizierung auf Basis der IPMA Competence Baseline Version 3.0. GPM Deutsche Gesellschaft für Projektmanagement, Nürnberg, 2009.

[Goec12] Goecke, S.-F.; Krautwald, A.: [ENERWELD]. Effiziente thermische Fügeverfahren. Fachhochsch. Fertigungs- und Produktionstechnik Maschinenbau im Fachbereich Technik, Brandenburg, 2012.

[Gome07] Gomeringer, A.: Eine integrative, prognosebasierte Vorgehensweise zur strategischen Technologieplanung für Produkte. Jost-Jetter-Verl; Univ, Heimsheim, Stuttgart, Stuttgart, 2007.

[Götz13] Götze, U.; Zönnchen, S.; Schönherr, J.: Wirtschaftliche Bewertung von Prozesskettenvarianten am Beispiel von Strukturbauteilen. In (Neugebauer, R.; Götze, U.; Drossel, W.-G. Hrsg.): Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD. Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetische-wirtschaftliche Bilanzierung". Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2013S. 375–396].

[Götz14] Götze, U. et al.: Zur Analyse und Bewertung von Produkt-Prozessketten-Kombinationen der hybriden Produktion. In (Neugebauer, R.; Götze, U.; Drossel, W.-G. Hrsg.): Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung – Diskussion der Ergebnisse des Spitzentechnologieclusters eniPROD. 3. Methodenband der Querschnittsarbeitsgruppe „Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung“des Spitzentechnologieclusters eniPROD, 2014S. 21–32].

[Grab06] Grabner, J.; Nothhaft, R.: Konstruieren von Pkw-Karosserien. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006.

[Grün09] Grünig, R.; Kühn, R.: Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. Ein heuristischer Ansatz. Springer-Verlag, s.l., 2009.

[Gudu10] Gudula Rünger, Thomas Reichel, Daniel Steger, Haibin Xu: IT-Unterstützung zur energiesensitiven Produktentwicklung, 2010.

[Gutt11] Guttenberger, P.: Energieeffizienz in der Baubranche. In Fachzeitschrift der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft Prävention, 2011, 2011S. 30–36].

[Hopf16] Hopf, H.; Müller, E.: Methodik zur Fabriksystemmodellierung im Kontext von Energie- und Ressourceneffizienz. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.

[Hopf95] Hopfenbeck, W.; Jasch, C.: Öko-Design. Umweltorientierte Produktpolitik. Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1995.

[Kamm17] Kammerl, D. et al.: A Framework for Sustainable Product Development. In (Matsumoto, M. et al. Hrsg.): Sustainability Through Innovation in Product Life Cycle Design. Springer Singapore, Singapore, s.l., 2017S. 21–32].

[Klei13] Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 2013.

[Klöp09] Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-VCH, Weinheim, 2009.

[Konr13] Konrad Fischer, Jürgen Salz, Cordula Tutt, Andreas Wildhagen: EEG-Reform macht Strom noch teurer. Industrie fürchtet EEG-Reform. http://www.wiwo.de/unternehmen/energie/subventionen-industrie-fuerchtet-eeg-reform/9009070-3.html, 21.08.2017.

[Künz16] Künzel, M.; Schulz, J.; Gabriel, P.: Engineering 4.0 Grundzüge eines Zukunftsmodells. http://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/autonomik-engineering%2040.pdf?__blob=publicationFile&v=3, 21.08.2017.

[Laux05] Laux, H.; Liermann, F.: Grundlagen der Organisation. Die Steuerung von Entscheidungen als Grundproblem der Betriebswirtschaftslehre. Springer, Berlin, 2005.

[Luck12] Lucko, A.: Ein Beitrag zur Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Karosserieentwicklung und Produktionsplanung. Helmut-Schmidt-Univ., Diss.--Hamburg, 2012. Shaker, Aachen, 2012.

[Ludw95] Ludwig, B.: Methoden zur Modellbildung in der Technikbewertung. Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, Clausthal, 1995.

[Lund99] Lundie, S.: Ökobilanzierung und Entscheidungstheorie. Praxisorientierte Produktbewertung auf der Basis gesellschaftlicher Werthaltungen ; 69 Tabellen. Springer, Berlin, 1999.

[Mana16] Manager Magazin: Abgas-Vergleich ist erst Beginn einer Kostenlawine. http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/volkswagen-wie-teuer-wird-der-abgasskandal-a-1100826.html, 21.08.2017.

[Mari11] Marinescu, M.; Winter, J.: Grundlagenwissen Elektrotechnik. Gleich-, Wechsel- und Drehstrom. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2011.

[Matt13] Matthias Streit: Energie: Fünf Dinge, die Sie über das Ende des fossilen Zeitalters wissen müssen. http://green.wiwo.de/energie-ende-des-fossilen-zeitalters-noch-nicht-in-sicht/, 21.08.2017.

[McKi12] McKinsey&Company: CO2-Regulierung sorgt bis 2030 für dreistelliges Milliardenwachstum im Leichtbau. http://www.mckinsey.de/co2-regulierung-sorgt-bis-2030-f%C3%BCr-dreistelliges-milliardenwachstum-im-leichtbau, 21.08.2017.

[Meer00] Meerkamm, H.; Wartzack, S.: Fertigungsgerecht Konstruieren. Potenzial und aktuelle Tendenzen. In Werkstatt und Betrieb, 2000, 2000S. 24–29].

[Mill07] Millet, D. et al.: Does the potential of the use of LCA match the design team needs? In Journal of cleaner production, 2007, 15S. 335–346].

[Möhr08] Möhrle, M. G.; Isenmann, R.: Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen, 2008.

[Mölt09] Möltner, C.: Life Cycle Assessment als Werkzeug zur Entwicklung umweltgerechter Produkte. Strategien zur Implementierung von Ecodesign. Diplomica Verlag GmbH, s.l, 2009.

[Müll09] Müller, E. et al.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.

[Ovtc10] Ovtcharova, J.: Virtual Engineering I. Vorlesungen an der FDIBA. http://tu.nuclear868.net/Virtual%20Engineering/Zusammenfassung/VE1_Zusammenfassung_Kap1.pdf, 21.08.2017.

[Pahl07] Pahl, G. et al.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.

[Pamm14] Pamminger, R.: LCA to go. http://www.lca2go.eu/files/LCA2go-brochure.pdf, 29.01.2020.

[Pape13] Pape, D.; Mantwill, F.: Frühzeitige energetische Produktbeeinflussung durch Nutzung von Kausalverkettungen im Automobilbau. In (Neugebauer, R.; Götze, U.; Drossel, W.-G. Hrsg.): Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD. Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetische-wirtschaftliche Bilanzierung". Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2013S. 215–229].

[Pape14] Pape, D.; Mantwill, F.: Ein Konzept zur Integration der Energieanforderung für eine frühzeitige energetische Produktbeeinflussung am Beispiel des automobilen Karosseriebaus, Hamburg, 2014.

[Pfah10] Pfahler, J. et al.: Energiebilanzierung in frühen Phasen der Bauteilentwicklung. In Konstruktion und Entwicklung, 2010S. 35–41].

[Pisc16] Pischinger, S.; Seiffert, U. Hrsg.Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 2016.

[Ponn11] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.

[Putz11] Putz, M.; Todtermuschke, M.; Böhme, J.: Energetische Prozesskettenbewertung mittels Prozess-Hilfs-Energie-Analyse. In (Neugebauer, R. Hrsg.): Methoden der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung in der Produktionstechnik. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD ; Tagungsband ; [26.10.2010, Chemnitz]. Verl. Wiss. Scripten, S.l, 2011S. 161–170].

[Rapp99] Rapp, F.: Normative Technikbewertung. Wertprobleme der Technik und die Erfahrungen mit der VDI-Richtlinie 3780. Ed. Sigma, Berlin, 1999.

[Rein07] Reinstettel, M.: Laboruntersuchung zur Prozessstabilität beim Niet-Clinchen, 2007.

[Rein13] Reinhardt, Saskia Katrin Christina: Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung. Utz, München, München, 2013.

[Ries13] Rieseberg, S.; Wörlen, C. D.: Wachsende Strompreisunterschiede zwischen Gewerbe- und Privatkunden. Marktversagen oder unfaire Abgabenbelastung? https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/energie/Arepo_Strompreise.pdf, 18.10.2018.

[Ritz01] Ritzen, S.; Beskow, C.: Actions for integrating environmental aspects into product development. In The journal of sustainable product design an international journal devoted to the design and development of sustainable products, services and systems innovation, 2001S. 91–102].

[Rumm14] Rummel, S.: Eine bewertungsbasierte Vorgehensweise zur Tauglichkeitsprüfung von Technologiekonzepten in der Technologieentwicklung. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Stuttgart, 2014.

[Saue16] Sauer, B. Hrsg.Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016.

[Scha14] Schacht, M.: Erweiterung des Planungsprozesses im Karosserierohbau um Energieaspekte zur Auslegung der Technischen Gebäudeausrüstung, Hamburg, 2014.

[Schi13] Schimpke, P.; Horn, H. A.: Praktisches Handbuch der gesamten Schweißtechnik. Dritter Band: Berechnen und Entwerfen der Schweißkonstruktionen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 2013.

[Schi99] Schimmelpfeng, L.: Ökologische Produktgestaltung. Stoffstromanalysen und Ökobilanzen als Instrumente der Beurteilung ; [Ergebnisse der Fachtagung, die im Oktober 1998 … veranstaltet wurde]. Springer, Berlin, 1999.

[Schl04] Schlößer, F.: Kostenanalyse als Methodik zur Optimierung von Entwicklungs- und Fertigungsprozessen. Dissertation, Hamburg, 2004.

[Schm11] Schmidt, T.: Technologiemanagement und anwendungsspezische Prozessentwicklung in der Mikrosystemtechnik. Dissertation, Siegen, 2011.

[Schu02] Schultz, A.: Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien. Universitätsbibl, Magdeburg, Magdeburg, 2002.

[Schu11] Schuh, G.: Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2, 2011.

[Schu13] Schulte, R.: Rechnergestütztes Normteilmanagement als Beitrag zu einem optimierten Produktionsplanungsprozess in der Automobilindustrie, 2013.

[Schw11] Schwarzer, C. M.: Stahl ist noch keineswegs abgemeldet. http://www.zeit.de/auto/2011-03/leichtbau-cfk-aluminium, 21.08.2017.

[Simo13] Simonis, G.: Konzepte und Verfahren der Technikfolgenabschätzung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013.

[Sous06] Sousa, I.; Wallace, D.: Product classification to support approximate life-cycle assessment of design concepts. In Technological forecasting & social change an international journal, 2006, 73S. 228–249].

[Spei08] Speith, S.: Vorausschau und Planung neuer Technologiepfade in Unternehmen – Ein ganzheitlicher Ansatz für das strategische Technologiemanagement. Dissertation, Kassel, 2008.

[Spur03] Spur, G.: Technologie und Management - eine Herausforderung der Ingenieure. In Führungskräfte für ein integriertes Management Wirtschaftsingenieurwesen in Wissenschaft und Unternehmenspraxis ; Festschrift für Professor Dr.-Ing. Helmut Baumgarten zum 65. Geburtstag, 2003S. 49–63].

[Stat19] Statista GmbH: Wichtigste Kriterien beim Autokauf in Deutschland im Jahr 2019. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/171605/umfrage/wichtige-kriterien-beim-autokauf/, 04.05.2020.

[Stat20a] Statistisches Bundesamt: Energieverbrauch der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe. Deutschland, Jahre, Nutzung des Energieverbrauchs, Wirtschaftszweige, Energieträger. https://www-genesis.destatis.de/, 04.05.2020.

[Stat20b] Statistisches Bundesamt: Zahlen und Fakten Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html, 04.05.2020.

[Step07] Stephan, H.: Bewertungsmethodik für Fertigungsverfahren im Karosseriebau aus Sicht des betrieblichen Umweltschutzes. Inst. WAR, Darmstadt, 2007.

[Stre07] Strebel, H.: Innovations- und Technologiemanagement. Facultas.wuv, Wien, 2007.

[Swat15] Swat, M.: Methode zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten für die Serienfertigung am Beispiel ausgewählter Feinbearbeitungsverfahren. Dissertation, Saarland, 2015.

[Tarr07] Tarr, M.: The DfX Concept. http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0248_dfx/index.html, 01.03.2015.

[Tisc00] Tischner, U. Hrsg.Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung. Verl. form, Frankfurt am Main, 2000.

[Ulri12] Ulrich, K. T.; Eppinger, S. D.: Product design and development. McGraw-Hill, New York, 2012.

[Ulri16] Ulrich Knorra: VDI bietet kostenlose Kurzanalyse zur Fügetechnik. https://www.springerprofessional.de/leichtbau/vdi-bietet-kostenlose-kurzanalyse-zur-fuegetechnik/10959488, 23.05.2017.

[Verb00] Verband Deutscher Ingenieure: Technikbewertung Begriffe und Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000.

[Verb12] Verband Deutscher Ingenieure: Kumulierter Energieaufwand Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

[Wall09] Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2009.

[Wars12] Warsen, J.; Krinke, S.: Das Lebenszyklus-Konzept von Volkswagen. In ATZ, 2012, 114S. 560–565].

[Welt15] WeltN24 GmbH: VW hat die Ökobewussten in San Francisco verloren. https://www.welt.de/wirtschaft/article146948836/VW-hat-die-Oekobewussten-in-San-Francisco-verloren.html, 21.08.2017.

[Wemh06] Wemhöner, N.: Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2005. Shaker, Aachen, 2006.

[Wilh13] Wilhelm Böllhoff GmbH & Co. KG: Werkstoffe hochfest und prozesssicher verbinden. http://www.boellhoff.de/static/pdf/downloadcenter/RIVSET_D_6701.pdf, 07.07.2014.

[Wimm20] Wimmer, W.: Ecodesign Pilot. http://www.ecodesign.at/startseite/, 29.01.2020.

[Wöhe13] Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Vahlen, München, 2013.

[Wörd08] Wördenweber, B.; Wickord, W.: Technologie- und Innovationsmanagement im Unternehmen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.

[Zhao13] Zhao, S.: Integriertes Management von ökonomischen und ökologischen Produkteigenschaften. VDI-Verl, Düsseldorf, Darmstadt, 2013.