

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

**Methodik zur frühzeitigen Fertigungstechnologie-Auswahl auf
Bauteilebene unter Nutzung des Maschinellen Lernens**

Tobias R. Büchler

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen
Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
2. Prof. Dr.-Ing. Günther Schuh

Die Dissertation wurde am 05.03.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 27.08.2024 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist in Zeiten globaler Herausforderungen, wie der Klimakrise, dem Mobilitätswandel und der Überalterung der Gesellschaft in westlichen Ländern, für eine nachhaltige Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Der Einfluss eines Industriebetriebs auf die Umwelt und die Gesellschaft hängt dabei entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen. Dabei muss größtes Augenmerk darauf gelegt werden, möglichst ressourcenschonend, effizient und resilient zu werden, um flexibel im volatilen Produktionsumfeld zu agieren.

Um in dem Spannungsfeld Nachhaltigkeit, Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des iwb ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Personals sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei eingesetzten rechnergestützten und Künstliche-Intelligenz-basierten Methoden und die notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades dürfen jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung ökologischer und sozialer Aspekte in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des iwb. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, die Qualitätssicherung, die Verfügbarkeit und die Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den iwb-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des Institutes veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und den Anwendenden zu verbessern.

Rüdiger Daub

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München und wäre ohne die Unterstützung einer Vielzahl von Personen nicht in dieser Form zustande gekommen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, einem der Leiter des Institutes, für die stets wertvolle Unterstützung und Förderung meiner Arbeit. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Schuh (RWTH Aachen) für das Korreferat und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit danken. Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes und den Studierenden sei außerdem herzlichst für die konstruktiv-kritischen Diskussionen, den gewinnbringenden Austausch sowie die vielen einprägsamen Momente gedankt. In besonderer Erinnerung wird mir die intensive Zusammenarbeit mit Vertretern der BMW Group im Rahmen des Kernprojektes während meiner Promotionszeit bleiben. Ich bedanke mich diesbezüglich bei allen eingebundenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des erwähnten Industrie- und Anwendungspartners, die die Praxisrelevanz dieser Arbeit sichergestellt und mich in den durchlaufenen Projektphasen abteilungsübergreifend unterstützt und gefördert haben.

In besonderem Maße bedanke ich mich für die unermüdliche Unterstützung vor und während meiner Promotionszeit bei meiner Frau und meiner Familie, die mich in dem Promotionsvorhaben immer bestärkt und die für eine erfolgreiche Promotion nötigen Freiräume ermöglicht haben.

Garching b. München, September 2024

Tobias Büchler

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Verzeichnis der Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Dissertation und Vorgehensweise.....	3
1.3 Die Karosserie-Entwicklung als Anwendungsbereich der Arbeit.....	5
1.3.1 Aktuelle Herausforderungen.....	5
1.3.2 Abläufe und Begriffe der Karosserie-Entwicklung.....	5
1.3.3 Abläufe und Begriffe der Automobilproduktion	7
2 Grundlagen	8
2.1 Überblick relevanter Fertigungstechnologien	8
2.1.1 Tiefziehen.....	8
2.1.2 Aluminiumdruckguss	9
2.1.3 Strangpressen	9
2.1.4 Walzprofilieren.....	10
2.1.5 Additive Fertigung.....	11
2.2 Datenanalyse und KI-unterstützte Prognosemodelle.....	11
2.2.1 Datenaufbereitung	13
2.2.2 Lineare Regression	13
2.2.3 Random Forests.....	14
2.2.4 Künstliche Neuronale Netze	15
2.2.5 Faltende Neuronale Netze	16
2.3 Ansätze zur Verwertung unscharfer Informationen	18
2.3.1 Stochastische Verfahren	18

2.3.2	Szenariotechnik.....	18
2.3.3	Rough-Set-Theorie	20
2.3.4	Fuzzy-Logik.....	21
3	Stand von Forschung und Technik.....	24
3.1	Fertigungstechnologie-Analyse auf Technologieebene.....	24
3.2	Fertigungstechnologie-Analyse auf Bauteilebene	26
3.3	Forschungslücken und Anforderungen.....	27
3.4	Forschungsfragen.....	30
4	Betrachtungsrahmen	31
4.1	Frühe Phase der Karosserie-Entwicklung.....	31
4.2	Initiale Schritte der Automobilproduktion	32
5	Aufbau der Methodik.....	33
5.1	Einflussfelder zur Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene.....	33
5.1.1	Literaturbasierte Identifikation.....	33
5.1.2	Expertenbasierte Bestätigung.....	35
5.2	Bausteine der Methodik	37
5.2.1	Auswahl der Methoden des Maschinellen Lernens.....	39
5.2.2	Anforderungsmodul.....	40
5.2.3	Produktionsmodul	42
5.2.4	Kostenmodul	45
5.2.5	Geometriemodul	48
5.3	Bewertung der Fertigungstechnologien auf Bauteilebene	52
5.3.1	Auswahl der Methoden zur Verwertung unscharfer Informationen	52
5.3.2	Erstellung der Fuzzy-Regelsätze	54
5.3.3	Fuzzy-Regelsätze der Fertigungsszenarien.....	59
6	Publikation I: Methodik-Konzept und Anforderungsmodul	62
6.1	Kurzfassung.....	62

6.2	Kondensation der Erkenntnisse und Leistungsbeiträge des Hauptautors	63
7	Publikation II: Produktions- und Kostenmodul.....	64
7.1	Kurzfassung	64
7.2	Kondensation der Erkenntnisse und Leistungsbeiträge des Hauptautors	65
8	Publikation III: Geometriemodul.....	66
8.1	Kurzfassung	66
8.2	Kondensation der Erkenntnisse und Leistungsbeiträge des Hauptautors	67
9	Anwendung, Analyse und Nutzenbewertung.....	68
9.1	Verifikation: Erfüllung der Anforderungen an die Methodik	68
9.2	Validierung: Analyse der Ergebnisse nach Methodik-Anwendung	69
9.2.1	Plausibilität der Fertigungstechnologie-Verteilung	69
9.2.2	Analyse fertigungstechnologisch bestätigter Bauteile	70
9.2.3	Validierung von Fertigungstechnologie-Änderungsvorschlägen	73
9.3	Nutzenbewertung bezüglich der Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität	77
9.3.1	Entwicklungsdauer und Kosten	77
9.3.2	Entscheidungsqualität.....	83
10	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick.....	84
10.1	Zusammenfassung.....	84
10.2	Diskussion der Übertragbarkeit	86
10.2.1	Karosserie-Entwicklung der Automobilbranche	86
10.2.2	Metallische Bauteile außerhalb des Karosseriebaus	87
10.3	Ausblick.....	89
10.3.1	Integration weiterer metallischer Technologien	89
10.3.2	Integration nichtmetallischer Technologien.....	89
10.3.3	Integration weiterer Produktentwicklungsphasen.....	93
	Literaturverzeichnis	95

Anhang	107
A. Übersicht aller betreuten Studienarbeiten im Themengebiet	107
B. Schlüsselwörter der Literaturrecherche	108
C. Fragebögen der Expertenumfrage.....	109
D. Flowchart der Screening-Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl	114
E. Benutzeroberfläche des Prototyps zur Methodik-Anwendung.....	115
F. Fuzzy-Regelsysteme der Fertigungstechnologie-Szenarien (s. Abschnitt 5.3.3) ...	116
G. Verwendete Software	119
H. Kernpublikationen dieser Dissertation.....	119

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
A	Anforderung
AM	Additive Manufacturing (dt. Additive Fertigung)
B	(Funktions-)Bündel
BDG	Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie
BMW	Bayerische Motoren Werke (Unternehmen, Aktiengesellschaft)
BT	Bauteil
CAD	Computer Aided Design (dt. computergestütztes Design)
CNN	Convolutional Neural Network (dt. Faltendes Neuronales Netz)
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining (dt. industrieübergreifender Standardprozess für Data Mining)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRM	Design Research Methodology (dt. wissenschaftliche Forschungsmethodik)
DSM	Design-Structure-Matrix (dt. Design-Struktur-Matrix)
EOP	End of Production (dt. Produktionsende)
FEM	Finite-Elemente-Methoden
FT	Fertigungstechnologie
HKA	Hauptkomponentenanalyse
ISO	International Organization for Standardization (dt. Internationale Organisation für Normung und Standardisierung)
KI	Künstliche Intelligenz
KNN	Künstliches Neuronales Netz
KTL	Kathodische Tauchlackierung
ML	Maschinelles Lernen

MSC	MacNeal-Schwendler Corporation (Unternehmen)
NAI	Normierte Arbeitsinhalte
OEM	Original Equipment Manufacturer (dt. Originalerzeugnis-Hersteller)
PA12	Polyamid 12
PDM	Produktdatenmanagement
PP	Polypropylen
PTC	Parametric Technology Corporation (Unternehmen)
PVC	Polyvinylchlorid
ReLU	Rectified linear unit (dt. linearer Gleichrichter)
SAE	Society of Automobile Engineers (dt. Gesellschaft der Automobil-Ingenieure)
SP	Strangpressen
STEP	Standard for the Exchange of Product Data (Dateiformat)
SOP	Start of Production (dt. Produktionsstart)
SUV	Sport Utility Vehicle (dt. Sport- und Geländewagen)
VBA	Visual Basics for Applications (Programmiersprache)
VDD	Verband Deutscher Druckgießereien
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (e.V.)
VGG	Visual Geometry Group (Unternehmen)
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing (dt. draht- und lichtbogenbasierte Additive Fertigung)
WP	Walzprofilieren

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung
AB	Anzahl analysierter Bauteile (Parameter der Expertenumfrage)
AP	Anzahl beteiligter Personen (Parameter der Expertenumfrage)
AZ	Anwendungszeit der Methodik in Stunden
BEK	befreites Entwicklungskapital in Euro
DZA	durchschnittlicher Zeitaufwand in Stunden pro Bauteil (Parameter der Expertenumfrage)
FN	falsch negativ (Parameter der Objekterkennungsmodelle)
FP	falsch positiv (Parameter der Objekterkennungsmodelle)
GZA	gesamter Zeitaufwand in Stunden (Parameter der Expertenumfrage)
IZ	Implementierungszeit der Methodik in Stunden
KS	Kostensatz Entwicklungsingenieur in Euro pro Stunde
WN	wahr negativ (Parameter der Objekterkennungsmodelle)
WP	wahr positiv (Parameter der Objekterkennungsmodelle)

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Durch vermehrte Konkurrenz, steigende Kundenerwartungen und technologische Neuheiten stellen kurze Entwicklungszyklen einen zunehmend relevanten Treiber der Produktentwicklung in der Industrie dar (SABADKA ET AL. 2019, S. 1295 ff.). Agile und flexible Entwicklungsprozesse erfordern zudem die Fähigkeit zur schnellen Entscheidungsfindung (PILLER 2006, S. 92 f.). Dies impliziert eine frühzeitig im Entwicklungsprozess herrschende Gewissheit bezüglich der Fertigungstechnologien der Bauteile eines Produktes (SCHMENNER ET AL. 1998, S. 97 ff.). Das Erlangen dieser Klarheit wird jedoch durch den Wandel konventioneller Produktionssysteme und Fertigungsverfahren erschwert, der durch technologische Weiterentwicklungen und die vermehrte Nutzung moderner Unterstützungssysteme wie Künstlicher Intelligenz (KI) getrieben wird (WESTKÄMPER 2010, S. V). Dies führt zu einer Verschiebung lange geltender Fertigungsprämissen und technologiespezifischer Vor- und Nachteile (ZEBA ET AL. 2021). Ein fundierter Vergleich fertigungstechnologischer Alternativen ist daher unerlässlich (CLAUSEN ET AL. 2020, S. 38; MAUERMANN ET AL. 2021, S. 53). Dieser bedingt die gesamtheitliche Analyse relevanter technologischer und wirtschaftlicher Faktoren (VAYRE ET AL. 2013, S. 264 ff.; FRIEDRICH 2017, S. 96; BAUMERS ET AL. 2019, S. 794 ff.). Entsprechende Analyse- und Auswahlprozesse werden bislang manuell und aufgrund der benötigten Datengrundlage spät im Entwicklungsprozess durchgeführt. Die Fertigungstechnologie-Entscheidung unterliegt demnach menschlichen Einflüssen und Präferenzen, durch die ein Festhalten am fertigungstechnologischen Status quo begünstigt wird (WESTKÄMPER 2005, S. 117 ff.).

Ziel der Arbeit ist es daher, eine objektive, frühzeitige und nachvollziehbare Auswahl der Fertigungstechnologien zu ermöglichen. Der automobile Karosseriebau eignet sich aufgrund seiner technologischen Vielfalt und seiner hohen industriellen Bedeutung besonders gut als Anwendungsbereich der Arbeit. Daher werden die im Karosseriebau relevanten Technologien Tiefziehen, Strangpressen, Walzprofilieren und Aluminiumdruckguss im Rahmen dieser Arbeit betrachtet. Zudem kann die Additive Fertigung (engl. Additive Manufacturing, AM, auch *3D-Druck* genannt) künftige Produktionssysteme ergänzen, sofern sie die technischen und wirtschaftlichen Kennzahlen (z. B. Bauteilherstellkosten) konventioneller Verfahren erreicht (GEBHARDT 2016, S. 13 ff.; LINDEMANN ET AL. 2016, S. 93 ff.).

Durch die vorliegende Arbeit wird eine Verbesserung folgender drei Zielgrößen (Abbildung 1.1) angestrebt:

- Entwicklungszeit: Aufgrund der geschilderten Ausgangssituation sowie aktueller Entwicklungen ist eine Reduzierung der Entwicklungszeit anzustreben.
- Entwicklungskosten: Mit einer verkürzten Entwicklungszeit geht das Ziel einer Kostenreduzierung und einer Befreiung von Entwicklungskapital einher. Zudem sollen durch die frühzeitige Fertigungstechnologie-Identifikation weitere Kostenpotenziale gehoben und Änderungskosten vermieden werden.
- Entscheidungsqualität: Ferner wird eine Verbesserung der Entscheidungsqualität beabsichtigt, welche sich durch einen objektiven Fertigungstechnologie-Vergleich ohne menschliche Voreingenommenheit auszeichnet.

Die genannten Ziele sollen über die Bereitstellung einer Methodik für einen datenbasierten und automatisierten Vergleich von Fertigungstechnologie-Alternativen erreicht werden. Die Strukturierung der Arbeitsergebnisse in methodischer Form soll zudem die Nachvollziehbarkeit der gewählten Vorgehensweise fördern. Als Ergebnis des Fertigungstechnologie-Vergleichs wird die Ausgabe bauteilindividueller Fertigungstechnologie-Empfehlungen angestrebt. Die beabsichtigte Anwendbarkeit in frühen Produktentwicklungsphasen erfordert zudem einen prädiktiven Ansatz, um potenzielle Informationslücken zu schließen. Aufgrund der Automatisierung und der systematischen Bauteilanalyse lässt sich die Methodik dem sogenannten *Bauteilscreening* zuordnen (GÄNSICKE ET AL. 2015, S. 42 ff.).

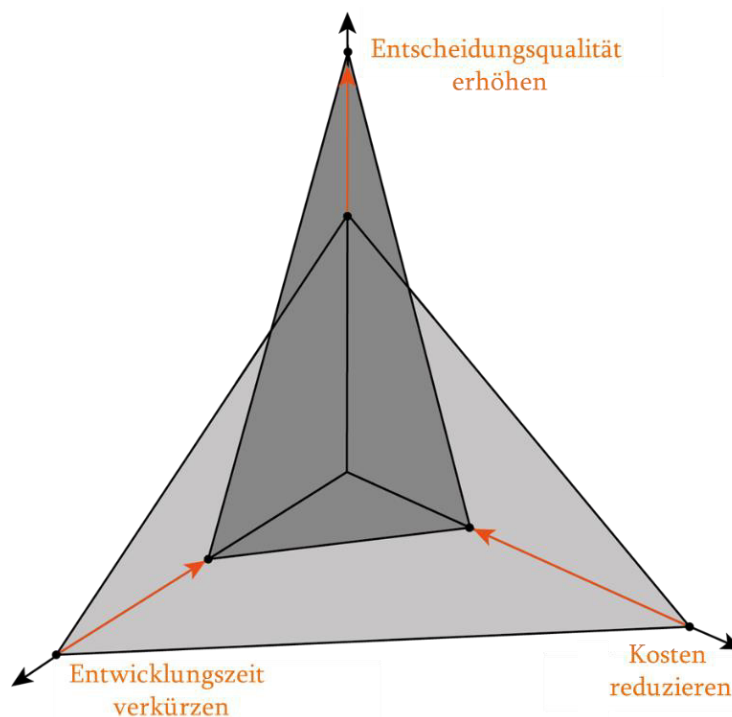


Abbildung 1.1: Angestrebte Veränderung der drei Zielgrößen durch den Einsatz der Methodik

1.2 Aufbau der Dissertation und Vorgehensweise

Diese Arbeit folgt dem Aufbau einer publikationsbasierten Dissertation und fußt demnach auf drei, die wesentlichen Inhalte behandelnden, Publikationen.

Die zur Erreichung der Zielsetzung gewählte Vorgehensweise lässt sich in grundlegende Schritte untergliedern und den Kapiteln dieser Arbeit zuordnen (Abbildung 1.2). Die Schritte orientieren sich im Sinne eines strukturierten, wissenschaftlichen Vorgehens an der *Design Research Methodology* (DRM; BLESSING ET AL. 2009, S. 9 ff.). Laut KOCH (2017, S. 7 ff.) stellt die DRM eine der umfassendsten und detailliertesten Forschungsmethoden im ingenieurwissenschaftlichen Bereich dar. Aufgrund der dominierenden internationalen Verwendung werden die DRM-Phasen fortfolgend anhand der englischen Originalbegriffe beschrieben. Zudem folgt die Dissertation zunächst einem induktiven Ansatz zur Theorie- und Hypothesenbildung. Mit fortschreitender Ausgestaltung der Methodik-Bausteine und der anschließenden Anwendung weicht der induktive Charakter einer deduktiven Prüfung der erarbeiteten Vorgehensweisen und Hypothesen. Der Aufbau der Dissertation lässt sich wie folgt gliedern:



Abbildung 1.2: Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung und Zuordnung zu den Dissertationskapiteln

I. Analyse der Ausgangssituation und des Anwendungsbereichs

Im initialen DRM-Schritt *Research Clarification* (Klärung des Forschungsziels) umfasst Kapitel 1 neben der Analyse der Ausgangssituation eine Einführung in den Methodik-Anwendungsbereich *automobiler Karosseriebau*. Diese Einführung umfasst derzeitige Herausforderungen und relevante Begriffe des benannten Themengebiets.

II. Analyse relevanter Grundlagen und themenverwandter Arbeiten

In Kapitel 2, Teil der DRM-Phase *Descriptive Study I* (Vertiefen des Verständnisses), werden Grundlagen erläutert, wobei auf die dominierenden Fertigungstechnologien des Karosseriebaus sowie auf Datenanalyseverfahren und Ansätze zur Verwertung unscharfer oder unbekannter Informationen eingegangen wird.

In Kapitel 3 wird die *Descriptive Study I* fortgeführt, indem bestehende Ansätze zur Fertigungstechnologie-Bewertung analysiert werden, um Forschungslücken, zu erfüllende Anforderungen und zu adressierende Forschungsfragen abzuleiten.

III. Definition des Betrachtungsrahmens

Kapitel 4 schließt die *Descriptive Study I* mit der Definition des Betrachtungsrahmens bezüglich der Abläufe der Karosserie-Entwicklung und der Automobilproduktion ab.

IV. Einflussfeldanalyse und Konzeptionierung der Methodik

Im Anschluss daran werden in der Phase *Prescriptive Study* (Aufbau der Lösungsstrategie) relevante Einflussfelder zur Technologieauswahl identifiziert. Darauf aufbauend wird die Konzeption der Methodik in Kapitel 5 erarbeitet.

V. Ausgestaltung der Methodik-Bausteine

Auf Basis des Methodik-Konzepts werden die zugehörigen Bausteine in modularer Form ausgestaltet. Die deduktive Prüfung der Vorgehensweisen je Baustein in den zugrundeliegenden Publikationen (Kapitel 6 bis 8) markiert den Übergang zur DRM-Phase *Descriptive Study II* (Bewertung der Lösungsstrategie).

VI. Anwendung der Methodik und Validierung der Ergebnisse

Kapitel 9 setzt die Lösungsbewertung fort und umfasst die Anwendung der Methodik zur Verifikation der Anforderungserfüllung sowie zur Ergebnisvalidierung. Ferner erfolgt eine wirtschaftliche Nutzenbewertung, indem das bisherige und das methodikbasierte Vorgehen zur Technologieauswahl miteinander verglichen werden.

VII. Kondensation der Kernaussagen und Erarbeitung des Ausblicks

Kapitel 10 vollendet die *Descriptive Study II* mit einer Zusammenfassung unter Einbeziehung der Forschungsfragen und einer Diskussion der Übertragbarkeit. Ein Ausblick auf potenzielle Erweiterungen der Methodik rundet die Arbeit ab.

1.3 Die Karosserie-Entwicklung als Anwendungsbereich der Arbeit

Als Anwendungsbereich der Methodik dienen Karosserie-Entwicklungsprozesse der Automobilindustrie, weshalb zunächst aktuelle Herausforderungen des Karosseriebaus geschildert werden. Weiterhin werden die Abläufe und Begriffe der Karosserie-Entwicklung sowie der Automobilproduktion beschrieben, die im weiteren Verlauf der Arbeit zur Einordnung der Methodik genutzt werden.

1.3.1 Aktuelle Herausforderungen

Die aktuellen Herausforderungen stehen in Bezug zur in Abschnitt 1.1 geschilderten Ausgangssituation. Die Automobilindustrie unterliegt dem aktuellen Trend zu kürzeren Entwicklungszeiten, der unter anderem durch die Digitalisierung getrieben wird (ISKANDER 2016; SABADKA ET AL. 2019, S. 1295 ff.). Die derzeit übliche Entwicklungsdauer vom Konzept über das Design bis zu den ersten Fahrzeugprototypen beträgt circa sechzig Monate. Innerhalb der kommenden Jahre wird eine Verkürzung dieser Zeitspanne auf vierzig Monate erwartet (GOETZPARTNERS 2019).

Zudem erfordern technologische Entwicklungen und das Auftreten neuer Wettbewerber eine Überprüfung fertigungstechnologischer Prämissen des Karosseriebaus. Die sogenannte *Tiefzieh-Stahl-Schalenbauweise* dominiert derzeit noch moderne Karosserie-Architekturen (GÄNSICKE ET AL. 2015, S. 42 ff.). Jedoch können zukünftig auch *Großgussbauteile* wirtschaftlich und technologisch sinnvoll sein, wenn bestimmte Rahmenbedingungen erfüllt sind (FRIEDRICH 2017, S. 96; MAUERMANN ET AL. 2021, S. 104).

1.3.2 Abläufe und Begriffe der Karosserie-Entwicklung

Die in dieser Dissertation erarbeitete Methodik soll in der Produktentwicklung zum Einsatz kommen. Daher werden die Entwicklungsabläufe des Karosseriebaus mithilfe von Abbildung 1.3 in abstrahierter Form erläutert.

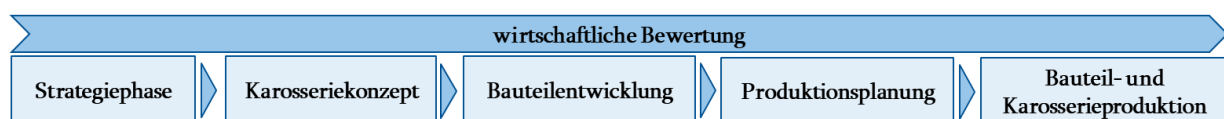


Abbildung 1.3: *Abstrahierte Karosserie-Entwicklung, von der Strategiephase bis zum Start der Produktion*
(vgl. BRAESS ET AL. 2016)

Strategiephase

Die Karosserie-Entwicklung beginnt mit der Strategiephase und der Initiierung neuer Fahrzeugprojekte. In dieser Phase stehen das Gesamtfahrzeug und die angestrebte Marktpositionierung im Fokus. (BRAESS ET AL. 2016, S. 1276 ff.)

Karosseriekonzept

Nach der Strategiephase wird das Karosseriekonzept erstellt und in Module unterteilt, um es anschließend zur Weiterbearbeitung an die zuständigen Fachabteilungen zu übergeben. Als Modul wird hierbei beispielsweise der Vorderbau, der Hinterbau oder der Unterboden einer Karosserie bezeichnet. Die Fachabteilungen bereiten die Entwicklung der Fahrzeugkomponenten vor, einschließlich der Aufteilung einzelner Module in Bauteilkonzepte. (BRAESS ET AL 2016, S. 1267 f.)

Bauteilentwicklung

Die anschließende Entwicklung und die Konstruktion von Karosserieteilen erfordert eine frühzeitige Auswahl der jeweiligen Fertigungstechnologie für jedes Bauteil (BRAESS ET AL 2016, S. 1270 ff.). Ist die Bauteilentwicklung fortgeschritten, fällt die sogenannte *Make-or-Buy-Entscheidung*, die eine *Eigenfertigung*, eine *Komponentenfertigung* oder einen *Fremdbezug* des jeweiligen Bauteils bestimmt (KOLTER 2020, S. 70 ff.):

- In der *Eigenfertigung* werden die im Karosseriebau dominierenden Tiefziehbauteile unmittelbar auf dem Werksgelände des Automobilherstellers produziert. Mit Verweis auf die Herausforderungen aus Abschnitt 1.3.1 ist anzumerken, dass auch der Aluminiumdruckguss in der Eigenfertigung umgesetzt werden kann (CLAUSEN ET AL. 2020, S. 38; MAUERMANN ET AL. 2021, S. 53).
- Für andere Technologien, beispielsweise die Additive Fertigung, existieren zum Teil unternehmenseigene Produktionsstandorte, die sich jedoch nicht auf dem Gelände der Automobilproduktion befinden. Diese *Komponentenfertigungsstandorte* sollen die Konkurrenzsituation für externe Lieferanten verschärfen und beliefern die Automobilwerke unternehmensweit.
- Im sogenannten *Fremdbezug* können Bauteile alternativ von externen Lieferanten eingekauft werden.

Produktions- und Einkaufsplanung

Die Planung der Teilefertigung, der Einkaufsprozesse sowie der Karosserieproduktion beginnt, sobald die Make-or-Buy-Entscheidungen getroffen sind. Darunter fällt die Kalkulation nötiger Investitionen zur Werkzeugherstellung und zur Linienplanung im Werk (BRAESS ET AL 2016, S. 1270 ff.). Zu unterscheiden sind die sogenannte *Greenfield-Planung*, bei der Produktionsstätten und -linien von Grunde auf neu geplant werden, und die *Brownfield-Planung*, die bestehende Produktionsstrukturen teilweise in eine Neuplanung integriert. Im Falle der Komponentenfertigung oder des Fremdbezugs wird die Bauteillogistik vom Lieferanten zum Werk als *Inbound* bezeichnet.

Bauteil- und Karosserieproduktion

Der Produktionsstart (engl. *start of production*, SOP) leitet die Umsetzungsphase des Fahrzeugbaus ein. Fahrzeugmodelle werden typischerweise über einen Zeitraum von circa sieben Jahren bis zum Ende der Produktion (engl. *end of production*, EOP) hergestellt. Die Beschreibung der Automobilproduktion wird im nächsten Abschnitt fortgesetzt.

1.3.3 Abläufe und Begriffe der Automobilproduktion

In diesem Abschnitt folgt die Erläuterung der Bauteil-, der Karosserie- und der Automobilproduktion (Abbildung 1.4). Ein Verständnis dieser Abläufe ist erforderlich, da im weiteren Verlauf der Arbeit die Wechselwirkungen zwischen der Fertigungstechnologie einzelner Bauteile und den anschließenden Produktionsschritten betrachtet werden.

Der Produktionsablauf bzw. -bereich eines *Original Equipment Manufacturers* (OEM) im Fahrzeugbau wird üblicherweise in vier Hauptschritte bzw. Teilbereiche unterteilt: *Presswerk*, *Karosseriebau*, *Lackiererei* und *Montage* (WITTEK 2012, S. 24 ff.).

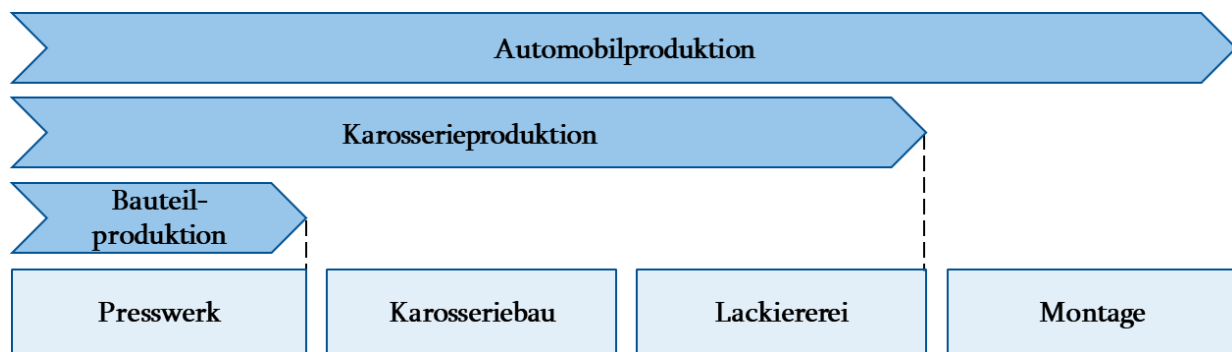


Abbildung 1.4: Hauptschritte der Bauteil-, der Karosserie- und der Automobilproduktion (vgl. WITTEK 2012)

Im *Presswerk* werden Tiefziehbauteile hergestellt, die im *Karosseriebau* schrittweise zu Baugruppen, Modulen und schließlich zur gesamthaften Rohkarosserie gefügt werden. In Abhängigkeit der Wandstärke, der Zugänglichkeit und des Materials der Bauteile kommen im Karosseriebau Fügeverfahren wie das Punktschweißen, das Stanznieten oder das Fließlochschrauben zum Einsatz. Das Fügen der Rohkarosserie wird durch weitere Schweißvorgänge in der sogenannten *Ausschweißlinie* vollendet. In der *Lackiererei* erfolgt die Lackierung der Rohkarosserie inklusive einer kathodischen Tauchlackierung (KTL) zur Korrosionsprävention. In der anschließenden *Montage* werden Interieur-Einheiten wie die Sitze oder das Cockpit in und an der Rohkarosserie verbaut. Abschließend werden Karosserie, Antriebsstrang, Motor und Fahrwerk zusammengeführt. (WITTEK 2012, S. 24 ff.).

Nach der nun abgeschlossenen Einführung in den Aufbau der Dissertation und in den automobilen Karosseriebau widmet sich das nächste Kapitel den Grundlagen weiterer Themenfelder, die für ein Verständnis dieser Arbeit relevant sind.

2 Grundlagen

Im Sinne der DRM-Phase *Descriptive Study I* werden in diesem Kapitel die Grundlagen in den Bereichen Fertigungstechnologie- und Datenanalyse eingeführt. Weiterhin werden Ansätze zur Verwertung unbekannter oder unscharfer Informationen erläutert. Die Ausführungen sollen ein grundlegendes Verständnis der für die Dissertation relevanten Aspekte vermitteln. Für detaillierte Einblicke wird auf die zitierte Fachliteratur verwiesen.

Die Auswahl der drei genannten Themengebiete erfolgte aufgrund dieser Überlegungen:

- Die zu entwickelnde Methodik dient der Auswahl von Fertigungstechnologien für Bauteile der Rohkarosserie. Eine Einführung in relevante Fertigungstechnologien ist demnach unabdingbar.
- Weiterhin wird mit der Methodik das Ziel einer frühzeitigen und automatisierten Anwendbarkeit verfolgt. Dies erfordert eine datenbasierte Vorgehensweise und begründet die Erläuterung von Ansätzen zur Datenanalyse und -prognose.
- Die durch die Methodik generierten und prognostizierten Informationen umfassen verschiedene Themenfelder. Sie weisen demnach unterschiedliche Genauigkeiten, Einheiten und Wertebereiche auf. Aus diesem Grund werden die Grundlagen der Ansätze zur Verwertung unscharfer Informationen beschrieben.

2.1 Überblick relevanter Fertigungstechnologien

In diesem Abschnitt wird ein grundlegendes Verständnis der im Karosseriebau relevanten Fertigungstechnologien erarbeitet. Nach einer kurzen Erläuterung der Funktionsweise fokussieren sich die Ausführungen auf die in einem Technologievergleich zu beachtenden Stärken und Schwächen sowie die Anwendungen der Technologien im Karosseriebau.

2.1.1 Tiefziehen

Das Tiefziehen zählt nach DIN 8580 zu den Umformtechnologien, da bei diesem Verfahren ein Blechzuschnitt mit einem Prägestempel in eine formgebende Matrize gepresst wird, bis es zur gewünschten plastischen Verformung des Blechs kommt (FRIEDRICH 2017, S. 453 ff.).

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit bedeutsamen Stärken des Tiefziehens liegen in einer niedrigen Zykluszeit und in einer hohen Prozesssicherheit bei der Produktion großer Stückzahlen. Darüber hinaus eignen sich Tiefziehbauteile gut zur Nachbearbeitung (SPUR 2008, S. L23 f.). Im Falle geometrisch einfacher Bauteile zeichnet sich das Tiefziehen zudem durch niedrige Herstellkosten aus (SPUR 2008, S. L23 f.). Bei anspruchsvollen Toleranzen

und komplexen Bauteilgeometrien können durch die Herstellung und gegebenenfalls erforderliche Anpassung der Tiefziehwerkzeuge allerdings hohe Kosten entstehen (SCHUH 2021).

Das Tiefziehen ist in der Herstellung flächiger Blechformteile sowie im Karosseriebau dominierend (FRIEDRICH 2017, S. 453; KUMKE 2018, S. 65 f.; SPUR 2008, S. L23 f.). Unterkategorien des Tiefziehens wie das Warmumformen kommen im Karosseriebau ebenfalls zum Einsatz (FRIEDRICH 2017, S. 459 ff.). Sie werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit der übergreifenden Tiefziehkategorie zugeordnet.

2.1.2 Aluminiumdruckguss

Der Aluminiumdruckguss wird nach DIN 8580 dem Urformen zugeordnet, da bei der Verfahrensausführung schmelzflüssiges Material in eine mehrteilige Form gegossen wird, in der es erstarrt und das finale Werkstück ausbildet (KUMKE 2018, S. 64 f.).

Im Zuge des angestrebten Technologievergleichs sind die hohe Maßhaltigkeit sowie die hohe Prozesssicherheit als positive Eigenschaften des Verfahrens zu nennen. Geringe Zykluszeiten und eine gute Automatisierbarkeit erlauben die wirtschaftliche Produktion großer Stückzahlen. Ferner sind Gussbauteile analog zu Tiefziehkomponenten im Sinne der Korrosionsbeständigkeit für Nachbearbeitungsschritte wie KTL geeignet. Darüber hinaus sind die meisten Gusswerkstoffe vollständig wiederverwertbar und somit ressourcenschonend. (FRIEDRICH 2017, S. 485 f.)

Aufgrund der hohen Anschaffungs- und Änderungskosten der Gießformen (auch *Gießwerkzeuge* genannt) ist der Druckguss für Prototypen und Kleinserien mit entsprechend kleinen Stückzahlen unwirtschaftlich. Weiterhin sind der Aluminiumdruckguss und verwendete Legierungen wie AlSi10MG aufgrund niedriger Festigkeitswerte insbesondere für die Herstellung nicht crashbelasteter Bauteile geeignet (KURTZ GIEßEREIMASCHINEN 2016). Das Unternehmen Tesla forciert die Verwendung von Großgussbauteilen im Karosseriebau, weshalb eine kontinuierliche Überprüfung der aufgeführten wirtschaftlichen Herausforderungen angeraten ist. (FRIEDRICH 2017, S. 96; MAUERMANN ET AL. 2021, S. 104)

Im automobilen Karosseriebau finden Gussbauteile vor allem an sogenannten *Knotenpunkten* der Karosserie Anwendung, die geometrisch komplex sind und umliegende Karosseriebereiche verbinden (FRIEDRICH 2017, S. 504).

2.1.3 Strangpressen

Das Strangpressen wird nach DIN 8580 dem Umformen aus dem festen bzw. plastischen Zustand zugeordnet (DIETRICH 2017, S. 124 ff.). Beim Strangpressen wird ein mittels einer

Aufnehmerheizung erwärmter Pressbolzen mit dem Pressstempel durch das profilgebende Werkzeug gedrückt. Bezüglich des Profilquerschnitts wird grundsätzlich zwischen offenen und geschlossenen Profilen unterschieden (OSTERMANN 2014, S. 451 ff.).

Die Stärken des Strangpressens liegen in der flexiblen Herstellung einfacher und bei Bedarf komplexer Profile. Werkzeugkosten und Energiebedarf sind insbesondere im Vergleich zu Gussverfahren niedrig. Vorzugsweise werden im Strangpressen Aluminiumlegierungen verwendet, weshalb sich Strangpressprofile im Vergleich zu den üblicherweise schwereren Stahlbauteilen für Leichtbaukonstruktionen eignen. Eine Schwäche besteht jedoch in der verfahrensbedingten Limitation auf die Produktion von Rohren und Profilen.

(SPUR 2008, S. L23)

Im Karosseriebau werden Strangpressprofile eingesetzt, um durch speziell gestaltete Profilquerschnitte die strukturelle Funktionalität und die Steifigkeit entsprechender Karosseriebereiche zu verbessern. Strangpressprofile werden demnach oft als Quer- oder Längsträger an crashrelevanten Stellen im Fahrzeug verbaut, da sie eine hohe Festigkeit und ein gutes Energieabsorptionsvermögen aufweisen. (FRIEDRICH 2017, S. 150, S. 289 f.; PISCHINGER ET AL. 2021, S. 188)

2.1.4 Walzprofilieren

Das Walzprofilieren (auch *Rollformen* genannt) lässt sich nach DIN 8580 dem Biegeumformen zuordnen. Bei diesem Verfahren wird ein Metallband durch hintereinanderliegende, angetriebene Walzenpaare aus Ober- und Unterwalze umgeformt. Hierbei nähert sich die Geometrie des Werkstücks in jeder Umformstufe dem gewünschten Zielprofil an.

(FRIEDRICH 2017, S. 474 ff.)

Das Walzprofilieren zeichnet sich durch die flexible Produktion von Bauteilen unterschiedlicher Längen aus, die sich ohne Werkzeugwechsel und somit zeit- und kosteneffizient herstellen lassen (ALBRECHT 2010). Die Werkzeugkosten sind insbesondere im Vergleich zum Gießen niedrig, sofern keine komplexen Bauteilgeometrien und Nachbearbeitungsschritte erforderlich sind. Weitere positive Aspekte des Walzprofilierens sind der geringe Werkzeugverschleiß der Walzensysteme und der hohe Materialausnutzungsgrad (ALBRECHT 2010). Analog zum Strangpressen ist die Beschränkung auf Profilbauteile zu nennen (FRIEDRICH 2017, S. 474 f.).

Im Automotive-Bereich werden Profilbauteile der Rohkarosserie sowie Schweller und Stoßfänger durch Walzprofilieren hergestellt (PISCHINGER ET AL. 2016, S. 1172).

2.1.5 Additive Fertigung

Bei der Additiven Fertigung handelt es sich um ein Fertigungsverfahren, bei dem das Werkstück schrittweise in Schichten aufgebaut wird (VDI 3405:2021-10; ISO 52900). Das selektive Laserstrahlschmelzen (engl. *Laser Beam Melting, LBM*) dominiert im Metallbereich aufgrund der bei Anwendung dieses Verfahrens erzielbaren Genauigkeit, Oberflächengüte und Festigkeit (MÖHRLE 2018, S. 7 ff.). Der Fertigungstechnologievergleich im Rahmen der Methodik fokussiert sich daher auf LBM als additives Verfahren. Beim LBM verschmilzt ein Laser das in einem Pulverbett gelagerte Granulat. Anschließend wird eine neue Pulverschicht aufgetragen und der Schmelzvorgang bis zur Erzeugung der gewünschten Bauteilgeometrie wiederholt (LACHMAYER ET AL. 2018, S. 60).

Die Vorteile der Additiven Fertigung gegenüber konventionellen Technologien liegen in den geometrischen Freiheiten bei der Bauteilherstellung und den daraus resultierenden Topologieoptimierungspotenzialen begründet. Außerdem zeichnet sich die Additive Fertigung als werkzeugfreies Verfahren durch eine hohe Flexibilität bei Produktänderungen und durch den Entfall von Werkzeuginvestitionen aus (SCHUH 2021). Der Prototypenfertigungsprozess mit entsprechend niedrigen Stückzahlen kann demnach durch den Einsatz Additiver Fertigung kosten- und zeiteffizient gestaltet werden (ATTARAN 2017, S. 677 ff.).

Ein Nachteil gegenüber konventionellen Technologien ist die hohe Zykluszeit pro Bauteil, weshalb pulverbettbasierte Verfahren nur für kleinere Bauteile geeignet sind. Bei hohen Stückzahlen schwächt sich der wirtschaftliche Effekt entfallender Werkzeuginvestitionen ab. Daher ist die Additive Fertigung wegen hoher Materialkosten in der Serienproduktion oftmals teurer als konventionelle Verfahren. (RUFFO ET AL. 2006, S. 1417 ff.; COVERT 2014)

Im Automobilbau findet die Additive Fertigung aufgrund wirtschaftlicher Schwächen hauptsächlich im Prototypenbau zur Bauteil- oder Werkzeugherstellung Anwendung (NICHOLS 2019). Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Produktion von Ersatzteilen nach Ablauf der Serienproduktion (NICHOLS 2019). Vereinzelt setzen Automobilunternehmen additiv gefertigte Bauteile auch in Serienfahrzeugen ein. So verbaut BMW im Modell i8 Roadster AM-Teile und Porsche verwendet im Modell 911 GT2 RS erstmals additiv gefertigte Aluminium-Hochleistungsmotorkolben (MAHLE 2020).

2.2 Datenanalyse und KI-unterstützte Prognosemodelle

In diesem Abschnitt wird die Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl anhand einschlägiger KI-Begriffe eingeordnet. Außerdem werden relevante Ansätze zur Vorhersage und Klassifizierung von Daten erläutert. Die Ausführungen umfassen die grundlegenden Funktionsweisen sowie Vor- und Nachteile der KI-Modelle.

Maschinelles Lernen (engl. *Machine Learning*, ML) lässt sich dem Gebiet der KI zuordnen und basiert auf Modellen, die mit vorhandenen Daten generiert und trainiert werden (PAASS ET AL. 2020, S.45 ff.). Diese Modelle sind nach erfolgreichem Training fähig, auf Basis bestimmter Eingangsgrößen verlässliche Prognosen zu treffen. Im Training ist mittels einer ausreichend großen Datengrundlage eine Überanpassung des Modells an die Trainingsdaten (sog. *Overfitting*) zu vermeiden, um eine ausreichende Prognosegüte bei der Anwendung mit neuen Datenpunkten sicherzustellen (PAASS ET AL. 2020, S. 97 ff.). Der Modellaufbau kann durch eine *Rastersuche* (engl. *Grid Search*) unterstützt werden, die den Vergleich verschiedener Modellarchitekturen strukturiert (YEH ET AL. 2012).

Maschinelles Lernen lässt sich ferner in das *Überwachte*, das *Unüberwachte* und das *Verstärkende* Lernen gliedern. Das Überwachte Lernen (engl. *Supervised Learning*) kommt bei Klassifikations- und Prädiktionssaufgaben sowie bei Kenntnis der Ausgangsgröße (engl. *Label*) zum Einsatz. Das Unüberwachte Lernen (engl. *Unsupervised Learning*) findet Anwendung in der Muster- und Clustererkennung, insbesondere bei fehlender Kenntnis der Ausgangsgröße. Beim Verstärkenden Lernen (engl. *Reinforcement Learning*) interagiert das Modell mit der Umgebung, um das Verhalten auf Basis einer Optimierungsfunktion durch positive (Belohnungen) oder negative (Bestrafungen) Rückmeldungen zu verbessern. (PAASS ET AL. 2020, S. 45 ff.)

Die in dieser Arbeit beschriebene Methodik fokussiert sich auf Modelle des Überwachten Lernens, da Klassifikationen und Vorhersagen bekannter Ausgangsgrößen für neue Eingangsdaten durch zuvor trainierte Modelle angestrebt werden (Abbildung 2.1).

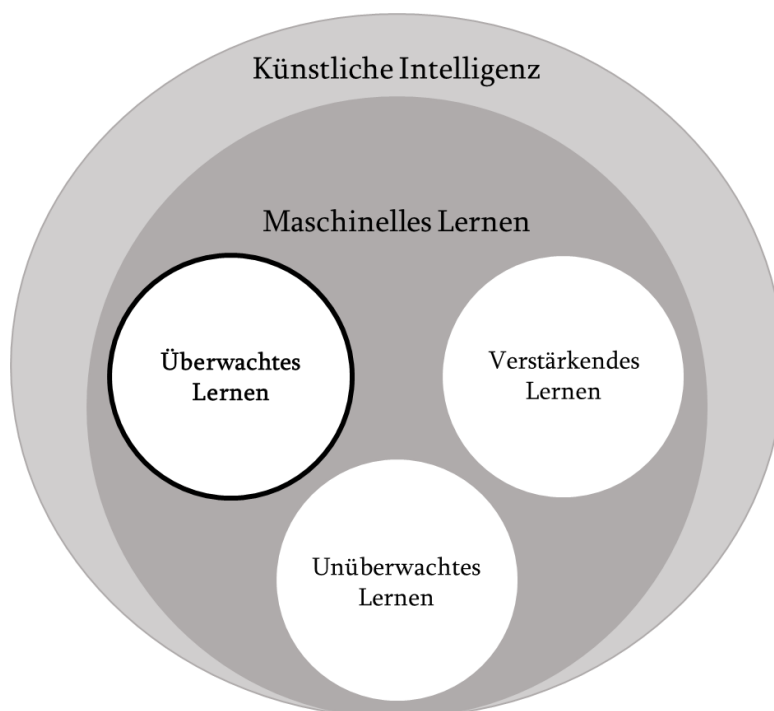


Abbildung 2.1: Das Überwachte Lernen im Fokus der Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl

2.2.1 Datenaufbereitung

Um ein erfolgreiches Training von KI-Modellen zu gewährleisten, ist vorab die Aufbereitung der Datenbasis sicherzustellen. Für das Training werden hierbei üblicherweise achtzig Prozent der Daten verwendet, die restlichen zwanzig Prozent dienen der anschließenden Modellvalidierung. Das Herausfiltern passender Eingangsgrößen (engl. *Features*) für ML-Modelle wird als *Variablenselektion* bezeichnet. Durch eine geeignete Auswahl dieser Eingangsvariablen kann die Präzision der Modelle zur Prognose der Zielgröße (engl. *Label*) verbessert und die Trainingszeit reduziert werden (REBALA ET AL. 2019, S. 19 ff.). Weichen die quantitativen Ausprägungen und Einheiten der gewählten Eingangsparameter (z. B. die Größe eines Grundstücks in Quadratmetern und der Kaufpreis in Euro) voneinander ab, werden diese über eine Normierung bzw. Skalierung einander angeglichen. Solche Skalierungen können durch die Implementierung vorgefertigter Bausteine (sog. *Scaler*) umgesetzt werden. Weiterhin kann das systematische Entfernen von Ausreißern aus den Trainingsdaten zur Steigerung der Prognosegüte beitragen (GUYON ET AL. 2003, S. 1157 ff.; REBALA ET AL. 2019, S. 42 f.). Zur Identifikation von Ausreißern können Korrelationsplots und Methoden zur Identifikation von Abhängigkeiten in vernetzten Systemen (z. B. die *Design-Structure-Matrix*; DSM) dienen (EPPINGER 2012, S. 2 ff.). Zur Erhöhung der Prognosegüte von ML-Modellen kann zudem die Hauptkomponentenanalyse (HKA) angewendet werden. Als statistisches Verfahren reduziert diese die Variablenanzahl eines bestimmten Datensatzes auf einen kleineren Satz nichtkorrelierter Variablen (sog. *Hauptkomponenten*). Da die erforderliche Trainingsdatenmenge mit der Anzahl der Modellvariablen korreliert, ist die HKA zur Komplexitätsreduktion oftmals unerlässlich (REBALA ET AL. 2019, S. 141 ff.).

2.2.2 Lineare Regression

In vielen Prädiktionsanwendungen empfiehlt sich die *lineare Regression* als ein mögliches Verfahren zur Vorhersage fehlender Informationen. Die Funktionsweise basiert auf der Beziehung zwischen einer Eingangsgröße x und einer zu prognostizierenden Ausgangsgröße y , die als lineare Funktion ausgedrückt wird. In der Trainingsphase werden die charakteristischen Funktionswerte kontinuierlich auf Basis der Ein- und Ausgangswerte des Trainingsdatensatzes angepasst, bis die Ausgangsgröße möglichst genau prognostiziert wird. Grafisch kann der Trainingsprozess als Optimierung einer Regressionsgeraden oder -kurve veranschaulicht werden (Abbildung 2.2). Als Kriterium zur Optimierung dient hierbei die Summe aus den quadrierten Abständen der Datenpunkte zur Geraden. Diese Abstände werden im Kontext der Regression auch *Residuum* bzw. *Residuen* genannt. (GUYON ET AL. 2003, S. 1159 ff.)

Die Vorteile der linearen Regression gegenüber alternativen Modellen (s. fortfolgende Abschnitte) liegen in einer geringen benötigten Datenmenge sowie einer umfassenden Nachvollziehbarkeit und Visualisierbarkeit. Diesen positiven Aspekten stehen jedoch Nachteile gegenüber, etwa die mangelnde Eignung bei nichtlinearen Abhängigkeiten in der zugrundeliegenden Datenbasis. (REBALA ET AL. 2019, S. 25 ff.)

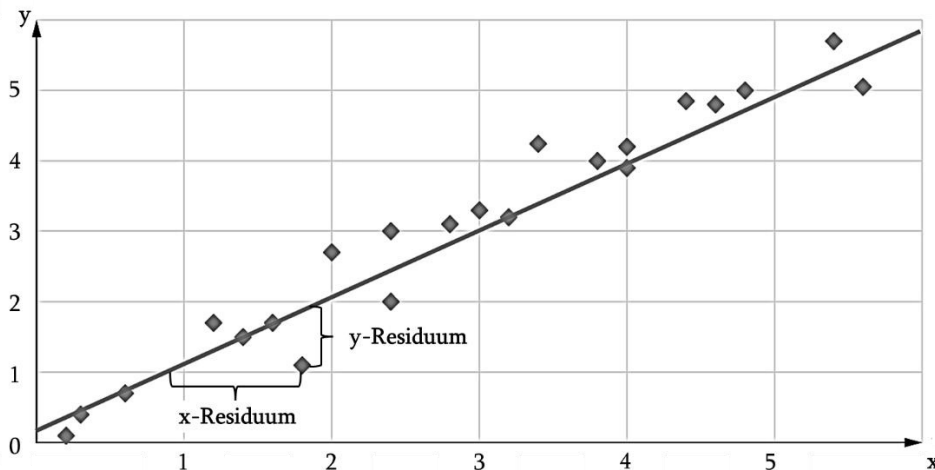


Abbildung 2.2: Visualisierung einer Regressionsgeraden und der Residuen

2.2.3 Random Forests

Random Forests lassen sich dem Überwachten Lernen zuordnen. Sie können sowohl bei Klassifikations- als auch bei Regressionsproblemen eingesetzt werden und das Ergebnis basierend auf Entscheidungsbaumstrukturen ermitteln. (GUYON ET AL. 2003, S. 1157 ff.; REBALA ET AL. 2019, S. 77 ff.)

Grundsätzlich beschreibt ein sogenannter Baum eine Datenstruktur mit Kanten zur Verbindung von Knoten. Die Pfade zwischen diesen Knoten stellen variablenbasierte Entscheidungsmöglichkeiten dar. Der Endknoten des Entscheidungsbaums repräsentiert eine Klassenbezeichnung oder einen Ergebniswert der Vorhersage. Der Zweck von Entscheidungsbäumen ist es, ein Modell aus Entscheidungsregeln zu generieren, um die Klasse oder den Wert der Zielvariablen möglichst korrekt zu prognostizieren. Diese Entscheidungsregeln bzw. Klassengrenzen werden im Zuge des Trainings optimiert (s. Größen g_1 und g_2 in Abbildung 2.3). Ein Random Forest stellt eine Verknüpfung vieler Entscheidungsbäume (daher Wald, engl. *Forest*) dar, da das Verwenden eines einzigen Entscheidungsbaums zu *Overfitting* führen würde. Die im Sinne der Prognosegüte bestmögliche Anzahl und Tiefe der Entscheidungsbäume kann durch eine Rastersuche ermittelt werden. (GUYON ET AL. 2003, S. 1157 ff.; REBALA ET AL. 2019, S. 77 ff.)

Die oftmals hohe Prognosequalität von Random Forests resultiert demnach unter anderem aus der Mittelung der Ergebnisse vieler Entscheidungsbäume, die aus verschiedenen Teilen

des Trainingsdatensatzes erstellt wurden. Weiterhin zeigen sich Random Forests robust gegenüber Ausreißern in der Datenbasis. Die potenziell mangelnde Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und, je nach Komplexität des Modells, potenziell hohe Rechenzeiten sind dagegen als Schwächen des Random-Forest-Ansatzes zu bewerten. (GUYON ET AL. 2003, S. 1157 ff.; REBALA ET AL. 2019, S. 77 ff.)

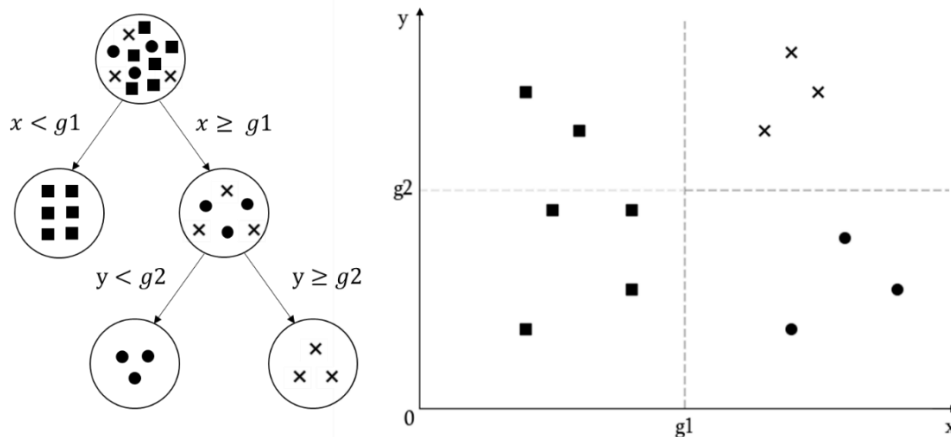


Abbildung 2.3: Beispiel eines Entscheidungsbaums mit visualisierten Klassengrenzen $g1$ und $g2$

2.2.4 Künstliche Neuronale Netze

Künstliche Neuronale Netze entstehen durch Verkettungen künstlicher Neuronen. Diese Verkettungen bestehen aus einem Eingangssignal (in Abbildung 2.4: x), einem Gewicht (W), einer Aktivierungsfunktion und einem Bias (REBALA ET AL. 2019, S. 103 ff.). Unter Einbeziehung der Gewichte und der Aktivierungsfunktion entstehen Ausgangssignale, die nach Durchlauf von Zwischenschichten (z) schließlich über die Ausgabeschicht (y) ausgegeben werden (REBALA ET AL. 2019, S. 103 ff.). Beispielfhaft sei an dieser Stelle die in der Praxis dominierende *Rectified-Linear-Unit(ReLU)-Aktivierungsfunktion* erwähnt, die negative Werte aus einem Eingangssignal entfernt (FUKUSHIMA 1975).

In den Trainingsläufen werden die Gewichte der Kanten zwischen den Neuronen durch die sogenannte *Backpropagation* angepasst, wodurch das Modell schrittweise optimiert wird. Als *Emergenz* wird die Verschaltung vieler Neuronen in Schichten (engl. *Layer*) in einer für das Problem geeigneten Topologie bezeichnet. Eine Rastersuche kann durch die systematische Variation der Hyperparameter eines Neuronalen Netzes (z. B. Anzahl der Schichten, Anzahl der Trainingsepochen, Ausprägung der Lernrate) die optimalen Einstellungen identifizieren. (REBALA ET AL. 2019, S. 114 ff.)

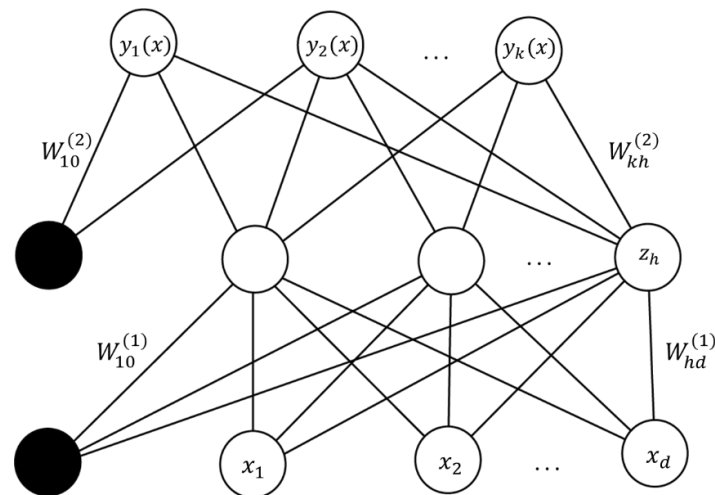


Abbildung 2.4: Beispielhafter Aufbau eines Künstlichen Neuronalen Netzes

Neuronale Netze zeichnen sich durch eine potenziell hohe Ergebnisqualität bei hochkomplexen Daten- und Problemlagen aus, insbesondere bei nichtlinearen Zusammenhängen, vielen Eingangsgrößen und großen Datenmengen. Analog zu Random Forests besteht dagegen die Gefahr der mangelnden Nachvollziehbarkeit getroffener Entscheidungen und resultierender Ergebnisse. (REBALA ET AL. 2019, S. 103 ff.; FOGEL ET AL. 2016)

2.2.5 Faltende Neuronale Netze

Neben Modellen zur Prognose fehlender Daten sind auch bildbasierte Klassifikations- und Objekterkennungsmodelle relevant für die Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl.

Bildklassifikation. In praktischen Bildklassifikationsanwendungen haben sich *Faltende Neuronale Netze* (engl. *Convolutional Neural Networks, CNN*) als erfolgreiche Modellarchitekturen etabliert (GOODFELLOW ET AL. 2016, S. 326 ff.; PAASS ET AL. 2020, S. 123 ff.). Der Aufbau eines CNN wird im Folgenden anhand von Abbildung 2.5 erläutert.

Das beispielhafte CNN besteht aus einem zweidimensionalen *Input Layer* mit jeweils 24 Eingangsneuronen (24 x 24), durch die eine Codierung der Pixel des zu untersuchenden Bildes ermöglicht wird (z. B. 0 = hell; 1 = dunkel). Darauf folgen drei *Filter* (5 x 5), die eine Extraktion sowie eine Zerlegung der Merkmale des Bildes in drei *Feature Maps* in einer Faltungsschicht (*Convolutional Layer*) erlauben (REBALA ET AL. 2019, S. 190 f.). Feature Maps ermöglichen Einblicke in den Trainingsvorgang, indem z. B. die vom CNN erkannten Klassifikationsmerkmale innerhalb des Bildes deutlich werden. Durch sogenannte *Pooling-Funktionen* werden anschließend die Ausgangsdimensionen im *Pooling Layer* reduziert. Eine solche Funktion ersetzt die Ausgabe des Netzes an einer bestimmten Stelle durch eine Zusammenfassung umliegender Neuronen. Durch ein *Max Pooling* wird lediglich der Maximalwert benachbarter Neuronen ermittelt und ausgegeben, während das *Average Pooling* den Mittelwert der Neuronenwerte berechnet (PAASS ET AL. 2020, S. 128).

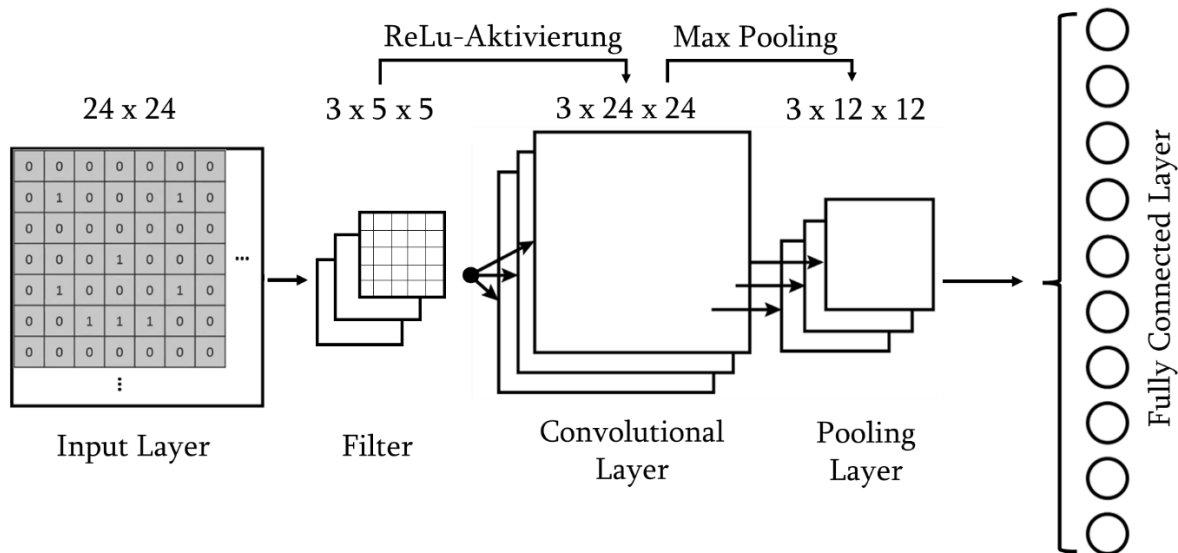


Abbildung 2.5: Veranschaulichung des Aufbaus eines Faltenden Neuronalen Netzes

Die letzte Verbindungsschicht des Netzes ist ein *Fully Connected Layer* zur Verknüpfung der Ausgangsneuronen, die jeweils eine spezifische Klasse repräsentieren. Im Training eines CNN werden die Neuronengewichte sowie die Anzahl und die numerische Struktur der Filter durch Optimierungsalgorithmen angepasst, um bestmögliche Klassifikationsergebnisse zu erzielen (GOODFELLOW ET AL. 2016, S. 326 ff.). Die CNN-Architekturen *Visual Geometry Group (VGG)* und *ResNet* dominieren im Themengebiet der Bildklassifikation (SIMONYAN 2014; PAASS ET AL. 2020, S. 133 ff.).

Objekterkennung. Neben Klassifikationsmodellen ist die sogenannte *Objekterkennung* zur Identifikation von Merkmalen innerhalb der Bilder relevant. Im Folgenden werden mittels Tabelle 2.1 Metriken zur Analyse von Objekterkennungsmodellen eingeführt. Mit *Wahr-Positiv (WP)* werden relevante Objekte beschrieben, die tatsächlich im Bild enthalten sind und erkannt werden. *Falsch-Positiv (FP)* bezieht sich auf Objekte, die erkannt wurden, obwohl sie nicht im Bild enthalten sind. Enthaltene Objekte, die nicht erkannt wurden, werden mit *Falsch-Negativ (FN)* bezeichnet. *Wahr-Negativ* betrifft Merkmale, die nicht enthalten sind und daher richtigerweise nicht erkannt wurden. (PADILA ET AL. 2020, S. 237 ff.)

Tabelle 2.1: Überblick der Parameter zur Analyse von Objekterkennungsmodellen

	tatsächliche Objekte im Bild			
	enthalten	nicht enthalten		
Ergebnis der Objekterkennung	enthalten	WP	FP	erkannte Objekte
	nicht enthalten	FN	WN	
<div style="border-top: 1px solid black; width: 50%; margin: 0 auto; position: relative;"> relevante Objekte </div>				

Diese Parameter werden verwendet, um die Metriken *Präzision* mittels der Formel

$$\text{Präzision} = \frac{WP}{WP+FP} \quad (1)$$

und *Sensitivität* unter Nutzung der Formel

$$\text{Sensitivität} = \frac{WP}{WP+FN} \quad (2)$$

zu berechnen (PADILA ET AL. 2020, S. 237 ff.). Erstere beschreibt, wie viele der erkannten Objekte relevant sind, während Letztere angibt, wie viele der relevanten Objekte tatsächlich erkannt werden. Die Kennzeichnung erkannter Objekte erfolgt durch eine Markierung innerhalb des Bildes inklusive einer Beschriftung der Objektklasse (PADILA ET AL. 2020, S. 237 ff.). Die im Themengebiet der bildbasierten Objekterkennung dominierende *You-Only-Look-Once-(YOLO)-Architektur* zeichnet sich durch eine simultane Erkennung mehrerer Objektklassen in nur einem Anwendungslauf aus (REDMON ET AL. 2015).

2.3 Ansätze zur Verwertung unscharfer Informationen

Im Folgenden werden Ansätze zur Verwertung unscharfer Informationen eingeführt, die in Kapitel 5 mit Bezug auf die Integration in die Methodik miteinander verglichen werden.

2.3.1 Stochastische Verfahren

Als erster Ansatz zur Verwertung unscharfer Informationen werden *stochastische Verfahren* erläutert. Entsprechende Ansätze kombinieren Ungenauigkeiten der Wahrscheinlichkeitstheorie mit statistisch erfassten Datenpunkten (VIERTL 2003, S. 15 ff.; BORGELT ET AL. 2001, S. 1 f.). Zur Verwertung unscharfer Informationen müssen zunächst historische Daten gesammelt und analysiert werden, um Muster oder Trends zu identifizieren (PAPULA 2016, S. 315 ff.; CHUNG 1978, S. 88). Solche Muster können durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen visualisiert werden (z. B. die statistische Verteilung der Körpergröße einer Population in Abhängigkeit des Geburtsjahres oder des Geschlechts). Anschließend wird ein mathematisches Modell entwickelt, das diese Muster und Trends berücksichtigt. Auf Basis neuer, unscharfer Eingangsdaten und unter Nutzung des Modells können den Ausprägungen relevanter Ausgangsgrößen anschließend Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden.

2.3.2 Szenariotechnik

Die *Szenariotechnik* ist eine weitere Strategie, um Ungenauigkeiten und Unsicherheiten zu berücksichtigen. Ein Szenario ist ein hypothetisches Zukunftsbild, das in Kombination mit

anderen Szenarien einen Raum möglicher zukünftiger Ereignisse schafft, der als Orientierung für künftige Entscheidungen dient. Die drei Schritte der Szenariotechnik werden mit den Begriffen *Szenariofeldanalyse*, *Projektionsentwicklung* und *Szenariokonstruktion* bezeichnet. (GÖTZE 1991, S. 38 f.; GAUSEMEIER ET AL. 2016, S. 2 f.)

In Phase 1, der *Szenariofeldanalyse*, werden das sogenannte *Szenariofeld* in geeignete Gruppen (z. B. technologisches und wirtschaftliches Umfeld) aufgeteilt und konkrete Einflussfaktoren herausgearbeitet. Phase 2 umfasst die anschließende sogenannte *Projektionsentwicklung*. Dabei werden Projektionen der möglichen Entwicklung einzelner Einflussfaktoren abgeleitet. Im dritten Schritt werden die Projektionen kombiniert und die finalen Szenarien in der *Szenariokonstruktion* erstellt (Abbildung 2.6). Die Grundlage für die Erstellung der einzelnen Szenarien ist die Konsistenzanalyse, wobei Kombinationen von Prognosen in Projektionsbündeln zusammenfasst werden. Die Szenariotechnik erlaubt folglich die prädiktive Beurteilung des Verhaltens relevanter Ausgangsgrößen mittels einer Variation der Eingangsgrößen und Szenarien. (GAUSEMEIER ET AL. 2016, S. 3 f.)

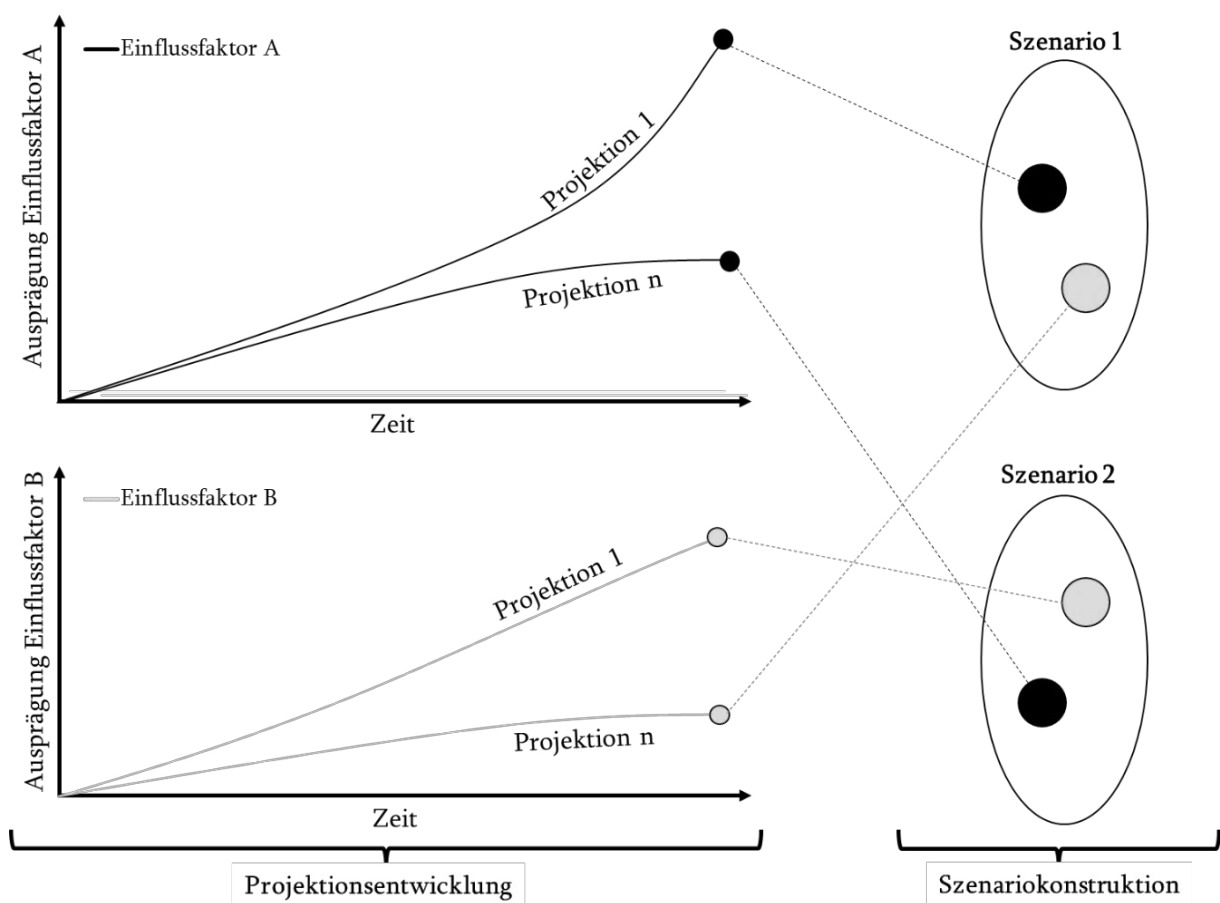


Abbildung 2.6: Visualisierung der Projektionsentwicklung und der Szenariokonstruktion (vgl. GAUSEMEIER ET AL. 2016)

2.3.3 Rough-Set-Theorie

Ein weiterer Ansatz zur Verwertung nicht exakt bekannter Informationen ist die sogenannte *Rough-Set-Theorie*. Eine Rough-Set-Menge ist die Approximation einer scharfen Menge durch eine sogenannte *untere* und eine *obere Näherung*. Die Erstellung der unteren und der oberen Annäherung basiert auf historischen Daten. Ziel ist es, eine Abschätzung relevanter Ausgangsgrößen in unbekanntem Anwendungsfällen zu ermöglichen. (PAWLAK 2002, S. 7 ff.)

Als Beispiel wird die Datenbasis in Tabelle 2.2 eingeführt, wobei jeder Datenpunkt eine Person repräsentiert. Da die Datenpunkte X3 und X5 bezüglich der beiden Eingangsgrößen Alter und Körpergewicht identisch sind, kann die Datenbasis wie folgt gebündelt und beschrieben werden: $\{X1; X2; X4; (X3, X5)\}$. Davon ausgehend soll die Wahrscheinlichkeit des Zufußgehens einer Strecke von zwei Kilometern in Abhängigkeit der Eingangsgrößen analysiert werden. Die Zielmenge repräsentiert demnach alle zuzußgehenden Personen und lautet $\{X1; X3\}$. An dieser Stelle sei die bewusst gewählte Einfachheit des Beispiels betont, eine in der Praxis genutzte Datenbasis (z. B. eine Kundendatenbank) enthält in der Regel wesentlich mehr als fünf Datenpunkte.

Tabelle 2.2: Beispielhafter Datensatz zur Erläuterung der Rough-Set-Theorie

Datenpunkt / Person	Altersklasse (Eingangsgröße)	Gewichtsklasse (Eingangsgröße)	zu Fuß? (Ausgangsgröße)
X1	21–30	61–70 kg	Ja
X2	41–50	61–70 kg	Nein
X3	31–40	81–90 kg	Ja
X4	51–60	51–60 kg	Nein
X5	31–40	81–90 kg	Nein

Zur Ableitung der unteren Annäherung wird ein strenges Vorgehen angewendet, wobei nur eindeutige Zugehörigkeiten der Datenpunkte zur Zielmenge ermittelt werden und Datenbündel unberücksichtigt bleiben. Lediglich X1 findet sich eindeutig und ohne Bündelzugehörigkeit in der Zielmenge wieder: $\{X1\}$.

Für die obere Annäherung werden auch Datenbündel einbezogen, sofern ein Teil von ihnen in der Zielmenge enthalten ist. Neben X1 wird für die obere Annäherung folglich auch das Bündel (X3, X5) berücksichtigt, da X3 der Zielmenge angehört: $\{X1; X3; X5\}$.

Im Falle neuer Datenpunkte, zu denen die Eingangsgrößen Alter und Körpergewicht bekannt sind, kann die Wahrscheinlichkeit des Zufußgehens auf Basis der unteren und der oberen Approximation geschätzt werden. Beispielsweise ist davon auszugehen, dass eine

Person der Altersklasse ‚21–30‘ und der Gewichtsklasse ‚61–70 kg‘ zu Fuß geht, da der äquivalente Datenpunkt X1 sowohl in der unteren als auch in der oberen Annäherung enthalten ist. Dagegen erstreckt sich die Wahrscheinlichkeit des Zufußgehens für einen Probanden der Altersklasse ‚31–40‘ und der Gewichtsklasse ‚81–90 kg‘ (äquivalent zu den Datenpunkten X3 und X5) von null Prozent (untere Annäherung) bis 100 Prozent (obere Annäherung) und liegt im Mittel bei 50 Prozent. Allgemein kann durch Rough Set demnach eine Abschätzung des Verhaltens und der Eintrittswahrscheinlichkeit relevanter Ausgangsgrößen erfolgen.

2.3.4 Fuzzy-Logik

Um die theoretische Grundlage der *Fuzzy-Logik* (engl. *fuzzy*; dt. *unscharf*) verständlich zu machen, werden zunächst die sogenannten *Fuzzy-Mengen* zur Verwertung unscharfer Parameter erläutert. Der Begriff der *Fuzzy-Menge* wird als eine Klasse von Objekten beschrieben, die unterschiedliche Zugehörigkeitsgrade zu einer gegebenen Menge aufweisen (ZADEH 1965, S. 338 ff.; HAWER ET AL. 2015, S. 348).

Die Zugehörigkeitsgrade werden durch trapez-, dreiecks- oder singletonförmige Zugehörigkeitsfunktionen definiert (ZADEH 1965). Trapez- und dreiecksförmige Funktionen können, ihrem charakteristischen Verlauf folgend, verschiedene Zugehörigkeitswerte annehmen. Die Dreiecksfunktion weist nur einem einzigen Element an der Spitze des Dreiecks den maximalen Grad der Zugehörigkeit zu. Diese Eigenschaft stellt den Unterschied zur Trapezfunktion dar, bei der über einen Wertebereich entlang der oberen Trapezkante maximale Zugehörigkeiten zugeordnet werden. Die Singleton-Zugehörigkeitsfunktion ist dagegen für die Zuordnung maximaler Zugehörigkeiten zu diskreten, scharfen Werten geeignet (KAHLERT 1995, S. 15 f.). Die Wertebereiche der Zugehörigkeitsfunktionen werden in der Fuzzy-Theorie mit linguistischen Variablen benannt (ZIMMERMANN ET AL. 1993, S. 12). Ein Beispiel ist eine Bewertung der Geschwindigkeit eines Fahrzeugs als *niedrig*, *mittel* und *hoch*. Die Bewertung in Zugehörigkeitsfunktionen gibt diesen linguistischen Einordnungen eine quantitative Bedeutung (KAHLERT 1995, S. 17 f.). Fuzzy-Systeme ahmen folglich die menschliche Fähigkeit nach, Entscheidungen auf Basis ungenauer und nichtnumerischer Informationen zu treffen (VALASKOVA ET AL. 2014).

Fuzzy-Logiken wenden Fuzzy-Mengen durch die Kombination mit *Fuzzy-Regelsystemen* an. *Fuzzifizierung*, *Inferenz* und *Defuzzifizierung* repräsentieren hierbei die drei Phasen der Logik. (ZADEH 1965; FORTE 2002, S. 73 ff.)

In der ersten Phase, der *Fuzzifizierung*, werden die Eingangsgrößen über Zugehörigkeitsfunktionen den unscharfen, linguistischen Wertebereichen zugeordnet und es wird der Grad der Zugehörigkeit bestimmt (TRAEGER 1994, S. 80 f.). Die kausalen Zusammenhänge

zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen werden in der zweiten Stufe, der *Inferenz*, modelliert (KREBS 2012, S. 89 f.). Die kausalen Zusammenhänge werden mit Regeln modelliert, die aus einer bestehenden Wissensbasis oder aus Expertenwissen abgeleitet werden (ZIMMERMANN ET AL. 1993, S. 96 ff.). Die Gesamtaussage eines Fuzzy-Regelsets wird nach Durchlauf aller Regeln durch Zusammenführen der Ergebnisse einzelner Regeln gebildet (ZIMMERMANN ET AL. 1993, S. 97 ff.). Im Zuge der abschließenden *Defuzzifizierung* wird das Gesamtergebnis wieder in eine scharfe Ausgangsvariable umgewandelt (VINODH ET AL. 2014, S. 523 ff.). Eine Methode zur Defuzzifizierung ist der Schwerpunktansatz (engl. *centroid approach*), der den grafischen Schwerpunkt der aktivierten Zugehörigkeitsfunktionen berechnet (ZIMMERMANN ET AL. 1993, S. 99 f.).

Auf Basis der beispielhaften Eingangsgröße *in* könnten Fuzzy-Regeln zur Ermittlung der Ausgangsgröße *out* wie folgt lauten:

WENN *,in ist low‘*, DANN *,out ist low‘*

WENN *,in ist medium‘*, DANN *,out ist medium‘*

WENN *,in ist high‘*, DANN *,out ist high‘*

Die Zugehörigkeitsgrade zu den Wertebereichen *low*, *medium* und *high* werden im vorliegenden Beispiel durch Trapezfunktionen beschrieben. Für die beispielhafte Eingangsgröße *in* = 0,81 ergibt sich folglich die in Abbildung 2.7 dargestellte Regelaktivierung von zwei der drei Regeln. Um die Fuzzy-Variablen im Rahmen der Defuzzifizierung in einen quantitativen Wert umzuwandeln, wird der Schwerpunktansatz *centroid* verwendet. Mit diesem wird der grafische Schwerpunkt der zusammengesetzten Gesamtfläche der Ausgangsgröße *out* bei einem Wert von 78 ermittelt. Abschließend sei die dem Verständnis dienende, einfache Regelgestaltung mit nur drei Regeln und je einer Eingangsgröße erwähnt. In der Praxis wird über das Aufstellen mehrerer Regeln ein holistisches Fuzzy-Regelsystem generiert, aus dem eine Gesamtaussage unter Berücksichtigung mehrerer Eingangsgrößen resultiert.

Nachdem die für das Verständnis der vorliegenden Dissertation relevanten Grundlagen nun bekannt sind, fokussiert sich das nächste Kapitel auf den *Stand von Forschung und Technik* im behandelten Themengebiet.

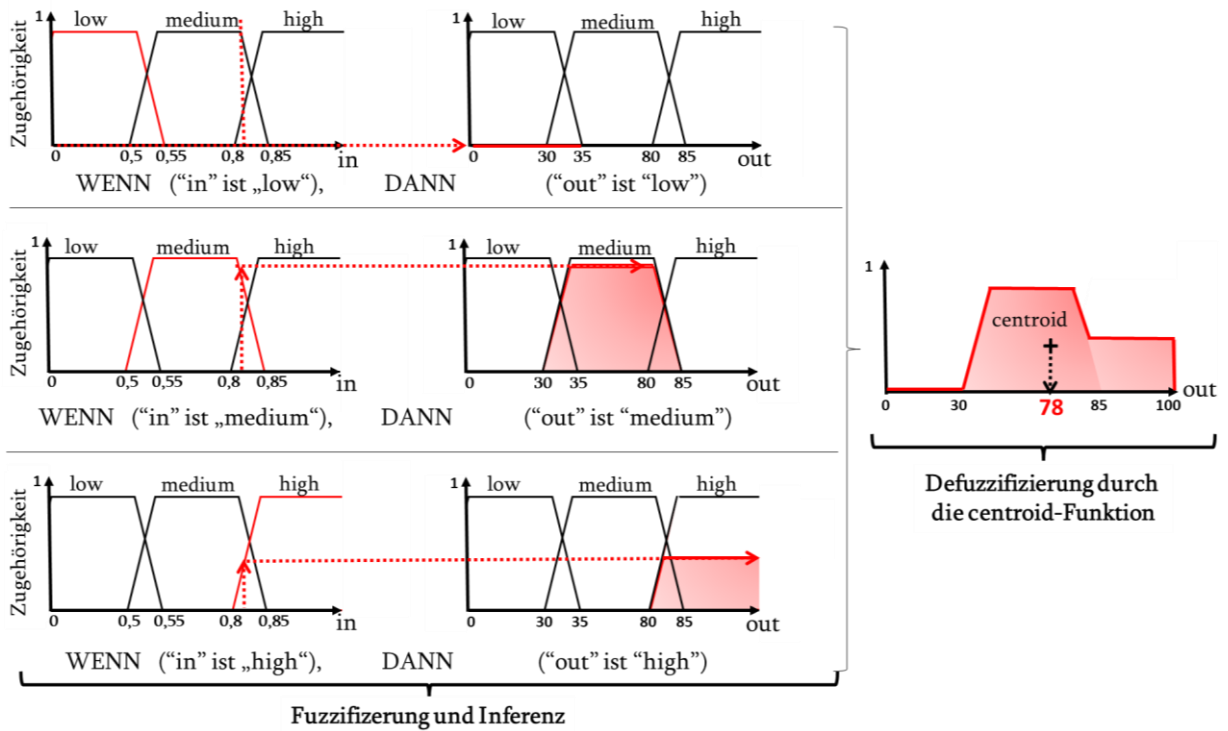


Abbildung 2.7: Beispielhafte Anwendung der centroid-Funktion zur Defuzzifizierung und Quantifizierung der Ausgangsgröße ,out' auf Basis der Eingangsgröße ,in' = 0,81

3 Stand von Forschung und Technik

Kapitel 3 dieser Dissertation setzt die Phase *Descriptive Study I* durch eine Stand-der-Technik-Analyse fort. Der Fokus liegt auf dem übergeordneten Methodikziel eines objektiven und automatisierten Vergleichs von Fertigungstechnologien. Die Betrachtungen existierender Ansätze zur Analyse einzelner, für die Fertigungstechnologie-Auswahl relevanter Themenfelder sind dagegen Bestandteil der entsprechenden Publikationen.

Die systematische Recherche relevanter Arbeiten wurde durch Schlüsselwortsuchen in wissenschaftlichen und universitären Datenbanken (u. a. Scopus, Google Scholar, Universitätsbibliotheken) gestützt. Die verwendeten Schlüsselwörter sind der Tabelle in Anhang B zu entnehmen. Anschließend wurden die Suchergebnisse bezüglich ihrer Bedeutung für das Themengebiet dieser Arbeit beurteilt. Ferner wurden die Literaturverzeichnisse identifizierter Arbeiten nach weiteren relevanten Quellen durchsucht.

Die Schritte zur Analyse des Stands der Technik gliedern sich des Weiteren wie folgt:

- i. Untersuchung von Ansätzen zur Fertigungstechnologie-Analyse auf Technologieebene
- ii. Untersuchung von Ansätzen zur Fertigungstechnologie-Analyse auf Bauteilebene
- iii. Erarbeitung bestehender Forschungslücken und zu erfüllender Anforderungen
- iv. Ableitung zu adressierender Forschungsfragen

3.1 Fertigungstechnologie-Analyse auf Technologieebene

Zunächst stehen Betrachtungen auf Technologieebene im Fokus, durch welche die Technologien und zugehörige Anlagen in ihrer Gesamtheit analysiert werden. Diese gesamtheitlichen Technologievergleiche sind für strategische Unternehmensausrichtungen essenziell und unterstützen eine schnelle Reaktion auf technologische Veränderungen. Die Ergebnisse der Vergleiche informieren Stakeholder ohne Expertenwissen über Neuerungen und Fortschritte existierender Fertigungstechnologien, z. B. über eine erhöhte Produktivität.

Im Zuge der Recherche wurden Ansätze zur Komplexitätsanalyse von Produktionsketten und Fertigungssystemen betrachtet (BORILLE ET AL. 2011, S. 29 ff.; HUANG ET AL. 2015; SCHMENNER ET AL. 1998). Die Auswirkungen von Änderungen und Eigenschaften eines Produktionsnetzwerks auf Produktionskosten können außerdem in manuellen, nichtautomatisierten Vorgehensmodellen abgebildet werden (NANDHAKUMAR ET AL. 2020, S. 1235 ff.; NAGULPELLI ET AL. 2019, S. 619 ff.). Bei anderen Methoden wird das Potenzial von Technologien und der jeweiligen Maschinen durch die Analyse der aktuellen Technologiereife ermittelt, ohne dabei zukünftige Entwicklungspotenziale quantitativ zu betrachten (BAUMERS ET AL.

2019, S. 794 ff.; VAYRE ET AL. 2013, S. 264 ff.). HOFER bezieht Technologiepotenziale in die strategische Technologieplanung mit ein und ermöglicht damit die quantitative Analyse von Fertigungstechnologien (HOFER ET AL. 2019, S. 1400 ff.). Im Automotive-Sektor existieren außerdem Arbeiten zur technologischen Analyse von Faserverbundwerkstoffen (SARFRAZ ET AL. 2021).

Darüber hinaus konnten bezüglich des betrachteten Themengebiets *Fertigungstechnologie-Analyse auf Technologieebene* folgende Dissertationen als relevant identifiziert werden.

HEITSCH (2000) stellt mit Fokus auf die technische Investitionsplanung ein Verfahren zur multidimensionalen Bewertung verschiedener Produktionstechniken vor. Dabei werden ökonomische, ökologische, qualitative und strategische Aspekte durch vier Bewertungsmodelle adressiert. Die Ausgabe der Analyse-Ergebnisse erfolgt in einer hierarchischen und qualitativen Form.

SCHÖNING (2006) präsentiert eine Methodik zur monetären, strategischen Bewertung von Technologien unter Berücksichtigung des *Technologie-*, des *Nutzen-* und des *Marktpotenzials*. Das Technologiepotenzial wird durch den Abgleich von Leistungsparametern und Umsetzungskosten determiniert, das Nutzenpotenzial quantifiziert den Nutzen für Anwender und Anbieter der Technologien. Das Marktpotenzial wiederum hängt vom durch die Technologien erzielbaren Cash-Flow (dt. Geldfluss) ab.

GOMERINGER (2007) schildert auf Basis vorhandener Ansätze neuartige Technologieplanungsprozesse. Diese zeichnen sich durch eine prognosebasierte Berücksichtigung künftiger Technologieentwicklungen aus. Die resultierenden methodischen Handlungsempfehlungen unterstützen Unternehmen mit dem Ziel einer effizienten Technologieplanung.

Das Vorgehensmodell zur anlaforientierten Technologieplanung nach NAU (2012) umfasst zwei Phasen. In der Grobplanungsphase werden geeignete Fertigungstechnologien unter Nutzung einer Risiko-Potenzial-Matrix ausgewählt. In der Feinplanungsanalyse liegt der Fokus auf dem Hochlaufverhalten und der erreichbaren Produktivität je Technologie.

SCHINDLER (2014) fokussiert sich auf die Auswahl des besten Technologieketten-Setups. In einem aus fünf Schritten bestehenden Vorgehensmodell werden die zur Bauteilerzeugung benötigten Technologien bezüglich ihrer Reife, ihrer Wirtschaftlichkeit sowie ihrer Potenziale bewertet und anschließend zu einer Abfolge verbunden.

HEESCHEN (2015) erarbeitet eine Methodik zur kennzahlenbasierten Auswahl von Fertigungstechnologien und stellt hierbei den oftmals kostenintensiven Werkzeugbau in den Mittelpunkt. Die resultierende Quantifizierung der technologischen Alternativen unterstützt Entscheidungsprozesse bei der Einführung neuer Technologien.

GREITEMANN (2016) stellt sich der Herausforderung, Produktionstechnologien frühzeitig potenziellen Alternativen gegenüberzustellen. Ein strukturierter, fundierter Vergleich der Fertigungstechnologien erfordert einen hohen Aufwand. Durch eine Systematisierung der Suche, u. a. mittels einer Deduktion relevanter Suchfelder und einer Identifikation von Schlüsselfaktoren, kann dieser Aufwand reduziert werden.

LINDEMANN (2015, S. 935 ff.; 2017) behandelt die Industrialisierung der Additiven Fertigung. Im Zuge dessen wurden Wirtschaftlichkeitsanalysen und Verifizierungspläne für die Produktion entwickelt sowie Auswirkungen der Integration additiv gefertigter Produkte auf die Lieferketten aufgezeigt.

Ebenfalls zu betrachten sind Fertigungstechnologie-Analysen zur Unterstützung eines effizienten Substitutionsmanagements. SCHÖNMANN (2018) beschreibt fünf Module zur systematischen Identifikation produktionstechnologischer Substitutionsbedarfe mithilfe von Zyklusmodellen. Diese berücksichtigen die Abnutzungszustände sowie Struktur-, Leistungs- und Fähigkeitsgrößen der Fertigungstechnologien.

3.2 Fertigungstechnologie-Analyse auf Bauteilebene

Den in Abschnitt 3.1 erläuterten Ansätzen stehen Verfahren zur bauteilindividuellen Beurteilung der fertigungstechnologischen Eignung gegenüber. Die strategische Technologiebewertung rückt demnach in den Hintergrund und weicht dem Ziel einer Automatisierung und Objektivierung bauteilspezifischer Technologie-Auswahlprozesse.

Analysen auf Bauteilebene ermöglichen u. a. das Heben von Leichtbaupotenzialen (GÄNSICKE ET AL. 2015, S. 42 ff.; KLEEMANN ET AL. 2017, S. 68 ff.). Aufgrund des Aufstrebens der Additiven Fertigung konzentrieren sich aktuelle Bauteilscreening-Ansätze häufig auf die Auswahl geeigneter AM-Teile (REIHER ET AL. 2017, S. 43 ff.). Forschungsprojekte zur besseren Kontrolle von AM-Prozessen und -Bauteileigenschaften erhöhen die Anzahl AM-tauglicher Bauteile (ESCHNER ET AL. 2020). Eine Herausforderung besteht jedoch in der Reduktion manueller, nichtdigitalisierter Suchschritte (VAYRE ET AL. 2013, 264 ff.; BORILLE ET AL. 2011, S. 29 ff.). Als bedeutsamen Aspekt der Fertigungstechnologie-Analyse adressieren viele Arbeiten eine Kostenschätzung auf Bauteilebene (siehe Kapitel zum *Stand der Technik* in BUECHLER ET AL. 2022). So ermöglichen AM-exklusive Methoden eine Kalkulation von Bauteil-Herstellungskosten (HARTOGH ET AL. 2017).

Folgende Dissertationen aus dem Themengebiet der *Fertigungstechnologie-Analyse auf Bauteilebene* sind auf Basis der Literaturrecherche zu betrachten.

Das Vorgehen nach STEINHÄUßER (2018) ermöglicht eine Beschleunigung der Serienreifmachung von Bauteilen, weist jedoch keinen fertigungstechnologischen Fokus auf. Die rechnergestützte Methode zur kontinuierlichen Reifemessung berücksichtigt Unsicherheiten und ermöglicht die Priorisierung wichtiger Aufgaben.

RUDOLPH (2018) ermöglicht den Einsatz cloudbasierter Berechnungen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Analyse und Ermittlung von Kostenpotenzialen der Additiven Fertigung. Die zugrundeliegende Methodik zielt auf eine integrierte Bauteilsichtung und -selektion nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ab.

HÖLLER (2020) analysiert und hebt Kostenpotenziale des selektiven Laserstrahlschmelzens entlang der Prozesskette. Die Arbeitsergebnisse ermöglichen einen Bauteilauswahlprozess unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Faktoren.

Das Vorgehensmodell nach SCHUMACHER (2021) ermöglicht eine Automatisierung der Identifikation von Bauteilen, für die sich die Additive Fertigung eignet. Dies geschieht durch ein datenbasiertes Entscheidungswerkzeug und unter Nutzung der Fuzzy-Logik zur Verwertung resultierender Daten. Der Kostenvergleich erfolgt auf Basis der Ist-Kosten der bisherigen Bauteil-Fertigungstechnologie und integrierter AM-Kostenberechnungen.

3.3 Forschungslücken und Anforderungen

Auf Basis der Analyse des Standes von Forschung und Technik wird Handlungsbedarf bezüglich folgender Aspekte deutlich:

- i. Bestehende Ansätze sind auf fortgeschrittene Produktentwicklungsphasen und Bauteildaten angewiesen. Sie funktionieren folglich nicht ausreichend prädiktiv für einen Fertigungstechnologie-Vergleich in frühen Phasen der Produktentwicklung.
- ii. Existierende Arbeiten und Methodiken erfordern zudem die Ausführung manueller Schritte und decken nur Teile des Bewertungsprozesses automatisiert ab.
- iii. Weiterhin konzentrieren sich bestehende Ansätze auf die Bewertung einzelner Fertigungstechnologien oder Themenfelder. Es besteht demnach keine Möglichkeit eines ganzheitlichen Fertigungstechnologievergleichs.
- iv. Existierende Arbeiten zur Fertigungstechnologie-Analyse auf Technologieebene erlauben keine bauteilindividuellen Technologiebewertungen.

Um die Forschungslücken zu schließen, muss die in der vorliegenden Arbeit präsentierte Methodik außerdem bestimmte Anforderungen (A) erfüllen, die im Hinblick auf den zu stiftenden Nutzen formuliert wurden (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Anforderungen an die Methodik; A: Anforderung

	Anforderung	Nutzen
A1	Ermöglichung einer frühzeitigen Parameterprognose und -analyse ...	... zur Anwendung der Methodik in frühen Entwicklungsphasen
A2	Realisierung eines möglichst hohen Automatisierungsgrades ...	... zur zeiteffizienten Analyse einer Vielzahl von Bauteilen
A3	Sicherstellung eines objektiven Vergleichs der Fertigungstechnologien ...	... zur Vermeidung erfahrungsbasierter menschlicher Einflüsse
A4	Ermöglichung einer ganzheitlichen Technologiebewertung ...	... zur Vermeidung einer thematischen Fokussierung
A5	Sicherstellung der Methodik-Anwendbarkeit auf Bauteilebene ...	... zur bauteilindividuellen Entscheidungsfindung

Im Folgenden werden Thesen zur Erfüllung der gelisteten Anforderungen formuliert, die im fünften Kapitel in den Aufbau der Methodik einfließen:

Zu A1: Die frühzeitige Anwendung der Methodik in der Produktentwicklung geht mit einer begrenzten Datenverfügbarkeit einher. Diese Limitation erfordert einen prädiktiven Ansatz, der durch die Verwendung von KI-Prognosemodellen auf Basis frühzeitig verfügbarer, technologieunabhängiger Bauteilinformationen umgesetzt werden kann.

Zu A2: Die angestrebte Automatisierung der Methodik dient der fertigungstechnologischen Analyse einer Vielzahl von Bauteilen und Parametern. Dies erfordert die Anbindung von Datenbankschnittstellen und die automatisierte Verarbeitung heterogener Daten.

Zu A3: Der objektive Fertigungstechnologie-Vergleich sollte datenbasiert erfolgen, um menschliche Einflüsse zu minimieren. Dieser Aspekt bedingt eine quantitative Bewertung der Fertigungstechnologien unter Nutzung einer Technologiepotenzialskala.

Zu A4: Eine ganzheitliche Technologieanalyse erfordert die Bewertung von Daten verschiedener Einflussfelder, die durch Ansätze zur Verwertung unscharfer Informationen verwertet und zu einer Gesamtaussage gebündelt werden können.

Zu A5: Die angestrebte Technologiebewertung auf Bauteilebene erfordert die Verwendung bauteilbezogener Eingangsdaten, um bauteilindividuelle Ergebnisse zu ermöglichen.

Die Analyse des Standes der Technik und der zu erfüllenden Anforderungen zeigt: Es existiert keine Methodik zum frühzeitigen, automatisierten, objektiven und ganzheitlichen Fertigungstechnologievergleich auf Bauteilebene. Im Sinne der Übersichtlichkeit fokussiert sich Tabelle 3.2 auf die betrachteten Dissertationen. Weitere Arbeiten weisen ebenfalls die in der untersten Zeile kondensierte Forschungslücke auf.

Tabelle 3.2: Abgrenzung der vorliegenden Arbeit ggü. dem Stand der Technik; FT: Fertigungstechnologie

	Legende:						
	vollständig gegeben	teilweise gegeben	nicht gegeben				
BÜCHLER 2024	●	●	●	●	◐	●	●
SCHUMACHER 2021	◐	●	○	◐	○	●	○
HÖLLER 2020	●	○	○	◐	◐	●	○
RUDOLPH 2018	◐	●	○	○	○	●	○
STEINHÄUBER 2018	●	◐	○	○	○	●	○
SCHÖNEMANN 2018	●	◐	●	○	●	○	○
LINDEMANN 2017	◐	○	○	◐	●	◐	○
GREITEMANN 2016	◐	◐	●	◐	●	○	○
HEESCHEN 2015	◐	○	●	◐	●	○	○
SCHINDLER 2014	◐	○	◐	○	●	○	○
NAU 2012	◐	○	◐	◐	●	○	○
GOMERINGER 2007	●	○	◐	◐	●	○	○
SCHÖNING 2006	◐	○	◐	◐	●	○	○
HEITSCH 2000	◐	○	◐	●	●	○	○
	A1: frühzeitige Analyse / Prädiktion	A2: hoher Automatisierungsgrad	A3: objektiver Technologievergleich	A4: ganzheitliche Technologieanalyse	Technologie / Anlage	Bauteil	FT-übergreifendes Bauteilscreening
	Anforderungen						A5: Ebene

3.4 Forschungsfragen

Um die Forschungslücken zu schließen und die Zielsetzung zu erreichen, gilt es, folgende Forschungsfragen zu beantworten:

1. Welche Parameter und Einflussfelder müssen in einer Methodik zur Auswahl der Fertigungstechnologie auf Bauteilebene berücksichtigt werden?
2. Wie können diese relevanten Parameter frühzeitig bereitgestellt und für eine objektive Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene verwertet werden?
3. Welcher Nutzen ist durch die praktische Anwendung der Methodik in Prozessen der Produktentwicklung zu erwarten?

Nach der Analyse des Standes von Forschung und Technik und der Formulierung der Forschungsfragen wird im nächsten Kapitel der für diese Arbeit relevante Betrachtungsrahmen konkretisiert.

4 Betrachtungsrahmen

In diesem Kapitel wird zum Abschluss der *Descriptive Study I* der Betrachtungsrahmen der vorliegenden Dissertation definiert. Potenzielle Erweiterungen des im Folgenden spezifizierten Anwendungsbereichs werden in Abschnitt 10.3 erläutert.

4.1 Frühe Phase der Karosserie-Entwicklung

Zunächst wird die Methodik zeitlich in die Abläufe der Karosserie-Entwicklung eingeordnet. Der angestrebte frühzeitige Einsatz der Methodik zielt auf eine Anwendung nach der Konzeptphase und zu Beginn der Bauteilentwicklung ab (Abbildung 4.1). Auf Basis der resultierenden Fertigungstechnologievorschläge kann die im Entwicklungsprozess folgende Konstruktion der Karosseriebauteile beginnen. Die Methodik dient folglich als unterstützendes System am Anfang der Bauteilentwicklung, ersetzt aber nicht den vollständigen Arbeitsumfang der Bauteilentwickler und -konstrukteure¹.

Mit der Rohkarosserie als Anwendungsgebiet der Methodik geht zudem eine Fokussierung auf die in diesem Bereich dominierenden metallischen Fertigungstechnologien aus Abschnitt 2.1 einher. Die einleitend geschilderten technologischen Entwicklungen und Neubewertungen begründen hierbei die hohe Nachfrage nach frühzeitiger Klarheit bezüglich zu verwendender Fertigungstechnologien (CLAUSEN ET AL. 2020, S. 38; MAUERMANN ET AL. 2021, S. 104).

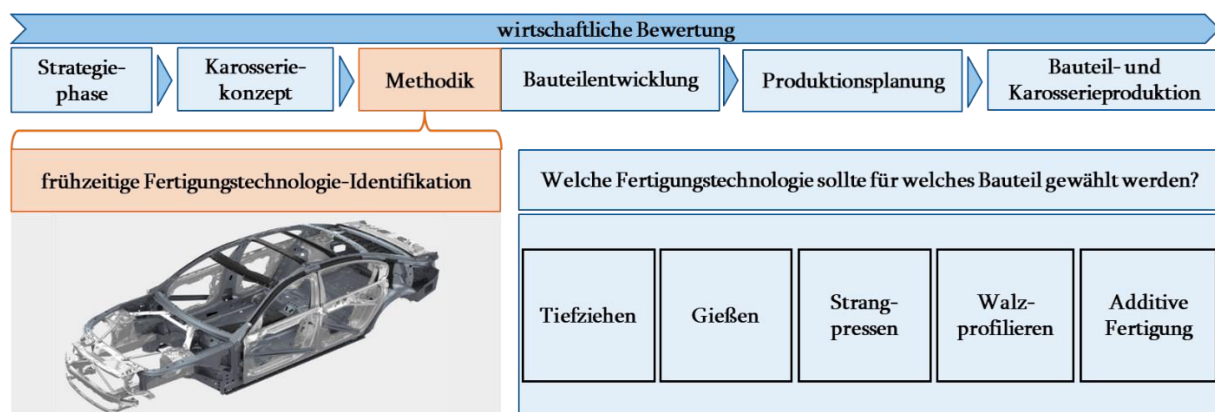


Abbildung 4.1: Einordnung der Methodik (orange) in die Abläufe der Karosserie-Entwicklung

¹ Im Sinne der Lesbarkeit wird bei Personen- oder Berufsbezeichnungen sowie personenbezogenen Hauptwörtern in der vorliegenden Arbeit das generische Maskulinum verwendet, weibliche Personen und Personen diversen Geschlechts sind dadurch keinesfalls ausgeschlossen, sondern im Gegenteil bewusst inkludiert.

4.2 Initiale Schritte der Automobilproduktion

Durch eine frühzeitige Auswahl der Fertigungstechnologie auf Bauteilebene beeinflusst die Methodik vor allem die Abläufe im *Presswerk* und im *Karosseriebau* (Abbildung 4.2). So hängt die Anzahl der im Presswerk zu produzierenden Bauteile maßgeblich von der gewählten Fertigungstechnologie der Bauteile ab. Die Abläufe im Karosseriebau sind ebenfalls zu betrachten, da zu verwendende Fügetechniken und resultierende Zeitaufwände von den Bauteilfertigungstechnologien und -materialien beeinflusst werden. Die weiteren Produktionsschritte *Lackieren* und *Montage* erfolgen nach dem Fügen der Karosserieeinzelbauteile zur Rohkarosserie und stehen daher nicht im Fokus der Methodik. Im Gegensatz zur Inbound-Logistik der Teilelieferung an die Karosserieproduktionsstätte wird die Intralogistik innerhalb der Werke nicht berücksichtigt, da sie nicht maßgeblich von der Fertigungstechnologie eines Bauteils beeinflusst wird (KOLTER 2021, S. 24). Ebenso sind Vertrieb und Service der Fahrzeuge nicht Teil des Betrachtungsrahmens.

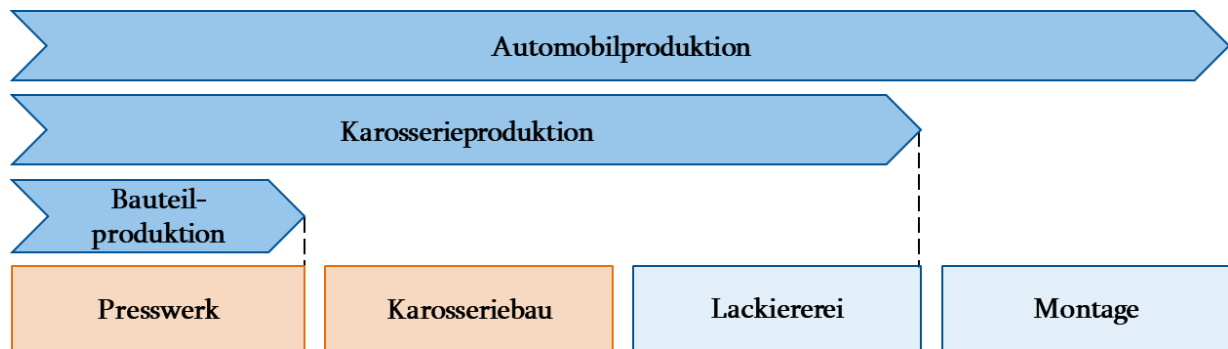


Abbildung 4.2: *Presswerk und Karosseriebau als zu betrachtende Produktionsschritte*

Der nun definierte Betrachtungsrahmen bildet in Kombination mit den zuvor behandelten Grundlagen und dem analysierten Stand von Forschung und Technik das verständnisschaffende Fundament dieser Dissertation. Im folgenden Kapitel wird darauf aufbauend die Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl eingeführt.

5 Aufbau der Methodik

Dieses Kapitel widmet sich zunächst der Identifikation und Analyse von Einflussfeldern zur Fertigungstechnologie-Auswahl. Anschließend wird im Sinne der DRM-Phase *Prescriptive Study* die Konzeption der in dieser Dissertation präsentierten Methodik abgeleitet. Dieses Konzept bildet zugleich den Rahmen für die drei zugrundeliegenden Publikationen.

5.1 Einflussfelder zur Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene

Die Kenntnis der Einflussfelder zur frühzeitigen Auswahl der Fertigungstechnologien ist essenziell für die erfolgreiche Methodik-Entwicklung. Das Vorgehen zur Identifikation der Einflussfelder im Rahmen dieser Dissertation gliedert sich in eine Literaturrecherche und eine Expertenbefragung.

5.1.1 Literaturbasierte Identifikation

Unter Anwendung der schlüsselwortbasierten Vorgehensweise zur Literaturrecherche gemäß Kapitel 3 wurden in wissenschaftlichen und universitären Datenbanken sowie in Dokumenten der Karosserie-Entwicklung folgende Einflussfelder identifiziert.

Bauteilanforderungen

Karosseriebauteile müssen Funktionen erfüllen, die durch bestimmte Anforderungen spezifiziert sind. Das in Abbildung 5.1 gezeigte Vorgehensmodell unterstützt eine strukturierte Ermittlung relevanter Anforderungskategorien. Der Zusammenhang zwischen Funktionen und Anforderungen ergibt sich aus dem *Münchener Produktkonkretisierungsmodell* (PONN ET AL. 2011, S. 39). Um die Funktionen eines Produkts darstellen zu können, müssen die Anforderungen demnach vollständig definiert sein (PONN ET AL. 2011, S. 35; HERRMANN 2022, S. 3). Daher lassen sich aus Funktionsanalysen Rückschlüsse bezüglich relevanter Anforderungskategorien ziehen.

Im ersten Schritt des Vorgehensmodells aus Abbildung 5.1 wurden Karosseriefunktionen durch eine strukturierte Literaturrecherche und die Analyse relevanter Dokumente aus der Produktentwicklung ermittelt. Anschließend wurden Funktionsbeziehungen aus entsprechenden Beschreibungen, DIN-Normen und Lastenheften eruiert und strukturiert. Beispielsweise besteht ein Zusammenhang zwischen den Funktionen *Abdichten* und *Korrosion vermeiden*. Im zweiten Schritt wurden diese Beziehungen in einer Funktionsmatrix veranschaulicht, indem die Funktionen in den Zeilen und Spalten der Matrix aufgelistet und Beziehungen untereinander gekennzeichnet wurden. Die Funktionen konnten in einem dritten Schritt durch eine Umsortierung innerhalb der Matrix zu Funktionskategorien

gebündelt werden, die möglichst viele Funktionsbeziehungen beinhalten (Abbildung 5.1, Bündel B1 bis B3). Zur Umsortierung wurden frei verfügbare Algorithmen zur Erzeugung einer Design-Structure-Matrix genutzt. Der vierte Schritt bildet einen Schnittpunkt zum expertenbasierten Teil der Einflussfeldermittlung. In diesem wurden die Funktionsbündel auf ihre Bedeutung für das konkrete Ziel der Bauteilfertigungstechnologie-Auswahl geprüft, um relevante Anforderungskategorien abzuleiten. (PEIS 2022, S. 41 ff.)

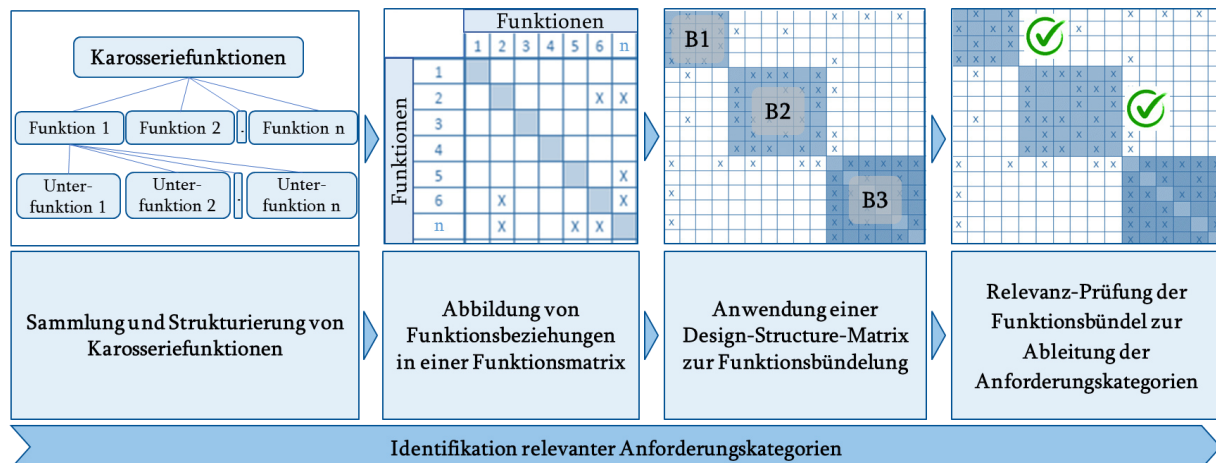


Abbildung 5.1: Ermittlung relevanter Funktions- und Anforderungskategorien nach PEIS 2022

Nach Anwendung der vier Schritte wurden folgende Kategorien erfasst. Im Kollisionsfall sind der Insassenschutz sowie der Schutz von Fahrzeugkomponenten vor äußeren Einflüssen zu beachten (GROTE ET AL. 2018, S. Q3 ff.). Einerseits existieren diesbezüglich Bauteile, die über ein erwünschtes Deformationsverhalten Lasten leiten und Energie absorbieren sollen. Andererseits gibt es Komponenten, beispielsweise im Bereich der Fahrgastzelle, die sich im Kollisionsfall nicht deformieren sollten (GROTE ET AL. 2018, S. Q3 ff.). Besondere Relevanz für die Auswahl der Fertigungstechnologie besitzen außerdem die Korrosions- und die Temperaturbeständigkeit der Bauteile (LUEDKE ET AL. 2005, S. 28 ff.).

Karosserie-Produktionsumfeld

Aufgrund der circa siebenjährigen Produktionszeit eines Automobilmodells hat die Wahl der Fertigungstechnologien und der erforderlichen Fügetechniken langfristige strategische Auswirkungen (HALLWEGGER 2021, S. 13 ff.). Dies gilt insbesondere im Rohkarosseriebau, da die hochautomatisierten Produktionsanlagen auf bestimmte Fahrzeugmodelle ausgelegt sind. Zusätzlich beeinflusst die Beschaffung von Bauteilen verschiedener Technologien über externe Lieferanten die Komplexität des Produktionsnetzwerks (RICHTER 2007, S. 10 ff.). Demnach sollten die zu produzierende Stückzahl eines Bauteils, die erforderlichen Fügeprozesse, die Taktrate der Produktionslinie sowie zurückzulegende Logistikwege bei der Wahl der Bauteilfertigungstechnologie berücksichtigt werden (RICHTER 2007, S. 10 ff.; NAGULPELLI ET AL. 2019, S. 619 ff.).

Bauteilkosten

Die Wahl der Fertigungstechnologie auf Bauteilebene beeinflusst diverse Kostenarten (SCHUMACHER 2021, S. 67 f.; NANDHAKUMAR ET AL. 2020, S. 1235 ff.). Diese umfassen die Bauteil-Herstellkosten, Investitionen für die zur Bauteilherstellung nötigen Werkzeuge, die technologie- und lieferantenabhängigen Logistikkosten sowie Investitionen in die Karosserie-Produktionslinie (KOLTER 2020, S. 33 ff.). Eine Kostenanalyse muss demnach Bestandteil der Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl sein.

Bauteilgeometrie

Die im Karosseriebau dominierenden Fertigungstechnologien weisen bei der Erzeugung erforderlicher Bauteilgeometrien Stärken und Schwächen auf, die im Rahmen der Fertigungstechnologie-Auswahl beachtet werden müssen (SCHUMACHER 2021, S. 78 ff.; SCHULZ 2021, S. 7 ff.). Tiefziehbauteile sollten keine Hinterschneidungen und keine kleinen Radien aufweisen, um die Herstellbarkeit zu gewährleisten und Falten- oder Rissbildung zu vermeiden (KUMKE 2018, S. 64 ff.). Gussbauteile können komplexe Bauteilgeometrien annehmen, sofern die Entformbarkeit durch Entformungsschragen gewährleistet ist. Verrippungen und große Radien erhöhen die Beanspruchbarkeit der Bauteile (KLOCKE 2018, S. 34 ff.). Strangpress- und Walzprofilbauteile sollten keine starken Krümmungen oder Querschnittsänderungen aufweisen (OSTERMANN 2014, S. 457 ff.). Additiv hergestellte Bauteile unterliegen dagegen kaum geometrischen Limitationen (GEBHARDT 2016).

Mit Verweis auf den Stand der Technik aus Kapitel 3 ist festzuhalten, dass bislang keine gesamtheitliche und automatisierte Betrachtung dieser identifizierten Einflussfelder zur Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene erfolgt.

5.1.2 Expertenbasierte Bestätigung

Die auf Literaturbasis identifizierten Einflussfelder wurden zudem im Rahmen einer Expertenbefragung diskutiert (Fragebogen in Anhang C1). Ein Experte ist eine Person, deren Einschätzungen nicht zufälliger oder laienhafter Natur sind, sondern auf klarem, abrufbarem Wissen in einem bestimmten Themengebiet beruhen (MEUSER ET AL. 2009, S. 466 ff.; MAYER 2013). Für die Befragung wurden daher elf Mitarbeiter eines Automobilunternehmens aus der Karosserie-Konzeptentwicklung (fünf Personen), dem Karosserie-Einkauf (fünf Personen) und der Karosserie-Projektentwicklung (eine Person) ausgewählt. Ein für die angestrebte Befragungsstudie mittels Interviewleitfaden ausreichender Stichprobenumfang beläuft sich auf zehn bis zwanzig Personen (DÖRING ET AL. 2016, S. 373 ff.). Diese Begründung der Expertenanzahl gilt fortfolgend für die weiteren von Expertenumfragen gestützten Abschnitte dieser Dissertation. Die Inhalte der zu bearbeitenden Bögen wurden zur Vermeidung von Missverständnissen vor und während der Befragung erläutert.

Zunächst wurden die Einflussfelder durch eine geschlossene Fragestellung unter Nutzung einer *Likert-Skala* beurteilt. Die Experten sollten hierbei die Relevanz jedes Einflussfeldes anhand der folgenden Abstufungen beurteilen: ‚sehr relevant‘, ‚relevant‘, ‚neutral‘, ‚weniger relevant‘ und ‚nicht relevant‘. Abbildung 5.2 zeigt die Ergebnisse dieses geschlossenen Teils der Umfrage. Es ist ersichtlich, dass die Experten alle identifizierten Einflussfelder überwiegend mit ‚sehr relevant‘ oder ‚relevant‘ bewerteten. In einem Einflussfeld wurde einmalig die Bewertung ‚weniger relevant‘ vergeben (Abbildung 5.2, in rot). Diese Beurteilung des Einflussfeldes *Kosten* ist laut Angabe des Experten nur dann valide, wenn ein Bauteil aus konstruktiven Gründen nur mit bestimmten Technologien gefertigt werden kann. In diesem Fall sind die potenziell niedrigeren Kosten alternativer, aber nicht umsetzbarer Technologien ‚weniger relevant‘. Dieser Aspekt ist durch die Bündelung aller Einflussfelder innerhalb der Methodik berücksichtigt (Abschnitt 5.3). Die Bauteilkosten können daher grundsätzlich als relevant angesehen werden. (DELLWEG 2022, S. 98 ff.)

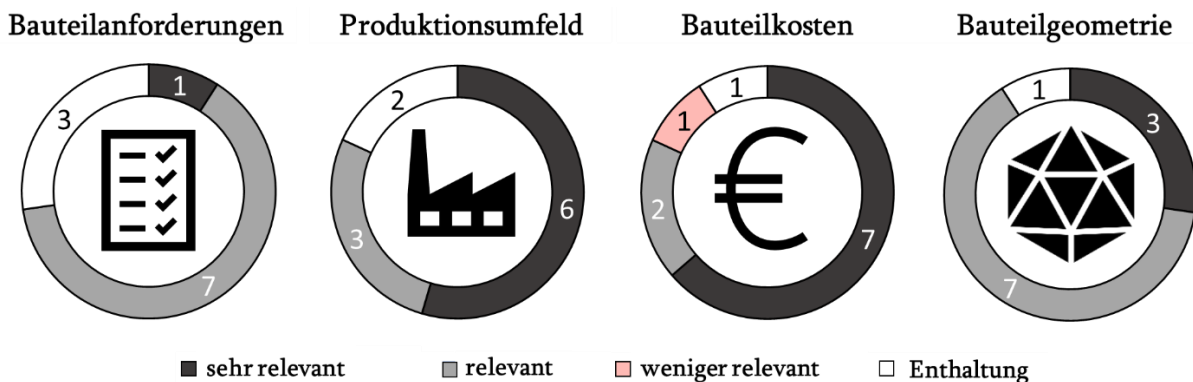


Abbildung 5.2: Anzahl der Expertenantworten je Einflussfeld und Antwortoption der Befragung (vgl. DELLWEG 2022, S. 99)

Im offenen Teil der Befragung war es den Experten zudem möglich, weitere Einflussfaktoren zur Fertigungstechnologie-Auswahl zu nennen. In den Antworten wurde der Unterschied zwischen Eigenfertigung und Fremdbezug der Bauteile betont. Zudem gilt es, die zu produzierende Stückzahl eines Bauteils zu berücksichtigen. Weiterhin sollte die CO₂-Belastung durch Logistik und Bauteilherstellung beachtet werden. Auch die Masse der Bauteile sowie der verfügbare Bauraum in der Rohkarosserie sind relevant. All diese Nennungen lassen sich jedoch den vier übergeordneten Einflussfeldern zuordnen und finden demnach Berücksichtigung in der Methodik (Tabelle 5.1).

So sind die Eigenfertigung oder der Fremdbezug sowie die Stückzahl der Bauteile den Einflussfeldern *Produktionsumfeld* und *Bauteilkosten* zuzuordnen. Auch CO₂-Aspekte sind Teil der Logistikanalysen innerhalb des *Produktionsumfeldes*. Die Masse der Bauteile ist für das *Produktionsumfeld*, die *Kosten* und die Analyse der *Bauteilgeometrie* relevant. Der verfügbare Bauraum wird durch das Einflussfeld *Anforderungen* abgedeckt. Weitere genannte

Aspekte sind aufgrund der angestrebten frühzeitigen Anwendung der Methodik nicht Teil des Betrachtungsrahmens. (DELLWEG 2022, S. 100 ff.)

Tabelle 5.1: Genannte Einflussfaktoren im offenen Teil der Umfrage inklusive Zuordnung zu Einflussfeldern

Einflussfaktoren	enthalten im Einflussfeld			
	Bauteil- anforderungen	Karosserie- Produktionsumfeld	Bauteil- kosten	Bauteil- geometrie
Eigenfertigung / Fremdbezug		✓	✓	
Stückzahl		✓	✓	
CO ₂ -Emissionen		✓	✓	
Bauteilmasse		✓	✓	✓
Architektur / Bauräume	✓			

5.2 Bausteine der Methodik

Die Methodik zur Unterstützung der Fertigungstechnologie-Auswahl erfordert die Berücksichtigung aller identifizierten Einflussfelder. Sie besteht daher aus vier sogenannten *Modulen*, die für jedes Einflussfeld Parameter generieren und prognostizieren. Hierbei besteht die Herausforderung, die alternativen Fertigungsszenarien der Bauteile objektiv und automatisiert miteinander zu vergleichen, bevor alle relevanten Informationen verfügbar sind. Der prädiktive Charakter der Module, gebildet durch die integrierte Nutzung von Prognose- und Klassifikationsmodellen, ermöglicht ein Schließen der Informationslücken. Die Module werden in Abbildung 5.3 veranschaulicht und gliedern sich wie folgt:

Anforderungsmodul (Publikation I)

Im Anforderungsmodul werden Anforderungsklassen auf Basis einer koordinatenbasierten Zuweisung der Bauteile zu vorab definierten Bauräumen abgeleitet. Die grundlegende Vorgehensweise des Anforderungsmoduls wird in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, um die Basis für ein tiefgründiges Verständnis der ersten Publikation zu schaffen.

Produktionsmodul (Publikation II)

Im Produktionsmodul wird analysiert, welchen Einfluss die zur Herstellung des Einzelbauteils gewählte Fertigungstechnologie auf die Karosserieproduktion hat. Die Abläufe und Datenstrukturen des Produktionsmoduls können zusammenfassend in Abschnitt 5.2.3 und detailliert in der zweiten Publikation nachvollzogen werden.

Kostenmodul (Publikation II)

Auf Basis der Ausgaben des Produktionsmoduls werden im Kostenmodul relevante Kostenarten prognostiziert und berechnet, um die potenziellen Fertigungsszenarien der Bauteile

wirtschaftlich miteinander zu vergleichen. Die Grundzüge des Kostenmoduls können Abschnitt 5.2.4 entnommen werden. Das Produktions- und das Kostenmodul sind eng miteinander verknüpft, weshalb sie gemeinsam in der zweiten Publikation behandelt werden.

Geometriemodul (Publikation III)

Im Geometriemodul wird die Eignung konkurrierender Technologien zur Erzeugung der erforderlichen Bauteilgeometrie bewertet. Dies geschieht über automatisierte Analysen und Klassifikationen von Bauteilbildern. Die Geometriemodul-Abläufe werden in Abschnitt 5.2.5 erläutert, Details sind Publikation III zu entnehmen.

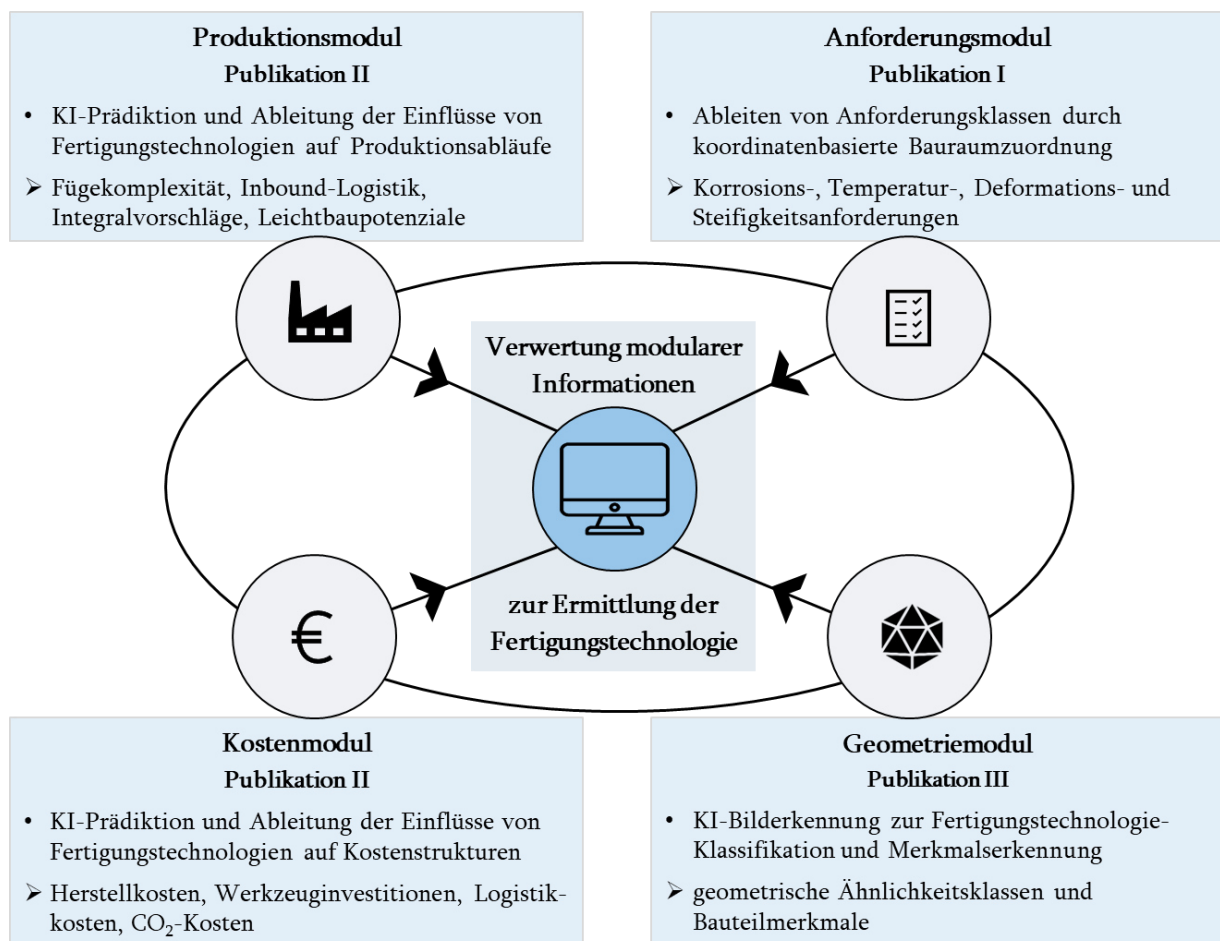


Abbildung 5.3: Die vier Module der Screening-Methodik zur Prognose und Erstellung der Datengrundlage inklusive Zuordnung zu den drei Publikationen der vorliegenden kumulativen Dissertation

Die Module müssen auf Basis technologieunabhängiger Eingangsdaten funktionieren, die in frühen Entwicklungsphasen vorliegen. Der Analyseumfang wird durch eine Stückliste des zu analysierenden Fahrzeugmodells und der enthaltenen Karosseriebauteile bestimmt. Anschließend werden grundlegende Bauteilinformationen wie Maße, Material, Masse und Volumen ergänzt. Diese Informationen liegen entweder bereits nach der Konzeptphase in Form von Schätzwerten vor oder können auf Basis des Vorgängermodells abgeleitet werden. Die resultierende Datenbasis bildet die Grundlage für die Ausführung der Module. Die

Modul-Outputs werden zur bündelnden Verwertung an die zentrale Methodik-Schnittstelle übergeben, um die automatisierte, bauteilindividuelle Bewertung der Fertigungstechnologien zu ermöglichen. Die Anwendung der Methodik resultiert in einem quantitativen Vergleich der Fertigungstechnologie-Alternativen auf Bauteilebene (siehe Abschnitt 5.3).

Der Datenfluss der Methodik und ihrer Module kann anhand des Flowcharts in Anhang D nachvollzogen werden. Es stellt den Aktivstand der Methodik nach dem Training der KI-Modelle sowie nach der Implementierung von Ableitungslogiken dar. Folglich beschränken sich die In- und Outputs auf die Anwendung der Methodik. Die für das Training der KI-Modelle und den Aufbau der Datengrundlage einmalig erforderlichen Informationen sind hingegen nicht Teil des abgebildeten Datenflusses. Die in der Programmiersprache *Python* umgesetzte prototypische Benutzeroberfläche zur praktischen Anwendung der Methodik ist in Anhang E zu finden.

5.2.1 Auswahl der Methoden des Maschinellen Lernens

Für die Datenprognose werden im Rahmen der Module die in den Grundlagen eingeführten ML-Methoden verwendet. Bei der Methodenauswahl sind Vorgehensweisen zu beachten, die in diesem Abschnitt zunächst in allgemeiner Form erläutert und im weiteren Verlauf je Modul konkretisiert werden.

Das Produktions- und das Kostenmodul fokussieren sich auf die Prognose technologischer und wirtschaftlicher Parameter im Produktentstehungsprozess durch ML-Modelle. Das Geometriemodul erweitert den Rahmen der KI durch das Themengebiet der Bildklassifikation durch CNN. Die Auswahl der Methoden und Modelle zur Datenprognose sowie zur Bildklassifikation orientiert sich an dem für datenbasierte Anwendungen etablierten Rahmenwerk *CRISP-DM* (Cross Industry Standard Process for Data Mining). Dieses gliedert sich in die Schritte *Data Understanding*, *Data Preparation*, *Modeling*, *Evaluation* und *Deployment* (WIRTH ET AL. 2000):

- i. *Data Understanding*: Zunächst werden Bauteildaten und -bilder aus vergangenen Produktentwicklungen gesammelt und strukturiert.
- ii. *Data Preparation*: Nach der Feature-Auswahl werden die Daten normiert und in Trainings- und Validierungsdatensätze geteilt. Bauteilbilder werden zudem um fertigungstechnologische Informationen ergänzt.
- iii. *Modeling*: Anschließend werden konkurrierende ML-Modelle zur Datenprognose (Regression, Random Forest, Neuronales Netz) und zur Bildklassifikation (verschiedene CNN-Architekturen) trainiert und validiert.

- iv. *Evaluation*: Die Prognosegüten der Modelle werden grafisch (s. Publikationen II und III) und anhand statistischer Kenngrößen wie der mittleren absoluten Abweichung oder des R²-Wertes miteinander verglichen.
- v. *Deployment*: Der je Anwendungsfall ermittelte *Best Performer* wird anschließend in die Methodik implementiert.

5.2.2 Anforderungsmodul

Ziel des Anforderungsmoduls ist eine frühzeitige Ableitung von Bauteilanforderungen. Grundlage für die Modulanwendung ist die Ermittlung relevanter Anforderungskategorien (s. Abschnitt 5.1.1). Die Herausforderung für das in Publikation I detailliert beschriebene Modul besteht darin, dass Anforderungen in einer frühen Phase der Produkt- und Bauteilentwicklung noch nicht auf Bauteilebene definiert sind (BUECHLER ET AL. 2021). Um diese Informationslücke zu schließen, musste folglich eine Vorgehensweise entwickelt werden, die auf Basis frühzeitig bekannter Bauteilinformationen anwendbar ist (Abbildung 5.4). Der Ort, an dem die Bauteile in der Karosserie verbaut werden, wird bereits in der Karosseriekonzeptphase durch die drei Koordinatenachsen in x-, y- und z-Richtung definiert. Diese Definition bezieht sich üblicherweise auf den Abstand des Bauteilschwerpunkts zum Mittelpunkt der Frontachse. Die folgenden Schritte beruhen daher auf der Bauteilkoordinatenposition in der Rohkarosserie.

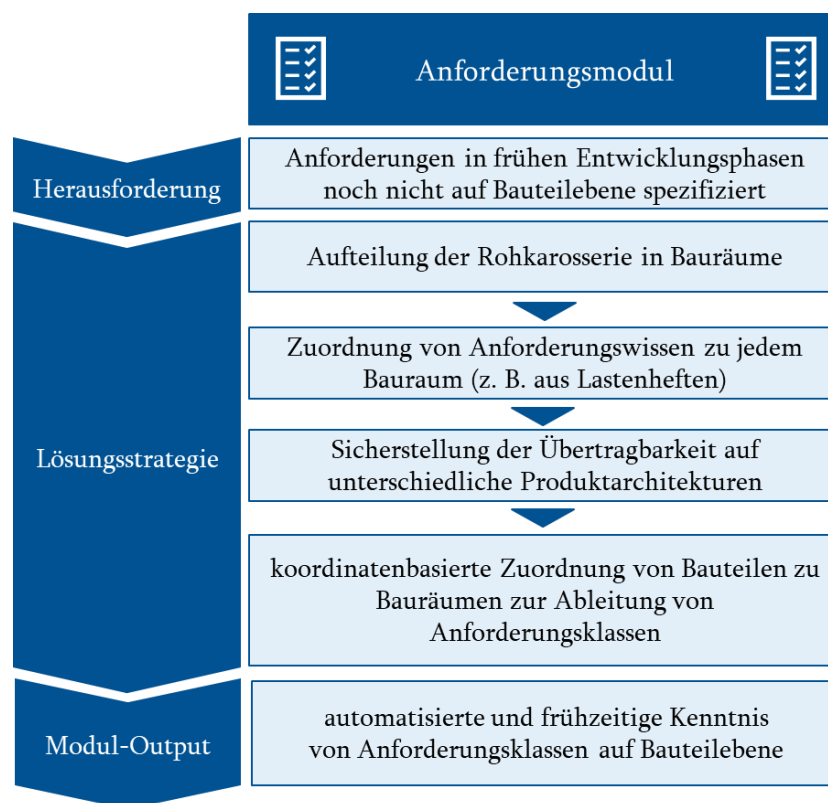


Abbildung 5.4: Vorgehensweise zur Anwendung des Anforderungsmoduls

Um eine prädiktive und zuverlässige Anforderungsermittlung zu gewährleisten, wird die Karosserie im ersten Schritt koordinatenbasiert in sogenannte *Bauräume* aufgeteilt (Anhang 2 in REIMANN 2020). Dabei sind konzeptionelle Unterschiede zwischen verbrennungsmotorischen und batterieelektrischen Fahrzeugen zu beachten.

Im zweiten Schritt wird das Back-End des Anforderungsmoduls mit Informationen versorgt, indem jedem Bauraum auf Basis von Expertenwissen und Lastenheften geltende Anforderungen zugeordnet werden. Im Zuge dessen wird eine klassenbasierte Logik eingeführt, um die spätere Verwertung der Informationen zu erleichtern. So werden Temperaturanforderungen auf der Grundlage von Lastenheften in die Anforderungsklassen *gering* (bis 95 °C), *mittel* (95 °C – 150 °C) und *hoch* (über 150 °C) eingeteilt. Korrosionsbeanspruchungen können die Ausprägung *gering* (dichte und trockene Karosseriebereiche), *mittel* (spritzwasserbelastet) und *hoch* (stark wasserbelastet) annehmen (REIMANN 2020, S. 65 ff.). Bezüglich der Deformation gelten insbesondere entlang der Karosserielastpfade *hohe* Anforderungen, Bauräume in der Nähe der Fahrgastzelle erfordern dagegen *hohe* Steifigkeitsanforderungen (PEIS 2022, S. 67 ff.).

Die ersten beiden Schritte sind einmalig zu durchlaufen. Alle weiteren Anwendungen des Anforderungsmoduls erfordern lediglich die Ausführung der nun folgenden Schritte.

Da mithilfe des Anforderungsmoduls verschiedene Fahrzeugmodelle unterschiedlicher Maße analysiert werden sollen, ermöglicht der dritte Schritt eine automatisierte Anpassung der definierten Bauräume. Dies geschieht durch Fahrzeugmaßtabellen, die für das Strecken oder Stauchen der Bauräume in x-, y- und z-Koordinatenrichtung verwendet werden. Diese Tabellen umfassen Informationen wie Fahrzeugbreite, -länge und -höhe sowie den Radstand. Die Logik, welches Fahrzeugmaß welchen Bauraum beeinflusst, ist im Anforderungsmodul hinterlegt (REIMANN 2020, S. 81 ff.).

Im vierten Schritt wird die automatisierte, koordinatenbasierte Zuweisung aller Bauteile zu den definierten Bauräumen umgesetzt (REIMANN 2020, S. 72 f.). Danach werden die hinterlegten Anforderungen automatisiert abgeleitet. Als Resultat des Anforderungsmoduls ergibt sich folglich eine automatisierte, frühzeitige Kenntnis von Anforderungen auf Bauteilebene.

Eine beispielhafte Ausgabe des Anforderungsmoduls ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Bauteil A wird über einen Koordinatenabgleich Bauraum 7 zugewiesen, woraufhin die aufgeführten Anforderungsklassen abgeleitet werden.

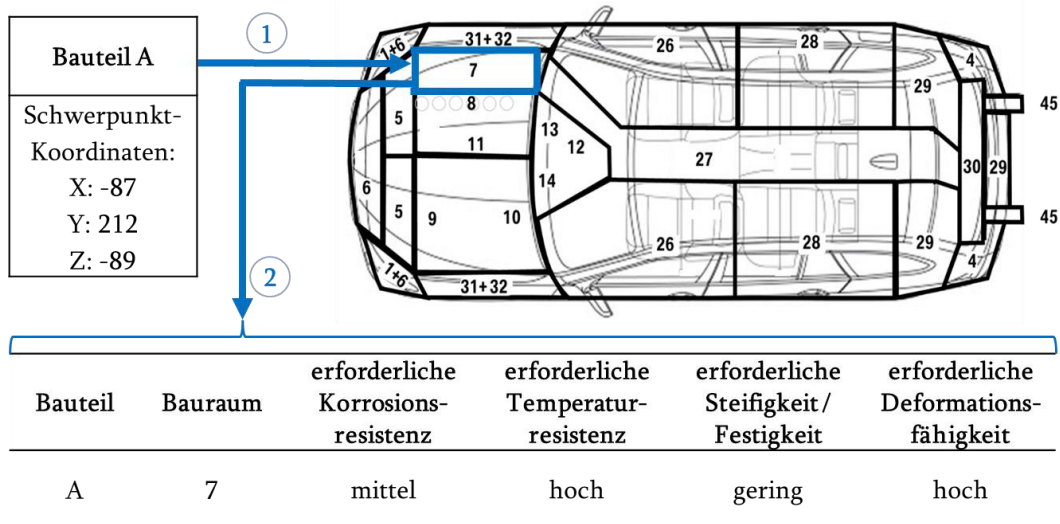


Abbildung 5.5: Beispielhafter Output des Anforderungsmoduls für Bauteil A

5.2.3 Produktionsmodul

Das Produktionsmodul hat die Prognose und Ableitung produktionsbezogener Parameter zum Ziel. Die resultierenden Parameter erweitern die Datenbasis für das unmittelbar anschließende Kostenmodul (HALLWEGER 2021). Anwendung und Validierung des Produktionsmoduls können in Publikation II detailliert nachvollzogen werden (BUECHLER ET AL. 2022).

Die besondere Herausforderung des Produktionsmoduls besteht in der Analyse des Einflusses der Bauteilfertigungstechnologie auf die Abläufe der Karosserieproduktion vor Beginn der Bauteilkonstruktion. Daher wurde eine prädiktive Lösungsstrategie entwickelt, die auf Basis frühzeitig verfügbarer Bauteilinformationen angewendet wird (Abbildung 5.6).

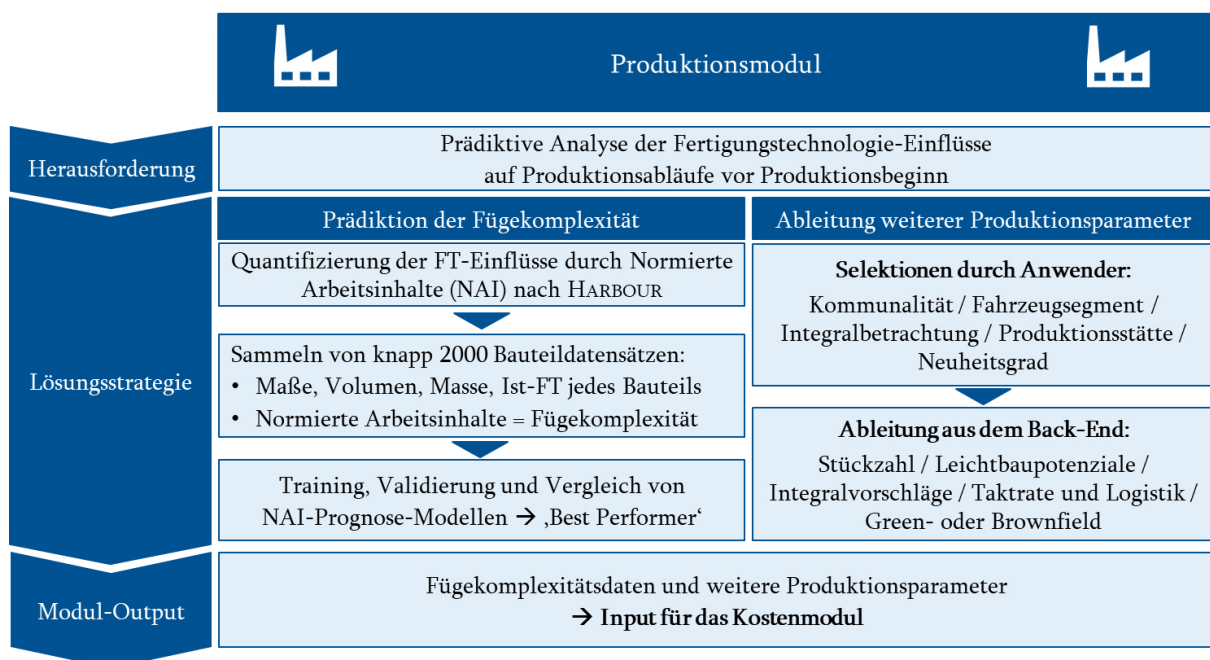


Abbildung 5.6: Vorgehensweise zur Anwendung des Produktionsmoduls; FT: Fertigungstechnologie

Im Gegensatz zu den bauraumabhängigen Anforderungsklassen des Anforderungsmoduls unterscheiden sich die vom Produktionsmodul generierten Daten in Abhängigkeit der Fertigungstechnologie. Um eine solche fertigungstechnologiebezogene Differenzierung zu ermöglichen, werden die im Karosseriebau relevanten *Fertigungsszenarien* für jedes Bauteil erstellt: Tiefziehen, Aluminiumdruckguss, Strangpressen, Walzprofilieren und Additive Fertigung. Neben diesen Szenarien ist außerdem die Art der Bauteilbeschaffung zu unterscheiden: Eigenfertigung, Komponentenfertigung oder Fremdbezug.

Prädiktion der Fügekomplexität. In der Lösungsstrategie wird zunächst angestrebt, die Einflüsse der Fertigungstechnologie eines Einzelbauteils auf die Produktionsabläufe zu quantifizieren. Dies kann in einem ersten Schritt durch die sogenannten *Normierten Arbeitsinhalte (NAI)* erfolgen, welche die Fügekomplexität eines Einzelbauteils in der Karosserieproduktionslinie auf Basis der Fügeverfahren quantitativ ausdrücken. Das Punktschweißen verursacht beispielsweise einen NAI-Wert von 1 je erforderlichem Schweißpunkt. Analog sind anderen Fügeverfahren entsprechende NAI-Werte zugewiesen (HARBOUR 2014). Je mehr NAI der Fügeprozess eines Bauteils verursacht, desto aufwändiger ist der Fügevorgang und desto höher sind die resultierenden Kosten.

Zur Vorbereitung einer prädiktiven NAI-Analyse werden im zweiten Schritt die Variablen selektiert. Dabei werden Bauteildaten erfasst, die sich auf die NAI-Werte auswirken und zudem das Kriterium der frühzeitigen Verfügbarkeit erfüllen. Zum einen haben die Bauteilgröße und -masse Einfluss auf die Anzahl und Komplexität der erforderlichen Fügevorgänge. Zum anderen ist das Material relevant, da Aluminiumbauteile zur Prävention von galvanischer Kontaktkorrosion in der stahldominierten Karosseriebauweise kalte Füge- und Klebetechniken mit hohen NAI-Werten erfordern (WEISS 2019, S. 13). Folgende Bauteilinformationen dienen demnach als Eingangsgrößen: Maße, Volumen, Masse, Material und Ist-Fertigungstechnologie. Ferner können Ist-NAI-Werte auf Basis vorhergehender Bauteilgenerationen als Zielgröße bzw. Label erfasst werden. Die Datenbasis sollte circa 2000 Datensätze umfassen, um ein erfolgreiches Training der NAI-Prädiktionsmodelle zu gewährleisten (BUECHLER ET AL. 2022, S. 303).

Im dritten Schritt folgen das Training, die Validierung und der Vergleich von ML-Modellen zur fertigungstechnologieabhängigen NAI-Prognose. Der Vergleich basiert auf statistischen Kenngrößen wie dem Bestimmtheitsmaß R^2 oder der mittleren absoluten Abweichung sowie auf grafischen Analysen. Die aufgrund der frühzeitigen Anwendung des Produktionsmoduls in der Produktentwicklung zu erwartenden Unschärfen erfordern den Einsatz geeigneter Methoden zur Verwertung der Modul-Ergebnisse (Abschnitt 5.3). Die erreichten Prognosegenauigkeiten der alternativen ML-Modelle sind Publikation II zu entnehmen. Es ist festzuhalten, dass die NAI-Prognosemodelle im niedrigen NAI-Bereich ($NAI < 50$), der

neunzig Prozent der Bauteile umfasst, bessere Ergebnisse ermöglichen als im hohen NAI-Bereich ($NAI > 50$). Dies ist durch eine geringere Menge an Trainingsdaten im hohen NAI-Bereich erklärbar, die durch die begrenzte Anzahl an großvolumigen Bauteilen (v. a. Gussbauteile) mit entsprechend hohen NAI-Werten zu begründen ist. Nach dem Training wird das beste Modell in den Aktivstand der Methodik integriert. (BUECHLER ET AL. 2022; HALLWEGER 2021)

Ableitung weiterer Produktionsparameter. Neben der Prädiktion der Fügekomplexität leitet das Produktionsmodul auf Basis von Benutzerselektionen und vorab implementierten Back-End-Daten weitere Parameter ab (HALLWEGER 2021, S. 92 ff.):

- i. Zunächst kann der Methodik-Anwender die sogenannte *Kommunalität* der Bauteile bestimmen, sofern diese Information nicht bereits in den eingelesenen Stücklisten enthalten ist. Sie gibt an, in welchen Fahrzeugmodellen die Bauteile verbaut werden. Die Bestimmung der Kommunalität erfolgt über eine Auswahlmaske innerhalb des Prototyps zur Anwendung der Methodik (HALLWEGER 2021, S. 95). Auf Basis der im Back-End hinterlegten Stückzahlen jedes Fahrzeugmodells kann die zu produzierende Gesamtmenge für jedes Bauteil automatisiert berechnet werden.
- ii. Weiterhin ist relevant, welches Fahrzeugsegment (z. B. Sport Utility Vehicle, kurz SUV, oder Limousine) im Fokus der Analyse steht, denn jedem Segment werden sogenannte *Leichtbaupotenziale* zugewiesen. Sie definieren, welcher Geldbetrag pro eingespartem Kilogramm von den Bauteilkosten abgezogen werden darf. Die Intention ist folglich, Kostennachteile aluminiumbasierter Verfahren auszugleichen, um Leichtbauziele zu erreichen. Die potenzielle Masse-Ersparnis wird auf Basis der Ist-Bauteilmasse und des Dichteverhältnisses von Aluminium zu Stahl ($= 0,34$) für jedes Fertigungsszenario automatisiert berechnet.
- iii. Ferner können für die Szenarien ‚Guss‘ und ‚Additive Fertigung‘ Vorschläge zur Integralbauweise unterbreitet werden. Dabei werden bislang getrennt gefertigte Tiefziehbauteile zu einem neuen, größeren Bauteil fusioniert. Die Vorschläge werden auf Basis einer automatisierten Analyse benachbarter Bauteile erstellt. Kriterien zur Integraleignung sind hierbei vergleichbare Wandstärken, Materialien und zu erfüllende Anforderungen der angrenzenden Bauteile. Sind alle diese Kriterien erfüllt, wird der Datenbasis ein neues, fiktives Integralbauteil hinzugefügt.
- iv. Auch die im Fokus der Methodik-Anwendung stehende Karosserieproduktionsstätte ist von Bedeutung. Die Kenntnis der Produktionsstätte ermöglicht die Ermittlung zurückzulegender Bauteillostikwege vom Lieferanten oder von der Komponentenfertigung zum Standort der Karosserieproduktion. Im Falle neuer Lieferanten ist das Back-

End des Produktionsmoduls zu aktualisieren. Weiterhin wird die Taktrate der Produktionslinie automatisch aus dem Back-End abgeleitet, da auch diese für die Kostenberechnungen des Kostenmoduls relevant ist.

- v. Ferner ist zu unterscheiden, ob ein vollständig neues oder ein auf Basis bestehender Fahrzeugmodelle abgeleitetes Automobil analysiert wird. Dieser Aspekt ermöglicht eine Differenzierung zwischen einer *Greenfield*- (vollständig neue Produktionslinie) und einer *Brownfield-Planung* (teilweise Übernahme bestehender Linien). Dieser Unterschied wirkt sich wiederum auf erforderliche Investitionen in die Karosserieproduktionslinie aus.

Die Datenstruktur der Ausgabe des Produktionsmoduls ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Beispielbauteil A wird zeilenweise nach den fünf verschiedenen Fertigungsszenarien bewertet. So finden sich die NAI-Prognose sowie weitere Produktionsparameter des Szenarios *Tiefziehen* in der ersten Zeile der Tabelle wieder. Die zweite Zeile, das *Guss-Szenario*, zeigt, dass die Umsetzung als Gussbauteil Leichtbaupotenzial bietet, die NAI im Vergleich zur Umsetzung als Tiefziehteil jedoch steigen. Detaillierte Erläuterungen der Leichtbaupotenziale sind Publikation II zu entnehmen (BUECHLER ET AL. 2022, S. 307). Ferner sind beim Fremdbezug des Bauteils A im Guss-Szenario längere Logistikwege bis ins Werk zu erwarten als im Falle einer Tiefzieh-, Strangpress- oder AM-Umsetzung.

Tabelle 5.2: Beispielhafter Produktionsmodul-Output für Bauteil A zur Übergabe an das Kostenmodul

Input-Daten				KI-Prognose	abgeleitet und berechnet auf Basis der Nutzereingaben und implementierter Back-End-Daten				
Bauteil	Fertigungsszenario	Material/Werkstoff	geometrische Daten		NAI	Taktrate	Greenfield/Brownfield	Logistik bei Komponentenfertigung	Logistik bei Fremdbezug	Leichtbaupotenzial
A	Tiefziehen	Stahl	...	11,6	45 Stück/h	Greenfield	-	54 km	-
A	Druckguss	Aluminium	...	38,1	45 Stück/h	Greenfield	82 km	110 km	42,5 %
A	Strangpressen	Aluminium	...	22,3	45 Stück/h	Greenfield	-	92 km	34 %
A	Walzprofilieren	Stahl	...	11,9	45 Stück/h	Greenfield	-	112 km	-
A	Additive Fertigung	Aluminium	...	34,3	45 Stück/h	Greenfield	82 km	73 km	52 %

5.2.4 Kostenmodul

Auf der Grundlage der vom Produktionsmodul übergebenen Daten zielt das Kostenmodul auf einen fertigungstechnologieabhängigen Vergleich von Bauteilkosten ab (KOLTER 2020). Die Herausforderung besteht hierbei in einer frühzeitigen Kostenanalyse aller Fertigungs-

szenarien vor der Bauteilentstehung, weshalb eine prognosebasierte Lösungsstrategie entwickelt wurde (Abbildung 5.7). Die Anwendung und Validierung der Lösungsstrategie ist Publikation II zu entnehmen (BUECHLER ET AL. 2022).

Im ersten Schritt der Lösungsstrategie werden zunächst historische Kostendaten gesammelt, um das anschließende Training von Prädiktionsmodellen zu ermöglichen. Je nach Kostenart sollte die Datenbasis circa 1500 Datensätze umfassen (BUECHLER ET AL. 2022, S.308 ff.). Folgende Kennzahlen sind im Zuge eines Technologievergleichs relevant und werden vom Kostenmodul adressiert:

- Herstellkosten der Bauteile
- Investitionen in die Bauteilfertigung (z. B. Gießwerkzeuge) und die Karosserieproduktionslinie (z. B. Fügetechnik)
- Logistikkosten für den Transport der Bauteile an die Karosserieproduktionsstätte
- CO₂-Kosten je Kilogramm CO₂ (unternehmensinterne Werte in €/kg CO₂)

CO₂-Kosten fungieren als unternehmensinterner Mechanismus, der verursachtes CO₂ in Kosten umrechnet, um rechtliche Vorgaben und ethische Ziele zu beachten. Das Kostenmodul berücksichtigt logistikbezogene CO₂-Emissionen. Eine Einbeziehung der durch die Bauteilherstellung verursachten CO₂-Emissionen ist auf Basis der Bauteilmasse möglich, erfordert jedoch eine unternehmensinterne Datengrundlage (PEIS 2022, S. 93 ff.).

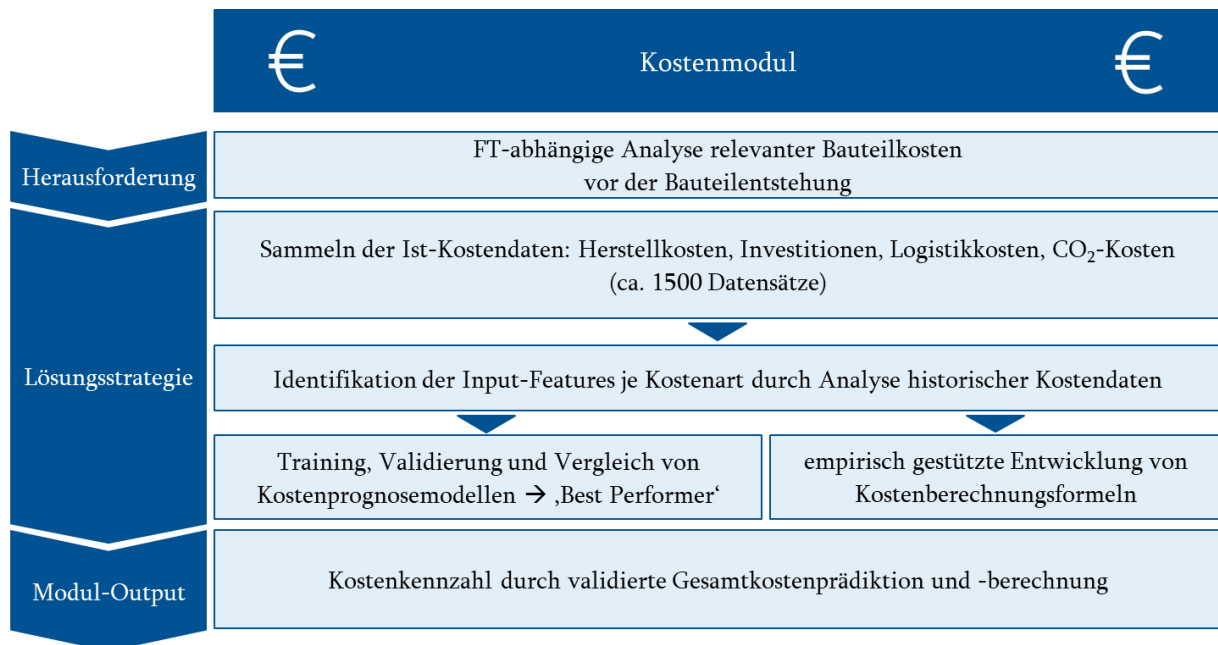


Abbildung 5.7: Vorgehensweise zur Anwendung des Kostenmoduls

Um ein erfolgreiches Training zu gewährleisten, unterstützen Clustering-Methoden und Korrelationsanalysen im zweiten Schritt die Variablenselektion, um die Eignung verfügbarer Eingangsgrößen zur Prognose der Kostenarten zu prüfen (BUECHLER ET AL. 2022, S. 309). Diese Eingangsgrößen umfassen die Maße, das Volumen, die Masse und das Material des

jeweiligen Bauteils, die bisherige Bauteilfertigungstechnologie sowie vom Produktionsmodul generierte Informationen. Bezüglich verwendbarer Eingangsgrößen ist anzumerken, dass diese für alle Fertigungsszenarien relevant sein müssen, weshalb technologiespezifische Parameter (z. B. Rohplatinengröße für das Tiefziehen) ausscheiden.

Im dritten Schritt erfolgen das Training und die Validierung verschiedener ML-Ansätze zur Prognose der eingeführten Kostenarten (Abbildung 5.7, linker Pfad). Die konkurrierenden Modelle werden unter Anwendung einer Rastersuche aufgebaut und anhand statistischer Kennzahlen (mittlere Abweichung, Varianz, R²-Wert) sowie grafischer Analysen miteinander verglichen. Das leistungsstärkste Vorhersagemodell je Kostenart wird in den Aktivstand des Kostenmoduls implementiert. Die erreichten Prognosegenauigkeiten der verglichenen ML-Modelle sind Publikation II zu entnehmen (BUECHLER ET AL. 2022, S. 310 ff.). Analog zum Produktionsmodul begründet die frühzeitige Anwendung des Kostenmoduls den Einsatz von Unschärfemethoden zur Kompensation von Abweichungen. Der Kostenvergleich der Fertigungsszenarien geschieht zudem relativ und toleriert daher technologieübergreifende Abweichungen (*Kostenkennzahl* in Tabelle 5.3).

Zusätzlich werden mithilfe der vom Produktionsmodul übergebenen NAI die Investitionen und Fertigungskosten an der Karosserieproduktionslinie berechnet (Abbildung 5.7, rechter Pfad). Die Formeln zur Berechnung wurden auf Basis historischer Kostendaten über einen Dreisatz abgeleitet (Formeln 4 bis 8 in BUECHLER ET AL. 2022, S. 313). Dieser Dreisatz berücksichtigt unter anderem die Taktrate und die Planungsart der Produktionslinie (Green- oder Brownfield). Es ist demnach bekannt, welche Kosten pro NAI je nach Produktionsstätte und -linie verursacht werden.

Der abgeschlossene Modellaufbau erlaubt die eigentliche Anwendung des Kostenmoduls zur Prädiktion und Berechnung der Kostenarten je Bauteil und Fertigungsszenario. Anschließend werden, abhängig von den Bezugsarten (Eigenfertigung, Komponentenfertigung oder Fremdbezug), die Gesamtkosten jedes Szenarios auf Bauteilebene ermittelt (BUECHLER ET AL. 2022, S. 315).

Aus der Anwendung des Kostenmoduls resultiert eine prädiktive Kostenanalyse der Fertigungsszenarien auf Bauteilebene (Tabelle 5.3). Im Falle des Beispielbauteils A setzt sich das Walzprofilieren im Kostenvergleich als günstigste Fertigungstechnologie durch. Die Technologiealternativen (b' in Tabelle 5.3) werden in ein Verhältnis zu dieser kostengünstigsten Technologie (a') gesetzt. Dieses Verhältnis repräsentiert die Kostenkennzahl ($\frac{a'}{b'}$), die eine wichtige Eingangsgröße für die Unschärfeansätze in der zentralen Methodik-Schnittstelle darstellt.

Tabelle 5.3: Beispielhafte Datenstruktur des Kostenmodul-Outputs für Bauteil A

Input-Daten					Kostenprognosen und -berechnungen					
Bauteil	Fertigungs-szenario	Material/ Werkstoff	Geometrie-daten	Output Produktions-modul	Prognosen/ Berechnungen je Kostenart	Bezugs-szenario	Kosten je Bauteil	bester Preis	,beste' Technologie	Kosten- kennzahl
A	Tiefziehen	Stahl	...	...	...	Eigenfertigung	2,40 €	2,12 €	Walz- profilieren	0,88
A	Druckguss	Aluminium	...	...	...	Komponenten- fertigung	5,67 €	2,12 €	Walz- profilieren	0,37
A	Strangpressen	Aluminium	...	...	...	Fremdbezug	4,22 €	2,12 €	Walz- profilieren	0,50
A	Walzprofilieren	Stahl	...	...	...	Fremdbezug	2,12 €	2,12 €	Walz- profilieren	1
A	Additive Fertigung	Aluminium	...	...	...	Komponenten- fertigung	9,67 €	2,12 €	Walz- profilieren	0,22

5.2.5 Geometriemodul

Das Geometriemodul verfolgt das Ziel einer automatisierten Analyse der Eignung der Fertigungstechnologie-Alternativen zur Erzeugung der erforderlichen Bauteilgeometrie (SCHULZ 2021). Die Anwendung und Validierung des Geometriemoduls kann in Publikation III nachvollzogen werden (BUECHLER ET AL. 2023).

Das Modul vereint eine fertigungstechnologische Bauteilbildklassifikation und eine Objekterkennung zur Identifikation von Bauteilmerkmalen (Abbildung 5.8).

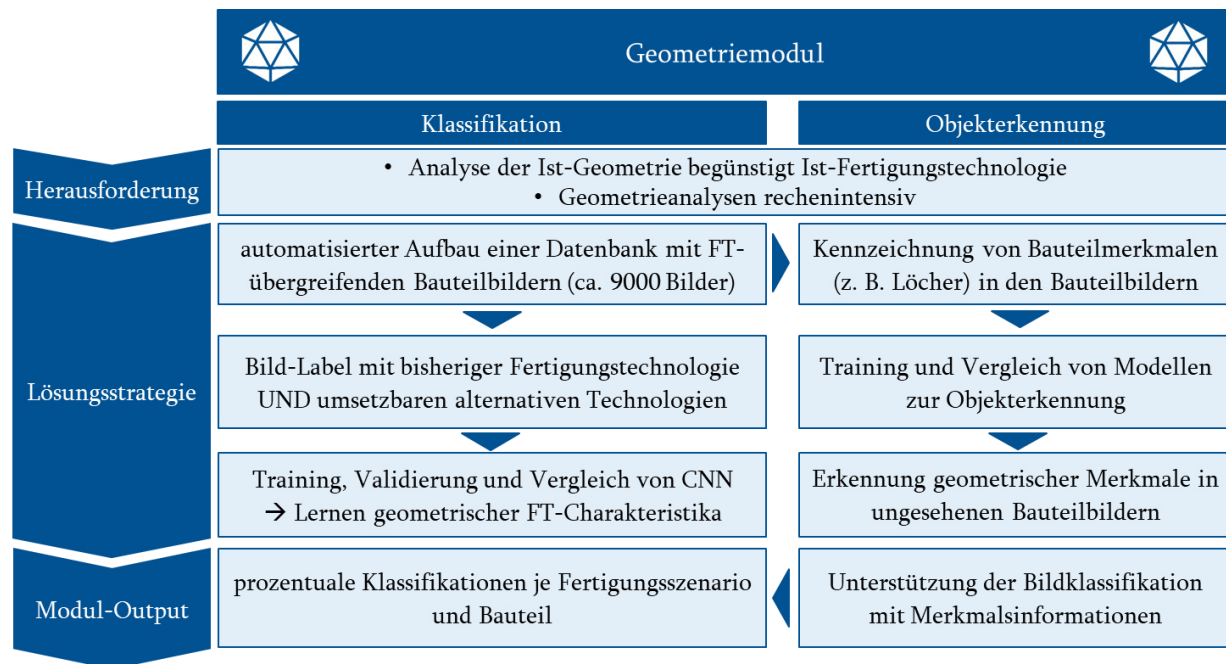


Abbildung 5.8: Vorgehensweise des Geometriemoduls zur Bildklassifikation und Objekterkennung

Der bildbasierte Ansatz wurde aufgrund folgender Argumente gewählt:

- i. Die angestrebten kurzen Anwendungszeiten des Geometriemoduls müssen auch bei der Analyse einer Vielzahl von Bauteilen gewährleistet sein. Ansätze in *Computer-Aided-Design-(CAD)-Umgebungen* zur Untersuchung dreidimensionaler Objekte erfordern jedoch lange Rechenzeiten (BUECHLER ET AL. 2023, S. 15).
- ii. Die durchgehende Verwendung von Bauteilbildern ermöglicht eine enge Verzahnung von Klassifikation und Objekterkennung und somit einen effizienten Datenfluss innerhalb des Geometriemoduls.
- iii. Die Unschärfeansätze der Methodik tolerieren Abweichungen der modular generierten Eingangsgrößen. Die angestrebten Genauigkeiten der Klassifikation und der Objekterkennung können mit dem bildbasierten Ansatz erreicht werden.
- iv. Nicht alle relevanten Bauteilmerkmale (Löcher, Prägungen, Flansche, geschlossene Profile) sind in möglichen Alternativen zum bildbasierten Vorgehen, beispielsweise durch die Analyse von STEP-Modelldateien, auswertbar.

Bildklassifikation. Hauptaufgabe des Geometriemoduls ist eine fertigungstechnologische Klassifikation von Bauteilbildern, um die Eignung jeder Fertigungsalternative zur Erzeugung der erforderlichen Bauteilgeometrie zu beurteilen. Die zu bewältigende Herausforderung besteht darin, eine Bevorzugung des fertigungstechnologischen Status quo der Bauteile zu vermeiden. Die Analyse eines Tiefziehbauteils würde beispielsweise zu einer positiven Beurteilung der geometrischen Eignung des Tiefziehens führen. Daher wurde eine Lösungsstrategie entwickelt, die dieser Problemstellung entgegenwirkt (Abbildung 5.8, linker Pfad).

Im ersten Schritt wird eine Bilddatenbank erstellt. Nach den Erkenntnissen der Geometriemodul-Anwendung sollte diese Datenbasis circa 9000 Bauteilbilder umfassen (BUECHLER ET AL. 2023, S. 12). Im Anwendungsbeispiel ermöglicht ein *Visual-Basics-for-Applications-(VBA)-Skript* die automatische Ausleitung von sieben Bildern pro Bauteil aus CAD-Programmen (z. B. CATIA). Diese sieben Perspektiven resultieren aus den Hauptansichten eines CAD-Programms: *oben, unten, hinten, vorne, Seite 1, Seite 2* und *isometrisch*.

Im zweiten Schritt werden die Bauteilbilder mit der bisherigen Fertigungstechnologie aus vorangegangenen Produktgenerationen gekennzeichnet. Zusätzlich werden alternative Technologien zugeordnet, die im Falle einer Änderung der Technologie einen geringen *Umkonstruktionsaufwand* erfordern (SCHULZ 2021, S. 86). Den Bildern eines Bauteils kann folglich mehr als nur eine Technologie zugewiesen werden, was eine Abschwächung des Bias zugunsten der bisherigen Fertigungstechnologie ermöglicht.

Darauf aufbauend können im dritten Schritt CNN-Architekturen (*ResNet* und *VGG16*) trainiert und miteinander verglichen werden. Die Modelle lernen im Training, geometrische Charakteristika der Bauteile für verschiedene Fertigungstechnologien zu erkennen. Anschließend werden die *Best Performer* anhand von statistischen Kenngrößen und Genauigkeitsanalysen ausgewählt und in den Aktivstand der Methodik implementiert. Die Analyse der Funktionalität und die Architektur des besten Modells können Publikation III entnommen werden (BUECHLER ET AL. 2022, S. 12 f.).

Nach diesen einmalig auszuführenden Schritten folgt die Anwendung des Geometriemoduls mit neuen Bilddaten. Die resultierenden Klassifikationsergebnisse je Bauteil und Fertigungsszenario werden als geometrische Eignung jeder Technologie interpretiert. Die Ergebnisausgabe folgt nicht der üblichen binären Klassifikationslogik (zugehörig, nicht zugehörig). Vielmehr werden die Fertigungstechnologieklassen in prozentualen Zugehörigkeitsgraden ausgegeben, wodurch die Identifikation mehrerer Klassen je Bauteil ermöglicht und der Bias zugunsten der bisherigen Fertigungstechnologie abgeschwächt wird. Diese prozentualen Klassifikationswerte repräsentieren eine weitere Eingangsgröße für die Unschärfeansätze der zentralen Methodik-Schnittstelle. Abbildung 5.9 zeigt die sieben Perspektiven sowie einen beispielhaften Output der Bildklassifikation für Bauteil A.

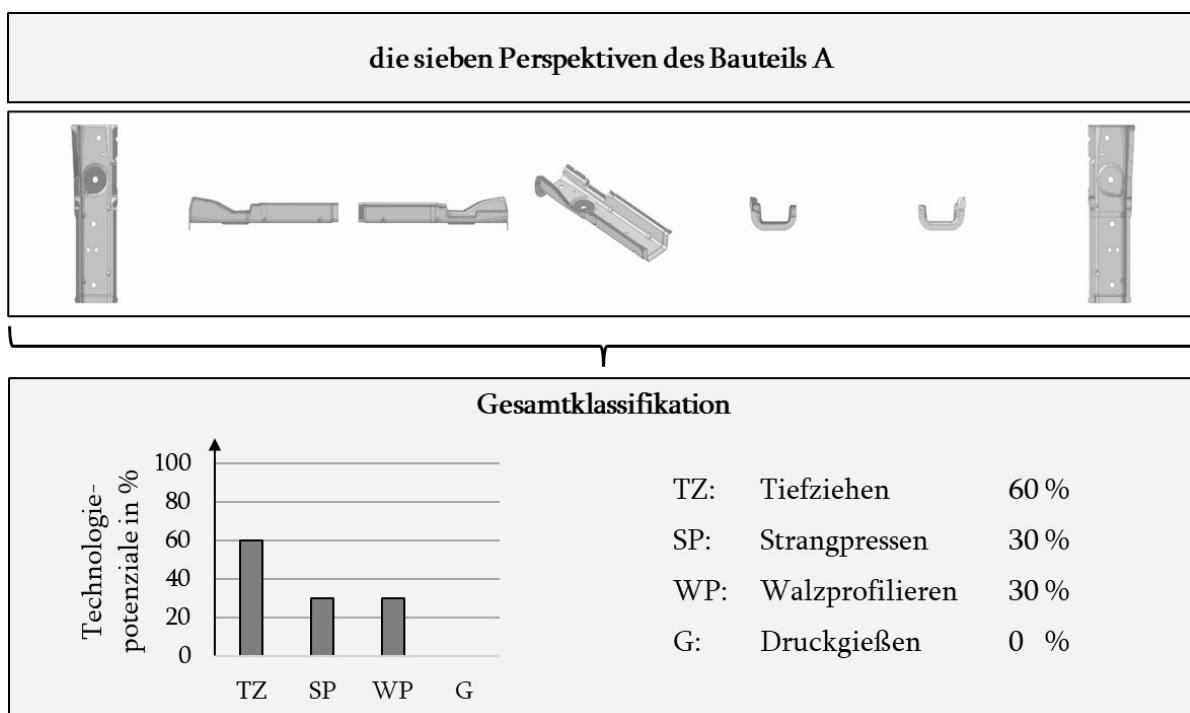


Abbildung 5.9: *Beispielhafter Output der Bildklassifikation des Geometriemoduls für Bauteil A*

Das Neuronale Netz zur Bildklassifikation erkennt in diesem Beispiel vor allem geometrische Merkmale vorab gesehener Tiefziehbauteile, da das betreffende Bauteil in Vorgänger-

projekten mit diesem Verfahren gefertigt wurde. Jedoch ist ebenso die angestrebte Identifikation alternativer Technologien festzustellen, die der aktuellen Beschaffenheit geometrisch nahe sind. So erkennt das Neuronale Netz auch Charakteristika von Strangpress- und Walzprofilbauteilen, was durch den länglichen Charakter des Bauteils zu erklären ist. Da die Additive Fertigung kaum geometrischen Einschränkungen unterliegt und es nur wenige für das Modelltraining nutzbare AM-Karosserieteile gibt, ist die merkmalsbasierte Klassifikationslogik für diese Technologie ungeeignet. Daher kommen anstelle des Geometriemoduls geometrische Kriterien zur Selektion potenzieller AM-Bauteile zum Einsatz, die in Abschnitt 5.3.3 erläutert werden.

Objekterkennung. Neben der Kernaufgabe der Bildklassifikation beinhaltet das Geometriemodul außerdem eine Objekterkennung, deren Ergebnis die Klassifikation unterstützt. Sie ermöglicht die Identifizierung von Bauteilmerkmalen innerhalb der Bauteilbilder (Abbildung 5.8, rechter Pfad).

Im ersten Schritt der Lösungsstrategie werden Bauteilmerkmale innerhalb der Bilder markiert und mit den Kategoriebezeichnungen (z. B. Löcher, Kerben) beschriftet. Dies kann z. B. mit dem Softwaretool *LabelImg* erfolgen (SAGER ET AL. 2021).

Anschließend können im zweiten Schritt ML-Ansätze zur Objekterkennung mit dieser Datenbasis trainiert und validiert werden. Die in Publikation III dokumentierte Anwendung zeigt, dass der *YOLO-Ansatz* schnelle Rechenzeiten sowie hohe Präzisions- und Sensitivitätswerte ermöglicht (REDMON ET AL. 2015, BUECHLER ET AL. 2023, S. 14 f.).

Das trainierte Modell kann im darauffolgenden dritten Schritt mit neuen Bauteilbildern angewendet werden. Die Merkmale werden in den einzelnen Bildern erkannt, markiert und gezählt. Die sieben Perspektiven bzw. Bilder müssen anschließend zur Ermittlung der Merkmalsanzahl je Bauteil und Merkmalskategorie ausgewertet werden, da beispielsweise ein das Bauteil durchdringendes Loch in mehreren Ansichten erkannt und markiert werden könnte. Für die Gesamtmerkmalsanzahl des Bauteils darf dieses Loch jedoch nur einmal berücksichtigt werden. Bei einem geometrisch einfachen Bauteil kann dieser Herausforderung durch die Auswertung eines einzigen Bildes bzw. einer einzigen Perspektive und den Ausschluss der restlichen Bilder begegnet werden. Hierfür ist insbesondere die isometrische Ansicht geeignet, da sie bei geometrisch einfachen Bauteilen viele Merkmale erkennbar abbildet. Bei komplexeren Bauteilen sind KI-gestützte Berechnungen zur näherungsweisen Ermittlung der Gesamtanzahl aus den sieben Einzelbildern nötig (SCHULZ 2021, S. 94 ff.).

Die erkannten Merkmale unterstützen den Klassifizierungsansatz. Beispielsweise sind geschlossene Profile in den Bauteilen ein Indikator für eine hohe Strangpress-Eignung. Abbildung 5.10 zeigt einen beispielhaften Output der Objekterkennung für Bauteil A. Es wird

deutlich, dass alle neun Löcher und fünf Kerben des Bauteils korrekt erkannt und im Bild markiert wurden. Die Zahlen im farbigen Teil der Abbildung können hierbei als Gewissheit des Modells bezüglich der Merkmalerkennung auf einer Skala von 0 („Modell ist unsicher“) bis 1 („Modell ist sehr sicher“) interpretiert werden.

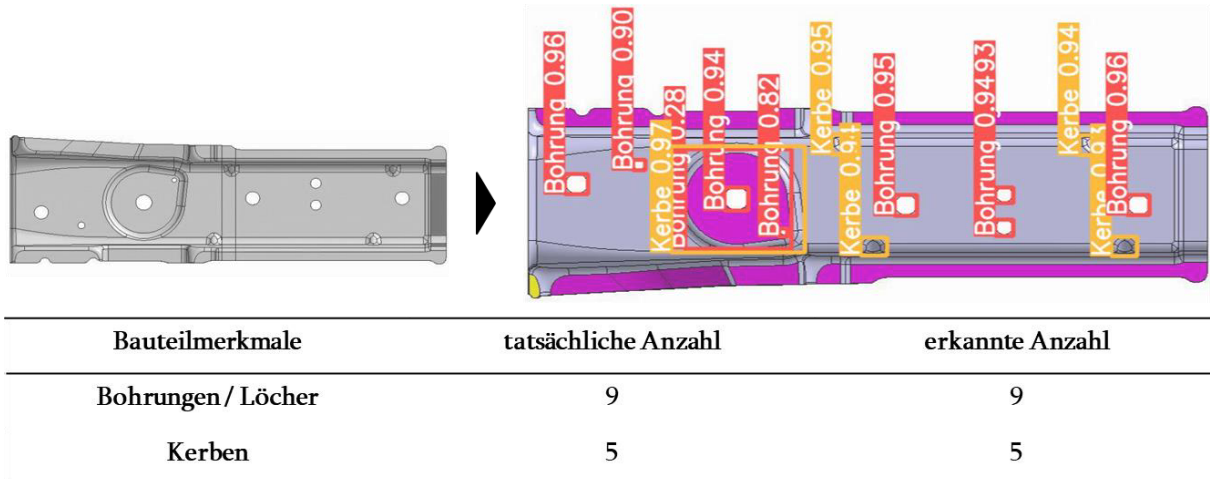


Abbildung 5.10: *Beispielhafter Output der Objekterkennung des Geometriemoduls für Bauteil A*

5.3 Bewertung der Fertigungstechnologien auf Bauteilebene

In der zentralen Schnittstelle der Methodik werden die Fertigungsszenarien je Bauteil auf Basis der modularen Informationen bewertet. Im Folgenden werden der Prozess zur Methodenauswahl und die Ausgestaltung der Bewertung thematisiert.

5.3.1 Auswahl der Methoden zur Verwertung unscharfer Informationen

Die aus den Modulen resultierenden Daten weisen Ungenauigkeiten auf und erfordern daher Ansätze zur Verwertung unscharfer Informationen (Abschnitt 2.3). Unter Nutzung der Anforderungen aus Kapitel 3 wird im Folgenden eine geeignete Methode zur Unschärfe-Quantifizierung ausgewählt. In Tabelle 5.4 werden die Vergleiche zusammengefasst.

Zunächst werden stochastische Verfahren betrachtet. Die Notwendigkeit historischer Daten zur Modellbildung konfliktiert mit einer prädiktiven Anwendung der Methodik, denn stochastische Verfahren erfordern eine zur historischen Datenbasis vergleichbare Anwendungsgrundlage (VIERTL 2003, S. 15 ff.). Diese ist bei der Methodik-Anwendung in verschiedenen Entwicklungsprojekten nicht gegeben. Im Rahmen der Methodik ist zudem die Bewertung heterogener Informationen aller identifizierten Einflussfelder essenziell. Aufgrund der Notwendigkeit von Fixgrößen können mit stochastischen Verfahren jedoch nur einzelne Parameter je Anwendungslauf untersucht werden (MEINHARDT ET AL. 2005). In der praktischen Anwendung führt die für die Datenerhebung und -verarbeitung benötigte Zeit





















zu erheblichem Ausführungsaufwand und widerspricht dem Ziel einer automatisierten Anwendung (MAXARA 2010, S. 40ff.). Ferner wird ein ganzheitlicher und nachvollziehbarer Technologievergleich erschwert. Aufgrund dieser Argumente scheiden stochastische Ansätze für die Anwendung im Rahmen der Methodik dieser Dissertation aus.




Als zweite Alternative wird die Szenariotechnik betrachtet. Diese erfordert eine historische Datenbasis zur Projektionsentwicklung je Anwendungsfall (GAUSEMEIER 2016). In der vorliegenden Arbeit wird außerdem angestrebt, alle Fertigungsszenarien und Einflussfelder zu berücksichtigen. Diese Aspekte verursachen bei Anwendung der Szenariotechnik manuellen Aufwand und widersprechen der automatisierten Methodik-Anwendung. Die angestrebten quantitativen Aussagen auf Bauteilebene sind zudem nicht mit dem Fokus strategischer Szenarioanalysen vereinbar (HAHN ET AL. 1997, S. 497 f.). Folglich ist die Szenariotechnik nicht für die Umsetzung der Methodik geeignet.

Nachfolgend wird die Rough-Set-Theorie bezüglich ihrer Eignung analysiert. Sie ist primär für das Erkennen von Zusammenhängen in bestehenden Datenmengen anwendbar, jedoch weniger für die quantitative Prädiktion relevanter Ausgangsgrößen (PAWLAK 2002, S. 7 ff.). Weiterhin führt die in der Methodik notwendige Berücksichtigung heterogener Eingangs- und die Erzeugung technologiespezifischer Ausgangsgrößen je Bauteil zu einer Zunahme der Komplexität. Diese lässt sich durch fallspezifische Annäherungsmengen nur bedingt beherrschen und verhindert eine automatisierte Anwendung des Rough-Set-Ansatzes auf Bauteilebene. Daher ist die Rough-Set-Theorie nicht mit den Anforderungen der Methodik vereinbar.

Abschließend wird die Fuzzy-Logik betrachtet. Sie bildet Expertenwissen unter Verwendung linguistischer Variablen ab, um relevante Daten quantitativ zu verwerten (KAHLERT 1995, S. 88). Weiterhin bedarf es nach der Regelerstellung keiner historischen Datenbasis, um neue Anwendungsfälle zu beherrschen (ZIMMERMANN ET AL. 1993, S. 48 ff.). Die Regeln können im Falle technologischer Neuerungen zudem aktualisiert werden. Die Nachvollziehbarkeit der Fuzzy-Ergebnisse ist bei Kenntnis der zugrundeliegenden Fuzzy-Regeln gegeben (UNBEHAUEN 2001, S. 336). Ferner ermöglicht die Fuzzy-Logik einen objektiven Vergleich der Fertigungsszenarien sowie die Minimierung menschlicher Einflüsse (FOGEL ET AL. 2016; KRUSE ET AL. 2015). Fuzzy-Logiken können die Heterogenität der Einflussfelder zur Fertigungstechnologie-Auswahl über Fuzzy-Regeln abbilden und automatisiert zu einer Gesamtaussage auf Bauteilebene bündeln (KEUPER 1999, S. 125 ff.). Auf Basis der Analysen wird die Fuzzy-Logik für die Verwertung der Moduldaten und für den quantitativen Technologievergleich verwendet.

Tabelle 5.4: Vergleich der Ansätze zur Verwertung unscharfer Informationen

Anforderungen	stochastische Verfahren	Szenariotechnik	Rough-Set-Theorie	Fuzzy-Logik
A1: prädiktives, quantitatives Vorgehen				
A2: automatisierte Anwendbarkeit				
A3: objektiver, nachvollziehbarer Technologievergleich				
A4: ganzheitliche Technologieanalyse				
A5: Anwendbarkeit auf Bauteilebene				

Legende:  nicht erfüllt  teilweise erfüllt  vollständig erfüllt

5.3.2 Erstellung der Fuzzy-Regelsätze

In diesem Abschnitt wird der Prozess zur Erstellung der Fuzzy-Regelsätze erläutert, wobei grundsätzlich die folgenden zwei Fälle zu unterscheiden sind.

Einige der Eingangsgrößen und die zugehörigen Regeln folgen einer allgemeingültigen Logik, die keiner Bestätigung durch Experten bedarf. Dies gilt für die kostenbezogenen Regeln, da niedrige Kosten grundsätzlich positiv und hohe Kosten grundsätzlich negativ zu bewerten sind. Analog ist ein hohes Leichtbaupotenzial technologieübergreifend als positiv, ein niedriges Leichtbaupotenzial als negativ zu bewerten. Auch die Ausgangsgröße des Geometriemoduls, die prozentuale Technologieklassifikation, folgt einer stringenten Logik. Je mehr geometrische Charakteristika einer bestimmten Technologie erkannt werden, desto besser ist dies für das entsprechende Fertigungsszenario zu bewerten.

Komplexere Eingangsgrößen und ihre Auswirkungen auf die zu bewertende Eignung der Fertigungstechnologien zur Bauteilumsetzung müssen im Sinne einer fundierten Regelerstellung durch Experten bewertet werden (DELLWEG 2022, S. 102 ff.). Die Befragung wurde mit den in Abschnitt 5.1.2 benannten Personen durchgeführt (Fragebogen in Anhang C2).

Abbildung 5.11 zeigt die Beurteilung der Fertigungstechnologien in Abhängigkeit der Korrosionsanforderungen. Das Tiefziehen, das Gießen und das Strangpressen zeichnen sich selbst bei hohen Anforderungen durch überwiegend ‚gute‘ Korrosionsresistenzen aus. Insbesondere bei hohen Korrosionsanforderungen wird dem Walzprofilieren demgegenüber nur eine ‚mittlere‘ Eignung zugewiesen. Dies ist laut den Experten auf die Schnittkanten der Walzprofilteile zurückzuführen, die bei langfristiger Belastung korrosionsbezogene Schwachstellen darstellen. Abschließend wird die Additive Fertigung betrachtet, der eine ‚gute‘ Korrosionsresistenz bescheinigt wird. Aufgrund des jungen Technologiealters der Additiven Fertigung ist neben dieser rein technologischen Einschätzung zusätzlich die Betrachtung freigabebezogener Aspekte erforderlich. Damit ist die Notwendigkeit unternehmensinterner, anforderungsbezogener Freigaben gemeint, die aus Gewährleistungsgründen erforderlich sind. Demnach müssen möglicherweise fehlende Freigaben bei der Gestaltung der Fuzzy-Regeln berücksichtigt werden.

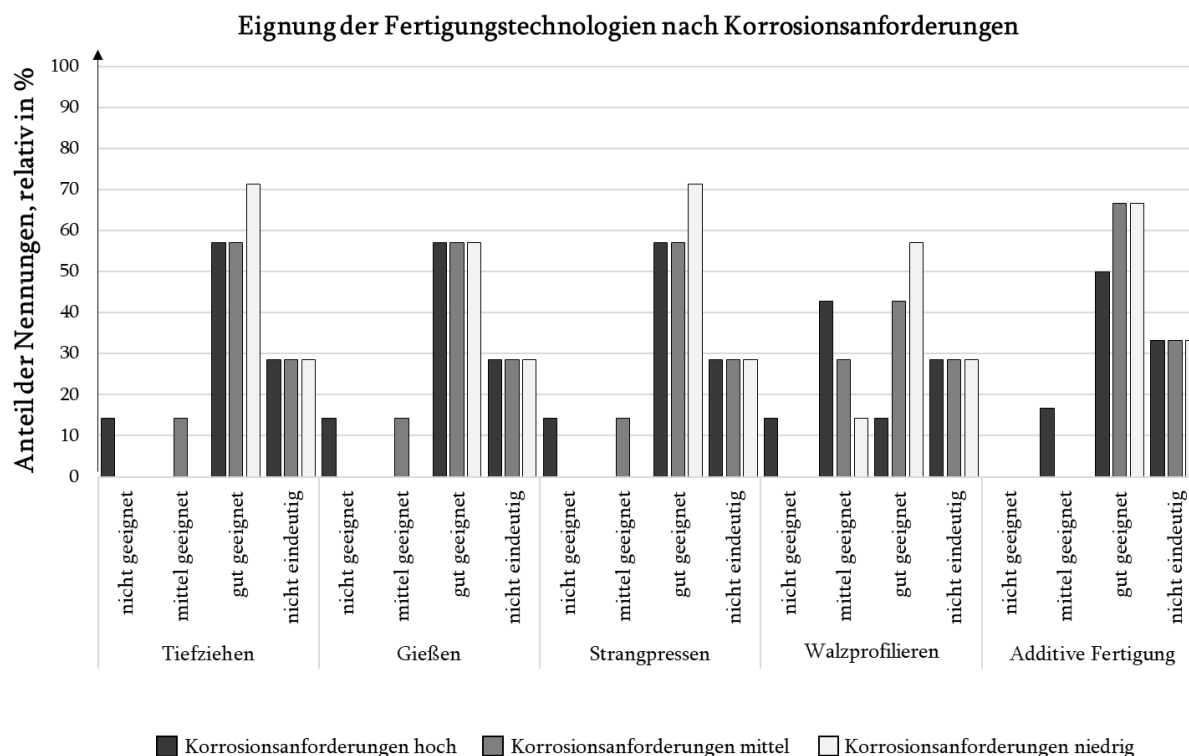


Abbildung 5.11: *Beurteilung des Einflusses der Korrosionsanforderungen auf die Fertigungstechnologie-Eignung (vgl. DELLWEG 2022, S. 108)*

Abbildung 5.12 zeigt die Beurteilung der Fertigungstechnologien in Abhängigkeit der Deformationsanforderungen im Crashfall. Das Tiefziehen eignet sich gut, unabhängig von der Anforderungsausprägung, für die Herstellung crashbelasteter Bauteile. Gussbauteile sind insbesondere bei hohen Deformationsanforderungen ‚nicht geeignet‘, auch bei mittleren Anforderungen ist keine gute Eignung zu erwarten. Dies ist auf das in Relation zu anderen

Materialien schnelle Brechen gängiger Aluminiumgusslegierungen wie AlSi10Mg zurückzuführen (DIN EN 1706). Dem Strangpressen und dem Walzprofilieren wird dagegen eine überwiegend ‚gute‘ Eignung für die Erzeugung crashbelasteter Bauteile zugewiesen. Die Additive Fertigung kommt nach Meinung der Experten lediglich bei geringen Deformationsanforderungen in Frage. Dies wird analog zum Gießen durch das Bruchverhalten additiv gefertigter Bauteile und gängiger LBM-Werkstoffe wie AlSi10Mg begründet.

Die Betrachtung crashbelasteter Bauteile erfordert neben Deformationsanalysen die Berücksichtigung von Anforderungen der Kategorie *Steifigkeit/Festigkeit*. Diese wurden auf Basis der Deformationsanalysen und im Rahmen eines weiteren Expertengesprächs im Detail diskutiert (PEIS 2022, S. 100 ff., Experteninterview 4). Das Tiefziehen und das Walzprofilieren wurden als geeignete Verfahren zur Erreichung hoher Steifigkeiten bewertet. Strangpressen, Gießen und die Additive Fertigung sollten dagegen im Falle hoher Steifigkeitsanforderungen, beispielsweise im Bereich der Fahrgastzelle, vermieden werden.

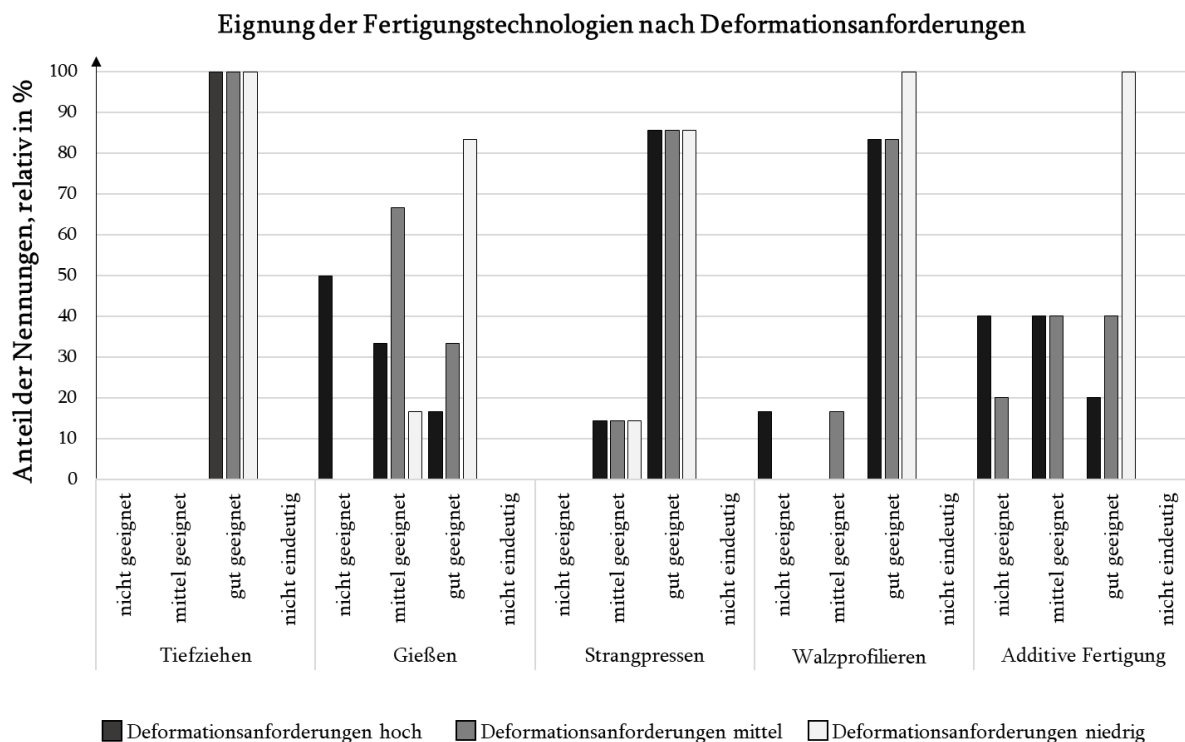


Abbildung 5.12: *Beurteilung des Einflusses der Deformationsanforderungen auf die Fertigungstechnologie-Eignung (vgl. DELLWEG 2022, S. 106)*

Abbildung 5.13 visualisiert die Beurteilung der Fertigungstechnologien, unterschieden nach den Temperaturanforderungen *gering* (bis 95 °C), *mittel* (95 °C – 150 °C) und *hoch* (über 150 °C). Das Tiefziehen und das Walzprofilieren unterliegen keinen temperaturbedingten Einschränkungen. Auch das Gießen sowie das Strangpressen werden überwiegend positiv beurteilt, wenngleich vereinzelt kritische Anmerkungen zu verzeichnen sind. Auch Bauteilen der Additiven Fertigung wird eine grundsätzlich ‚gute‘ Temperaturresistenz bescheinigt, jedoch werden hohe Temperaturen vereinzelt als kritisch betrachtet.

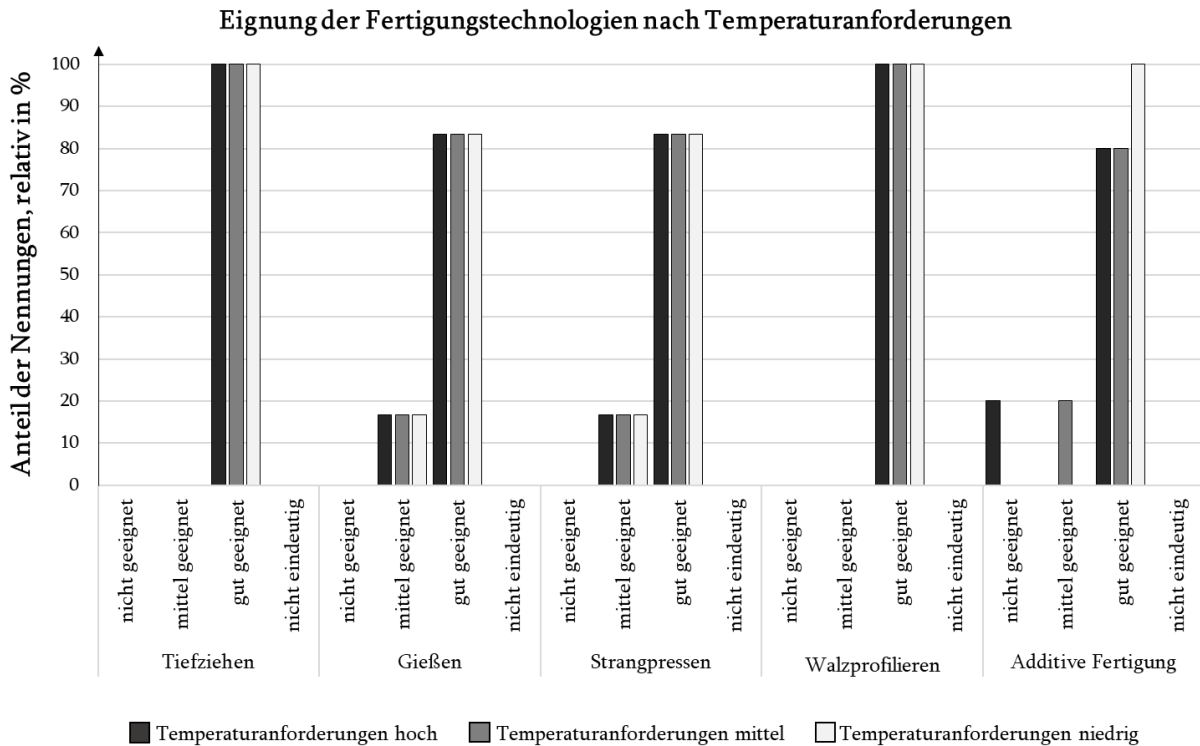


Abbildung 5.13: *Beurteilung des Einflusses der Temperaturanforderungen auf die Fertigungstechnologie-Eignung (vgl. DELLWEG 2022, S. 103)*

Bezüglich der Bewertung des Strangpressens und des Walzprofilierens ist eine Besonderheit zu berücksichtigen, die aus der Objekterkennung des Geometriemoduls gespeist wird. So werden diese beiden Fertigungstechnologien mit der zusätzlichen Eingangsgröße *geschlossenes Profil* bewertet. Hierbei wird unterschieden, ob die Objekterkennung ein geschlossenes Profil in den Schnittdarstellungen der Bauteile erkennt oder nicht. Der Einfluss dieser Unterscheidung auf das Strangpressen und das Walzprofilieren wurde ebenfalls im Rahmen der Expertenumfrage bewertet (Abbildung 5.14). Es ist ersichtlich, dass sich das Walzprofilieren insbesondere zur Herstellung offener Profile eignet und das Strangpressen bevorzugt zur Erzeugung geschlossener Profile eingesetzt wird.

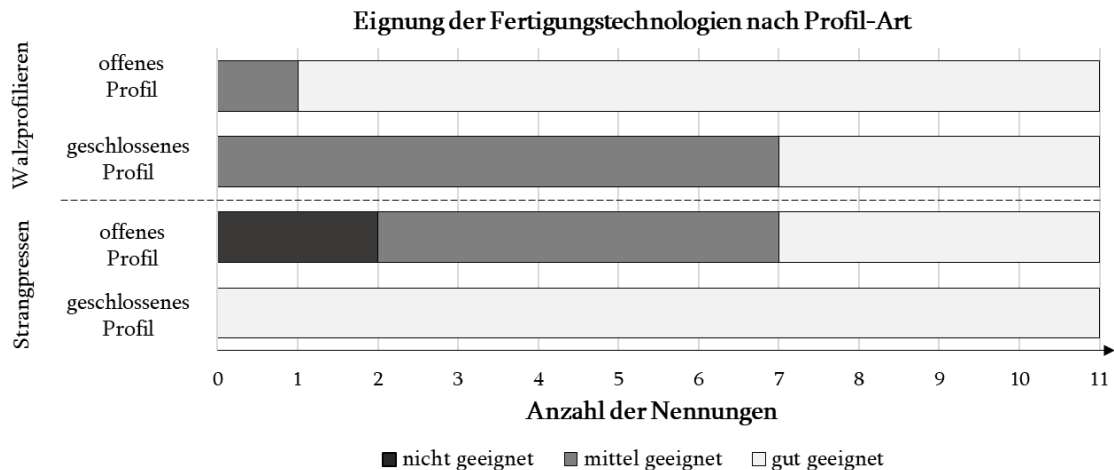


Abbildung 5.14: *Anzahl der Expertenantworten, unterschieden nach Fertigungstechnologie und Profil-Art (vgl. DELLWEG 2022, S. 113)*

Neben den modularen Eingangsgrößen wird in den Fuzzy-Systemen auch das Volumen der Bauteile berücksichtigt, da es ein weiteres Kriterium bei der Fertigungstechnologie-Auswahl darstellt. Abbildung 5.15 zeigt die Experten-Einschätzungen des Einflusses der Eingangsgröße *Bauteilvolumen* auf die Eignung der Fertigungstechnologie-Alternativen. Um eine Distinktion zwischen den Technologien herauszuarbeiten, fokussiert sich die Frage auf die Beurteilung großvolumiger (Volumen > 50 cm³) und kleinvolumiger Bauteile (Volumen < 10 cm³). Es ist ersichtlich, dass das Tiefziehen keinen Einschränkungen bezüglich der zu fertigenden Bauteilgröße unterliegt. Auch das Gießen wird grundsätzlich für alle Bauteilgrößen positiv bewertet. Das Strangpressen ist aufgrund der durch Extrusion hergestellten länglichen Strangpressprofile zur Fertigung großvolumiger Bauteile ‚gut‘ geeignet. Die Bewertung kleinvolumiger Bauteile fällt dagegen etwas negativer aus, da zur Erzeugung von Bauteilen dieser Art Nacharbeitsaufwände durch Schneidvorgänge anfallen. Der längliche Charakter eines typischen Walzprofilbauteils eignet sich analog ebenfalls für große, weniger jedoch zur Erzeugung kleiner Bauteile. Die deutlichsten Unterschiede weist die Additive Fertigung auf. Begründet wird die negative Bewertung großer Bauteile durch wirtschaftliche Nachteile additiv gefertigter Großbauteile gegenüber konventionellen Technologien und Bauraumbeschränkungen der 3D-Druckanlagen (LINDEMANN ET AL. 2016, S. 93 ff.).

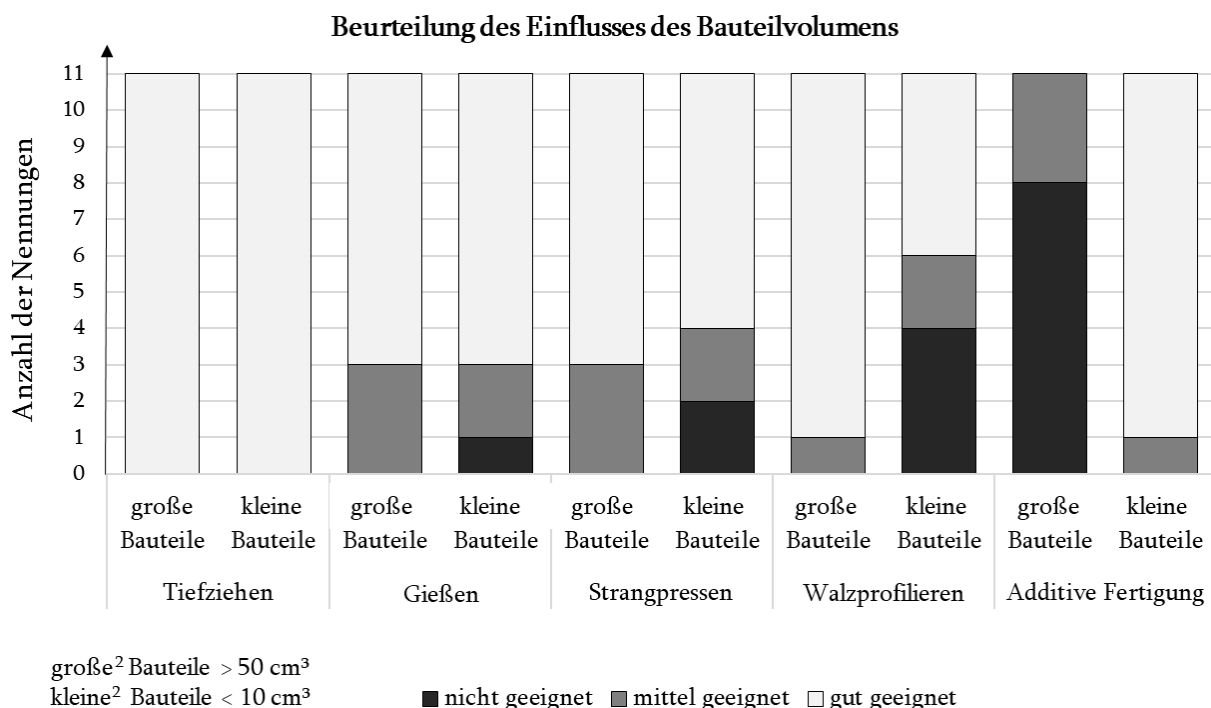


Abbildung 5.15: *Beurteilung des Einflusses des Bauteilvolumens auf die Fertigungstechnologie-Eignung (vgl. DELLWEG 2022, S. 111)*

² Zur übersichtlicheren Gestaltung der Abbildung 5.15 wurden die bisherigen Begriffe „großvolumige“ und „kleinvolumige“ durch die in diesem Fall gleichbedeutende Formulierung „große“ und „kleine Bauteile“ ersetzt.

5.3.3 Fuzzy-Regelsätze der Fertigungsszenarien

Unter Beachtung der Erkenntnisse aus der Expertenurfrage werden die Fuzzy-Regelsätze der Fertigungsszenarien erarbeitet. Tabelle 5.5 vermittelt zunächst eine Übersicht der Eingangsgrößen und gewählter Zugehörigkeitsfunktionen. Bezüglich der Zugehörigkeitsfunktionen sind zwei Fälle zu unterscheiden. Die Ausgangsgröße des Anforderungsmoduls liegt bereits in klassenspezifischer Form vor (gering, mittel, hoch) und bedarf demnach keiner Unterteilung in Wertebereiche. Damit geht die Verwendung der Singleton-Zugehörigkeitsfunktion einher, mit der die Klassen des Anforderungsmoduls in numerisch-diskrete Werte übersetzt werden. Gleiches gilt für die binäre Unterscheidung der Objekterkennung bezüglich des *geschlossenen Profils* (ja oder nein). Die verbleibenden Eingangsgrößen sind stetiger Natur und erfordern demnach die zur linguistischen *Fuzzifizierung* nötige Einteilung in die Wertebereiche *gering*, *mittel* und *hoch*. Für Eingangsgrößen dieser Art wird die Trapez-Zugehörigkeitsfunktion verwendet, da diese über entsprechende Wertebereiche definiert werden kann. Sie wird hier der Dreiecksfunktion vorgezogen, da über den Verlauf der horizontalen, oberen Trapezkante eine konstante Zugehörigkeit innerhalb eines Wertebereichs gewährleistet ist. Dies ist aufgrund möglicher Unschärfen in den modular generierten und prognostizierten Eingangsgrößen erwünscht und wäre mit einer dreiecksförmigen Zugehörigkeitsfunktion unmöglich. Die exakten Ausprägungen der Wertebereiche der Trapezfunktionen können je nach Anwendungsfall angepasst werden. Für alle Fertigungsszenarien existiert zudem je eine Fuzzy-Ausgangsgröße, die das Technologiepotenzial repräsentiert. Sie ist ebenfalls über eine in drei Intervalle (*gering*, *mittel*, *hoch*) unterteilte Trapez-Zugehörigkeitsfunktion definiert und ermöglicht nach Durchlauf aller Regeln und der anschließenden Defuzzifizierung die Quantifizierung der Technologiepotenziale. Diese werden als Methodik-Output auf einer Skala von 0 bis 100 für jedes Bauteil ausgewiesen.

Tabelle 5.5: Übersicht der Fuzzy-Eingangsgrößen und gewählter Zugehörigkeitsfunktionen

Eingangsgröße	Zugehörigkeitsfunktion		
	Typ	linguistische Ausprägung	Wertebereiche
Anforderungen Korrosion	Singleton-Funktion	gering / mittel / hoch	1 / 2 / 3
Anforderungen Deformation	Singleton-Funktion	gering / mittel / hoch	1 / 2 / 3
Anforderungen Steifigkeit	Singleton-Funktion	gering / mittel / hoch	1 / 2 / 3
Anforderungen Temperatur	Singleton-Funktion	gering / mittel / hoch	1 / 2 / 3
Kostenkennzahl	Trapezfunktion	gering / mittel / hoch	$[0 - 0,5) / [0,5 - 0,8) / [0,8 - 1]$
Leichtbaupotenzial	Trapezfunktion	gering / mittel / hoch	$[0 \%) / (0 - 20 \%) / [20 - 100 \%)$
geometrische Klassifikation	Trapezfunktion	gering / mittel / hoch	$[0 - 20 \%) / [20 - 60 \%) / [60 - 100 \%)$
geschlossenes Profil	Singleton-Funktion	ja / nein	1 / 2
Bauteilvolumen	Trapezfunktion	gering / mittel / hoch	$[0 - 10 \text{ cm}^3) / [10 - 50 \text{ cm}^3) / [50 \text{ cm}^3 - \infty)$

(runde Klammer: Intervall-Ende gehört nicht zum Wertebereich)

Die Fuzzy-Regelsätze der Fertigungsszenarien können den Tabellen in Anhang F entnommen werden. Im Falle des Tiefzieh-, des Gieß-, des Strangpress- und des Walzprofilszenarios entsprechen die Regeln den Expertenaussagen oder unterliegen der zu Beginn des Abschnitts 5.3.2 erläuterten allgemeingültigen Logik.

Die Additive Fertigung stellt bezüglich der Gestaltung der Fuzzy-Regeln einen Sonderfall dar. Dies ist auf die geometrischen Freiheiten des Verfahrens sowie eine geringere Anzahl an verfügbaren, historischen Bauteildaten zurückzuführen. Beispielsweise werden die Kosten der Additiven Fertigung aufgrund fehlender Trainingsdaten nicht durch ML prognostiziert. Stattdessen werden sie durch eine flexible Eingabemöglichkeit im Prototyp zur Methodik-Anwendung berechnet, indem die Herstellkosten pro Bauteilvolumen ($\text{€}/\text{cm}^3$) angegeben werden können. Dies ermöglicht auch im Falle technologischer, kostenreduzierender Entwicklungen eine jederzeit aktuelle Kostenkalkulation. Die geometrische Bewertung der Additiven Fertigung wird zudem durch folgende Ausschlussregeln ergänzt, die vor den Fuzzy-Systemen Anwendung finden.

Bauteilkantenlänge. Der Argumentation bezüglich Abbildung 5.15 folgend werden vor Anwendung der volumenbezogenen Fuzzy-Regeln Bauteile ausgeschlossen, die eine bestimmte Größe überschreiten. Das Bauteilvolumen kann hierbei als Kriterium verwendet werden. Alternativ kann der Ausschluss über die maximale Kantenlänge der sogenannten *Bounding Box* erfolgen, die einen das Bauteil umspannenden Quader beschreibt. Die Ausprägung der maximalen Kantenlänge hängt von technologisch-wirtschaftlichen Fortschritten des Verfahrens und der Anlagentechnologie ab. Analysen zufolge ist eine maximale Kantenlänge von circa 400 mm zu empfehlen (SCHUMACHER 2021, S. 73).

Anzahl der Bauteilmerkmale pro Bauteilfläche. Ein weiteres Kriterium zum Ausschluss der Additiven Fertigung für einzelne Bauteile ist die Anzahl der Bauteilmerkmale im Verhältnis zur Bauteiloberfläche. Hintergrund dieses Kriteriums ist, dass mit Nacharbeit einzubringende Bauteilmerkmale wie Löcher, Bohrungen oder Kerben mit konventionellen Technologien zusätzliche Kosten verursachen. Daher ist eine hohe Anzahl an Bauteilmerkmalen für die konkurrierende Additive Fertigung, welche nur eine geringe Nacharbeit zur Merkmalseinbringung erfordert, positiv zu bewerten. Die Ausprägung dieses Kriteriums kann vom Methodik-Anwender in der Benutzeroberfläche durch eine Eingabe der Mindestanzahl an Merkmalen pro Quadratzentimeter Bauteiloberfläche flexibel eingestellt werden.

Ferner ist zu beachten, dass bei drei AM-Regeln von den Experteneinschätzungen aus der technologieübergreifenden Umfrage abgewichen wurde (Anhang F, Tabelle F.5, in rot). Diese Abweichung erfolgte auf Basis eines zusätzlichen Gesprächs mit einem hochspezialisierten AM-Experten. So sind hohe Korrosionsanforderungen als kritisch zu bewerten, da

die kathodische Tauchlackierung von additiv gefertigten Bauteilen angesichts einer unzureichenden Oberflächenhaftung derzeit noch als problematisch bewertet wird. Bezüglich hoher Temperaturanforderungen ist zu beachten, dass additiv gefertigte Teile aufgrund des jungen Technologiealters bislang keine unternehmensspezifische Freigabe für Hochtemperaturbereiche erhielten. Es ist demnach eine Anpassung der Fuzzy-Regeln vorzunehmen, sobald technologische Fortschritte erreicht oder entsprechende Freigaben erteilt wurden. (PEIS 2022, S. 72 f. und S. 108 f., Experteninterview 8)

In Abbildung 5.16 wird die Vorgehensweise zur Bewertung der Fertigungstechnologien durch Fuzzy-Systeme zusammengefasst. Für Beispielbauteil A ist ersichtlich, dass sich das Tiefziehen auf Basis der in Abschnitt 5.2 aufgeführten Modul-Outputs und der Fuzzy-Regeln aus Anhang F gegenüber dem Walzprofilieren durchsetzt. Auf eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse für Bauteil A wird an dieser Stelle verzichtet, da sich Kapitel 9 umfassend der Ergebnisvalidierung widmet.

In den nächsten Kapiteln folgen die Kurzfassungen der dieser Dissertation zugrundeliegenden Publikationen, die sich nach den nun bekannten Methodik-Modulen gliedern.

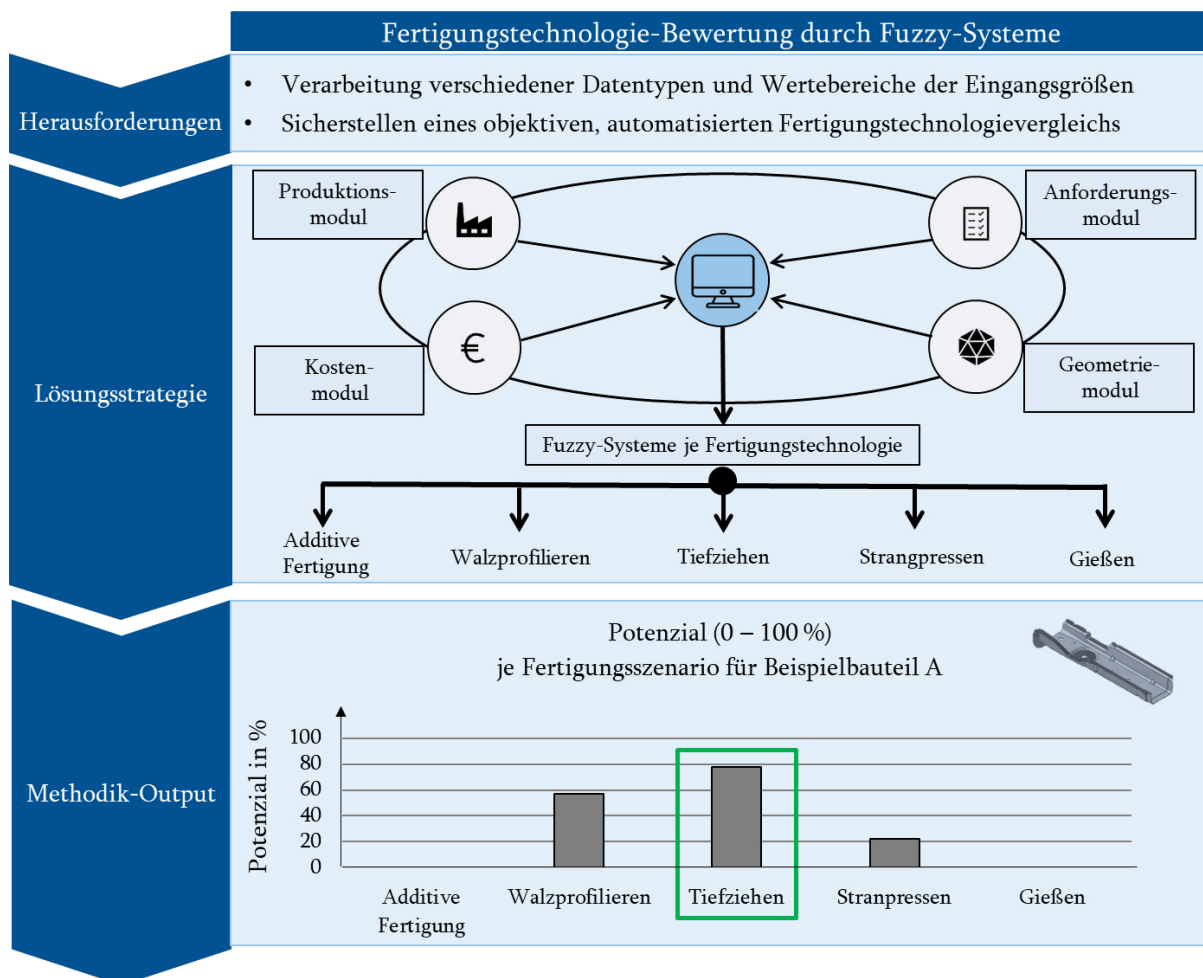


Abbildung 5.16: Verarbeitung der modularen Informationen an der zentralen Methodik-Schnittstelle durch Fuzzy-Systeme zur Fertigungstechnologie-Bewertung

6 Publikation I: Methodik-Konzept und Anforderungsmodul

Die Publikationen stellen bezüglich des Dissertationsaufbaus den Beginn der *Descriptive Study II* dar, da sie im Kern die Prüfung der modularen Lösungsstrategien behandeln. Gleichwohl befolgen die Veröffentlichungen in sich wiederum die vier DRM-Schritte.

6.1 Kurzfassung

Gemäß Publikation I offenbarte die Analyse bestehender Technologiebewertungsansätze einen Mangel an automatisierten, frühzeitig einsetzbaren Methoden zur Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene. Daher wird das Konzept der Methodik zur Analyse und Identifikation von Bauteilfertigungstechnologien in frühen Produktentwicklungsphasen präsentiert. Auf Basis der vier Einflussfelder wird die Grobstruktur der vier Module erläutert und die zentrale Methodik-Schnittstelle zur Fertigungstechnologie-Bewertung mittels Fuzzy-Regelsystemen konzeptionell eingeführt. (BUECHLER ET AL. 2021)

Im Fokus der Ausführungen steht das Anforderungsmodul, durch das die Bestätigung folgender Hypothese angestrebt wird: *Die frühzeitige Ableitung von Bauteilanforderungen ist möglich und für eine Bewertung fertigungstechnischer Potenziale im Bauteilscreening automatisiert verwendbar.*

Die detaillierte Erläuterung des Anforderungsmoduls umfasst die zugrundeliegende Herausforderung, die in der frühzeitigen Ableitung von Anforderungen auf Bauteilebene trotz fehlender Bauteilinformationen besteht. Um diese zu bewältigen, werden die Abläufe des Anforderungsmoduls in Publikation I zunächst allgemein geschildert. Im Zuge dessen wird die koordinatenbasierte Bauraumlogik eingeführt, inklusive einer Schilderung der automatisierten Bauraumanpassung für verschiedene Fahrzeugvarianten. Anschließend wird die Anwendung des Anforderungsmoduls im Karosseriebau beschrieben. Hierbei werden Beispielbauteile auf Basis ihrer Koordinaten den Bauräumen zugewiesen und die Anforderungsklassen abgeleitet. Durch eine Analyse der Modul-Ergebnisse konnten Plausibilität und Relevanz der generierten Anforderungsdaten bestätigt werden.

Die Kernhypothese der Veröffentlichung gilt somit als bestätigt: Die frühzeitige Ableitung von Anforderungen auf Bauteilebene ist möglich und kann im Rahmen einer Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl verwertet werden.

6.2 Kondensation der Erkenntnisse und Leistungsbeiträge des Hauptautors

Die erste Publikation bildet durch die konzeptionelle Einführung der Bauteil-Screening-Methodik das Fundament für weitere Veröffentlichungen. Der Forschungsbedarf im Themenfeld der Fertigungstechnologie-Auswahl wird abgeleitet und der modulare Aufbau der Methodik eingeführt.

Die zentralen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es besteht Bedarf an einer Methodik zur objektiven, frühzeitigen und möglichst automatisierten Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene.
- Ein essenzielles Kriterium stellt dabei die Menge und Ausprägung der durch das Bauteil zu erfüllenden Anforderungen dar.
- Eine koordinatenbasierte Unterteilung der Fahrzeugkarosserie in Bauräume ermöglicht ein bauraumindividuelles Hinterlegen von Anforderungswissen aus Lastenheften und Expertenbefragungen.
- Weiterhin eignen sich frühzeitig in der Produktentwicklung existierende Bauteilinformationen wie die Koordinatenpositionen innerhalb der Karosserie für eine automatisierte Zuweisung der Bauteile zu den Bauräumen.
- Auf Basis dieser Zuweisung und des hinterlegten Anforderungswissens können Bauteilanforderungen automatisiert abgeleitet werden.
- Die Übertragbarkeit der koordinatenbasierten Einteilung der Rohkarosserie in Bauräume auf andere Fahrzeugmodelle kann durch eine automatische Bauraumstreckung und -stauchung anhand der Fahrzeugmaße erfolgen.
- Die gewonnenen Informationen über die Bauteile eignen sich zur Umsetzung anforderungsspezifischer Fuzzy-Regeln, die das Gesamtsystem zur Beurteilung der Fertigungstechnologie-Alternativen sinnvoll ergänzen.

Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht der Leistungsbeiträge des Hauptautors, gegliedert nach der Konzeption, der Erarbeitung der Inhalte sowie der Ausarbeitung von Publikation I. Diese Gliederung wird in den publikationsbezogenen Kapiteln 7 und 8 konsistent fortgeführt.

Tabelle 6.1: Prozentuale Anteile des Autors an Konzeption, Erarbeitung der Inhalte und Ausarbeitung von Publikation I

	Konzeption	Erarbeitung der Inhalte	Ausarbeitung	Durchschnitt
T. Buechler	75 %	65 %	100 %	80 %

7 Publikation II: Produktions- und Kostenmodul

7.1 Kurzfassung

Publikation II greift den konzeptionellen Rahmen der ersten Veröffentlichung auf und fokussiert sich auf die detaillierte Erläuterung des Produktions- und des Kostenmoduls (BUECHLER ET AL. 2022). Im Kern wird der Beweis folgender Hypothesen angestrebt:

- *Eine Prognose und Ableitung produktionsbezogener Parameter ist bereits vor der Bauteilkonstruktion möglich.*
- *Die resultierende Datenbasis eignet sich zur frühzeitigen, vergleichenden Prognose und zur Berechnung von Kostenstrukturen der Bauteil-Fertigungsszenarien.*

In der zweiten Publikation wird die Vorgehensweise des Produktionsmoduls zunächst in allgemeiner Form erläutert. Anschließend folgt die Erläuterung der Anwendung im automobilen Karosseriebau. Ferner wird die Generierung produktionsrelevanter Parameter auf Basis frühzeitig existierender Bauteildaten (Maße, Volumen, Masse) und Nutzereingaben beschrieben. Zudem werden die Fertigungsszenarien für jedes Bauteil eingeführt: Gießen, Tiefziehen, Strangpressen, Walzprofilieren und Additive Fertigung. Die generierten Daten umfassen Logistikinformationen und produktionsbezogene Parameter. Ebenso erfolgt die Erläuterung der quantitativen Prognose der Fügekomplexität von Bauteilen in der Karosserieproduktionslinie, die eine Kerngröße des Produktionsmoduls repräsentiert. Weiterhin wird die Funktionalität des Produktionsmoduls anwendungsbasiert analysiert.

Nach dem produktionsbezogenen Teil wird die Verwertung der vom Produktionsmodul übergebenen Daten durch das Kostenmodul beschrieben. Hierbei wird verdeutlicht, dass die frühzeitige und objektive Kostenvorhersage zur Schließung von Kostendaten-Lücken in frühen Entwicklungsphasen dient. Nach einer allgemeinen Erläuterung der Abläufe folgt die Anwendung des Kostenmoduls im Karosseriebau. Ferner werden die Erarbeitung von Berechnungsformeln sowie das Training von ML-Prädiktionsmodellen betrachtet. Die abschließende Validierung der Funktionalität des Kostenmoduls rundet Publikation II ab.

Die Hypothesen konnten bestätigt werden, weshalb generierte Kostendaten in den Fuzzy-Regelsystemen der Methodik verwertet werden und einen bedeutsamen Beitrag zur Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene leisten.

7.2 Kondensation der Erkenntnisse und Leistungsbeiträge des Hauptautors

Die zentralen Erkenntnisse der zweiten Veröffentlichung gliedern sich nach der modularen Logik wie folgt.

Produktionsmodul:

- Frühzeitig vorhandene Bauteildaten wie Maße, Volumen und Masse eignen sich zur Ableitung und zur Prognose produktionsbezogener Parameter.
- ML-Modelle ermöglichen eine fertigungstechnologieabhängige Prognose der Fügekomplexität von Bauteilen in der Karosserieproduktionslinie.

Kostenmodul:

- Darauf aufbauend können für unterschiedliche Fertigungsszenarien frühzeitig Kostenanalysen durchgeführt werden.
- Die verwendeten Input-Daten eignen sich zur Prognose und zur Berechnung relevanter Kostenarten: Herstell- und Logistikkosten der Bauteile sowie Investitionen in die Karosserieproduktionslinie.
- Eine Herausforderung stellt die Prognose von Werkzeuginvestitionen dar. Dies ist auf erhebliche technologiespezifische Unterschiede der Werkzeugkostenstrukturen zurückzuführen, die sich nicht mit den verfügbaren, technologieübergreifenden Eingangsgrößen abbilden lassen.
- Die aus der frühzeitigen Methodik-Anwendung und der damit einhergehenden Limitation verfügbarerer Eingangsgrößen resultierenden Ungenauigkeiten erfordern die Verwendung von Fuzzy-Systemen zur Datenverarbeitung.

Schnittstelle der Methodik:

- Durch die Prognose und die Ableitung von Bauteilkosten löst sich die Methodik von der Notwendigkeit vorhandener Kostendaten in frühen Entwicklungsphasen.
- Die Erweiterung der Fuzzy-Systeme um kostenspezifische Regeln stellt einen wichtigen Baustein zur holistischen Fertigungstechnologie-Bewertung dar.

In Tabelle 7.1 werden die Leistungsbeiträge des Hauptautors zusammengefasst und nach den drei bekannten Kategorien strukturiert.

Tabelle 7.1: Prozentuale Anteile des Autors an Konzeption, Erarbeitung der Inhalte und Ausarbeitung von Publikation II

	Konzeption	Erarbeitung der Inhalte	Ausarbeitung	Durchschnitt
T. Buechler	55 %	50 %	75 %	60 %

8 Publikation III: Geometriemodul

8.1 Kurzfassung

Die zu erzeugende Geometrie eines Bauteils ist ein relevanter Aspekt bei der Analyse potenzieller Fertigungstechnologien. Im Rahmen der dritten Publikation wird daher die Vorgehensweise des Geometriemoduls erläutert. Das Ergebnis der geometrischen Analyse ergänzt die Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl. (BUECHLER ET AL. 2023)

Für Publikation III wurde die Beantwortung folgender Forschungsfragen angestrebt:

- *Können KI-basierte Bildklassifikationsmodelle zur automatisierten geometrischen Analyse metallischer Bauteile eingesetzt werden?*
- *Können die Ergebnisse der Bilderkennung und -klassifikation zur vergleichenden Analyse verschiedener Fertigungstechnologien genutzt werden?*

In Publikation III wird zunächst der Forschungsbedarf erarbeitet, indem existierende KI-Modellarchitekturen zur Bilderkennung und -klassifikation analysiert werden. Der identifizierte Bedarf bezieht sich auf eine automatisierte, recheneffiziente Analyse von Bauteilgeometrien zum Vergleich mehrerer Fertigungstechnologien. Um diese Lücke zu schließen, wird der bildbasierte Ansatz des Geometriemoduls allgemein erläutert, gefolgt von der Beschreibung der Anwendung im Karosseriebau. Die Beschreibung der auszuführenden Schritte beginnt mit dem grundlegenden Aufbau der Bauteilbilddatenbank sowie der Ergänzung fertigungstechnologischer Informationen. Anschließend wird verdeutlicht, dass die CNN-Architekturen in der Trainingsphase die geometrischen Charakteristika verschiedener Fertigungstechnologien erlernen können. Darauf aufbauend werden die prozentualen Klassifikationswerte je Technologieklasse eingeführt, welche die Identifikation mehrerer, geeigneter Technologien zur Herstellung der erforderlichen Bauteilgeometrie ermöglichen. Darüber hinaus wird die Objekterkennung erläutert, die Bauteilmerkmale innerhalb der Bilder erkennt und die Klassifikation mit diesen Informationen unterstützt.

Durch eine die Forschungsfragen bejahende Validierung konnte die Funktionalität des bildbasierten Ansatzes bestätigt werden, der zudem eine automatische Anwendung sowie kurze Rechenzeiten gewährleistet. Die Fuzzy-Regelsysteme der übergreifenden Methodik können folglich um geometrische Informationen ergänzt werden.

8.2 Kondensation der Erkenntnisse und Leistungsbeiträge des Hauptautors

Das aus der dritten Publikation resultierende Geometriemodul stellt eine weitere wichtige Informationsquelle der Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene dar. Folgende Erkenntnisse wurden erarbeitet:

Bildklassifikation:

- Unter Nutzung von CNN-Architekturen können Bauteilbilder geometrisch analysiert und fertigungstechnologisch klassifiziert werden.
- Die prozentualen Klassifizierungsergebnisse ermöglichen die geometrische Identifikation mehrerer alternativer Fertigungstechnologien je Bauteil.
- Durch den 2D-Ansatz können auch bei einer hohen Anzahl von Bauteilbildern kurze Rechenzeiten gewährleistet werden. So dauert die Ausführung des Geometriemoduls mit über 400 Bauteilen lediglich zwei Stunden.

Objekterkennung innerhalb der Bilder:

- Löcher, Bohrungen, Prägungen, geschlossene Profile und Flansche können ebenfalls in Bauteilbildern erkannt und gezählt werden.
- Diese lassen sich zur Unterstützung der Klassifikation und zur Verfeinerung der fertigungstechnologischen Analyse verwenden.

Schnittstelle der Methodik:

- Das Geometriemodul vollendet die modulare Architektur der Methodik, indem es die Datengrundlage um geometrische Aspekte ergänzt.
- Die Ergebnisse der Bildklassifikation und der Objekterkennung ermöglichen eine Erweiterung der Fuzzy-Regelsysteme zur Bewertung fertigungstechnologischer Alternativen auf Bauteilebene.

Die Leistungsbeiträge des Hauptautors können Tabelle 8.1 entnommen werden, die sich analog zu den zuvor behandelten Publikationen gliedert.

Tabelle 8.1: Prozentuale Anteile des Autors an Konzeption, Erarbeitung der Inhalte und Ausarbeitung von Publikation III

	Konzeption	Erarbeitung der Inhalte	Ausarbeitung	Durchschnitt
T. Buechler	75 %	50 %	85 %	70 %

9 Anwendung, Analyse und Nutzenbewertung

In Kapitel 9 wird die *Descriptive Study II* fortgesetzt, indem die Lösungsstrategie durch eine Verifikation, eine Validierung sowie eine Nutzenbewertung der Methodik bezüglich der definierten Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität bewertet wird.

9.1 Verifikation: Erfüllung der Anforderungen an die Methodik

Die Anforderungen aus Abschnitt 3.3 können aufgrund der folgenden Argumente als erfüllt angesehen werden:

A1: Ermöglichung einer frühzeitigen Prognose und Analyse relevanter Parameter

Eine frühzeitige Methodik-Anwendung konnte durch eine Reduzierung initial benötigter Eingangsgrößen (siehe Flowchart in Anhang D) und durch die modularen Prognosemodelle erreicht werden. Die mit der Frühzeitigkeit einhergehende Unschärfe der resultierenden Parameter kann durch die Anwendung der Fuzzy-Logik kontrolliert werden.

A2: Realisierung eines hohen Automatisierungsgrades zur Analyse großer Datenmengen

Durch die Umsetzung der Methodik als modulare Architektur mit Schnittstellen zur Informationsübergabe konnte ein hoher Automatisierungsgrad erreicht werden. Die Anwendung der Methodik zur Analyse einer Vielzahl von Bauteilen ist für den geübten Nutzer demnach in kurzer Zeit möglich (siehe Nutzenbewertung in Abschnitt 9.3).

A3: Sicherstellung eines objektiven Vergleichs der Fertigungstechnologien

Durch die Verwendung konsistenter Eingangsgrößen und Bewertungsregeln für alle Fertigungsszenarien konnte eine datenbasierte Bewertung sichergestellt werden. Diese zeichnet sich durch die Minimierung menschlicher Einflüsse und die Ausgabe quantitativer Fuzzy-Ausgangsgrößen in Form der Technologiepotenziale je Bauteil aus.

A4: Ermöglichung einer ganzheitlichen Fertigungstechnologie-Bewertung

Der modulare Methodik-Aufbau gewährleistet die Berücksichtigung aller identifizierten Einflussfelder, deren Parameter durch die Fuzzy-Systeme zu einer ganzheitlichen Bewertung der Technologiepotenziale gebündelt werden. Eine nicht gewünschte thematische Fokussierung auf ein Themenfeld konnte demnach vermieden werden.

A5: Sicherstellung der Methodik-Anwendbarkeit auf Bauteilebene

Alle modularen Parameter werden für jedes Bauteil und jedes Fertigungsszenario generiert und prognostiziert. Sie zielen demnach auf eine Beurteilung der Fertigungstechnologie auf Bauteilebene ab, die in bauteilindividuellen Fertigungstechnologiepotenzialen resultiert.

9.2 Validierung: Analyse der Ergebnisse nach Methodik-Anwendung

Die Validierung basiert auf einer Anwendung der Methodik zur Technologie-Auswahl in Entwicklungsprojekten und einer anschließenden expertengestützten Ergebnisanalyse.

9.2.1 Plausibilität der Fertigungstechnologie-Verteilung

Zunächst wird die prozentuale Verteilung der durch die Methodik generierten Fertigungstechnologie-Vorschläge auf Plausibilität geprüft. Hierbei dient die bisherige Verteilung der Fertigungstechnologien in modernen Karosseriearchitekturen als Grundlage und Vergleichswert. Dieser Abgleich erfolgt, da eine gezielte Identifikation möglicher Fertigungstechnologie-Alternativen einzelner Bauteile bei gleichzeitigem Erhalt einer plausiblen Fertigungstechnologie-Verteilung angestrebt wird.

In Abbildung 9.1 und Abbildung 9.2 werden auf Basis zweier in Produktion befindlicher Fahrzeugmodelle die aus der Methodik resultierenden Fertigungstechnologie-Verteilungen den realen Verteilungen gegenübergestellt (PEIS 2022, S. 75 ff.). Die Analyse umfasste bei Fahrzeugmodell 1 aus dem Limousinen-Segment 294 Bauteile und bei Fahrzeugmodell 2 aus dem SUV-Segment 372 Bauteile der Rohkarosserie. In beiden Fällen ist ersichtlich, dass Tiefziehen in den Methodik-Ergebnissen und in der realen Technologieverteilung stark dominiert. Auch das Gießen wird in einem zur tatsächlich produzierten Karosserie ähnlichen, jedoch leicht erhöhten Umfang als geeignete Technologie vorgeschlagen. Ebenso wird deutlich, dass die Methodik aufgrund erwarteter Kostenvorteile geringfügig mehr Walzprofile und weniger Strangpressteile ausweist. Zudem wird in der realen Karosserie des Modells 1 ein Bauteil additiv gefertigt, das von der Methodik ebenfalls der Additiven Fertigung zugewiesen wird. Es ist festzuhalten, dass durch die Methodik eine im Vergleich zur tatsächlich produzierten Karosserie plausible Technologieverteilung vorgeschlagen wird.

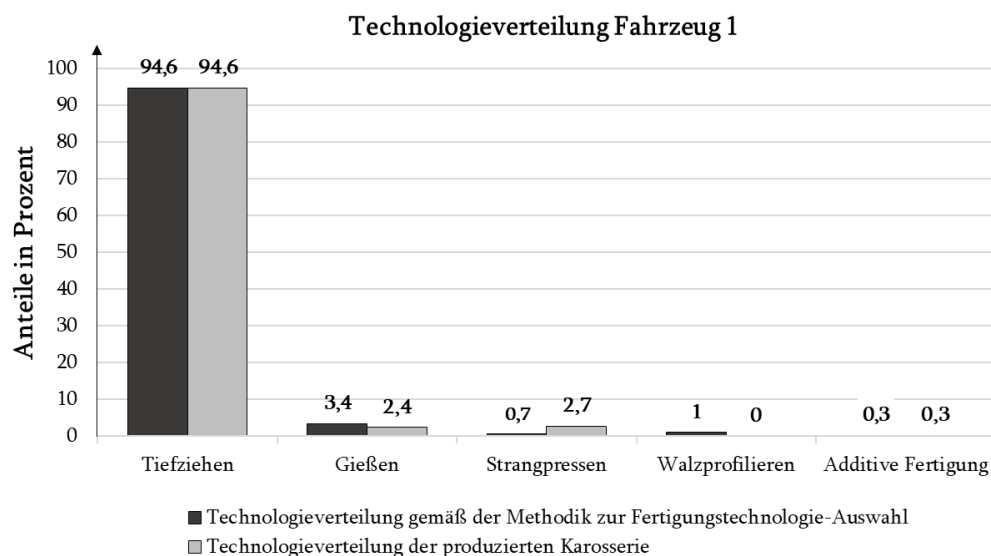


Abbildung 9.1: Vergleich der Technologieverteilungen für die Karosserie von Fahrzeugmodell 1

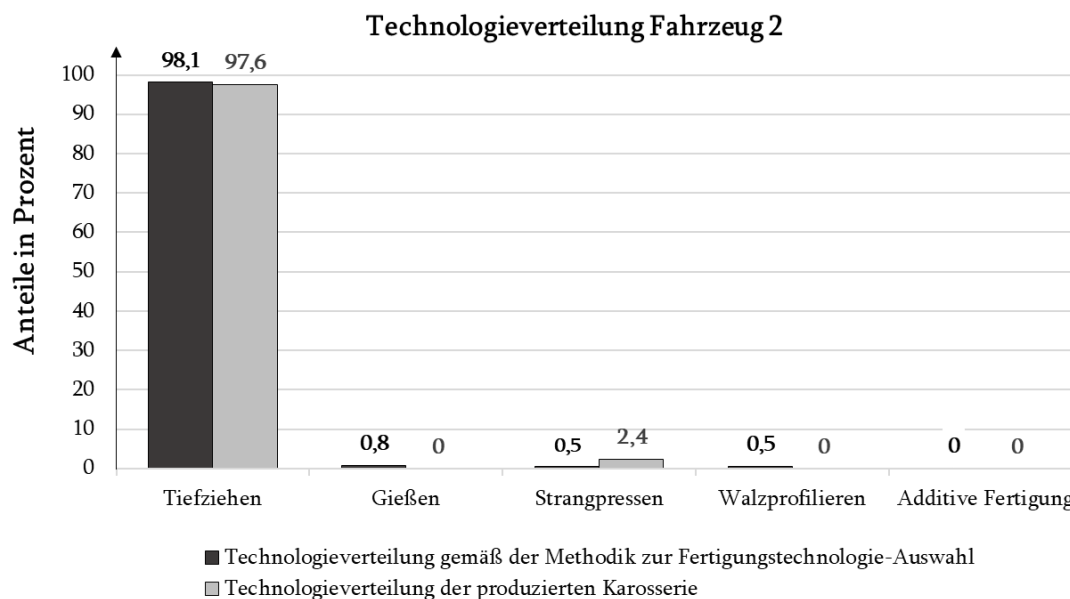


Abbildung 9.2: Vergleich der Technologieverteilungen für die Karosserie von Fahrzeugmodell 2

9.2.2 Analyse fertigungstechnologisch bestätigter Bauteile

Ebenso wurden im Rahmen einer Expertenumfrage Bauteile betrachtet, deren bisher verwendete Fertigungstechnologien durch die Methodik bestätigt wurden (DELLWEG 2022, S. 81 ff.). Bauteile dieser Art repräsentieren die Mehrheit der Anwendungsergebnisse und untermauern die Plausibilität der Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl. Um trotz fertigungstechnologisch bestätigter Bauteile Erkenntnisse für Optimierungspotenziale der Methodik zu erlangen, wurden die von der Methodik zweitrangig eingestuftten Technologien wie folgt betrachtet:

- i. Expertenbefragung zur Einholung von Gegenargumenten bezüglich der Umsetzung der *Platz-2-Technologien*
- ii. Analyse der genannten Gegenargumente bezüglich der bisherigen Berücksichtigung in den Modulen der Methodik
- iii. gegebenenfalls Implementierung bislang nicht beachteter Aspekte

Die Umfrage wurde mit den bewährten Personen aus den bisherigen Befragungen dieser Dissertation durchgeführt, wobei sich eine Person aus Zeitgründen zurückzog und demnach insgesamt zehn Experten befragt wurden (DELLWEG 2022, S. 81 ff.). Die offene Fragestellung umfasste zehn Bauteile und ist Teil des in Anhang C3 zu findenden Fragebogens (Fall 1). In Tabelle 9.1 werden die zehn diskutierten Bauteile aufgelistet, bei deren Auswahl auf heterogene Technologie- und Platz-2-Vorschläge geachtet wurde.

Abbildung 9.3 zeigt die Anzahl der von den Experten genannten Argumente, die gegen eine Umsetzung der *Platz-2-Technologien* sprechen. Es wird deutlich, dass sie sich vier Hauptkategorien zuordnen lassen: *Bauraum*, *Herstellungsprozess*, *Material* und *Funktion*.

Tabelle 9.1: Die zehn Bauteile der Expertendiskussion bezüglich der *Platz-2-Technologien*

Bauteile	bisherige Fertigungstechnologie ≙ Vorschlag der Methodik	<i>Platz-2-Technologie</i> laut Methodik
1	Tiefziehen	Gießen
2	Strangpressen	Walzprofilieren
3	Tiefziehen	Gießen
4	Tiefziehen	Gießen
5	Tiefziehen	Gießen
6	Strangpressen	Walzprofilieren
7	Tiefziehen	Gießen
8	Tiefziehen	Walzprofilieren
9	Tiefziehen	Strangpressen
10	Tiefziehen	Walzprofilieren

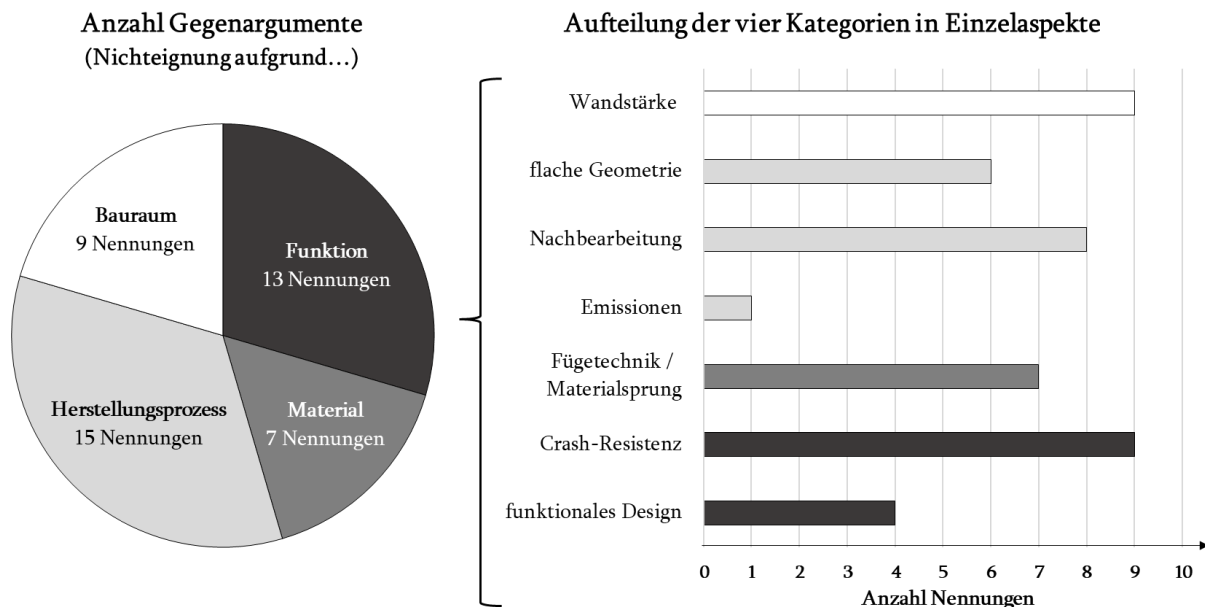


Abbildung 9.3: Anzahl und Kategorien der Gegenargumente zu den ‚Platz-2-Technologien‘ der Bauteile (vgl. DELLWEG 2022, S. 87)

Gegenargumente der Kategorie *Bauraum* beziehen sich auf Gussvorschläge der Methodik und den benötigten Bauraum in der Rohkarosserie. Aluminiumdruckguss-Bauteile können zwar mit einer Mindestwandstärke von einem Millimeter hergestellt werden, dies gilt jedoch nur für kleine, wenig belastete Komponenten (BDG & VDD 2016, S. 13). Im Automobilbau kommen Gussbauteile aufgrund ihrer geometrischen Freiheiten insbesondere an Knotenpunkten der Karosserie wie der Federstütze zum Einsatz. An diesen Stellen sind zur Verbindung umliegender Karosseriebereiche großvolumige, hochgradig belastbare Bauteile erforderlich. Dies resultiert in einer Mindestwandstärke eines Karosserie-Gussbauteils von drei Millimetern (BDG & VDD 2016, S. 23). Tiefziehbauteile können dagegen je nach Größe und Beanspruchung mit einer Wandstärke von rund einem Millimeter realisiert werden. Dieser Aspekt des zusätzlichen Platzbedarfs wurde durch eine von den Experten unterstützte Kennzeichnung *platzkritischer Bauräume* im Anforderungsmodul adressiert

(PEIS 2022, S. 73 f.). Künftig wird das Guss-Szenario für alle Bauteile ausgeschlossen, die in einem dieser platzkritischen Bauräume lokalisiert sind (siehe Bauteil ‚D‘ in Abschnitt 9.2.3).

Die Gegenargumentskategorie *Herstellungsprozess* lässt sich in drei Unterkategorien aufteilen: *flache Geometrie*, *Nachbearbeitung* und *Emissionen*. Das Argument der *flachen Geometrie* betrifft ausschließlich Gussvorschläge der Methodik. Die Gusstechnologie eignet sich zur Realisierung komplexer, knotenartiger Bauteilstrukturen. Flache Bauteile könnten dagegen auch mit alternativen Technologien wie dem Tiefziehen umgesetzt werden. Bislang wurde in der geometrischen Gussbewertung zwar die Größe der Bauteile erfasst, die *Flachheit* eines Bauteils wurde jedoch vernachlässigt. So konnten die vorgeschlagenen Gussbauteile in zwei der drei Koordinatenrichtungen große Maße (z. B. > 600 mm), in der dritten Koordinatenrichtung jedoch kleine Maße (< 100 mm) aufweisen. Diesem Gegenargument wurde durch die Einführung des neuen Parameters *minimale Kantenlänge* Rechnung getragen. Durch diesen wird künftig eine Abwertung des Guss-Szenarios für Bauteile ermöglicht, die eine von den Experten angegebene minimale Kantenlänge bzw. ein minimales Abmaß ($\hat{=}$ dem kleinsten Maß bzgl. der drei Koordinatenrichtungen) von 100 mm nicht überschreiten. Die minimale Kantenlänge bezieht sich analog zum AM-Kriterium *maximale Kantenlänge* auf die *Bounding Box* des Bauteils (siehe S. 60). Die *Nachbearbeitung* eines Bauteils sollte insbesondere bei der Kostenbetrachtung berücksichtigt werden. Da die Kostenprognosemodelle des Kostenmoduls mit Ist-Daten inklusive Nacharbeitsaufwänden trainiert wurden, ist dieser Aspekt bereits Teil der Methodik. Auch die *Emissionen* werden als Teil des Produktions- und Kostenmoduls der Methodik beachtet.

Das Gegenargument der Kategorie *Material* bezieht sich auf Vorschläge des Aluminiumdruckgusses und des Strangpressens, durch die ein sogenannter *Materialsprung* von Stahl auf Aluminium zwischen umliegenden Stahlbauteilen und dem betrachteten Bauteil verursacht wird. Dies geht aufgrund der notwendigen galvanischen Trennung zur Korrosionsvermeidung mit einer Änderung der Füge-technik vom Karosserie-Standardverfahren des Punktschweißens zu Klebetechniken und kalter Füge-technik wie dem Fließlochschauben oder dem Nieten einher (WEISS 2019, S. 13). Jede Abweichung vom Standard führt weiterhin zu einer Erhöhung der Komplexität in der Produktionslinie des Endprodukts und damit zu gesteigerten Kosten. Auch dieser Aspekt ist über die mit fertigungstechnologie- und materialabhängigen Ist-Daten trainierte Fügekomplexitätsprognose des Produktionsmoduls bereits Bestandteil der Methodik.

Nennungen bezüglich der Kategorie *Funktion* lassen sich in die Unterkategorien *Crash-Resistenz* und *funktionales Design* aufteilen. Die erste Unterklasse bezieht sich insbesondere auf Gussvorschläge. So deformieren sich Gussbauteile im Crash-Fall nicht nennenswert, sondern brechen schneller als Bauteile anderer Fertigungstechnologien (DIN EN

1706). Dies führt dazu, dass Gussbauteile Crashlasten nicht aufnehmen können und innerhalb einer Rohkarosserie in der Regel nicht entlang der Crash-Lastpfade verbaut werden. Dieser gusspezifische Aspekt wird bereits über die Kategorien *Deformationsfähigkeit* und *Steifigkeit/Festigkeit* innerhalb des Anforderungsmoduls beachtet und ist demnach Bestandteil der Methodik. Die Gegenargumentskategorie *funktionales Design* bezieht sich auf geometrische Merkmale eines Bauteils, die zur Funktionserfüllung zwingend erforderlich sind. Diese Merkmale können durch die Objekterkennung des Geometriemoduls erfasst und zur Präzisierung der geometrischen Klassifikationen verwendet werden. Jedoch verhindert eine pauschale Berücksichtigung bestimmter Bauteilmerkmale die erforderliche, funktionale Beurteilung jedes individuellen Bauteils (siehe Bauteil ‚A‘ in Abschnitt 9.2.3).

Es ist festzuhalten, dass die Mehrheit der genannten Aspekte bereits in der Methodik berücksichtigt werden und daher zu den plausiblen Methodik-Ergebnissen beitragen. Die Expertenangaben bekräftigen zudem die Relevanz der in den Modulen berücksichtigten Parameter. Bislang nicht beachtete Aspekte wurden implementiert und somit zur Optimierung und Erweiterung der Methodik-Module genutzt.

9.2.3 Validierung von Fertigungstechnologie-Änderungsvorschlägen

Die durch die Anwendung der Methodik identifizierten Bauteile mit technologischen Änderungsvorschlägen wurden ebenfalls im Rahmen der Expertenumfrage validiert (DELLWEG 2022, S. 90 ff.). Die zugrundeliegende Fragestellung ist Teil des in Anhang C3 hinterlegten Fragebogens (Fall 2). Tabelle 9.2 zeigt die bisherigen realen Fertigungstechnologien und die abweichenden Methodik-Vorschläge für jedes der sechs Bauteile. Bei der Auswahl der Komponenten wurde auf eine heterogene Technologieverteilung geachtet. So umfassen die Technologievorschläge das Walzprofilieren, das Gießen und das Strangpressen.

Tabelle 9.2: Die sechs Bauteile aus der Expertendiskussion mit Technologie-Änderungsvorschlägen

Bauteile	bisherige / tatsächliche Fertigungstechnologie	alternative Fertigungstechnologie ≙ Vorschlag der Methodik
A	Tiefziehen	Walzprofilieren
B	Tiefziehen	Walzprofilieren
C	Tiefziehen	Walzprofilieren
D	Tiefziehen	Gießen
E	Tiefziehen	Strangpressen
F	Walzprofilieren	Strangpressen

Die sechs Bauteile sowie die Umsetzbarkeit der technologischen Änderungsvorschläge wurden zunächst auf Basis der binären Antwortmöglichkeit *Zustimmung* oder *Wider-*

spruch beurteilt. Im Falle eines Widerspruchs bestand zudem die Möglichkeit, die Gegenargumente bezüglich der Umsetzbarkeit als offene Antwort auszuformulieren. Abbildung 9.4 veranschaulicht die Anzahl der Zustimmungen und Widersprüche seitens der befragten Experten je Bauteil (BT).

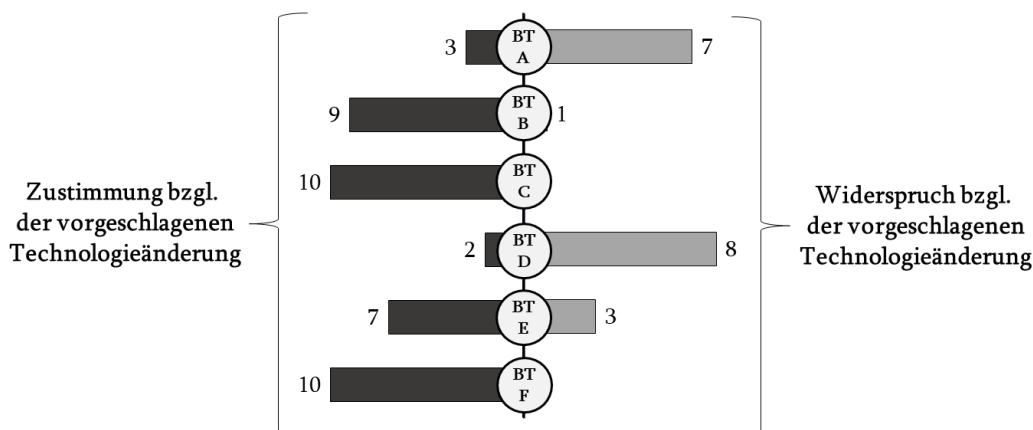


Abbildung 9.4: Anzahl der Zustimmungen und Widersprüche je Bauteil (BT) (vgl. DELLWEG 2022, S. 90)

BT ‚C‘ und BT ‚F‘ wurden von den Experten durchweg positiv bewertet. BT ‚B‘ erhielt neun von zehn möglichen Zustimmungen bezüglich des technologischen Änderungsvorschlags. Auch nach Analyse des BT ‚E‘ war die Mehrheit der Experten der Meinung, dass der Methodik-Vorschlag umsetzbar ist. Die drei Gegenstimmen vermuteten aufgrund mutmaßlich niedrigerer Kosten und schnellerer Produktionszeiten eine bessere Umsetzbarkeit im Walzprofilieren anstelle des vorgeschlagenen Strangpressens. Diese Anmerkungen wurden jedoch nicht durch die Methodik- und Modul-Ergebnisse bestätigt und entsprechen zudem nicht der durch die sieben Zustimmungen repräsentierten Mehrheit.

BT ‚A‘ und BT ‚D‘ kommt besondere Bedeutung zu, da sie von den Experten kritisch beurteilt wurden. Sie bieten demnach Potenzial zur Analyse sowie zur anschließenden Adressierung von Kritikpunkten zur Optimierung der Methodik. Abbildung 9.5 zeigt die Anzahl der Gegenargumente je Kategorie für diese beiden Bauteile.

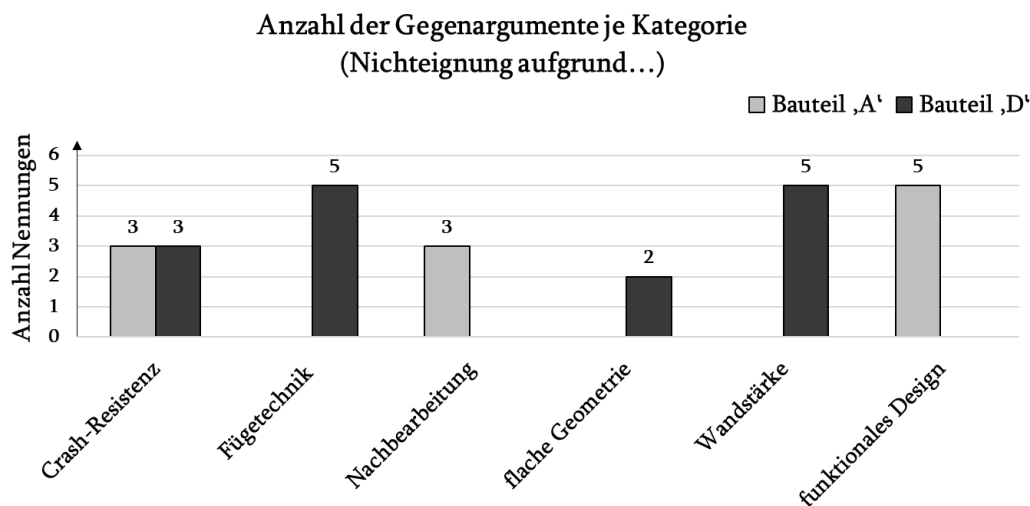


Abbildung 9.5: Anzahl der Gegenargumente je Kategorie für Bauteil ‚A‘ und Bauteil ‚D‘

Die Gegenargumente bzgl. der Umsetzbarkeit von Bauteil ‚A‘ im Walzprofilieren erlauben folgende Rückschlüsse. Drei Mal wurde seitens der Experten die erforderliche *Nacharbeit* des Bauteils thematisiert, die bereits im Kostenmodul berücksichtigt wird (siehe Argumentation auf S. 72). Anlass zur Diskussion geben zudem die beiden Gegenargumentskategorien *Crashbelastung* (drei Nennungen) und *funktionales Design* (fünf Nennungen). Im Falle des Bauteils ‚A‘ sind diese beiden Kategorien gemeinsam zu betrachten, da sich beide auf die vom Bauteil zu erfüllenden Funktionen beziehen. So ist der Querschnitt des Bauteils aus funktionalen Gründen der Crashlast-Leitung über die Bauteillänge nicht konstant (rechtes Bauteilende, eingekreist in Abbildung 9.6). Diese Eigenschaft macht eine Umsetzung des Bauteils in exakt dieser Geometrie mittels Walzprofilieren unmöglich, da das in die Walzensysteme eingehende Metallband konstante Maße aufweist.

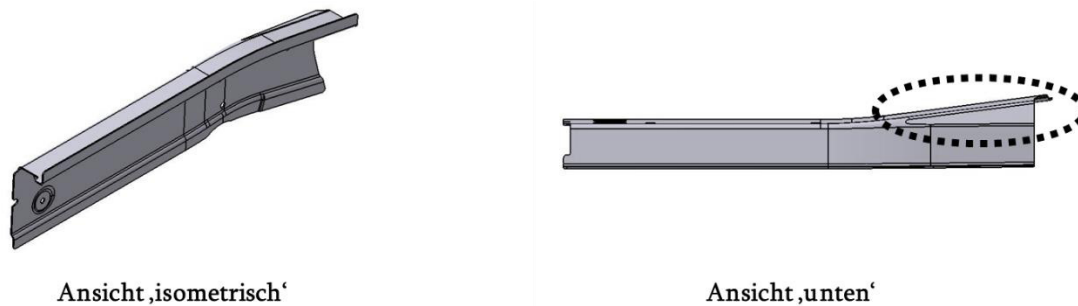


Abbildung 9.6: Zwei Ansichten des Bauteils ‚A‘; Ist-Technologie Tiefziehen, Vorschlag Walzprofilieren

Die Beurteilung der funktionalen Unverzichtbarkeit bislang bestehender, geometrischer Bauteildetails stellt zum frühen Zeitpunkt der Methodik-Anwendung eine Herausforderung dar. So könnten Bauteile mit nicht-konstantem bzw. variablem Querschnitt durch die Objekterkennung des Geometriemoduls erkannt und für das Walzprofilieren ausgeschlossen werden. Dies wäre allerdings nur dann zielführend, wenn dieser nicht-konstante Querschnitt funktional unverzichtbar ist, andernfalls könnte eine Umkonstruktion des Bauteils das Walzprofilieren ermöglichen. Die Entscheidung über die Unverzichtbarkeit solcher geometrischen Details fällt jedoch in Entwicklungsphasen, die nach der Methodik-Anwendung stattfinden. Ein pauschales Ausschließen bestimmter Fertigungstechnologien auf Basis bauteilindividueller Merkmale wurde demnach nicht implementiert, da es für die angestrebte Identifikation fertigungstechnologischer Alternativen kontraproduktiv wäre. Ferner ist hervorzuheben, dass das von den Experten bevorzugte Tiefziehen von der Methodik als zweitbeste Technologie bewertet wurde und nur geringfügige Potenzialunterschiede aufweist.

Die Analyse des Bauteils ‚D‘ und der vorgeschlagenen Änderung von Tiefziehen auf Gießen ermöglicht folgende Einblicke. Zwei Experten führten die *flache Geometrie* des Bauteils als Gegenargument für eine Umsetzung als Gussbauteil an. Dieser Aspekt wird künftig durch den Parameter *minimale Kantenlänge* berücksichtigt und bedarf daher keiner weiteren

Analyse (siehe S. 72). Die gusspezifische Problematik der *Crashbelastung* (drei Nennungen) ist Teil der Analysen des Anforderungsmoduls und wird daher ebenfalls bereits beachtet. Der Vorschlag des Aluminiumdruckgusses bedingt ferner einen *Materialsprung* zwischen angrenzenden Stahlbauteilen und dem vorgeschlagenen Aluminiumbauteil, weshalb kalte Fügechnik erforderlich wäre (fünf Nennungen). Auch dieser Aspekt ist durch die NAI-Betrachtung in Abhängigkeit der Fügeverfahren im Produktionsmodul bereits abgedeckt. Ferner wurde die Kategorie *Wandstärke* fünfmal als Gegenargument angeführt. Die Lösung dieser Schwachstelle folgt aus der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methodik-Optimierung durch die Kennzeichnung *platzkritischer Bauräume* (siehe S. 71). In Abbildung 9.7 werden die Methodik-Ergebnisse für Bauteil ‚D‘ vor und nach der Expertenurfrage (insbesondere nach der Einführung des Kriteriums *platzkritischer Bauraum*) miteinander verglichen. Demnach zeigt die Implementierung des neuen Parameters Wirkung, da Bauteil ‚D‘ in einem platzkritischen Bauraum liegt und das Tiefziehen fortan analog zu den Expertenmeinungen durch die Methodik vorgeschlagen wird.

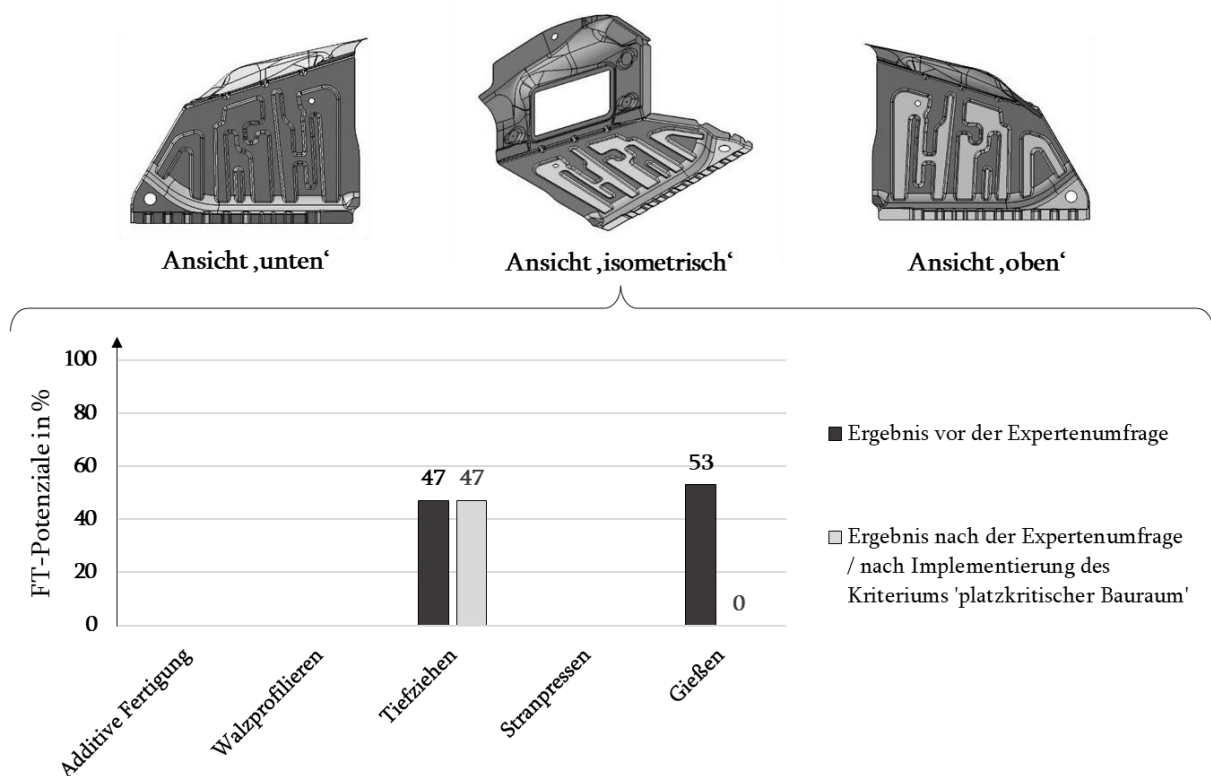


Abbildung 9.7: Methodik-Ergebnisse für Bauteil ‚D‘ vor und nach der Umfrage; FT: Fertigungstechnologie

Abschließend ist hervorzuheben, dass laut den Experten je Fahrzeugprojekt üblicherweise circa zwanzig Bauteile der Rohkarosserie intensiven Diskussionen zur Fertigungstechnologie unterzogen werden. Die Gesamtanzahl von sechzehn in den Abschnitten 9.2.2 und 9.2.3 analysierten Bauteilen entspricht demnach der ungefähren Anzahl diskutierter Bauteile eines Entwicklungsprojektes und ist als ausreichend große Stichprobe zu bewerten.

9.3 Nutzenbewertung bezüglich der Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität

In diesem Abschnitt wird die Nutzenbewertung unter Beachtung der Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität betrachtet.

9.3.1 Entwicklungsdauer und Kosten

Bezüglich einer Reduktion der Kosten und der Entwicklungsdauer sind folgende Aspekte zu beachten:

Identifikation von Kostenpotenzialen

Die Anwendung der in dieser Dissertation beschriebenen Methodik kann zur Identifikation möglicher Kostenpotenziale beitragen, indem durch das Kostenmodul günstigere Technologien identifiziert und nach Durchlauf aller Module vorgeschlagen werden. Die Größenordnung dieses Aspektes variiert mit dem Umfang der Analyse, den Bauteilstückzahlen und dem Fahrzeugmodell. Die quantitative Ausprägung erzielbarer Ersparnisse wird sich demnach erst durch die Anwendung in künftigen Entwicklungsprojekten zeigen. Beispielsweise könnte für ein einzelnes Bauteil eine im Vergleich zum bisher verwendeten Verfahren zehn Cent günstigere Technologie identifiziert werden (bzgl. der Herstellkosten). Bei einer insgesamt zu produzierenden Bauteilanzahl von drei Millionen Stück würde dies bereits zu einer Produktkostenreduktion von 300.000 € führen (Kapitalwerteffekte wurden zur Vereinfachung des Beispiels nicht berücksichtigt).

Vermeidung von Änderungskosten

Weiterhin wird durch die Methodik eine frühzeitige und fundierte Entscheidungsfindung unterstützt. Dies reduziert das Risiko, getroffene Entscheidungen in fortgeschrittenen Entwicklungsphasen korrigieren zu müssen. Durch das Vermeiden dieser Korrekturen können Änderungskosten reduziert werden, die sich erheblich auf die Produktkosten auswirken. Änderungskosten entstehen beispielsweise durch eine späte Bauteil-Technologieanpassung, die sich auch auf umliegende Komponenten auswirkt und Werkzeug-Umkonstruktionen induziert. Deshalb erfordern Technologieanpassungen einen erheblichen Ressourceneinsatz in der Entwicklung, der zwanzig bis dreißig Prozent der gesamten zeitlichen und finanziellen Entwicklungskapazität einnehmen kann (WICKEL 2017). Die Änderungskosten steigen zudem mit dem Fortschreiten der Entwicklungsphasen an. Je später die Anpassungen im Entwicklungs- oder Produktionsprozess auftreten, desto höher sind die resultierenden Kosten (WESTKÄMPER 2005, S. 117 ff.). Studien bei Ford, GM und Chrysler zeigen, dass eine einzelne Änderung in Prototypenphasen Kosten von etwa 20.000 US-Dollar verursacht. Nach dem Start der Serienproduktion resultiert jede Anpassung bereits in durchschnittlichen Kosten von über 100.000 US-Dollar (WASMER ET AL. 2011, S. 533 ff.).

Reduzierung der Entwicklungsdauer

Die Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl zielt ferner auf eine Reduzierung der Entwicklungsdauer und somit eine Optimierung des Entwicklungskapitaleinsatzes ab. Die Analyse dieses Aspektes wird durch Experten unterstützt und im Folgenden im Detail betrachtet.

Um die angestrebte Reduktion des Zeitaufwands zur Fertigungstechnologie-Auswahl und den damit einhergehenden Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungsdauer zu beurteilen, werden zwei Szenarien miteinander verglichen: die Fertigungstechnologie-Auswahl ohne und die Fertigungstechnologie-Auswahl mit Methodik (Abbildung 9.8). Anschließend kann die zeitliche Differenz der beiden Szenarien ermittelt werden. Diese ermöglicht eine Umrechnung in finanzielle Einsparpotenziale je Fahrzeugprojekt. Hierbei fließen die Kostensätze künftiger Methodik-Anwender, z. B. der Entwicklungsingenieure, ein.

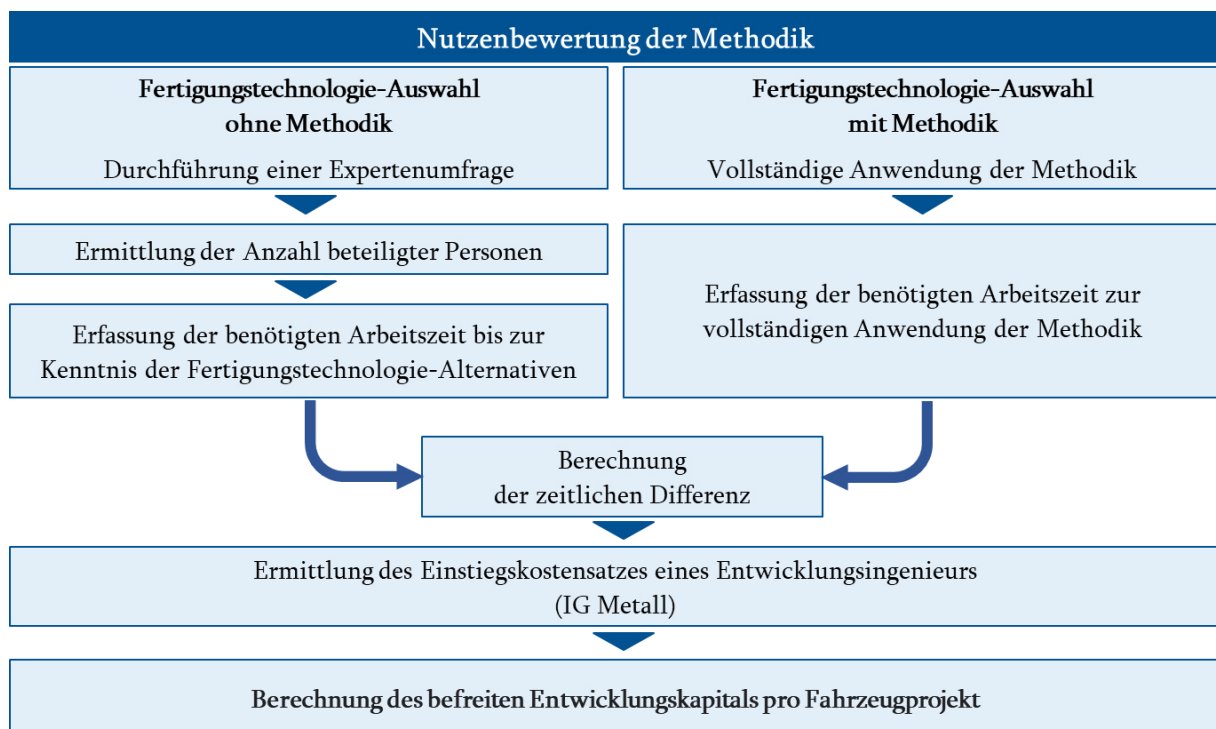


Abbildung 9.8: Vorgehensweise zur Quantifizierung des erzielbaren Nutzens bei Anwendung der Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl

Fertigungstechnologie-Auswahl ohne Methodik. Zunächst wurden durch eine Expertenbefragung die zeitlichen Aufwände ermittelt, die zur Auswahl der Fertigungstechnologie ohne Methodik nötig sind (Fragebogen *Nutzenbewertung* in Anhang C4). Hierfür wurden die Stakeholder der Entscheidungsfindung um eine Einschätzung des zeitlichen Aufwandes gebeten, der für die Fertigungstechnologie-Entscheidung anfällt. Befragt wurden die aus Abschnitt 9.2 bekannten zehn Personen. Im Rahmen der Befragung wurden zwei Aspekte erfasst. Zum einen wurde die Anzahl der an der Fertigungstechnologie-Entscheidung beteiligten Personen erfragt. Zum anderen ist die benötigte Arbeitszeit pro Person relevant,

die ohne Anwendung der Methodik je Bauteil aufzubringen ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Methodik die menschlichen Entscheidungsträger nicht vollständig ersetzt. Demnach wird sie nicht zur hundertprozentigen Einsparung der Aufwände des bisherigen manuellen Vorgehens führen, sondern vielmehr die Grundlage zur finalen Entscheidung liefern. Die Experten wurden daher explizit gebeten, die anzugebende Arbeitszeit auf den Zeitraum bis zur Kenntnis fertigungstechnologischer Alternativen je Bauteil zu beziehen, und nicht auf den gesamten Prozess bis zur finalen Fertigungstechnologie-Entscheidung. Die Angaben umfassen folglich nur die Zeitaufwände zur Identifikation der fertigungstechnologisch zu diskutierenden Bauteile und der entsprechenden Technologie-Alternativen.

Die Beschreibung der Auswertung der Befragung bezieht sich zunächst auf die Anzahl an Personen, die im Zuge der Fertigungstechnologie-Entscheidung involviert sind. Die Angaben der Experten bewegten sich im Bereich von fünf bis zwölf beteiligten Personen. Im Schnitt wurden acht Personen genannt, die an den Diskussionen und Terminen zur Fertigungstechnologie-Auswahl teilhaben (DELLWEG 2022, S. 92 f.).

Daran anschließend erfolgte die Ermittlung der persönlichen Arbeitszeit, die je Bauteil bis zur Kenntnis der Fertigungstechnologie-Alternativen zu erbringen ist. Die Experten-Angaben sind Abbildung 9.9 zu entnehmen. Die Ausführungen beziehen sich zunächst auf den linken Teil der Abbildung (*mit dem Ausreißer*). Dieser Teil inkludiert alle Antworten, die sich über einen Wertebereich von 0,2 Stunden bis 16 Stunden erstrecken. Im Durchschnitt ergibt sich bis zur Kenntnis der fertigungstechnologischen Alternativen ein persönlicher Arbeitszeitaufwand von 3,7 Stunden je Bauteil (DELLWEG 2022, S. 92 f.). Die Auswertung dieses Aspekts der Expertenumfrage erfordert jedoch folgende kritische Betrachtung. Es ist anzumerken, dass der angegebene Maximalwert von sechzehn Stunden den zweithöchsten Wert von vier Stunden erheblich übersteigt. Diese Diskrepanz kann folgende potenzielle Ursachen haben. Entweder ist der betreffende Experte im Zuge der Fertigungstechnologie-Diskussion tatsächlich in besonderer Weise eingebunden oder die Fragestellung wurde missverstanden. Um diesen Eventualitäten Rechnung zu tragen, unterscheiden die Berechnungen und Argumentationen der folgenden Absätze die beiden Betrachtungsmöglichkeiten *mit dem Ausreißer* und *ohne den Ausreißer*. Der rechte Teil der Abbildung zeigt, dass eine um den 16-Stunden-Ausreißer bereinigte Datengrundlage eine durchschnittliche Arbeitszeit von 1,6 Stunden aufweist.

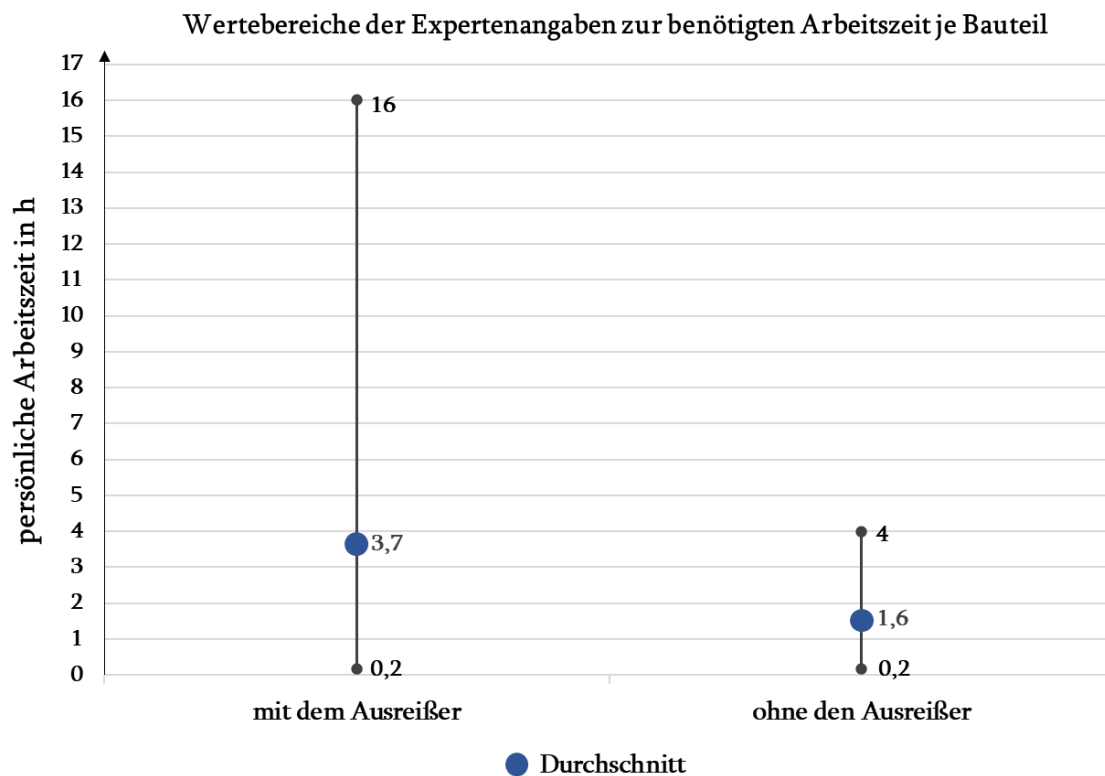


Abbildung 9.9: Wertebereiche der Expertenangaben zur benötigten Arbeitszeit bis zur Kenntnis der Fertigungstechnologie-Alternativen je Bauteil; Höchst-, Tiefst- und Durchschnittswert

Da die persönliche Arbeitszeit pro Bauteil angegeben wurde, ist ferner die Anzahl der zu analysierenden Bauteilen von Interesse. Aus Abschnitt 9.2.3 ist bereits bekannt, dass circa 20 Bauteile pro Entwicklungsprojekt intensiven fertigungstechnologischen Diskussionen unterzogen werden. Die Fertigungstechnologie der restlichen Teile wird üblicherweise aus dem Vorgängerprojekt übernommen. Im Sinne eines fairen Vergleichs der Zeitaufwände wird die Berechnung demnach mit einer Anzahl von zwanzig Bauteilen durchgeführt (DELLWEG 2022, S. 93 ff.).

Nach der Ermittlung der relevanten Eingangsgrößen folgt nun die Berechnung des insgesamt erforderlichen Arbeitszeitaufwandes. Für die Betrachtung *mit dem Ausreißer* ergibt sich folgende Rechnung:

$$AP \cdot DZA \cdot AB = GZA \quad (3)$$

mit

$$AP = \text{Anzahl beteiligter Personen} = 8$$

$$DZA = \text{durchschnittlicher Zeitaufwand pro Bauteil} = 3,7 \text{ h/Bauteil}$$

$$AB = \text{Anzahl analysierter Bauteile} = 20 \text{ Bauteile}$$

$$GZA = \text{gesamter Zeitaufwand}$$

folgt

$$8 \cdot 3,7 \frac{h}{\text{Bauteil}} \cdot 20 \text{ Bauteile} = GZA_{\text{mit dem Ausreißer}} = 592 \text{ h}$$

Bei Exklusion des Ausreißers lautet die Rechnung wie folgt:

$$8 \cdot 1,6 \frac{h}{\text{Bauteil}} \cdot 20 \text{ Bauteile} = GZA_{\text{ohne den Ausreißer}} = 256 \text{ h}$$

Die resultierenden Gesamtzeitaufwände je Fahrzeugprojekt von 592 Stunden unter Berücksichtigung aller Antworten und 256 Stunden bei Exklusion des Ausreißers dienen im Weiteren als Vergleichswerte für die *Fertigungstechnologie-Auswahl mit Methodik*.

Fertigungstechnologie-Auswahl mit Methodik. Im Sinne eines seriösen Vergleichs ist zu beachten, dass sich die Methodik-Anwendung auf diejenigen Karosserie-Bauteilumfänge bezieht, die von den zuvor befragten Experten verantwortet werden. Bei der Erfassung des Zeitbedarfs zur *Fertigungstechnologie-Auswahl mit Methodik* ist außerdem sicherzustellen, dass sich die Aufwände nicht auf ein zufällig gewähltes Fahrzeugprojekt beziehen. Daher wurde die Methodik mit elf verschiedenen Fahrzeugmodellen angewendet, um anschließend die minimalen und maximalen Zeitaufwände ermitteln zu können (DELLWEG 2022, S. 94 ff.). Diese minimalen und maximalen Zeitbedarfe bewegen sich im Bereich von circa drei bis vier Stunden. In Tabelle 9.3 wurden die Aufwände nach Methodik-Schritt und -Modul unterteilt, wobei das Geometriemodul den Großteil der Zeit beansprucht.

Tabelle 9.3: Minimale und maximale Methodik-Anwendungszeit (vgl. DELLWEG 2022, S. 96)

Methodik-Schritt	minimale Anwendungszeit	maximale Anwendungszeit
Datenaufbereitung	31,43 min	32,58 min
Anforderungsmodul	3,27 min	7,75 min
Produktionsmodul	2,27 min	4,23 min
Kostenmodul	0,68 min	1,08 min
Geometriemodul	126,05 min	190,18 min
Screening (zentrale Schnittstelle)	1,00 min	1,17 min
Summe	164,70 min (2,75 h)	236,99 min (3,95 h)

Befreites Entwicklungskapital. Auf Basis der bisherigen Ausführungen werden die zeitliche Differenz und damit einhergehende wirtschaftliche Effekte berechnet. Hierfür ist es zu-

nächst erforderlich, einen Parameter zur Umrechnung der zeitlichen Angaben in wirtschaftliche Kenngrößen zu ermitteln. Die Kostensätze der künftigen Methodik-Anwender stellen hierfür einen geeigneten Input dar, da sie öffentlich zugänglich und somit nachvollziehbar sind. Laut IG Metall erfolgt die Eingruppierung eines Entwicklungsingenieurs bei Berufseinstieg üblicherweise in die Entgeltgruppen 9 oder 10. Demnach ergibt sich aus Arbeitgeberperspektive ein Mindestkostensatz von circa 150 € pro Stunde (IG METALL 2021). Zusätzlich muss im Sinne eines fundierten Vergleichs der Aufwand zur praktischen Implementierung der Methodik berücksichtigt werden. Bei der Einrichtung des Software-Prototyps zur Methodik-Anwendung belief sich dieser Aufwand auf circa sechs Stunden.

Die Berechnung möglicher Ersparnisse ist demnach mittels folgender Formel möglich:

$$(GZA_{\text{ohne Methodik}} - (AZ_{\text{Methodik}} + IZ_{\text{Methodik}})) \cdot KS = BEK \quad (4)$$

mit

$GZA_{\text{ohne Methodik}}$ = gesamter Zeitaufwand ohne Methodik

AZ_{Methodik} = Anwendungszeit der Methodik

IZ_{Methodik} = Implementierungszeit der Methodik

KS = Kostensatz Entwicklungsingenieur

BEK = befreites Entwicklungskapital

Da bezüglich der Zeitaufwände *mit Methodik* und *ohne Methodik* jeweils zwei Fälle unterschieden werden, bietet sich die Darstellung der Berechnungen in einer Matrixformatierung an (Tabelle 9.4). Das durch die zeitsparende Anwendung der Methodik befreite Entwicklungskapital beläuft sich unter Nutzung obenstehender Formel auf mindestens 36.907,50 € und maximal 87.487,50 €. Die Summen beziehen sich auf die Analyse der Karosserie eines einzelnen Fahrzeugprojektes. Die Betrachtungen weiterer Fahrzeugprojekte und Fahrzeugbereiche versprechen demnach zusätzliche Potenziale.

Tabelle 9.4: Vergleich der beiden Szenarien *mit Methodik* und *ohne Methodik* zur Berechnung des befreiten Entwicklungskapitals pro Fahrzeugprojekt

befreites Entwicklungskapital	GZA ohne Methodik; mit dem Ausreißer	GZA ohne Methodik; ohne den Ausreißer
$AZ_{\text{Methodik}; \text{min}}$	$(592 \text{ h} - (2,75 \text{ h} + 6 \text{ h})) \cdot 150 \text{ €/h}$ = 87.487,50 €	$(256 \text{ h} - (2,75 \text{ h} + 6 \text{ h})) \cdot 150 \text{ €/h}$ = 37.087,50 €
$AZ_{\text{Methodik}; \text{max}}$	$(592 \text{ h} - (3,95 \text{ h} + 6 \text{ h})) \cdot 150 \text{ €/h}$ = 87.307,50 €	$(256 \text{ h} - (3,95 \text{ h} + 6 \text{ h})) \cdot 150 \text{ €/h}$ = 36.907,50 €

9.3.2 Entscheidungsqualität

Zum Ende der Nutzenbewertung wird die durch Anwendung der Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl erreichbare Entscheidungsqualität unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus den Abschnitten 9.2 und 9.3.1 analysiert.

In Abschnitt 9.2.1 konnte durch eine Betrachtung der von der Methodik vorgeschlagenen Fertigungstechnologien die Plausibilität der Technologieverteilung belegt werden. Anschließend gelang es in Abschnitt 9.2.2, die Funktionalität der Methodik sowie die Relevanz verwendeter Parameter mittels der Analyse von zehn fertigungstechnologisch bestätigten Bauteilen zu verifizieren. Weiterhin konnten Maßnahmen zur Methodik-Optimierung abgeleitet werden. Auch in Abschnitt 9.2.3 zeigte sich, dass die Mehrheit der analysierten Bauteile bzw. fertigungstechnologischen Änderungsvorschläge als plausibel zu beurteilen sind.

In Kombination mit dem in Abschnitt 9.3.1 dokumentierten zeitlichen und wirtschaftlichen Potenzial der Methodik ist die Entscheidungsqualität wie folgt zu beurteilen. Die Beschleunigung der Technologie-Diskussionsprozesse bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung und punktueller Verbesserung der fertigungstechnologischen Vorschlagsqualität bekräftigt die Steigerung der Entscheidungsqualität. Die angestrebte Veränderung der Zielgrößen konnte demnach durch eine Reduktion von Entwicklungszeit und Kosten sowie durch eine Erhöhung der Qualität erreicht werden (Abbildung 9.10).

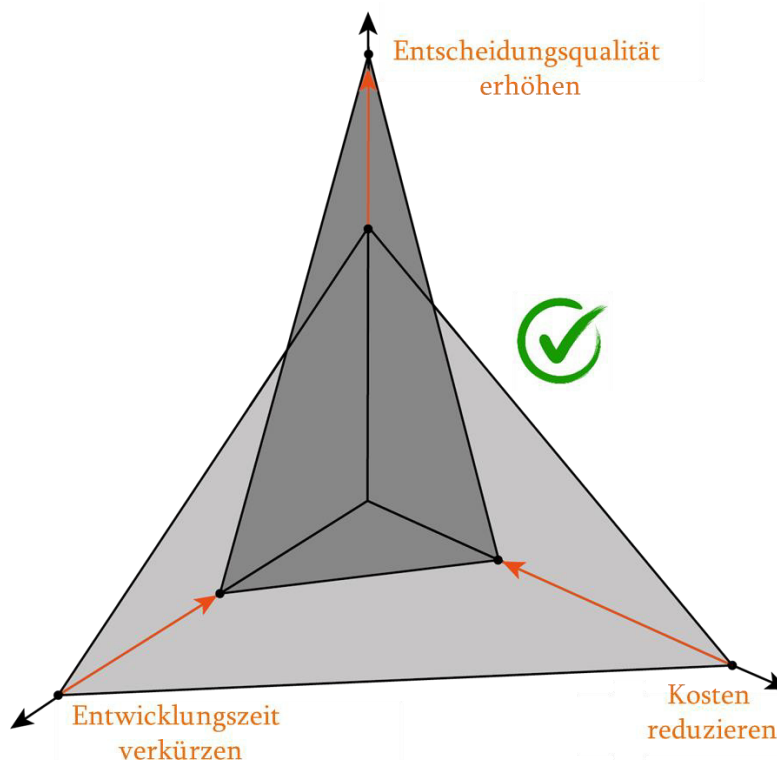


Abbildung 9.10: Veränderung der Zielgrößen durch den Einsatz der Methodik in der Produktentwicklung

10 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Das Schlusskapitel der Dissertation rundet die Arbeit durch eine Zusammenfassung und eine Beantwortung der Forschungsfragen ab. Den Abschluss der *Descriptive Study II* bilden eine kritische Diskussion der Übertragbarkeit und ein Ausblick auf potenzielle Erweiterungen der Methodik.

10.1 Zusammenfassung

Flexibilität und Effizienz stellen in der Produktentwicklung entscheidende Erfolgsfaktoren dar. Im als Anwendungsbereich dieser Arbeit dienenden Karosseriebau sind daher kurze Entwicklungszyklen sowie eine frühzeitige Kenntnis der Bauteil-Fertigungstechnologien anzustreben. Die Auswahlprozesse bezüglich dieser Technologien erfolgen bislang manuell und können aufgrund der benötigten Datengrundlage erst spät im Entwicklungsprozess finalisiert werden. Demnach ist eine automatisierte und frühzeitige Entscheidungsunterstützung bei der bauteilindividuellen Fertigungstechnologie-Auswahl erstrebenswert. Diese Unterstützung wird durch den Einsatz der in Kapitel 5 erarbeiteten Methodik ermöglicht.

Um die Methodik bereits zu Beginn der Karosserie-Entwicklung anwenden zu können, werden fehlende Daten auf Basis frühzeitig existierender Bauteilinformationen durch Ableitungslogiken und KI-Modelle generiert. Die Methodik gliedert sich nach den identifizierten Einflussfeldern und Parametern in vier Module:

- Das Anforderungsmodul zur Ableitung von Bauteilanforderungen,
- das Produktionsmodul zur Prognose und Ableitung der Auswirkungen von Bauteil-Fertigungstechnologien auf die Karosserieproduktion,
- das Kostenmodul zur fertigungstechnologieabhängigen Prognose und Berechnung von Bauteilkosten und
- das Geometriemodul zur KI- und bildbasierten Beurteilung der Eignung von Fertigungstechnologien zur Erzeugung der erforderlichen Bauteilgeometrie.

Die durch die Module generierten Daten werden in der zentralen Methodik-Schnittstelle vereint und anschließend durch Fuzzy-Regelsysteme quantitativ und objektiv bewertet. Die datenbasierte Vorgehensweise zur Unterstützung der Fertigungstechnologie-Auswahl ermöglicht einen hohen Automatisierungsgrad und die Erreichung der definierten Ziele:

- Eine Verkürzung der Entwicklungszeit,
- eine Reduktion der Entwicklungs- und Produktkosten und
- eine Erhöhung der Entscheidungsqualität.

Zum Abschluss der Zusammenfassung können die Forschungsfragen aus Abschnitt 3.4 durch folgende Erkenntnisse beantwortet werden.

Forschungsfrage 1: *Welche Parameter und Einflussfelder müssen in einer Methodik zur Auswahl der Fertigungstechnologie auf Bauteilebene berücksichtigt werden?*

- Auf Basis einer Literaturrecherche sowie einer Expertenumfrage konnten vier Einflussfelder zur Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene identifiziert werden: Anforderungen, Produktionsumfeld, Kosten und Geometrie.
- In der Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene werden diese identifizierten Einflussfelder und zugehörige Parameter berücksichtigt.

Forschungsfrage 2: *Wie können diese relevanten Parameter frühzeitig bereitgestellt und für eine objektive Fertigungstechnologie-Auswahl auf Bauteilebene verwertet werden?*

- Ein strukturiertes Vorgehensmodell in Modulform ermöglicht die schrittweise Generierung und Prognose von Informationen je Einflussfeld.
- Eine frühzeitige Bereitstellung relevanter Parameter je Fertigungsszenario und Bauteil gelingt durch die Einbindung von Ableitungslogiken und KI-unterstützten Prognosemodellen.
- Diese frühzeitige Bereitstellung relevanter Parameter kann durch die Verwendung frühzeitig verfügbarer Bauteildaten als Eingangsgrößen erreicht werden.
- Die modularen Informationen werden in der zentralen Schnittstelle der Methodik gebündelt. Diese Bündelung wird aufgrund der heterogenen Daten durch Fuzzy-Regeln zur Verwertung unscharfer Informationen verwirklicht, wodurch quantitative Potenziale je Fertigungstechnologie-Szenario und Bauteil generiert werden.

Forschungsfrage 3: *Welcher Nutzen ist durch die praktische Anwendung der Methodik in Prozessen der Produktentwicklung zu erwarten?*

- Die Funktionalität der Methodik konnte durch ihre Anwendung und eine Validierung der Ergebnisse bestätigt werden.
- Anmerkungen von Experten ließen sich der existierenden modularen Struktur der Methodik zuordnen und ermöglichten eine Optimierung der Methodik-Bausteine.
- Die angestrebte zeitliche und finanzielle Reduktion von Entwicklungsaufwänden wurde in einer Nutzenbewertung quantifiziert. Demnach verkürzt die Anwendung der Methodik fertigungstechnologische Diskussionen.

10.2 Diskussion der Übertragbarkeit

Im Folgenden wird die Übertragbarkeit der Methodik diskutiert. Hierbei liegt der Fokus zunächst auf einer branchenweiten Anwendung innerhalb der Karosserie-Entwicklung, anschließend auf einem Einsatz außerhalb des Karosseriebaus.

10.2.1 Karosserie-Entwicklung der Automobilbranche

Bezüglich einer branchenweiten Anwendung der Methodik durch Automobilunternehmen sind ihr prädiktiver Charakter und die erreichte Reduktion benötigter Eingangsgrößen hervorzuheben (siehe Methodik-Flowchart in Anhang D).

Zunächst sind Bauteilstücklisten mit frühzeitig in der Produktentwicklung verfügbaren Bauteilinformationen zur Ausführung der Methodik erforderlich. Diese umfassen die ungefähren Maße, die Masse, das Volumen sowie den koordinatenbasierten Verbauort in der Karosserie je Bauteil. Nach GUSIG (2010, S. 164) erstellen alle OEM diese Bauteillisten bereits in frühen Stadien der Produktentwicklung. Folglich stehen Bauteilstücklisten OEM-übergreifend zur Verfügung und können für die Anwendung der Methodik herangezogen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Listen unterschiedliche Formate aufweisen können, weshalb der Datenimport des Prototyps zur Methodik-Anwendung gegebenenfalls angepasst werden muss (PEIS 2022, S. 92 f.).

Die frühzeitig verfügbaren Bauteilinformationen werden durch CAD-Daten ergänzt, die vom Geometriemodul verwertet werden. Zugehörige Produktdatenmanagement-(PDM)-Systeme enthalten Zusatzinformationen, beispielsweise zum Material des Bauteils. Die Datenformate für PDM-Systeme sind in der Automobilindustrie nach ISO 10303-242-2020 standardisiert (ANDERL ET AL. 2000, S. 150 ff.; MECHLINSKI 2021, S. 176 f.). Entsprechende Systeme werden jedoch auf spezifische CAD-Umgebungen ausgelegt. Beispiele hierfür sind das PDM-System *Teamcenter* von Siemens mit den CAD-Systemen *NX* und *Solid Edge* sowie *3DEXperience* von Dassault Systèmes in Verbindung mit den CAD-Systemen *CATIA* und *SolidWorks* (MECHLINSKI 2021, S. 186). Demnach ist grundsätzlich von einer Nutzung von PDM- und CAD-Systemen in der Automobilbranche und damit von einer Übertragbarkeit der Vorgehensweise des Geometriemoduls auszugehen. Jedoch muss der Datenimport des Geometriemoduls in der praktischen Umsetzung gegebenenfalls an die verwendete CAD-Software angepasst werden (PEIS 2022, S. 92 f.).

Eine weitere benötigte Eingangsgröße ist durch die Maßtabellen im Anforderungsmodul gegeben, die zur Anpassung der Bauräume an verschiedene Fahrzeugmodelle verwendet werden. Sie enthalten nach Definition der *Society of Automobile Engineers* (SAE) spezifi-

sche Fahrzeugmaße (SAE J1100, 2009). Die genormten Tabellen werden zu Beginn des Entwicklungsprozesses erstellt und von allen OEM verwendet (PISCHINGER ET AL. 2021, S. 136 ff. und S. 1204). Aufgrund dieser Standardisierung und der umfassenden Verbreitung ist von einer branchenweiten Verfügbarkeit der Maßstabellen auszugehen (PEIS 2022, S. 93).

Insgesamt ist festzuhalten, dass die benötigten Input-Daten allen Automobilunternehmen in der Produktentwicklung vorliegen und die branchenweite Anwendbarkeit der Methodik-Vorgehensweise demnach gegeben ist. Die Übertragbarkeit wird durch die detaillierte Ausgabe aller prognostizierten und generierten Parameter sowie durch die Einsehbarkeit der Fuzzy-Regeln bekräftigt, wodurch außerdem Nachvollziehbarkeit und Akzeptanz der Methodik-Ergebnisse im Sinne einer vertrauenswürdigen KI gefördert werden.

10.2.2 Metallische Bauteile außerhalb des Karosseriebaus

Insbesondere der in batterieelektrischen Fahrzeugen verbaute *Hochvoltsspeicher* gewinnt in der Entwicklung neuer Fahrzeuggenerationen an Bedeutung (MAUERMANN ET AL. 2021, S. 53 f.). Die Anwendung der Methodik außerhalb der Rohkarosserie wird daher beispielhaft für metallische Bauteile eines bereits produzierten Hochvoltsspeichergehäuses nachfolgend beschrieben (Abbildung 10.1).

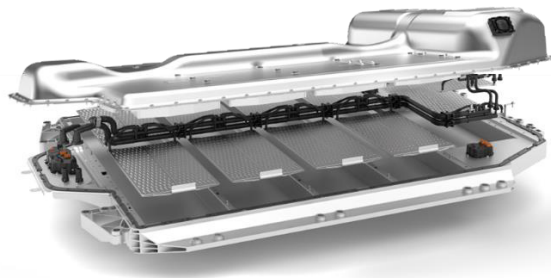


Abbildung 10.1: *Beispielhafte Darstellung eines Hochvoltsspeichergehäuses (BMW AG)*

Das Gehäuse besteht aus einem Boden, einem einteiligen Deckel sowie zahlreichen Längsträgern, Verbindungsstangen und Streben. Den Hauptteil des Bodens bildet eine Platte, die im Rahmen einer fertigungstechnischen Analyse keine Relevanz aufweist. Einige Bauteile sind aufgrund der symmetrischen Konzeption mehrfach im Gehäuse verbaut, zudem sind Normteile in der Analyse zu vernachlässigen. Die Anwendung der Methodik fokussiert sich demnach auf zwölf relevante Bauteile des Hochvoltsspeichergehäuses. Die resultierenden Fertigungstechnologiepotenziale (Skala 0 bis 100 Prozent, s. Abschnitte 5.3 und 9.2) sind in Tabelle 10.1 aufgelistet. Es ist ersichtlich, dass die Methodik bei elf der zwölf Bauteile die tatsächlich gewählte Fertigungstechnologie durch das jeweils höchste Technologiepotenzial bestätigt. Übereinstimmungen zwischen Methodik-Ergebnis und der in der Praxis gewählten Technologie wurden in grün markiert. Eine grundsätzliche Funktionalität der Methodik für die Umfänge des Hochvoltsspeichers ist daher gegeben (PEIS 2022, S. 79 ff.).

Tabelle 10.1: Übersicht der Methodik-Ergebnisse und Technologiepotenziale (in Prozent, s. Abschnitte 5.3 und 9.2) der zwölf analysierten Bauteile; TZ: Tiefziehen, SP: Strangpressen, G: Gießen

Bauteil	ermittelte Fertigungstechnologiepotenziale in Prozent					Ergebnis
	Tiefziehen	Gießen	Strangpressen	Walzprofilieren	Additive Fertigung	
1	82,7	0	0	0	0	TZ
2	70,1	49,6	0	0	0	TZ
3	43,1	0	51,1	0	0	SP
4	82,7	0	0	0	0	TZ
5	0	0	82,7	62,1	0	SP
6	0	0	82,7	62,1	0	SP
7	0	0	51,3	0	0	SP
8	58,9	0	52,9	51,2	0	TZ
9	0	69,0	0	0	0	G
10	0	0	65,2	62,1	0	SP
11	65,6	44,4	0	0	0	TZ
12	64,1	0	57,2	58,2	0	TZ

Lediglich bezüglich Bauteil 2 wird das Tiefziehen der realen Technologie des Gießens vorgezogen (Tabelle 10.1, in rot). Eine Analyse der Modul-Ergebnisse zeigt, dass das Geometriemodul überwiegend geometrische Tiefziehmerkmale in den Bauteilbildern erkennt (Klassifikation Tiefziehen 92,9; Klassifikation Gießen 5,4). In den Gesamtergebnissen fällt der Potenzialunterschied zwischen diesen beiden Technologien geringer aus (Tiefziehpotenzial 70,1; Gusspotenzial 49,6). Dies deutet darauf hin, dass das Guss-Szenario in den weiteren Modulen positiver bewertet wurde als im Geometriemodul. Die hohe Bewertung des Tiefziehens in Bezug auf die Geometrie ist mutmaßlich auf die Flachheit des Bauteils zurückzuführen (siehe seitliche Darstellung in Abbildung 10.2). Das Bauteil könnte aus zwei Tiefziehbauteilen (oben und unten) gefertigt und gefügt werden. Aufgrund möglicher funktionaler Nachteile gegenüber dem Gießen ist die hohe Bewertung des Tiefziehens jedoch kritisch zu beurteilen. Eine Anpassung des Kriteriums *minimale Kantenlänge* (siehe S. 72) für Gussbauteile oder ein Training des CNN im Geometriemodul mit neuen Gussbauteilbildern könnte diese Problematik beheben.



Abbildung 10.2: Bauteil 2 in der seitlichen (links) und isometrischen (rechts) Ansicht

10.3 Ausblick

In diesem Abschnitt folgt ein Ausblick bezüglich möglicher Erweiterungen der Methodik, die auf der Konzeption als lernendes und modular anpassbares System beruhen.

10.3.1 Integration weiterer metallischer Technologien

Das *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), die draht- und lichtbogenbasierte Additive Fertigung, bietet sich aufgrund der zunehmenden Reife und Relevanz zur künftigen Integration in die Methodik an (GIBSON ET AL. 2021, S. 285 ff.; RODRIGUES 2019, S. 8). Im Anwendungsbereich der Methodik sind Karosserie-Knotenpunkte potenziell für WAAM geeignet. Die Eignung für Großbauteile ist auf die im Gegensatz zu pulverbettbasierten Verfahren hohen Materialauftragsraten von mehreren Kilogramm pro Stunde zurückzuführen (WILLIAMS ET AL. 2016). Die endkonturnahe und topologisch optimierte WAAM-Bauteilfertigung bietet durch eine Reduktion von Materialabfällen zudem wirtschaftliche Vorteile gegenüber Technologien mit viel Materialverschnitt (RODRIGUES 2019, S. 7).

WAAM ist als Erweiterung zur pulverbettbasierten Additiven Fertigung in Grundzügen bereits in die Methodik integriert. Die Anwender können bezüglich der additiven Szenarien zwischen pulverbett- oder WAAM-basierten Bewertungskriterien wählen. So entfallen im WAAM-Fall Limitationen bezüglich der fertigbaren Bauteilgröße, vielmehr werden großvolumige Bauteile über einen zu definierenden cm^3 -Schwellenwert als grundsätzlich WAAM-geeignet bewertet. Ein künftiger Ausbau dieser automatisierten WAAM-Bewertung liegt angesichts der steigenden Bedeutung dieses Verfahrens nahe.

10.3.2 Integration nichtmetallischer Technologien

Im Folgenden wird ein Ausblick bezüglich möglicher Erweiterungen der Methodik zur Analyse nichtmetallischer Bauteile erarbeitet. Dieser bezieht sich auf spezielle Kunststoffbauteile, die im Karosseriebau und insbesondere im Fahrzeug-Interieur zum Einsatz kommen (PISCHINGER 2021, S. 231 ff. und S. 1233 ff.). Um diese Umfänge in die Methodik zu integrieren, müssen dominierende Kunststoff-Fertigungstechnologien (z. B. Extrudieren oder Kunststoffspritzguss) analysiert werden. Dies geht mit Anpassungen der KI-Modelle, der Ableitungsprinzipien sowie der Berechnungsformeln einher. Der modularen Logik folgend sind die folgenden Aspekte zu berücksichtigen (PEIS 2022, S. 33 ff. und S. 84 ff.):

Anforderungsmodul

Kunststoffe weisen im Vergleich zu vielen Metallen eine niedrigere maximale Gebrauchstemperatur auf (ABTS 2020, S. 45; BONNET 2014, S. 75). Ebenso ist der im Vergleich zu Me-

tallen höhere Wärmeausdehnungskoeffizient zu beachten (BARGEL 2022, S. 513 ff.). Während Kunststoffe im Karosserieumfeld insbesondere durch wärmeintensive Produktionsschritte und während der Fahrzeugnutzung thermisch belastet werden, ist der Fahrzeuginnenraum der Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Es kann festgehalten werden, dass die Anforderung der *Temperaturbeständigkeit* auch für Kunststoffbauteile relevant ist. Um diese im Anforderungsmodul zu bewerten, müssen die thermische Bewertung der Bauräume sowie die Ausprägung der Anforderungen (*gering, mittel, hoch*) adaptiert werden. Anschließend können resultierende Informationen in technologiespezifischen Fuzzy-Regeln unter Beachtung der Einsatztemperaturen (Tabelle 10.2) verwertet werden.

Tabelle 10.2: Maximale Einsatztemperaturen ausgewählter Kunststoffe (ROOS ET AL. 2022, S. 320)

Kunststoff	maximale Einsatztemperatur
Polyamid (PA12)	80 °C
Polypropylen (PP)	100 °C
Polyvinylchlorid (PVC)	65 °C

Kunststoffe unterliegen im Gegensatz zu Metallen keiner elektrochemischen Oxidation, weshalb die Anforderungskategorie *Korrosionsbeständigkeit* nicht von Relevanz ist. Jedoch gibt es bei Kunststoffen Alterungsvorgänge, die unter Einwirkung von Feuchtigkeit, UV-Strahlung oder Chemikalien die innere Struktur verändern und zum Bauteilversagen führen können (ELSNER ET AL. 2012, S. 62, BONTEN 2020, S. 191 ff.). Entsprechend sollte die Anforderungskategorie *Korrosionsbeständigkeit* in eine kunststoffspezifische Kategorie *Umweltbeständigkeit* umgewandelt werden. Dabei ist zu beachten, welchen Belastungen, Einflüssen und Substanzen das Bauteil während des Produktlebenszyklus ausgesetzt ist. Die Bauräume des Anforderungsmoduls können literatur- und expertenbasiert in der bekannten Klassenlogik *gering, mittel* und *hoch* bewertet werden.

Die Anforderungskategorie *Festigkeit/Steifigkeit* stellt auch für Kunststoffbauteile einen relevanten Aspekt dar, da sie mechanischen Belastungen ausgesetzt sind und strukturelle Anforderungen zu erfüllen haben. Kunststoffe weisen durch ihren makromolekularen Aufbau im Vergleich zu Metallen geringere Festigkeiten auf (BARGEL 2022, S. 514). Das aus Lastenheften zu beziehende und auf Basis von Expertengesprächen zu generierende Wissen muss in der Bauraumstruktur des Anforderungsmoduls hinterlegt werden, um die Übertragung der Kategorie *Festigkeit/Steifigkeit* auf Kunststoffbauteile zu ermöglichen.

Auch Kunststoffbauteile sollten in crashrelevanten Bereichen ein bestimmtes *Deformations- und Verformungsverhalten* aufweisen (BARGEL 2022, S. 498; ROOS ET AL. 2022, S.

320). Aufgrund ihres im Vergleich zu Metallen deutlich geringeren Elastizitätsmoduls absorbieren Kunststoffe Energie weniger effektiv (BARGEL 2022, S. 525). Im Sinne des Insassenschutzes ist zu beachten, ob Kunststoffteile im Falle eines Autounfalls sprödbrechen oder splintern (PISCHINGER 2021, S. 1235). Die existierenden Vorgaben müssen den Bauräumen zugewiesen werden, um anschließend Rückschlüsse auf geeignete Kunststoffe und zugehörige Technologien zu ermöglichen. Die Anforderungskategorie *Deformation* kann demnach durch eine Implementierung des zulässigen *Brechverhaltens* von Kunststoffbauteilen übertragen werden.

Produktionsmodul

Im Folgenden wird die Übertragbarkeit des Produktionsmoduls auf Kunststoffbauteile geprüft. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Kleben im Kunststoffumfeld das dominierende Fügeverfahren ist (PISCHINGER 2021, S. 241). Daher muss eine Kunststoffdatenbasis mit Ist-NAI-Daten aufgebaut werden, um anschließend kunststoffspezifische Prognosemodelle zu trainieren. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen der Bauteilgröße und erforderlichen Klebenähten kann die These formuliert werden, dass Bauteilmaße, -masse und -volumen potenziell geeignete Eingangsgrößen für die Prognose der Fügeaufwände darstellen und demnach bei diesem Punkt Analogien zum Metallbereich bestehen.

Bezüglich der weiteren Parameter des Produktionsmoduls ist zu beachten, dass die zurückzulegenden Logistikwege vom Standort potenzieller Lieferanten abhängen. Die Lieferantenstruktur muss daher im Back-End des Produktionsmoduls um die Standorte und die technologischen Verfügbarkeiten der Kunststofflieferanten ergänzt werden.

Kostenmodul

Die Kostenstrukturen von Kunststoffen weisen Unterschiede zu denen von Metallen auf, weshalb die Übertragung des Kostenmoduls mit dem Aufbau einer Kunststoffkostendatenbasis und dem anschließenden Training kunststoffspezifischer Kostenprognosemodelle einhergeht. Tabelle 10.3 zeigt eine Übersicht der Materialpreise gängiger Kunststoffe, die insbesondere zur Prognose der Herstellkosten relevant sind.

Tabelle 10.3: Übersicht der Materialpreise relevanter Kunststoffe (PLASTICKER ROHSTOFFBÖRSE 12/2022)

Kunststoff	Materialpreis
Polyamid (PA12)	2,50 bis 4 €/kg
Polypropylen (PP)	1 bis 2 €/kg
Polyvinylchlorid (PVC)	circa 1 €/kg

In Bezug auf Werkzeuginvestitionen ist zu berücksichtigen, dass Spritzgießwerkzeuge für Kunststoffbauteile kostengünstiger sind als Aluminiumdruckgießwerkzeuge, wenngleich

die Kosten ebenfalls von der Bauteilgröße und -geometrie abhängen. Auch die Lebensdauer der Werkzeuge unterscheidet sich zwischen Metall- und Kunststoffanwendungen. So lässt sich mit einem Kunststoffspritzgießwerkzeug bis zum verschleißbedingten Ersatz eine höhere Stückzahl fertigen als mit Aluminiumdruckgießwerkzeugen (Experteninterview 7 in PEIS 2022, S. 105 f.). Ferner ist zu beachten, dass Kunststoffkomponenten in der Automobilbranche üblicherweise von externen Lieferanten bezogen werden, da sich die OEM-eigenen Presswerke meist auf die Herstellung metallischer Bauteile fokussieren. Die Kostenanalysen können sich daher auf das Fremdbezugsszenario beschränken (Experteninterview 6 in PEIS 2022, S. 104 f.).

Geometriemodul

Auch im Kunststoffbereich werden die geometrischen Charakteristika maßgeblich durch Fertigungsverfahren diktiert. Daher ist eine Übertragung des bild- und klassenbasierten Ansatzes des Geometriemoduls grundsätzlich vielversprechend.

Ferner weisen die Bauteile bestimmter Kunststoff- und Metalltechnologien geometrische Ähnlichkeiten auf. Das Aluminium-Strangpressen zeigt beispielsweise prozessuale und damit geometrische Analogien zur Thermoplast-Extrusion. Gleiches gilt für den Aluminiumdruckguss und das Kunststoffspritzgießen. Das Äquivalent zum Tiefziehen in der Kunststoffverarbeitung ist das Thermoformen. Die Additive Fertigung von Kunststoffbauteilen unterliegt wie im Metallumfeld kaum geometrischen Limitationen. Daher liegt die These nahe, dass die CNN-Architekturen des Geometriemoduls mit Kunststoffbauteilbildern trainiert und angewendet werden können.

Die Analyse der Bauteilmerkmale innerhalb der Bilder mittels Objekterkennung ist auch für Kunststoffbauteile anzustreben, um die fertigungstechnologische Klassifikation zu unterstützen. Dies könnte mit dem bereits trainierten YOLO-Modell erfolgen, das jedoch für die Anwendung im Kunststoffumfeld validiert werden sollte.

Fuzzy-Regeln

Bezüglich der Definition von Fuzzy-Regeln zur Bewertung von Kunststoffbauteilen sind folgende Unterschiede zu beachten. Kosten- und geometriebezogene Regeln behalten die in Abschnitt 5.3.2 geschilderte Logik: Hohe Kosten sind potenzialmindernd, niedrige Kosten potenzialsteigernd. Hohe geometrische Klassifikationen sind potenzialsteigernd und geringe Klassifikationen potenzialmindernd. Anforderungsbezogene Aussagen müssen dagegen fundiert erfasst werden, um beispielsweise temperatur- oder alterungsspezifische Auswirkungen verschiedener Technologien auf Kunststoffbauteile beurteilen zu können. Diesbezüglich kann auf Kunststoff-Fachliteratur sowie durchgeführte Experteninterviews zurückgegriffen werden (PEIS 2022, S. 23 ff. und S. 97 ff.).

10.3.3 Integration weiterer Produktentwicklungsphasen

Im Folgenden wird eine Erweiterung der Methodik um bauteilgestaltende Fähigkeiten diskutiert. Moderne Bauteilkonstruktionsprozesse beinhalten die integrierte Anwendung intelligenter und automatisierter Programme zur Unterstützung menschlicher Konstruktionsarbeiten (BOHNACKER ET AL. 2012). *Generatives Design* ermöglicht die Erstellung eines neuen Bauteils und findet bislang vor allem in der Additiven Fertigung Anwendung (ZHU ET AL. 2021, S. 91 ff.). Bei der *Topologie-Optimierung* wird dagegen ein bestehendes CAD-Bauteilmodell unter Einbeziehung von Lastpfaden und konstruktiven Freiheitsgraden angepasst. Ansätze hierzu können auf Basis Künstlicher Neuronaler Netze automatisiert angewendet werden, um Spannungsverläufe oder das Deformationsverhalten der Bauteile zu optimieren (FREITAG ET AL. 2022). Ferner existieren Algorithmen zur automatisierten Dichteanpassung und Materialverschiebung innerhalb der Bauteilstruktur (SIGMUND ET AL. 2013, S. 1031 ff.).

Außerdem sind folgende Software-Lösungen für mögliche Erweiterungen der Methodik relevant. *Fusion 360* ist ein generatives Werkzeug zur automatisierten Erzeugung fertigungsgerechter Bauteil-Designs (Firma AUTODESK). *Creo Generative Design* bietet cloudbasierte Software zur automatischen Erstellung von Designkonzepten (Firma PTC). Die *nTop*-Plattform stellt generative Werkzeuge zur Verfügung, um wiederverwendbare Arbeitsabläufe zu generieren und simulative Prozesse zur Topologie-Optimierung umzusetzen (Firma NTOPOLOGY). *NX* bietet neben Funktionen des generativen Designs auch integrierte Lösungen zur Optimierung des Produktdesigns (Firma SIEMENS). *MSC Apex Generative Design* fokussiert sich auf die Konstruktion von Metallkomponenten bei geringem manuellem Aufwand (Firma MSC SOFTWARE).

Eine automatisierte Umkonstruktion der Bauteile gemäß den Fertigungstechnologie-Vorschlägen stellt daher eine potenzielle Erweiterung der Methodik dar. So könnte die Anwendbarkeit der Methodik auf den gesamten Prozess der Bauteilkonstruktion nach der Fertigungstechnologie-Entscheidung ausgeweitet werden. Hierfür muss die Methodik mit Algorithmen und Programmen der Topologie-Optimierung ausgestattet oder verknüpft werden. Dies erfordert die Implementierung detaillierter Konstruktionsrichtlinien und Prämissen für jedes Fertigungsszenario. Einen vielversprechenden Ansatz zur Integration generativer oder topologieoptimierender Algorithmen stellt die Analyse von Karosseriefunktionen zur frühzeitigen Ermittlung konstruktiver und fertigungstechnologischer Randbedingungen dar. Diesbezüglich bilden die Funktionsanalysen von PEIS (2022) eine Grundlage für weitere Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

ABTS 2020

Abts, G.: Kunststoff-Wissen für Einsteiger. Grundlagen, Eigenschaften und Recycling polymerer Werkstoffe; 4. Auflage. München: Hanser, 2020. ISBN: 978-3-446-46291-5.

ALBRECHT 2010

Albrecht, V.: Komplette von der Rolle gefertigt, Walzprofilieren: Die Flexibilisierung der Massenfertigung. In: *Industrieanzeiger* 60 (2010) 5.

ANDERL ET AL. 2000

Anderl, R.; Trippner, D.: STEP STandard for the Exchange of Product Model Data: Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2000. ISBN: 978-3-322-89096-2.

ATTARAN 2017

Attaran, M.: The rise of 3D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. In: *Business Horizons* 60 (2017) 5, S. 677–688.

BARGEL 2022

Bargel, HJ.: Werkstoffkunde: Strukturen - grundlegende Eigenschaften. 13. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2022. ISBN: 978-3-662-63961-0.

BAUMERS ET AL. 2019

Baumers, M.; Holweg, M.: On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. In: *Journal of Operations Management*, Wiley, 65 (2019) 8, S. 794–809.

BDG & VDD 2016

Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG) und Verband Deutscher Druckgießereien (VDD): Druckguss aus NE-Metallen, Technische Richtlinien, 2016.

BERGER ET AL. 2017

Berger, U.; Hartmann, A.; Schmid, D.: 3D-Druck – Additive Fertigungsverfahren. Haan: Europa-Lehrmittel, 2017. ISBN: 978-3-8085-5079-3.

BLESSING ET AL. 2009

Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. London: Springer, 2009. ISBN: 978-1-84882-586-4.

BOHNACKER ET AL. 2012

Bohnacker, H.; Laub, J.; Groß, B.; Lazzeroni, C.: Generative Design: Visualize, Program, and Create with Processing. London: Abrams & Chronicle Books, 2012. ISBN: 978-1-616-89077-3.

BONNET 2014

Bonnet, M.: Kunststofftechnik-Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. ISBN: 978-3-658-03138-1.

BONTEN 2020

Bonten, C.: Kunststofftechnik, Einführung und Grundlagen. München: Hanser, 2020. ISBN: 978-3-446-46471-1.

BORGELT ET AL. 2001

Borgelt, C.; Kruse, R. J.: Unsicherheit und Vagheit: Begriffe, Methoden, Forschungsthemen. In: KI 15 (2001) 3.

BORILLE ET AL. 2011

Borille, A. V.; de Oliveira Gomes, J.: Selection of Additive Manufacturing technologies using decision methods. In: InTech (2011)*, S. 29–53, ISBN: 978-9-533-07970-7.

BRAESS ET AL 2016

Braess, H.; Breitling, T.; Weissinger, J.; Grawunder, N.; Hackenberg, U.; Liskowsky, V.; Widmann, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Produktentstehungsprozess. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN: 978-3-658-09527-7.

BUECHLER ET AL. 2021

Buechler, T.; Schumacher, F.; Reimann, P.; Zaeh, M. F.: Methodology for an automatic and early manufacturing technology selection on a component level. In: Production Engineering 16 (2021), S. 23–41.

BUECHLER ET AL. 2022

Buechler, T.; Kolter, M.; Hallweger, L.; Zaeh, M. F.: Predictive cost comparison of manufacturing technologies through analyzing generic features in part screening. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 38 (2022), S. 299–319.

BUECHLER ET AL. 2023

Buechler, T.; Schulz, M.; Zaeh, M. F.: Automated geometric analysis of metallic components through picture recognition models for manufacturing technology assessments. In: Production Engineering 17 (2023), S. 1–20.

CHUNG 1978

Chung, K. L.: Elementare Wahrscheinlichkeitstheorie und stochastische Prozesse. Berlin, Heidelberg: Springer, 1978. ISBN: 978-3-540-08971-1.

CLAUSEN ET AL 2020

Clausen, J; Olteanu, Y: Tesla als Start-up in der Automobilbranche: Vom Pleitekandidat zum Gamechanger. Düsseldorf: Hans Böckler Stiftung, 2020.

* Jahrgang und Heftnummer nicht angegeben, da nicht ermittelbar. Gilt fortfolgend für fehlende Informationen.

COVERT, 2014

Covert, A.: 3-D printing 'ink' is way too expensive. CNNMoney. <<https://money.cnn.com/2014/02/20/technology/innovation/3d-printer-filament/>>, besucht am 26.12.2022.

DIETRICH 2018

Dietrich, J.: Strangpressen. In: Praxis der Umformtechnik, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018, S. 124–137. ISBN: 978-3-658-19529-8.

DÖRING ET AL. 2016

Döring N.; Bortz, J.: Forschungsmethoden und Evaluation. Berlin, Heidelberg: Springer-Lehrbuch, 5. Auflage, 2016. ISBN: 978-3-642-41089-5.

ELSNER ET AL. 2012

Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T.: Kunststoffe, Eigenschaften und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer VDI-Buch, 2012. ISBN: 978-3-642-16173-5.

EPPINGER 2012

Eppinger, S. D.: Design structure matrix methods and applications. Online-Ausgabe, Engineering systems, Boston: MIT Press, 2012. ISBN: 978-0-262-01752-7.

ESCHNER ET AL. 2020

Eschner, N.; Weiser, L.; Häfner, B.; Lanza, G.: Classification of specimen density in Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) using in-process structure-borne acoustic process emissions. In: Additive Manufacturing 34 (2020).

FOGEL 2016

Fogel, D. B.; Keller, D. L. J. M.: Fundamentals of Computational Intelligence. Neural Networks, Fuzzy Systems, and Evolutionary Computation. New York City: Wiley-IEEE Press, 2016, ISBN: 978-1-119-21440-3.

FORTE 2002

Forte, M.: Unschärfen in Geschäftsprozessen. Berlin: Weißensee, 2002, ISBN: 3934479790.

FREITAG ET AL. 2022

Freitag, S.; Peters, S.; Edler, P.; Meschke, G.: Reliability-based optimization of structural topologies using artificial neural networks. In: Probabilistic Engineering Mechanics 70 (2022).

FRIEDRICH 2017

Friedrich, H. E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017. ISBN: 978-3-658-12294-2.

FUKUSHIMA 1975

Fukushima, K.: Cognitron: A self-organizing multilayered neural network. In: Biological Cybernetics 20 (1975) 3, S. 121–136.

GÄNSICKE ET AL. 2015

Gänsicke, T.; Sandiano, J.: Systematische Bewertung von Leichtbaupotenzialen in der Fahrzeugentwicklung. In: LightweightDesign 8 (2015) 2, S. 42–47.

GAUSEMEIER ET AL. 2016

Gausemeier, J.; Pfänder, T.; Lehner, A.-C.: Strategische Unternehmensführung mit Szenario-Management. In: Handbuch Unternehmensorganisation. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016, S. 1-13. ISBN: 978-3-642-45370-0.

GEBHARDT 2016

Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 5. Auflage. München: Hanser, 2016. ISBN: 978-3-446-44539-0.

GIBSON ET AL. 2021

Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani; M.: Directed Energy Deposition. In: Additive Manufacturing Technologies 10 (2021). ISBN: 978-3-030-56127-7.

GOMERINGER 2007

Gomeringer, A.: Eine integrative, prognosebasierte Vorgehensweise zur strategischen Technologieplanung für Produkte. Dissertation, Universität Stuttgart, IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 460. Heimsheim: Jost-Jetter, 2007.

GOODFELLOW ET AL. 2016

Goodfellow, I.; Bengio, Y.; Courville, A.: Deep Learning. Boston: MIT PRESS, 2016. <<http://www.deeplearningbook.org>>, besucht am 26.11.2021.

GOETZPARTNERS 2019

Russo, P.; Schütte, G.: Die Zukunft des Entwicklungsprozesses in der Automobilindustrie, Ergebnisbericht, 2019. <https://www.goetzpartners.com/fileadmin/user_upload/Ergebnisbericht_Entwicklung_in_der_Automobilindustrie.pdf>, besucht am 22.04.2022.

GÖTZE 1991

Götze, U.: Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1991. ISBN: 978-3-8244-0078-2.

GREITEMANN 2016

Greitemann, J.: Methodik für die systematische Identifikation von Produktionstechnologien. Dissertation, Technische Universität München, iwB, 2016.

GROTE ET AL. 2018

Grote, KH; Feldhusen, J; Schinder, V: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 25. Auflage, Kapitel Q1.3 „Karosserie“. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-662-54805-9.

GUSIG 2010

Gusig, L. O.: Fahrzeugentwicklung im Automobilbau: Aktuelle Werkzeuge für den Praxiseinsatz. München: Hanser, 2010. ISBN: 978-3-446-42468-5.

GUYON ET AL. 2003

Guyon, I.; Elisseeff, A.: An Introduction to Variable and Feature Selection. In: Journal of Machine Learning Research 3 (2003), S. 1157–1182.

HAHN ET AL. 1997

Hahn, D.; Taylor, B.: Strategische Unternehmensplanung / Strategische Unternehmensführung. Heidelberg: Physica, 1997. ISBN: 978-3-662-41483-5.

HARBOUR 2014

The Harbour Report. Automotive Industry Publication of Oliver Wyman. <<https://www.oliverwyman.de/content/dam/oliver-wyman/global/en/2015/jul/Oliver-Wyman-Automotive-Manager-2015-final.pdf>>, besucht am 26.12.2022.

HARTOGH ET AL. 2017

Hartogh, P.; Vietor, T.: Unterstützung des Entscheidungsprozesses in der Produktentwicklung additiv herzustellender Produkte mithilfe von Ähnlichkeitskennzahlen. In: Additive Manufacturing quantifiziert. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, S. 49–68. ISBN: 978-3-662-54113-5.

HAWER ET AL. 2015

Hawer, S.; Ilmer, P.; Reinhart, G.: Klassifizierung unscharfer Planungsdaten in der Fabrikplanung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 6, S. 348–351.

HEITSCH 2000

Heitsch, J.-U.: Multidimensionale Bewertung alternativer Produktionstechniken. Dissertation, RWTH Aachen, 2000. ISBN: 3-8265-7544-X.

HERRMANN 2022

Herrmann, A.: Grundlagen der Anforderungsanalyse: Standardkonformes Requirements Engineering. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022. ISBN: 978-3-658-35459-6.

HEESCHEN 2015

Heeschen, D.: Kennzahlenbasierte Auswahl der Fertigungstechnologien und -ressourcen im industriellen Werkzeugbau. Dissertation, RWTH Aachen, 2015. ISBN: 978-3863593148.

HÖLLER 2020

Höllner, C.: Approaches and Concepts to increase the Economic Efficiency of Selective Laser Melting. Dissertation, TU Graz, 2020.

HOFER ET AL. 2019

Hofer, A.; Schnell, J.; Beck, B.; Reinhart, G.: Potential-based Technology Planning for Production Companies. In: Procedia CIRP 81 (2019), S. 1400–1405.

HUANG ET AL. 2015

Huang, Y.; Leu, M.C.; Mazumder, J.; Donmez, A.: Additive manufacturing: Current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering 137 (2015).

IG METALL 2021

IG Metall; Rehm, H.: Gehälter für Ingenieurinnen und Ingenieure 2021-2022. <https://www.igmetall.de/download/BaWue_20211207_IGM_Bro_Ingenieur_Geha_lter_2022_2023_99x210mm__c5f11a972233784b35db6282b89aa0ae77611b90.pdf>, besucht am 28.12.2022.

ISKANDER 2016

Strelow, M.; Wussmann, M.: Digitalisierung in der Automobilindustrie, Ergebnisbericht 09/2016. <<https://i-b-partner.com/wp-content/uploads/2016-09-06-Iskander-RZ-Whitepaper-Digitalisierung-in-der-Automobilindustrie-DIGITAL.pdf>>, besucht am 22.04. 2022.

KAHLERT 1995

Kahlert, J.: Fuzzy Control Für Ingenieure. Analyse, Synthese und Optimierung, Von Fuzzy-Regelungssystemen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 1995. ISBN: 978-3-322-90484-3.

KEUPER 1999

Keuper, F.: Fuzzy-PPS-Systeme. Einsatzmöglichkeiten und Erfolgspotentiale der Theorie unscharfer Mengen. In: Betriebswirtschaftliche Forschung zur Unternehmensführung 37, Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1999. ISBN: 978-3-322-99315-1.

KLEEMANN ET AL. 2017

Kleemann, S.; Fröhlich, T.; Vietor, T.; Türck, E.: A Methodological Approach Towards Multimaterial Design of Automotive Components. In: Procedia CIRP 60 (2017), S. 68–73.

KLOCKE 2018

Klocke, F.: Fertigungsverfahren 5. Gießen und Pulvermetallurgie. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-662-54727-4.

KOCH 2017

Koch, J.: Manufacturing Change Management – a Process-Based Approach for the Management of Manufacturing Changes. Dissertation, Technische Universität München, 2017.

KREBS 2012

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. In: Forschungsberichte iwB Band 255. München: Herbert Utz, 2012. ISBN: 978-3-831-64156-7.

KRUSE ET AL. 2015

Kruse, R.; Borgelt, C.; Braune, C.; Klawonn, F.; Moewes, C.; Steinbrecher, M.: Computational Intelligence. Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutive Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-658-10903-5.

KUMKE 2018

Kumke, M.: Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018. ISBN: 978-3-658-22208-6.

KURTZ GIEßEREIMASCHINEN 2016

KURTZ Gießereimaschinen: Niederdruckguss vs. Druckguss. Kurtz Ersä Magazin 06/2016. <<https://www.ke-mag.de/ausgabe-42/artikel/niederdruckguss-vs-druckguss.html>>, besucht am 28.12.2022.

LACHMAYER ET AL. 2018

Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Kaierle, S.: Additive Serienfertigung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. ISBN: 978-3-662-56462-2.

LINDEMANN ET AL. 2015

Lindemann, C.; Jahnk, U.; Reiher, T.; Koch, R.: Towards a sustainable and economic selection of part candidates for Additive Manufacturing. In: Annual international solid freeform symposium, University of Texas, Austin, 2015, S. 935–949.

LINDEMANN 2017

Lindemann, C.: Systematic Approach for Cost Efficient Design and Planning with Additive Manufacturing. Dissertation, Universität Paderborn, 2017. ISBN: 978-3-8440-5718-8.

LUEDKE ET AL. 2005

Luedke, B.; Pfestorf, M.: Von den Anforderungen an die Rohkarosserie zu den Anforderungen an den Werkstoff. In: Materials Testing 47 (2005).

MAHLE 2020

MAHLE fertigt erstmals Aluminium- Hochleistungskolben im 3D-Druck. Pressemitteilung, Stuttgart, 13.07.2020. <<https://www.mahle.com/de/news-and-press/press-releases/mahle-fertigt-erstmals-aluminium-hochleistungskolben-im-3d-druck-76416>>, besucht am 28.12.2022.

MAUERMANN ET AL. 2021

Mauermann, R.; Harst, S.; Göschel, A.; Jäckel, M.; Rennau, A.; Schieck, F.; Werner, M.; Bergmann, H.; Kaiser, S.; Maier, M.-J.; Lehnhus, D.; Pille, C.; Rahn, T.; Härdtlein, C.; Hohmann, A.; Klan, S.; Klöber-Koch, J.; Schmitt, M.: Giga-Casting – Chancen und Risiken im Karosseriebau. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 2021.

MAXARA 2010

Maxara, C.: Stochastische Simulation von Zufallsexperimenten mit Fathom. Eine theoretische Werkzeuganalyse und explorative Fallstudie. Hildesheim: Franzbecker, 2010. ISBN: 978-3-88120-489-7.

MAYER 2013

Mayer, H.: Interview und schriftliche Befragung. Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung. München: Oldenbourg, 2013. ISBN: 978-3-486-71762-4.

MECHLINSKI 2021

Mechlinski, T.: Produktdatenmanagement – Anforderungen und Lösungen: Konzeption, Auswahl, Installation und Administration von PDM-Systemen. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. ISBN: 978-3-662-63339-7.

MEINHARDT ET AL. 2005

Meinhardt, I.; Sunarjo, F.; Marquardt H.: Bestimmung des stochastischen Zeitverhaltens in Supply Chains. In: Logistics Journal 11 (2005), ISBN: 978-3-8350-0155-8.

MEUSER ET AL. 2009

Meuser, M.; Nagel, U.: The Expert Interview and Changes in Knowledge Production. London: Palgrave Macmillan, 2009. ISBN: 978-0-230-24427-6

MÖHRLE 2018

Möhrle, M.: Gestaltung von Fabrikstrukturen für die additive Fertigung. Wiesbaden: Springer Vieweg, Light Engineering für die Praxis, 2018. ISBN: 978-3-662-57706-6.

NAGULPELLI ET AL. 2019

NagulPELLI, K. S.; King, R. E.; Warsing, D.: Integrated traditional and additive manufacturing production profitability model. In: *Procedia Manufacturing* 34 (2019), S. 619–630.

NANDHAKUMAR ET AL. 2020

Nandhakumar, S.; Thirumalai, R.; Viswaaswaran, J.; Senthil T. A.; Vishnuvardhan V. T.: Investigation of production costs in manufacturing environment using innovative tools. In: *Materials Today, Proceedings* 37 (2020), S. 1235–1238.

NAU 2012

Nau, B.: Anlauforientierte Technologieplanung zur Auswahl von Fertigungstechnologien. Dissertation, RWTH Aachen, 2012. ISBN: 978-3-86359-064-2.

NICHOLS 2019

Nichols, M. R.: How does the automotive industry benefit from 3D metal printing? In: *Metal Powder Report* 74 (2019) 5, S. 257–258.

OSTERMANN 2014

Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium* (3. Auflage). Heidelberg, Berlin: Springer, 2014. ISBN: 978-3-662-43806-0.

PAASS ET AL. 2020

Paass, G.; Hecker, D.: *Künstliche Intelligenz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2020. ISBN: 978-3-658-30210-8.

PADILA ET AL. 2020

Padilla R.; Netto SL.; Da Silva EAB.: A survey on performance metrics for object-detection algorithms. In: *Proceedings of the 2020 international conference on systems, signals and image processing* (2020), S. 237–242.

PAPULA 2016

Papula, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. ISBN: 978-3-658-11923-2.

PAWLAK 2002

Pawlak, Z.: Rough set theory and its applications. In: *Journal of Telecommunications and Information Technology* (2002), S. 7–10.

PISCHINGER ET AL. 2016

Pischinger, S.; Seiffert, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. (8. erweiterte und ergänzte Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. ISBN: 978-3-658-09528-4.

PISCHINGER ET AL. 2021

Pischinger, S.; Seiffert, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. (9. erweiterte und ergänzte Auflage). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. ISBN: 9783658255572.

PILLER 2006

Piller, F. T.: Mass customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter (4. Edition). Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2006, S. 39–40. ISBN: 978-3-8350-0355-2.

PONN ET AL. 2011

Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsformen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. ISBN: 978-3-642-20579-8.

REBALA ET AL. 2019

Rebala, G.; Ravi, A.; Churiwala, S.: An Introduction to Machine Learning. Basel: Springer International, 2019. ISBN: 978-3-030-15728-9.

REDMON ET AL. 2015

Redmon, J.; Divvala S.; Girshick R.; Farhadi A.: You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2015), arXiv: 1506.02640v5.

REIHER ET AL. 2017

Reiher, T.; Lindemann, C.; Jahnke, U.; Deppe, G.; Koch, R.: Holistic approach for industrializing AM technology: from part selection to test and verification. In: Progress in Additive Manufacturing 2 (2017), S. 43–55.

RICHTER 2007

Richter, A. R.: Entwicklung und Umsetzung eines Kennzahlensystems zur Leistungsmessung im Karosseriebau. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2017.

RODRIGUES 2019

Rodrigues, T. A.; Duarte, V.; Miranda D. R. M.; Santos T. G.; Oliveira, J. P.: Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). In: Materials 12 (2019) 7, S. 1121 ff.

ROOS ET AL. 2022

Roos, E.; Maile, K.; Seidenfuss, M.: Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung, (7. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer, 2022. ISBN: 978-3-662-64732-5.

RUDOLPH 2018

Rudolph, J. P.: Cloudbasierte Potentialbewertung für die Additive Fertigung. Light Engineering für die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. ISBN: 978-3-662-58262-6.

RUFFO ET AL. 2006

Ruffo, M.; Tuck, C.; Hague, R.: Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes. In: Journal of Engineering Manufacture 220 (2006) 9, S. 1417–1427.

SABADKA ET AL. 2019

Sabadka, D.; Molnár, V.; Fedorko, G.: Shortening of Life Cycle and Complexity Impact on the Automotive Industry. In: TEM Journal 8 (2019) 4, S. 1295–1301.

SARFRAZ ET AL. 2021

Sarfraz, M. S.; Hong, H.; Kim, S. S.: Recent developments in the manufacturing technologies of composite components and their cost-effectiveness in the automotive industry: A review study. In: *Composite Structures* 266 (2021).

SAGER ET AL. 2021

Sager, C.; Zschech, P.; Kühl, N.: labelCloud: A Lightweight Domain-Independent Labeling Tool for 3D Object Detection in Point Clouds. (2021), arXiv: 2103.04970.

SCHINDLER 2014

Schindler, S.: Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion. Dissertation, Technische Universität München, 2014. ISBN: 978-3-8316-7105-2.

SCHMENNER ET AL. 1998

Schmenner, R. W.; Swink, M. L.: On theory in operations management. In: *Journal of Operations Management* 17 (1998) 1, S. 97–113.

SCHÖNING 2006

Schöning, S.: Potenzialbasierte Bewertung neuer Technologien. Dissertation, RWTH Aachen, 2006. ISBN: 3-8322-4912-5.

SCHÖNMAN 2018

Schönmann, A.: Antizipative Identifikation produktionstechnologischer Substitutionsbedarfe durch Verwendung von Zyklusmodellen. Dissertation, Technische Universität München, 2018.

SCHUH 2021

Schuh, G.; Bergweiler, G.; Fiedler, F.; Lackner, N.; Löffler, B.: Tiefziehen mit additiv gefertigten Werkzeugen. In: *WT Werkstattstechnik* 111 (2021) 11–12.

SCHUMACHER 2021

Schumacher, F.: Methodische Identifikation und Entwicklung von Automobilkomponenten für die additive Serienfertigung. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2021.

SIGMUND ET AL. 2013

Sigmund, O.; Maute, K.: Topology optimization approaches. In: *Structural Multidisciplinary Optimization* 48 (2013), S. 1031–1055.

SIMONYAN 2014

Simonyan, K.; Zisserman, A.: Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. In: *3rd International Conference on Learning Representations* (2014), S. 1–14.

SPUR 2008

Spur, G.: Produktion. In: *Hütte. Das Ingenieurwissen* (Jubiläumsausgabe, 150 Jahre Hütte). Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. ISBN: 978-3-540-71851-2.

STEINHÄUßER 2018

Steinhäüßer, T.: Methode zur Reifebewertung und Priorisierung von Aufgaben in der Serienreifmachung komplexer Produkte. Dissertation, Technische Universität München, 2018.

TRAEGER 1994

Traeger, D. H.: Einführung in Die Fuzzy-Logik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 1994. ISBN: 978-3-322-99590-2.

UNBEHAUEN 2001

Unbehauen, H.: Grundlagen der Fuzzy-Regelung. In: Regelungstechnik I. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2001, S. 329-360. ISBN: 978-3-528-01332-5.

VALASKOVA ET AL. 2014

Valaskova, K.; Kliestik, T.; Misankova, M.: The role of Fuzzy Logic in Decision Making Process. In: 2nd International Conference on Management Innovation and Business Innovation (2014).

VAYRE ET AL. 2013

Vayre, B.; Vignat, F.; Villeneuve, F.: Identification on some design key parameters for Additive Manufacturing: application on Electron Beam Melting. In: 46th CIRP Conference (2013), S. 264–269.

VIERTL 2003

Viertl, W.: Einführung in die Stochastik (3. Auflage). Wien: Springer, 2003. ISBN: 978-3-211-00837-9.

VINODH ET AL. 2014

Vinodh, S.; Sakthi, N.; Jeya, G.: Application of Fuzzy VIKOR for selection of rapid prototyping technologies in an agile environment. In: Rapid Prototyping Journal 20 (2014) 6, S. 523–532.

WASMER ET AL. 2011

Wasmer, A.; Staub, G.; Vroom, R. W.: An industry approach to shared, cross-organisational engineering change handling - The road towards standards for product data processing. In: Computer-Aided Design 43 (2011), S. 533–545.

WEISS 2019

Weiss, M.: Ermittlung funktioneller Zusammenhänge beim Fügen von Stanzmuttern und Blechhalbzeugen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.

WESTKÄMPER 2005

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, S. 117-152. ISBN-978-3-540-26039-4.

WESTKÄMPER 2010

Westkämper, E.; Warnecke HJ.: Einführung in die Fertigungstechnik (8. Auflage). Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010. ISBN: 978-3-8348-0835-6.

WICKEL 2017

Wickel, M. C.: Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen. Dissertation, Technische Universität München, 2017.

WILLIAMS ET AL. 2016

Williams, S.W.; Martina, F.; Addison, A.C.; Ding, J.; Pardal, G.; Colegrove, P.: WAAM – current and future developments. In: Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology 32 (2016) 7, S. 641–647.

WIRTH ET AL. 2000

Wirth, R.; Hipp, J.: CRISP-DM: Towards a standard process model for data mining. In: Proceedings of the 4th International Conference on the Practical Applications of Knowledge Discovery and Data Mining (2000).

WITTEK 2012

Wittek, K.: Standortübergreifende Programmplanung in flexiblen Produktionsnetzwerken der Automobilindustrie. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013. ISBN: 978-3-658-01838-2.

YEH ET AL. 2012

Yeh, T.-H.; Deng, S.: Application of machine learning methods to cost estimation of product life cycle. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 25 (4) 5, S. 340–352.

ZADEH 1965

Zadeh, L. A.: Fuzzy sets. In: Information and Control 8 (1965) 3, S. 338–353.

ZEBA ET AL. 2021

Zeba, G., Dabić, M., Čičak, M., Daim, T., & Yalcin, H.: Technology mining: Artificial intelligence in manufacturing. In: Technological Forecasting and social change 171 (2021).

ZHU ET AL. 2021

Zhu, J.; Zhou, H.; Wang, C.; Zhou, L.; Yuan, S.; Zhang, W.: A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. In: Chinese Journal of Aeronautics 34 (2021) 1, S. 91–110.

ZIMMERMANN ET AL. 1993

Zimmermann, H.-J.; Angstenberger, J.; Lieven, K.; Weber, R.: Fuzzy Technologien. Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993. ISBN: 978-3-642-95774-1.

Anhang

A. Übersicht aller betreuten Studienarbeiten im Themengebiet

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors dieser Arbeit die im Folgenden chronologisch aufgeführten, studentischen Arbeiten. Die erarbeiteten Ergebnisse und Bausteine sind zum Teil in die vorliegende Arbeit eingeflossen und an den relevanten Stellen zitiert. Der Autor dankt an dieser Stelle allen Studierenden herzlich für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

CHRISTOPH BUCHNER

Bewertung von Bauteiländerungen in der Additiven Fertigung. Masterarbeit, 2020.

PATRICK REIMANN (HOCHSCHULE MÜNCHEN)

Anforderungen im Karosseriebau – Vergleich relevanter Anforderungen an Karosseriebereiche mithilfe eines automatisierten Bewertungssystems im Hinblick auf die Industrialisierung von Additive Manufacturing. Masterarbeit, 2020.

MORITZ KOLTER

Datenbasiertes Entscheidungs-Unterstützungs-System zur ökonomischen Selektion von AM-Bauteilen in der automobilen Serienproduktion. Masterarbeit, 2020.

LUDWIG HALLWEGER

Auswirkungen additiv gefertigter Produkte auf Produktionsabläufe. Masterarbeit, 2021.

MARTIN SCHULZ

Automatisierte Bauteil-Geometrie-Analyse zur Fertigungstechnologie-Untersuchung mittels Methoden des maschinellen Lernens. Masterarbeit, 2021.

SEBASTIAN DELLWEG

Validierung und Optimierung von regelbasierten und KI-unterstützten Modellen zur Fertigungstechnologie-Analyse. Masterarbeit, 2022.

LUKAS PEIS

Analyse der Karosseriefunktionen als Einflussfaktor für die Fertigungstechnologie-Identifikation. Masterarbeit, 2022.

B. Schlüsselwörter der Literaturrecherche

Tabelle B.1: Übersicht verwendeter Schlüsselwörter in der Literaturrecherche

Sprache	Schlüsselwörter
Deutsch	Bauteilscreening Bauteilanalyse Bauteilkostenprognose Fertigungstechnologievergleich Kosten Fertigungstechnologie Fertigungstechnologie-Auswahl Fertigungstechnologiekostenanalyse Strategie Fertigungstechnologie Fertigungsketten Prozessketten Automotive Karosserie-Technologien Karosserie-Produktion Karosserie-Entwicklung Karosserie-Funktionen Anforderungen Karosseriebauteile
Englisch	part screening part screening manufacturing part screening engineering part screening automotive manufacturing cost prediction manufacturing technology compare manufacturing technology comparison manufacturing technology selection manufacturing technology costs manufacturing technology strategy manufacturing costs manufacturing comparison generative Design car body technologies car body production car body development car body functions requirements car body parts

C. Fragebögen der Expertenurfrage

C1. Bewertung der Einflussfelder zur Fertigungstechnologie-Auswahl

Frage 1: Für die Bauteil-Screening-Methodik bilden folgende Einflussgrößen die Basis zur Beurteilung und Auswahl der Bauteil-Fertigungstechnologie.

Bewerten Sie die Relevanz der Einflussgrößen!

	sehr relevant	relevant	neutral	weniger relevant	nicht relevant
Anforderungen (z. B. Temperatur, Crash, Korrosion)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einflüsse auf die Karosserie-Produktionslinie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kosten	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
geometrische Eignung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Freitext: Falls weniger oder nicht relevant, warum?

Anforderungen	
Produktion	
Kosten	
Geometrie	

Frage 2: Welche weiteren Faktoren/Einflussgrößen sind relevant?

Faktoren	Einfluss	Relevanz

C2. Erfassung des Expertenwissens zur Generierung der Fuzzy-Regeln

Beurteilen Sie die Eignung der Fertigungstechnologien in Bezug auf Temperatur, Crash und Korrosion! (Rollformen = Walzprofilieren)

Bitte vergeben Sie folgende Zahlenwerte gemäß dieser Legende:

0 = Technologie ist nicht geeignet

1 = Technologie ist mittelgut geeignet

2 = Technologie ist sehr gut geeignet

		Anforderungen bezüglich										
		Temperatur			Crash / Belastungen			Korrosion				
		hoch (ab +150°C)	mittel (+95°C bis 150°C)	niedrig (-40 bis +95°C)	hoch	mittel	niedrig	hoch	mittel	niedrig		
Fertigungstechnologie	Tiefziehen											
	Gießen											
	Strangpressen											
	Rollformen											
	Additive Fertigung											

Freitext: Falls nicht geeignet, warum?

Tiefziehen	
Gießen	
Strangpressen	
Rollformen	
Additive Fertigung	

Beurteilung der Bauteilgröße:

	großvolumige Bauteile (> 50 cm ³)	kleinvolumige Bauteile (< 10 cm ³)
Tiefziehen		
Gießen		
Strangpressen		
Rollformen		
Additive Fertigung		

Beurteilung der Bauteilprofile:

	geschlossenes Profil (Schnittdarstellung)	offenes Profil (Schnittdarstellung)
Strangpressen		
Rollformen		

C3. Bewertung der Methodik-Ergebnisse

Anmerkung: Im Rahmen dieser Dissertation wurden Bauteilbezeichnungen aus Daten- und Informationsschutzgründen durch Bauteilnummern ersetzt, bei Durchführung der Expertenbefragung waren die Bauteilnamen und die CAD-Modelle einsehbar.

Fall 1: Die Bauteil-Screening-Methodik liefert dieselbe Fertigungstechnologie wie der manuelle Prozess, empfiehlt zusätzlich aber eine alternative Fertigungstechnologie. Die Potenzialdifferenz zwischen diesen beiden Fertigungstechnologien ist marginal. (Rollformen = Walzprofilieren)

Bauteile	tatsächliche Fertigungstechnologie ≙ Vorschlag der Methodik	Alternative Fertigungstechnologie laut Methodik
1	Tiefziehen	Gießen Aluminium
2	Strangpressen	Rollformen
3	Tiefziehen	Gießen Aluminium
4	Tiefziehen	Gießen Aluminium
5	Tiefziehen	Gießen Aluminium
6	Strangpressen	Rollformen
7	Tiefziehen	Gießen Aluminium
8	Tiefziehen	Rollformen
9	Tiefziehen	Strangpressen
10	Tiefziehen	Rollformen

Welche Punkte sprechen gegen die Umsetzung der alternativen Fertigungstechnologie auf Platz 2? Bewerten Sie!

Bauteile	Begründung
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

Fall 2: Die Bauteil-Screening-Methodik liefert eine andere Fertigungstechnologie als der bisherige manuelle Prozess.

Bauteile	tatsächliche Fertigungstechnologie	alternative Fertigungstechnologie ≅ Vorschlag der Methodik
A	Tiefziehen	Rollformen
B	Tiefziehen	Rollformen
C	Tiefziehen	Rollformen
D	Tiefziehen	Gießen Aluminium
E	Tiefziehen	Strangpressen
F	Rollformen	Strangpressen

Ist die Empfehlung der alternativen Fertigungstechnologie plausibel?

Erläuterung Plausibilität: Die alternative Technologie ist mit vertretbar geringem *Umkonstruktionsaufwand* sowie unter funktionalen Gesichtspunkten umsetzbar.

Bewerten Sie!

	Ich stimme zu	Ich stimme nicht zu	Falls nein, warum nicht?
Bauteil A	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Bauteil B	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Bauteil C	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Bauteil D	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Bauteil E	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Bauteil F	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

C4. Erfassung der Aufwände ohne Methodik zur Erstellung der Nutzenbewertung

Faktoren im Fertigungstechnologie-Entscheidungsprozess. FT = Fertigungstechnologie

	mindestens („Best Case“)	maximal („Worst Case“)
Wie lange dauert in der Regel die Fertigungstechnologie-Diskussion für ein Bauteil?		
Bei welchen Bauteilen fällt die FT-Entscheidung schnell?		
Bei welchen Bauteilen fällt die FT-Entscheidung langsam?		
Wie viel persönliche Arbeitszeit fließt in die Diskussion bis zur Kenntnis aller möglichen Fertigungstechnologie- Alternativen je Bauteil? (Basis für Detailbewertung)		
Wie viel persönliche Arbeitszeit fließt in die Diskussion bis zur Fertigungstechnologie- Entscheidung je Bauteil?		
Wie viele Kollegen sind Ihrer Meinung nach an dem FT-Entscheidungsprozess beteiligt?		

D. Flowchart der Screening-Methodik zur Fertigungstechnologie-Auswahl

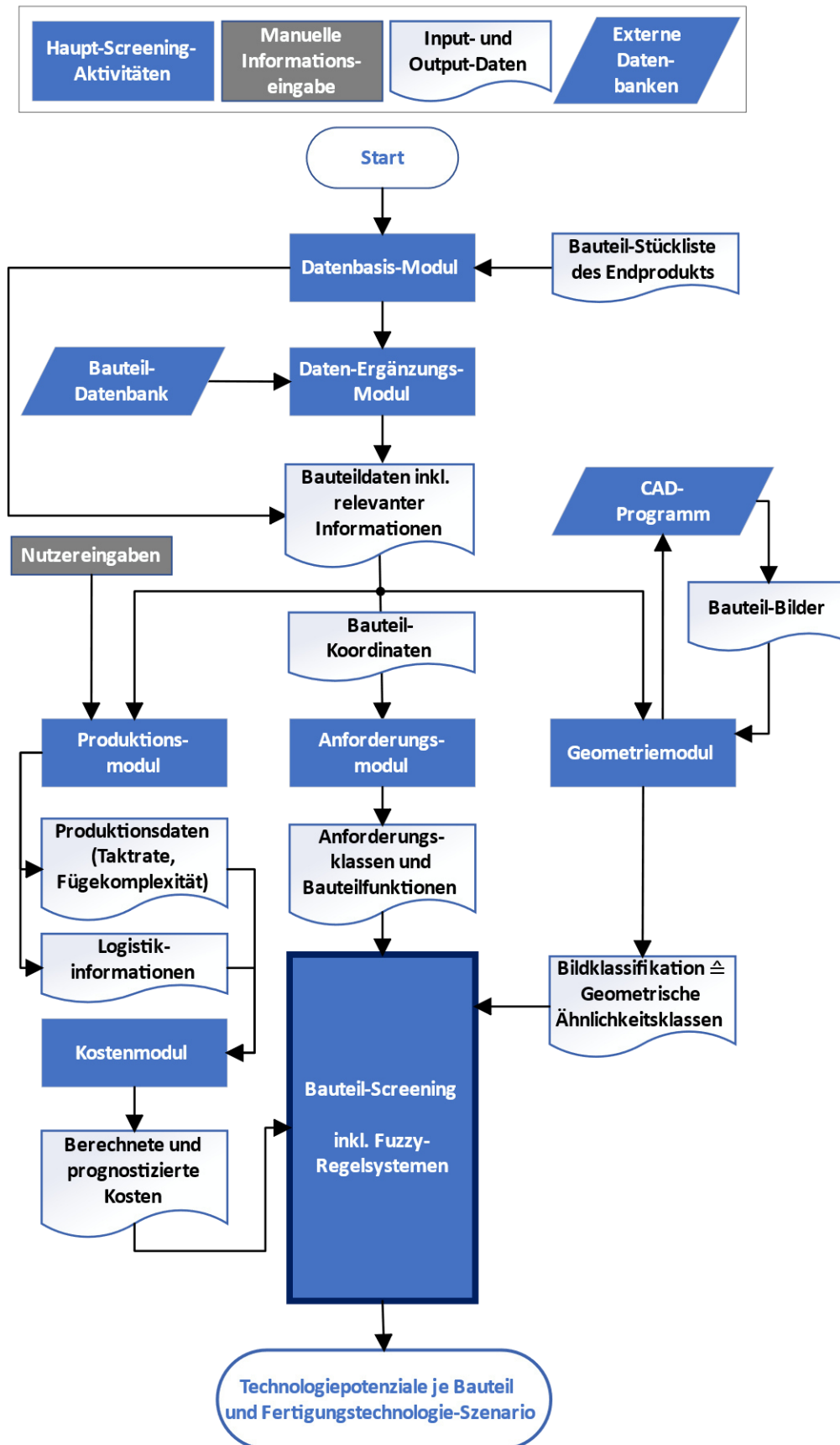


Abbildung D.1: Datenfluss der Screening-Methodik nach erfolgter Implementierung

E. Benutzeroberfläche des Prototyps zur Methodik-Anwendung

Datenaufbereitungsmodul

Strukturbericht einlesen PRISMA Daten auslesen

Zunächst Strukturbericht für Datenaufbereitung einlesen, um MMG_aufbereitet zu erzeugen

Anforderungsmodul

ICE Stufenheck Derivatsanpassung starten Anforderungsmodul starten Anforderungsergänzungsmodul starten

BEV Steilheck

Zunächst Derivatsanpassung ausführen (Excel-Makro öffnet sich im Hintergrund)

Geometriemodul

Sachnummer: 7333564 Zeige Bauteil-Klassifizierung

QUERTRAEGER HAA HINTEN

Klassifizierung

Prozess	Prozentuale KZG
Gießen	0.00
Strangpressen/Rollformen	0.00
Tiefziehen	42.00
G/TZ	0.00
SP/TZ	58.00

Erkannte Features des Bauteils

- Erkannte Löcher: 5
- Erkannte Verprägungen: 5
- Erkannte Krümmungen: 0
- Erkannte Geschlossene Profile: nein
- Erkannte Flansche: 1
- Hauptansicht: Heck
- Bearbeitungsrichtungen: 2

Aufteilung Derivat

Tiefziehen: 79.13%
Gießen: 4.83%
SP/TZ: 4.51%
G/TZ: 9.25%

Gussbauteile: 22
Strangpressbauteile: 29
Tiefziehbauteile: 402
G/TZ-Teile: 47
SP/TZ-Teile: 8

(1) Starte Struktur Export

(1) Starte SP Export

Feature-Bilder speichern

Feature-Bilder verwerfen

(2) Starte Objekterkennung

(3) Starte Klassifizierung

(4) Merge Ergebnisse

(5) Lade Ergebnisse

Ergebnisse der Klassifizierung und Objekterkennung wurden für die SNR 7333564 geplottet.

Produktionsmodul

ohne Integrationsvorschläge Inputdatei für Produktionsmodul erstellen Produktionsmodul starten

mit Integrationsvorschlägen

Zunächst Inputdatei für Produktionsmodul erstellen (Excel-Makro öffnet sich im Hintergrund)

Kostenmodul

Kosten in Euro vs Stückzahl

Lade Stückzahl-Prämisse

Derivatsstückzahl: 26000

Zinsfaktor: 0.11

Standort-Auswahl für HK-Berechnung: Europa USA China

Anzahl der Werke des Fokusderivats: 1

Lade Bauteilliste

Konventionell

NCAR

Offne komm. Skalierungsfaktor konv.

Offne komm. Skalierungsfaktor NCAR

AM Preis in € / cm3: 1

Aluminium

Stahl

Bauteile analysieren

Reporting Tool

Full Report

Bitte Bauteilliste laden

Screening-Tool

Datenbasis einlesen

Output Anforderungsmodul einlesen

Output Kostenmodul einlesen

Output Geometriemodul einlesen

Für Leichtbaugewichtung: kein Leichtbaufokus Leichtbaufokus

Für AM - Bewertung: Powder Bed WAAM

Starte Screening-Tool

Screening-Tool Output einlesen

Sachnummer: 7333564 Zeige FUZZY-Potentiale

QUERTRAEGER HAA HINTEN

Potentiale der Fertigungstechnologien

Technologie	Potentiale
Tiefziehen Stahl	58.89
Tiefziehen Alu	58.89
Gießen Alu	0.00
Gießen DWSG	0.00
Strangpressen	50.32
Rollformen	55.49
AM	0.00

Aufteilung Derivat nach Potentialen

Tiefziehen Stahl: 76.1%
Tiefziehen Alu: 21.5%
Gießen Alu: 0.7%
Gießen DWSG: 0.0%
Strangpressen: 1.4%
Rollformen: 0.0%
AM: 0.3%

Tiefziehen Stahlbauteile: 220
Tiefziehen Alubauteile: 62
Gießen Alubauteile: 2
Gießen Stahlbauteile: 0
Strangpressbauteile: 4
Rollformbauteile: 0
AM Bauteile: 1

Ergebnisse der Potential-Analyse für die SNR 7333564 wurden geplottet.

Abbildung E.1: Benutzeroberfläche des Prototyps zur Methodik-Anwendung mit farblich getrennten Modulbereichen, umgesetzt in der Programmiersprache *Python*

F. Fuzzy-Regelsysteme der Fertigungstechnologie-Szenarien (s. Abschnitt 5.3.3)

Tabelle F.1: Die Fuzzy-Regeln zur Bewertung des Fertigungsszenarios *Tiefziehen (TZ)*

Fuzzy-Regeln	wenn...,	dann...
1	Anforderung Korrosion gering	TZ-Potenzial hoch
2	Anforderung Korrosion mittel	TZ-Potenzial hoch
3	Anforderung Korrosion hoch	TZ-Potenzial hoch
4	Anforderung Deformation gering	TZ-Potenzial hoch
5	Anforderung Deformation mittel	TZ-Potenzial hoch
6	Anforderung Deformation hoch	TZ-Potenzial hoch
7	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit gering	TZ-Potenzial hoch
8	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit mittel	TZ-Potenzial hoch
9	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit hoch	TZ-Potenzial hoch
10	Anforderung Temperatur gering	TZ-Potenzial hoch
11	Anforderung Temperatur mittel	TZ-Potenzial hoch
12	Anforderung Temperatur hoch	TZ-Potenzial hoch
13	Kosten-Kennzahl gering	TZ-Potenzial gering
14	Kosten-Kennzahl mittel	TZ-Potenzial mittel
15	Kosten-Kennzahl hoch	TZ-Potenzial hoch
16	Bauteilvolumen gering	TZ-Potenzial hoch
17	Bauteilvolumen mittel	TZ-Potenzial hoch
18	Bauteilvolumen hoch	TZ-Potenzial hoch
19	Geometrie-Klassifikation Tiefziehen gering	TZ-Potenzial gering
20	Geometrie-Klassifikation Tiefziehen mittel	TZ-Potenzial mittel
21	Geometrie-Klassifikation Tiefziehen hoch	TZ-Potenzial hoch
22	Leichtbau-Potenzial hoch	TZ-Potenzial hoch

Tabelle F.2: Die Fuzzy-Regeln zur Bewertung des Fertigungsszenarios *Gießen*

Fuzzy-Regeln	wenn...,	dann...
1	Anforderung Korrosion gering	Gießen-Potenzial hoch
2	Anforderung Korrosion mittel	Gießen-Potenzial hoch
3	Anforderung Korrosion hoch	Gießen-Potenzial hoch
4	Anforderung Deformation gering	Gießen-Potenzial hoch
5	Anforderung Deformation mittel	Gießen-Potenzial mittel
6	Anforderung Deformation hoch	Gießen-Potenzial gering
7	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit gering	Gießen-Potenzial hoch
8	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit mittel	Gießen-Potenzial mittel
9	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit hoch	Gießen-Potenzial mittel
10	Anforderung Temperatur gering	Gießen-Potenzial hoch

11	Anforderung Temperatur mittel	Gießen-Potenzial hoch
12	Anforderung Temperatur hoch	Gießen-Potenzial hoch
13	Kosten-Kennzahl gering	Gießen-Potenzial gering
14	Kosten-Kennzahl mittel	Gießen-Potenzial mittel
15	Kosten-Kennzahl hoch	Gießen-Potenzial hoch
16	Bauteilvolumen gering	Gießen-Potenzial mittel
17	Bauteilvolumen mittel	Gießen-Potenzial mittel
18	Bauteilvolumen hoch	Gießen-Potenzial hoch
19	Geometrie-Klassifikation Gießen gering	Gießen-Potenzial gering
20	Geometrie-Klassifikation Gießen mittel	Gießen-Potenzial mittel
21	Geometrie-Klassifikation Gießen hoch	Gießen-Potenzial hoch
22	Leichtbau-Potenzial hoch	Gießen-Potenzial hoch

Tabelle F.3: Die Fuzzy-Regeln zur Bewertung des Fertigungsszenarios *Strangpressen (SP)*

Fuzzy-Regeln	wenn...,	dann...
1	Anforderung Korrosion gering	SP-Potenzial hoch
2	Anforderung Korrosion mittel	SP-Potenzial hoch
3	Anforderung Korrosion hoch	SP-Potenzial hoch
4	Anforderung Deformation gering	SP-Potenzial hoch
5	Anforderung Deformation mittel	SP-Potenzial hoch
6	Anforderung Deformation hoch	SP-Potenzial hoch
7	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit gering	SP-Potenzial hoch
8	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit mittel	SP-Potenzial mittel
9	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit hoch	SP-Potenzial gering
10	Anforderung Temperatur gering	SP-Potenzial hoch
11	Anforderung Temperatur mittel	SP-Potenzial hoch
12	Anforderung Temperatur hoch	SP-Potenzial hoch
13	Kosten-Kennzahl gering	SP-Potenzial gering
14	Kosten-Kennzahl mittel	SP-Potenzial mittel
15	Kosten-Kennzahl hoch	SP-Potenzial hoch
16	Bauteilvolumen gering	SP-Potenzial hoch
17	Bauteilvolumen mittel	SP-Potenzial hoch
18	Bauteilvolumen hoch	SP-Potenzial hoch
19	Geometrie-Klassifikation SP gering	SP-Potenzial gering
20	Geometrie-Klassifikation SP mittel	SP-Potenzial mittel
21	Geometrie-Klassifikation SP hoch	SP-Potenzial hoch
22	Leichtbau-Potenzial hoch	SP-Potenzial hoch
23	Objekterkennung geschlossenes Profil negativ	SP-Potenzial mittel
24	Objekterkennung geschlossenes Profil positiv	SP-Potenzial hoch

Tabelle F.4: Die Fuzzy-Regeln zur Bewertung des Fertigungsszenarios *Walzprofilieren (WP)*

Fuzzy-Regeln	wenn...,	dann...
1	Anforderung Korrosion gering	WP-Potenzial hoch

2	Anforderung Korrosion mittel	WP-Potenzial hoch
3	Anforderung Korrosion hoch	WP-Potenzial mittel
4	Anforderung Deformation gering	WP-Potenzial hoch
5	Anforderung Deformation mittel	WP-Potenzial hoch
6	Anforderung Deformation hoch	WP-Potenzial hoch
7	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit gering	WP-Potenzial hoch
8	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit mittel	WP-Potenzial hoch
9	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit hoch	WP-Potenzial hoch
10	Anforderung Temperatur gering	WP-Potenzial hoch
11	Anforderung Temperatur mittel	WP-Potenzial hoch
12	Anforderung Temperatur hoch	WP-Potenzial hoch
13	Kosten-Kennzahl gering	WP-Potenzial gering
14	Kosten-Kennzahl mittel	WP-Potenzial mittel
15	Kosten-Kennzahl hoch	WP-Potenzial hoch
16	Bauteilvolumen gering	WP-Potenzial mittel
17	Bauteilvolumen mittel	WP-Potenzial hoch
18	Bauteilvolumen hoch	WP-Potenzial hoch
19	Geometrie-Klassifikation Walzprofilieren gering	WP-Potenzial gering
20	Geometrie-Klassifikation Walzprofilieren mittel	WP-Potenzial mittel
21	Geometrie-Klassifikation Walzprofilieren hoch	WP-Potenzial hoch
22	Leichtbau-Potenzial hoch	WP-Potenzial hoch
23	Objekterkennung geschlossenes Profil negativ	WP-Potenzial hoch
24	Objekterkennung geschlossenes Profil positiv	WP-Potenzial mittel

Tabelle F.5: Die Fuzzy-Regeln zur Bewertung des Fertigungsszenarios *Additive Fertigung (AM)*

Fuzzy-Regeln	wenn...	dann...
1	Anforderung Korrosion gering	AM-Potenzial hoch
2	Anforderung Korrosion mittel	AM-Potenzial mittel
3	Anforderung Korrosion hoch	AM-Potenzial gering
4	Anforderung Deformation gering	AM-Potenzial hoch
5	Anforderung Deformation mittel	AM-Potenzial mittel
6	Anforderung Deformation hoch	AM-Potenzial gering
7	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit gering	AM-Potenzial hoch
8	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit mittel	AM-Potenzial mittel
9	Anforderung Steifigkeit / Festigkeit hoch	AM-Potenzial gering
10	Anforderung Temperatur gering	AM-Potenzial hoch
11	Anforderung Temperatur mittel	AM-Potenzial hoch
12	Anforderung Temperatur hoch	AM-Potenzial mittel
13	Kosten-Kennzahl gering	AM-Potenzial gering
14	Kosten-Kennzahl mittel	AM-Potenzial mittel
15	Kosten-Kennzahl hoch	AM-Potenzial hoch
16	Bauteilvolumen gering	AM-Potenzial hoch
17	Bauteilvolumen mittel	AM-Potenzial mittel
18	Bauteilvolumen hoch	AM-Potenzial gering
19	Leichtbau-Potenzial hoch	AM-Potenzial hoch

G. Verwendete Software

CATIA V5 R29	(Dassault Systèmes; Frankreich)
JUPYTER LAB	(Open-Source-Entwicklungsumgebung, IPython-Projekt)
SPYDER - ANACONDA 3	(Open-Source-Python-Entwicklungsumgebung)
LabelImg	(LIN 2018)
www.flaticon.com	(Symboldatenbank, verwendet für Piktogramme)

H. Kernpublikationen dieser Dissertation

BUECHLER ET AL. 2021 (PUBLIKATION I)

Buechler, T.; Schumacher, F.; Reimann, P.; Zaeh, M. F.: Methodology for an automatic and early manufacturing technology selection on a component level. In: Production Engineering 16 (2021)*, S. 23-41.

Link: <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01070-2>.

BUECHLER ET AL. 2022 (PUBLIKATION II)

Buechler, T.; Kolter, M.; Hallweger, L.; Zaeh, M. F.: Predictive cost comparison of manufacturing technologies through analyzing generic features in part screening. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 38 (2022)*, S. 299–319.

Link: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.04.012>.

BUECHLER ET AL. 2023 (PUBLIKATION III)

Buechler, T.; Schulz, M.; Zaeh, M. F.: Automated geometric analysis of metallic components through picture recognition models for manufacturing technology assessments. In: Production Engineering 17 (2023)*, S. 1–20.

Link: <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01146-7>.

* Heftnummer nicht angegeben, da nicht ermittelbar.