

Entwicklung einer Methodik für die Planung und Implementierung von flexiblen Montageanlagen in der Automobilproduktion

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Bennet Schulz, M.Eng.

aus

Hannover

Dortmund, 2026

Genehmigte Dissertation von der Fakultät Maschinenbau der Technischen Universität Dortmund

Tag der mündlichen Prüfung: 15.04.2026

Ort der mündlichen Prüfung: Dortmund

Erstgutachter: Prof. Dr. Michael Henke

Zweitgutachterin: Prof. Dr.-Ing. Katja Klingebiel

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. Matthias G.R. Faes

Mitglied der Prüfungskommission: Prof. Dr. Andreas Brümmer

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen Aktiengesellschaft

Kurzfassung

Die Flexibilität von Betriebsmitteln stellt in industriellen Fabriken einen entscheidenden Erfolgsfaktor dar. Angesichts volatiler Rahmenbedingungen – etwa durch eine wachsende Variantenvielfalt, geopolitische Unsicherheiten oder technologische Entwicklungen – erweist sich eine erhöhte Reaktionsfähigkeit als zwingend notwendig, um effiziente und zukunftsfähige Fertigungssysteme planen und realisieren zu können. Besonders in der automatisierten Montage innerhalb der Automobilindustrie besteht erhebliches Potenzial, da die aktuellen Betriebsmittel, also Montageanlagen den Fokus auf Performance legen.

Ausgehend von einer theoretischen Auseinandersetzung mit der Planung von Betriebsmitteln als Teil der Fabrikplanung wurden die zentrale Leitforschungsfrage sowie drei spezifische Forschungsfragen abgeleitet, die eine bestehende Forschungslücke adressieren und das praktische Problem begrenzter Flexibilität in Montageanlagen theoretisch fundieren. Die übergeordnete Forschungsfrage lautet: „*Wie lässt sich die Flexibilität in Montageanlagen systematisch planen, gestalten und konzeptionell implementieren?*“

Zur Beantwortung dieser Frage wurde eine methodisch mehrstufige Herangehensweise gewählt: Zunächst erfolgte eine internationale, systematische Literaturrecherche zu den Themenkomplexen Flexibilität, Montage und Automatisierung. Auf Basis dieser Analyse wurde ein konzeptionelles Flexibilitätsmodell zur Beschreibung der Flexibilität in Montageanlagen entwickelt. Des Weiteren wurde im Rahmen einer Multiple Case Study mit fünf internationalen Automobilherstellern eine Praxissicht auf das konzeptionelle Flexibilitätsmodell aufgenommen. Die Datenerhebung erfolgte über Experteninterviews und teilnehmenden Beobachtungen, analysiert mittels eines Mixed-Methods Ansatzes und einer Datentriangulation. Schließlich wurde das konzeptionelle und praxisorientierte Flexibilitätsmodell in einem Modell – dem Montage-Flexibilitätsmodell – zusammengeführt.

Das resultierende Montage Flexibilitätsmodell wurde prototypisch zur Planung einer flexiblen Montageanlage in der Automobilindustrie angewendet und im Rahmen von Validierungsworkshops mit Industrieexperten validiert.

Durch die systematische Integration von Planungsprozessen der Fabrikplanung, relevanter Flexibilitätsaspekte sowie konkreter Umsetzungsmöglichkeiten adressiert das entwickelte Montage-Flexibilitätsmodell sowohl die identifizierte Forschungslücke als auch die praktischen Herausforderungen in der industriellen Montageplanung. Eine Anwendung des Modells verspricht eine signifikante Steigerung der Flexibilität von Montageanlagen.

Abstract

The flexibility of production equipment has become a critical success factor in industrial production systems. In light of volatile conditions – such as increasing number of product variants, geopolitical uncertainties, and rapid technological advancements – an enhanced responsiveness is imperative to enable the planning and implementation of efficient and future-proof manufacturing systems. This is particularly relevant in automated automotive assembly, where current assembly stations are primarily optimized for performance, often at the expense of adaptability.

Based on a theoretical examination of equipment planning as part of factory planning, this research develops one central research question and three specific sub-questions. Together, these address a theoretical gap in the literature and reflect the practical challenge – limited flexibility of current assembly stations. The overarching research question is: *"How can flexibility in assembly systems be systematically planned, designed, and conceptually implemented?"*

To answer this question, a multi-stage methodological approach was employed. First, a systematic international literature review on the topics of flexibility, assembly, and automation has been conducted. Based on this analysis, a conceptual flexibility model has been developed. In a subsequent multiple case study involving five international automotive OEMs, the model has been expanded with practical insights to form a practical flexibility model. Data collection has been conducted via expert interviews and participant observations, and the analysis applied a mixed-methods approach and triangulation. Finally, theoretical and practical findings have been synthesized into an integrated model the Assembly Flexibility Model.

The resulting model has prototypically been applied in a planning project of a flexible automotive assembly station and validated through workshops with industry experts. By systematically integrating factory planning processes, relevant aspects of flexibility, and practical implementation requirements, the developed Assembly Flexibility Model addresses both the identified research gap and practical challenges in industrial assembly planning. Future application of the model is expected to significantly enhance the flexibility of automated assembly systems.

Danksagung

Mit dieser Dissertation geht eine intensive und herausfordernde Zeit zu Ende, die ohne die Unterstützung vieler Menschen nicht möglich gewesen wäre. Ihnen allen gilt mein aufrichtiger Dank.

Mein besonderer Dank gilt *Prof. Dr. Michael Henke*, der mich als Erstprüfer durch alle Phasen dieser Arbeit begleitet hat. Seine Anregungen und seine Unterstützung haben entscheidend zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen. Zudem möchte ich *Prof. Dr.-Ing. Katja Klingebiel* für die engagierte und intensive Betreuung danken. Ihre fachliche Kompetenz, ihre wertvollen Rückmeldungen und ihr offenes Interesse an meinen Forschungsthemen haben diese Arbeit in besonderer Weise geprägt.

Ebenso danke ich meinem betrieblichen Betreuer *Dr.-Ing. Daniel Reh* für seine inspirierenden Denkanstöße, seine konstruktive Kritik und seine kontinuierliche Unterstützung, durch die ich neue Perspektiven einnehmen und meine Argumentation weiter schärfen konnte. Für den stetigen Austausch, methodische Anregungen und beständige Ermutigung danke ich zudem *Dr. Michael Schachtschabel* sehr herzlich.

Ein herzlicher Dank gilt zudem meinen Weggefährten aus dem Volkswagen Doktorandenkolleg. Der fachliche Austausch, die gemeinsamen Diskussionen und der kollegiale Zusammenhalt haben die Arbeit an dieser Dissertation nicht nur bereichert, sondern auch getragen. Vor allem der Austausch unter den „Doks“ der Montageplanung war besonders wichtig. Danke *Luca* und *Tom*.

Mein tiefster Dank gilt meiner Familie, meiner Partnerin und meinen Freunden. Sie waren mir stets eine verlässliche Stütze, gaben mir Halt, Geduld und Zuversicht. Durch ihre Unterstützung, ihr Vertrauen und ihr offenes Ohr konnte ich mich ganz auf diese Arbeit konzentrieren. Diese Dissertation wäre ohne sie nicht möglich gewesen.

Bennet Schulz

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	IV
Danksagung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einführung und Forschungsvorgehen	1
1.1 Herausforderungen und Zielsetzung	2
1.2 Allgemeines Forschungsvorgehen	3
1.3 Aufbau der Arbeit	7
2 Fabrikplanung in der automobilen Montage	10
2.1 Montage in der Automobilindustrie	10
2.1.1 Grundlagen der Automobilindustrie	10
2.1.2 Montage im automobilen Produktionsprozess	12
2.1.3 Planung und Umsetzung der automatisierten Montage	14
2.2 Grundlagen der Fabrikplanung	17
2.2.1 Planungsprozess in der Fabrikplanung	17
2.2.2 Charakterisierung von Montagesystemen	23
2.2.3 Grundlagen der Betriebsmittelplanung	26
2.2.4 Veränderungsfähigkeit in der Fabrikplanung	27
2.3 Handlungsbedarf von flexiblen Montageanlagen	30
3 Stand der Forschung zu flexiblen Montageanlagen	34
3.1 Formulierung des Forschungskontextes	34
3.2 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche	36
3.3 Herleitung des konzeptionellen Flexibilitätsmodells	40
4 Erstellung des empirischen Forschungskonzepts	44
4.1 Aufstellung des empirischen Forschungskonzepts	44

4.1.1	Herleitung der Experteninterviews	44
4.1.2	Auswertung der Experteninterviews.....	47
4.1.3	Herleitung der Multiple Case Study in der Automobilindustrie.....	52
4.2	Zusammenfassung: Empirisches Forschungskonzept zur Beantwortung der Forschungsfragen.....	56
5	Forschungsergebnisse aus der Multiple Case Study	58
5.1	Aufbereitung der Interviews und Herleitung des Kategoriensystems	58
5.2	Single Case Analysen	67
5.2.1	Analyse des Falls „Volumen“	67
5.2.2	Analyse des Falls „Sport“	72
5.2.3	Analyse des Falls „Luxus“.....	75
5.2.4	Analyse des Falls „Premium“	79
5.2.5	Analyse des Falls „LNFZ“.....	84
5.2.6	Zusammenfassung der Single Case Analysen	90
5.3	Cross Case Analyse.....	93
5.3.1	Cross Case Analyse der Interviews.....	93
5.3.2	Cross Case Analyse der Beobachtungen.....	108
5.4	Triangulation der Ergebnisse aus Beobachtung und Interviews.....	110
5.4.1	Triangulation der Flexibilitätsanforderungen je Montagesystem	110
5.4.2	Triangulation der Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität	111
5.5	Herleitung des praxisorientierten Flexibilitätsmodells	121
6	Integriertes Montage-Flexibilitätsmodell.....	123
6.1	Fabrikplanungsprozess für flexible Montageanlagen	123
6.2	Beschreibung der Flexibilität und der Flexibilitätsanforderungen für Montageanlagen.....	127
6.3	Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität für Montageanlagen.....	131
6.4	Zusammenfassung: Integriertes Montage-Flexibilitätsmodells.....	135
7	Validierung der Forschungsergebnisse	139
7.1	Prototypische Umsetzung	139
7.1.1	Umsetzung der Prototypenanlage	142
7.1.2	Effekte der flexiblen Gestaltung der Montageanlage	146

Inhaltsverzeichnis

7.1.3	Rückschluss zu den Forschungsergebnissen.....	149
7.2	Validierungsworkshops.....	150
7.3	Zusammenfassung: Validierung der Forschungsergebnisse und prototypische Umsetzung	154
8	Zusammenfassung, weiterer Forschungsbedarf und Limitationen	156
8.1	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	156
8.2	Kritische Betrachtung und weiterer Forschungsbedarf.....	157
9	Literaturverzeichnis	161
Anhang		175

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Forschungszyklus i. A. a. (Rost 2002, S. 29, 2005, S. 3)	4
Abbildung 2: Übersicht des Forschungskonzepts dieser Arbeit	7
Abbildung 3: Aufbau der Arbeit	9
Abbildung 4: Ausführungsbeispiele für Montageroboter (Hesse 2012a, S. 268)	15
Abbildung 5: Hierarchieebenen der Fabrik i. A. a. (Burggräf et al. 2021c, S. 11; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 6; Westkämper 2007, S. 11; Wiendahl et al. 2024, S. 113) ...	20
Abbildung 6: Planungsphasen von Fabrikplanungsprojekten i. A. a. (Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 8)	22
Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Produktionsarten und Organisationstypen der Montage i. A. a. (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 158; Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 42ff.)	24
Abbildung 8: Charakteristika von Montagesystemen i. A. a. (Lotter 2012e, S. 168)	26
Abbildung 9: Flexibilitäten von Fertigungssystemen i. A. a. (Sethi und Sethi 1990, S. 297) ..	28
Abbildung 10: Konzeptionelles Flexibilitätsmodell für die Flexibilität von Montageanlagen	43
Abbildung 11: Datenaufnahmeprotokoll für die Interviews	46
Abbildung 12: Vorgehen der qualitativen Inhaltsanalyse i. A. a. (Mayring und Fenzl 2022, S. 699)	48
Abbildung 13: Darstellung Kategoriensystem i. A. a. (Mayring und Fenzl 2022, S. 544f.)	50
Abbildung 14: Leitfaden und Datenaufnahmeprotokoll der teilnehmenden Beobachtung	53
Abbildung 15: Verschiedene Typen von Case Study Forschung i. A. a. (Yin 2018, S. 48)	55
Abbildung 16: Forschungskonzept zur Beantwortung der FF	57
Abbildung 17: Verteilung der induktiven Unterkategorien der dK7	63
Abbildung 18: Verteilung der induktiven Unterkategorien der dK1	64
Abbildung 19: Verteilung der induktiven Unterkategorien der dK2	65
Abbildung 20: Verteilung der induktiven Unterkategorien der dK3 bis dK5	66
Abbildung 21: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „Volumen“	69
Abbildung 22: Prioritätsranking der Flexibilitätsaspekte des Falls „Volumen“	70
Abbildung 23: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „Sport“	73
Abbildung 24: Prioritätsbetrachtung der Flexibilitätsaspekte aus dem Fall „Sport“	74
Abbildung 25: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „Luxus“	76
Abbildung 26: Darstellung des Prioritätsrankings des Falls „Luxus“	78
Abbildung 27: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „Premium“	81
Abbildung 28: Darstellung des Prioritätsrankings des Falls „Premium“	82
Abbildung 29: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „LNFZ“	86
Abbildung 30: Priorität der Flexibilitätsaspekte in dem Fall „LNFZ“	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 31: Cross Case Analyse der Priorität der Planungshorizonte	95
Abbildung 32: Cross Case Analyse der angegebenen Planungshorizonte.....	96
Abbildung 33: Cross Case Analyse zu den Projektbeispielen je Planungshorizont	97
Abbildung 34: Darstellung der Relevanz der Flexibilitätsaspekte über die Multiple Case Study	98
Abbildung 35: Cross Case Darstellung der Priorität der Flexibilitätsaspekte	101
Abbildung 36: Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilitätsaspekte aus der Multiple Case Study	105
Abbildung 37: Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität nach Nennung.....	106
Abbildung 38: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Anpassbarkeit	112
Abbildung 39: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Integrierbarkeit	112
Abbildung 40: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Konvertierbarkeit.....	113
Abbildung 41: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Mobilität	113
Abbildung 42: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Skalierbarkeit.....	113
Abbildung 43: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Wiederverwendbarkeit	114
Abbildung 44: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Anpassbarkeit	115
Abbildung 45: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Integrierbarkeit	116
Abbildung 46: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Konvertierbarkeit.....	117
Abbildung 47: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Mobilität	118
Abbildung 48: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Skalierbarkeit.....	118
Abbildung 49: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Wiederverwendbarkeit	119
Abbildung 50: Aufsummierte Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten.....	120
Abbildung 51: Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilitätsaspekte für die Bestandteile von Montageanlagen.....	120
Abbildung 52: Praxisorientiertes Flexibilitätsmodell für die Planung von flexiblen Montageanlagen.....	122
Abbildung 53: Vergleich der Planungshorizonte der Literatur mit der Industrie.....	124
Abbildung 54: Planungshorizonte der Fabrikplanung für das Montage-Flexibilitätsmodell	127
Abbildung 55: Flexibilitätsbeschreibung und -anforderungen des Montage-Flexibilitätsmodells.....	131
Abbildung 56: Darstellung des Baukastens zur Planung flexibler Montageanlagen.....	134
Abbildung 57: Umsetzungsprozess für die Flexibilität im Montage-Flexibilitätsmodell	135

Abbildung 58: Montage-Flexibilitätsmodell für die Planung von flexiblen Montageanlagen	137
Abbildung 59: Erarbeitung der Flexibilitätsanforderungen der prototypischen Umsetzung.	140
Abbildung 60: Umsetzungsmöglichkeiten der Anpassbarkeit und der Mobilität nach dem Baukasten zur Planung flexibler Montageanlagen	141
Abbildung 61: Darstellung der Bauteile für die Prototypenanlage	142
Abbildung 62: Greiferauswahl für den Versuch des universellen Greifens	143
Abbildung 63: Versuchsaufbau zur Greiferauswahl.....	143
Abbildung 64: Punktwolke der Karosse nach dem Aufnehmen der Bilder	144
Abbildung 65: Fügpunkt und Verkleidung Säule D-oben	145
Abbildung 66: Systemaufbau für die Prototypenanlage	145
Abbildung 67: Darstellung der Agenda der Validierungsworkshops	151

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fahrzeugsegmente in der Automobilindustrie i. A. a. (Europäische Kommission 2025)	11
Tabelle 2: Darstellung der relevanten Suchbegriffe für die Literaturrecherche	34
Tabelle 3: Ergebnisse der Literaturrecherche	35
Tabelle 4: Autoren aus der Kategorie flexible Fertigungssysteme.....	36
Tabelle 5: Autoren aus der Kategorie flexibles Systems Engineering	38
Tabelle 6: Autoren aus der Kategorie Automatisierungspotenzial	39
Tabelle 7: Schema zur Erstellung des Interviewleitfadens	46
Tabelle 8: Interviewtracking	46
Tabelle 9: Kodierleitfaden für die qualitative Inhaltsanalyse i. A. a. (Mayring 2022, S. 696).....	48
Tabelle 10: Kategorien der deduktiven Hauptkategorie Planungsprozess inkl. Planungshorizonte.....	51
Tabelle 11: Kategorien der deduktiven Hauptkategorie Flexibilitätsaspekte	52
Tabelle 12: Zuordnung der Fälle zu den Fahrzeugsegmenten	55
Tabelle 13: Finales Interviewtracking	59
Tabelle 14: Vorgehensweise zur Textanalyse.....	60
Tabelle 15: Kategorisierung nach dem ersten Materialdurchlauf.....	61
Tabelle 16: Detaillierung der dK7 nach dem dritten Materialdurchlauf.....	62
Tabelle 17: Finales Kategoriensystem	67
Tabelle 18: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „Volumen“	90
Tabelle 19: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „Sport“.....	91
Tabelle 20: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „Luxus“.....	91
Tabelle 21: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „Premium“	92
Tabelle 22: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „LNFZ“.....	93
Tabelle 23: Charakterisierung der Montagesysteme der einzelnen Fälle	109
Tabelle 24: Vergleich der Planungstätigkeiten je Planungshorizont	125
Tabelle 25: Abschätzung der Planungszeit für flexible Montageanlagen bei örtlichem Versetzen.....	147
Tabelle 26: Abschätzung der Planungszeit für flexible Montageanlagen bei der Integration eines neuen Bauteils.....	148
Tabelle 27: Abschätzung der Planungszeit für flexible Montageanlagen für die Nutzung für ein neues Fahrzeugprojekt	149

Abkürzungsverzeichnis

Bspw.	Beispielsweise
Ca.	Circa
DSR	Design Science Research
Etc.	Et cetera
EUA	Embedded Unit of Analysis
FF	Forschungsfrage
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
IT	Informationstechnologie
LFF	Leitforschungsfrage
LNFZ	Leichte Nutzfahrzeuge
MRK	Mensch-Roboter Kollaboration
OEM	Original Equipment Manufacturer
RAS	Reconfigurable Assembly Systems
RMS	Reconfigurable Manufacturing Systems
VWN	Volkswagen Nutzfahrzeuge
z. B.	Zum Beispiel

1 Einführung und Forschungsvorgehen

Eine industrielle Fabrik besteht aus verschiedenen Bereichen – z. B. der Montage (vgl. Bergholz 2005, S. 109ff.) –, die im Rahmen des Fabrikplanungsprozesses geplant werden. Über Planungsphasen wie die Zielsetzung, die Konzept- und Detailplanung bis hin zur Realisierung werden Montagesysteme – in verschiedenen Planungshorizonten – geplant und aufgebaut (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 28f.; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 8; Wiendahl et al. 2024, S. 22). Die Montage befasst sich innerhalb einer Fabrik mit dem Zusammenfügen und Fertigstellen der finalen Bauteile (vgl. Dictionary of Production Engineering IV 2020, S. 174) und beansprucht in der industriellen Produktion bis zu 70% der gesamten Fertigungsdauer. Daher ist eine möglichst effiziente Planung – mit den Zielgrößen kurze Montagezeiten, geringe Kosten sowie eine hohe Qualität – besonders wichtig (vgl. Lotter 2012a, S. 4ff.; Westkämper 2006, S. 68f.).

Die Montageplanung umfasst zahlreiche Aufgaben, wie die Festlegung der Produktionsart, die Bestimmung des Organisationstyps der Montage und die Gestaltung der Arbeitsplätze. Die Produktionsart kann bspw. als Einzel-, Serien-, oder Massenfertigung erfolgen, welche sich hinsichtlich Wiederholhäufigkeit, *Jahresproduktionsvolumen* und *Variantenanzahl* unterscheiden (vgl. Holtewert und Wiendahl 2020, S. 136f.). In Abhängigkeit von der gewählten Produktionsart stehen verschiedene Organisationstypen zur Verfügung, nach denen die Montage aufgebaut werden kann. Es wird z. B. zwischen Baustellen-, Reihen- oder Fließmontagen unterschieden (vgl. Kellner et al. 2020, S. 73ff.). Innerhalb der jeweiligen Organisationstypen erfolgt die Gestaltung der Arbeitsplätze, die in manuelle, automatisierte oder hybride Arbeitsplätze unterteilt werden (vgl. Lotter 2012a, S. 3).

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Montage von Fahrzeugherstellern in der Automobilindustrie – einem der größten Industriezweige in Deutschland und weltweit (vgl. Fortune 2025; Statistisches Bundesamt 2025a, 2025b). Im Produktionsprozess der Automobilindustrie stellt die Montage den letzten Prozessschritt dar, nachdem Presswerk, Karosseriebau und Lackiererei durchlaufen wurden (vgl. Kern 2021, S. 27; Kropik 2021, S. 14; Schmidt 2021, S. 79; Stadler et al. 2008, S. 146). Die automobile Montage ist im Kontext der industriellen Produktion durch Serien- und Variantenfertigung mit mittlerem *Jahresproduktionsvolumen*, jedoch einer hohen Anzahl an Produktvarianten gekennzeichnet. Diese Produktvarianten entstehen insbesondere im Montageprozess (vgl. Altinisik et al. 2022, S. 653f.; Hottenrott et al. 2023, S. 1144f.; Kampker et al. 2019, S. 474; Kropik 2021, S. 30; Küber 2017, S. 80f.). Darüber hinaus ist die Montage vorherrschend als Fließmontage organisiert, überwiegend entlang kontinuierlich fließender Montagelinien (vgl. Fisel 2019, S. 2; Hottenrott et al. 2023, S. 1144; Ivanov et al. 2021, S. 299; Kellner et al. 2020, S. 78).

Die Arbeitsplätze in der automobilen Montage sind größtenteils manuell gestaltet – nur etwa 15% sind automatisiert. Dies stellt den geringsten Automatisierungsgrad innerhalb des gesamten Produktionsprozesses der Automobilindustrie dar (vgl. Kropik 2021, S. 16). Der Einsatz von Automatisierung in der industriellen Montage zielt heutzutage darauf ab, eine möglichst hohe Leistungsfähigkeit zu erreichen und somit Zeit und Kosten einzusparen (vgl. Lotter 2012b, S. 283; Schlick et al. 2014, S. 77). Um diese Effizienzsteigerung zu realisieren, werden spezialisierte Montageanlagen geplant, die für ein bestimmtes Fahrzeugprojekt einen klar definierten Montageprozess automatisiert ausführen. Aufgrund dieser spezialisierten Auslegung werden Montageanlagen als leistungsfähig, jedoch wenig flexibel beschrieben (vgl. Kropik 2021, S. 20; Scholer 2018, S. 1). Diese Auslegung der Montageanlagen erfolgt im Fabrikplanungsprozess im Zuge der Dimensionierung – durch eine Konzept- und Detailplanung. Auf Basis der übergeordneten Planungsgrundlagen und Zielsetzungen werden die notwendigen Fähigkeiten der Montageanlagen spezifiziert (vgl. Burggräf et al. 2021b, 123ff.).

1.1 Herausforderungen und Zielsetzung

Die Montage in der Automobilindustrie durchläuft derzeit einen starken Wandlungsprozess, der durch regulatorische, technologische und auch ökonomische Veränderungen getrieben wird. Diese Trends führen dazu, dass die Montage als Teil des industriellen Wertschöpfungsprozesses in Richtung einer erhöhten Flexibilisierung transformiert wird (vgl. Europäisches Parlament und Rat 2020; Fries et al. 2021, S. 37; Fries et al. 2020, S. 19; Olschewsky 2015, S. 194–206). Insbesondere infolge des Mass-Customization-Effekts – welcher die aktuelle Kombination aus steigenden Produktvarianten in der Montage und Kostendruck beschreibt (vgl. Bauernhansl et al. 2020, S. 102) – entwickelt sich die Produktion hin zu einer stärkeren Individualisierung (vgl. Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 8), was vor allem in der Montage zu Herausforderungen führt, da dort die meisten Produktvarianten entstehen. Entsprechend erfordert die Montageplanung einen verstärkten Fokus auf Flexibilität – insbesondere im Hinblick auf Montageanlagen.

In der industriellen Praxis der Automobilindustrie stellen die derzeit eingesetzten Montageanlagen leistungsfähige Betriebsmittel dar, um Montagezeiten, -kosten und -qualität zu optimieren. Aufgrund der spezialisierten Gestaltung sind jedoch regelmäßig – teils auch unerwartet – kostenintensive Anpassungen notwendig, um geänderten Anforderungen gerecht zu werden. Gleichzeitig sind Reaktionen auf sich ändernde Rahmenbedingungen häufig mit langen Änderungszeiten verbunden. Diese beiden Aspekte stellen zentrale Herausforderungen für die automobilen Montage dar und motivieren die Notwendigkeit einer erhöhten Flexibilität in Montageanlagen (vgl. Schulz et al. 2023; Svensson Harari und Fundin 2023). In der Praxis wird dieser Aspekt jedoch bislang nur unzureichend adressiert, da Montageanlagen primär im Hinblick auf Leistungsfähigkeit und Kosteneffizienz ausgelegt werden.

In der wissenschaftlichen Literatur existieren verschiedene Modelle zur Beschreibung der Flexibilität im Kontext übergeordneter Fabrikebenen (vgl. Wiendahl et al. 2024). Weitere Modelle thematisieren die Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit von Fertigungsmaschinen, wobei ein besonderer Fokus auf der Fähigkeit liegt, mehrere Produkte innerhalb einer Produktgruppe bearbeiten zu können (vgl. Koren 2020; Koren et al. 1999; Sethi und Sethi 1990). Allerdings fehlt diesen Ansätzen eine gezielte Auseinandersetzung mit den Besonderheiten der Montage. Zudem bleibt zumeist unklar, wie die beschriebenen Flexibilitäten konkret in Montageanlagen umgesetzt werden könnten. Hierzu braucht es ein ergänzendes Modell für die Flexibilität von Montageanlagen und eine passende Methodik für den Planungsprozess.

Für die Planung von flexiblen Montageanlagen fehlen somit zentrale konzeptionelle Ansätze, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden sollen. Dies führt zur Definition der zentralen Leitforschungsfrage (*LFF*) der vorliegenden Dissertation:

LFF: Wie lässt sich die Flexibilität in Montageanlagen systematisch planen, gestalten und konzeptionell implementieren?

1.2 Allgemeines Forschungsvorgehen

Im Anschluss an die Herausforderungen und Zielsetzung dieser Arbeit wird die methodische Logik dieser Forschungsarbeit näher erläutert. Forschung ist klassischerweise entweder qualitativer oder quantitativer Natur. Beide Ansätze verfolgen das Ziel, auf empirischer Basis Schlussfolgerungen zu ziehen, um Theorien weiterzuentwickeln (vgl. Mayring 2010, S. 227). Qualitative Forschung wird in verschiedenen Disziplinen, etwa den Technik- oder Kulturwissenschaften eingesetzt, wenn sich Forschungsinhalte auf Basis bestehender Theorien nicht durch Hypothesenbildung und -prüfung erschließen lassen (vgl. Mey und Ruppel 2018, S. 205f.). Quantitative Forschung hingegen beschreibt Vorgehensweisen, bei denen aus Theorien Hypothesen abgeleitet und überprüft werden können (vgl. Rost 2005, S. 1).

Der Forschungsprozess in der qualitativen wie der quantitativen Forschung lässt sich klassischerweise als Forschungszyklus darstellen, bestehend aus den fünf Phasen (1) *Theorie*, (2) *Deduktion*, (3) *Empirie*, (4) *Induktion* und (5) *Theorie*. Die *Theorie* bildet dabei sowohl den Anfang als auch das Ende des Zyklus, diese wird im Verlauf spezifiziert (vgl. Baur und Blasius 2014, S. 42; Rost 2005). Die Abbildung 1 zeigt diesen Forschungszyklus.

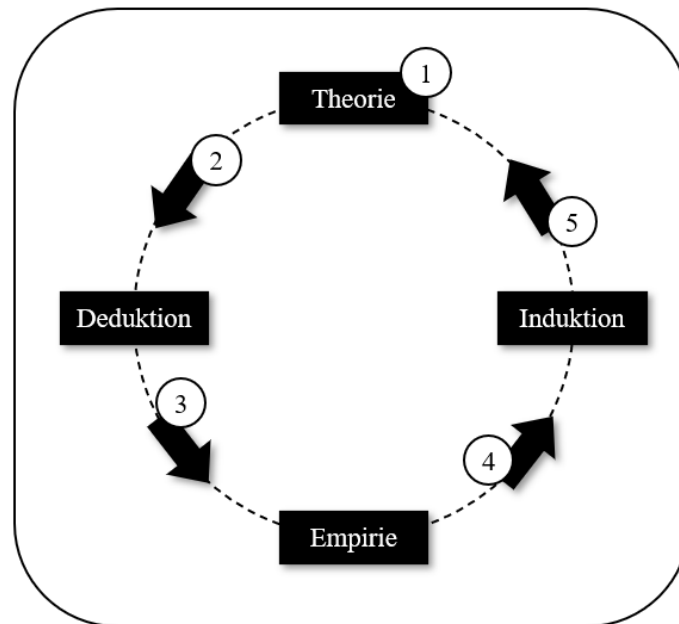


Abbildung 1: Forschungszyklus i. A. a. (Rost 2002, S. 29, 2005, S. 3)

Durch die wiederholte Anwendung des dargestellten Forschungszyklus lässt sich der Fortschritt wissenschaftlicher Erkenntnis beschreiben (vgl. Rost 2002, S. 29). Den Start des Forschungszyklus bildet die *Theorie*.

(1) *Theorie*: Eine *Theorie* wird definiert als „*Lehre über die allgemeinen Begriffe, Gesetze, Prinzipien eines bestimmten Bereichs der Wissenschaft, Kunst, Technik*“ (Duden 2023c). In der qualitativen Forschung ist diese zu Beginn häufig noch recht unvollständig und soll im Verlauf des Forschungsprozesses weiter ausdifferenziert werden (vgl. Rost 2005, S. 1f.).

(2) *Deduktion*: Die *Deduktion* meint das Ableiten des Besonderen aus dem Allgemeinen (vgl. Breuer 2010, S. 38f.). Im Zuge der qualitativen Forschung bedeutet dies etwa die Formulierung einer Fragestellung auf Basis der *Theorie* (vgl. Rost 2005, S. 3).

(3) *Empirie*: Die Empirie wird verstanden als „Methode, die sich auf wissenschaftliche Erfahrungen stützt, um Erkenntnisse zu gewinnen“ (Duden 2023a). In der qualitativen Forschung bedeutet dies z. B. eine informationsreiche Datenerhebung (vgl. Rost 2002, S. 29f., 2005, S. 3). Diese erfolgt theoriebasiert. Zudem wird betont, dass empirische Forschung stets von einer begleitenden *Theorie* geleitet sein sollte (vgl. Yin 2018, S. xxv).

(4) *Induktion*: Im Gegensatz zu *Deduktion* beschreibt *Induktion* das Schließen vom Besonderen auf das Allgemeine (vgl. Duden 2023b). Für die qualitative Forschung kann dies bspw. eine kreative Auswertung der empirischen Daten bedeuten (vgl. Rost 2002, S. 29f., 2005, S. 3).

(5) *Theorie*: Die *Theorie* wie sie in (1) *Theorie* beschrieben ist, schließt den Forschungszyklus wieder. Ziel dieses qualitativen Forschungszyklus ist die ursprüngliche *Theorie* zu

präzisieren oder auch neue Fragestellungen und *Theorien* zu entwickeln (vgl. Yin 2018, S. 38; Rost 2005, S. 1f.).

Je nach Forschungsziel und -frage können verschiedene Forschungsdesigns zum Einsatz kommen: *explorativ*, *explanativ*, *deskriptiv* oder *Kausalanalyse* (vgl. Mayring 2007, S. 4f., 2010, S. 230f.; Yin 2018, S. 42). *Explorative* Designs eignen sich, wenn noch keine präzisen Fragestellungen oder Hypothesen formulierbar sind. Ziel ist hier die Generierung von Hypothesen oder Theorien (vgl. Mayring 2010, S. 231f.; Yin 2018, S. 229ff.). Im Kontrast analysieren *explanative* Designs die verschiedenen Facetten einer Argumentation (vgl. Mayring 2010, S. 234; Yin 2018, S. 229ff.). *Deskriptive* Forschungsdesigns zielen auf eine möglichst genaue Beschreibung eines Untersuchungsgegenstands ab, wobei die Beschreibungsdimensionen meist in Form von Variablen bereits vorliegen (vgl. Mayring 2007, S. 6f., 2010, S. 233f.). *Kausalanalysen*, typischerweise experimentell, untersuchen Ursache-Wirkungszusammenhänge der Untersuchungsvariablen durch gezielte Systemeingriffe (vgl. Mayring 2007, S. 7; Mey und Mruck 2010, S. 235).

Aufgrund der beschriebenen Inhalte und der LFF dieser Arbeit lässt sich das Forschungsprojekt als *explorative* Forschung charakterisieren, da im Themenfeld flexibler Montageanlagen noch wenig Forschung vorliegt. Dabei werden im Rahmen des Mixed-Methods Ansatzes qualitative und quantitative Forschungsprozesse kombiniert (vgl. Schreier und Odağ 2020, S. 210).

Zur Sicherstellung der Forschungsqualität werden Gütekriterien herangezogen. Die klassischen Gütekriterien *Reliabilität*, *Validität* und *Objektivität* sollen die Qualität der Forschung sicherstellen (vgl. Flick 2020, S. 248f., 2022, S. 534). Die *Reliabilität* misst die Zuverlässigkeit von Erhebungen (vgl. Duden 2024b), ist jedoch für qualitative Forschung nur bedingt geeignet, da bspw. Interviewaussagen bei Wiederholungen variieren können (vgl. Flick 2022, S. 534). Die *Validität* beschreibt die Güte einer Messung oder einer Erhebung (vgl. Duden 2024d) und beschreibt in der quantitativen Forschung die Eindeutigkeit eines Zusammenhangs, das heißt inwieweit eventuelle Störgrößen ausgeschlossen werden können. Um den Einfluss von Störgrößen zu minimieren, werden standardisierte Erhebungsmethoden und Auswertungssituationen angestrebt, welche mit den meisten qualitativen Methoden nicht umzusetzen sind oder die qualitativen Methoden womöglich sogar einschränken (vgl. Flick 2020, S. 250f., 2022, S. 534). Die *Objektivität* bezieht sich auf die Unabhängigkeit eines Messwerts von der Person, welche die Messung durchführt. Für die qualitative Forschung ist dieses Kriterium jedoch weniger von Bedeutung (vgl. Flick 2022, S. 534f.).

Zusammenfassend sind diese drei Gütekriterien für die qualitative Forschung nicht direkt anwendbar, da die Beurteilungskriterien von quantitativer und qualitativer Forschung zu unterschiedlich sind (vgl. Flick 2022, S. 534f.). Daher werden die Gütekriterien angepasst:

Die *Reliabilität* in der qualitativen Forschung fokussiert sich auf die Transparenz der Datenerhebung, insbesondere darauf, was empirische Daten sind und was Interpretation (vgl. Flick 2020, S. 251; Yin 2018, S. 288). Die *Validität* wird durch Yin (2018) in drei Teilbereiche differenziert: *Konstruktvalidität*, *interne* und *externe Validität*. Die *Konstruktvalidität* meint die korrekte Auswahl an Methoden für die untersuchten Konzepte. Die *interne Validität* meint eine Kausalkette zwischen verschiedenen Ursachen und deren Wirkung. Die *interne Validität* ist besonders im Zuge der explanativen Forschung wichtig, sodass diese in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle spielt. Die *externe Validität* befasst sich mit der Generalisierbarkeit von z. B. Case Study Ergebnissen (vgl. Yin 2018, S. 42f.; Schachtschabel 2021, S. 118).

Für jedes der drei Gütekriterien *Reliabilität*, *Konstruktvalidität* und *externe Validität* werden Taktiken beschrieben, um diese bestmöglich in Forschungsprojekten umzusetzen. Die *Reliabilität* lässt sich etwa durch eine reflexive Dokumentation der Forschungsprozesse wie Interviewtranskriptionen oder Feldnotizen sichern. Ziel ist es eine intersubjektive Nachvollziehbarkeit sicherzustellen, sodass andere Forschende die Ergebnisse und Methoden nachvollziehen und überprüfen können (vgl. Flick 2020, S. 250f.; Schreier et al. 2023, S. 327; Yin 2018, S. 42). Die *Konstruktvalidität* kann durch Datenquellen-Triangulation sichergestellt werden. Diese ist besonders bei der Datenerhebung und -auswertung relevant (vgl. Yin 2018, S. 43f.). Das dritte Kriterium, die *externe Validität* lässt sich durch ein geeignetes Forschungsdesign mit „wie“ oder „warum“ Fragewörtern sicherstellen. Auch Theorien und Replikationslogiken helfen der *externen Validität* (vgl. Yin 2018, S. 43ff.).

Die Gütekriterien werden in dieser Arbeit über die gesamte methodische Ausarbeitung mit betrachtet. Nach der Literaturrecherche wird ein konzeptionelles, theoriebasiertes Modell für die Flexibilität in Betriebsmitteln entwickelt, welches als Grundlage für die weitere Forschung dient. Anschließend folgt eine empirische Untersuchung, um eine praxisorientierte Perspektive aufzunehmen. Durch Analysen und Vergleiche der unterschiedlichen Ergebnisse kann ein finales Modell erarbeitet werden.

Daraufhin wird im Zuge des Validierens der Ergebnisse die Gültigkeit und der Wert der Forschung bestimmt (vgl. Duden 2024c). Innerhalb der qualitativen Forschung werden häufig kommunikative Methoden zur Validierung von Ergebnissen genutzt. Bei der kommunikativen Validierung werden einerseits den Untersuchungsteilnehmenden die Ergebnisse präsentiert. Deren Zustimmung oder Ablehnung wird dann als Ansatz zur Validierung gesehen (vgl. Flick 2022, S. 536f.; Brinkmann und Kvale 2018, S. 144f.). Andererseits wird die Expertenvalidierung als Möglichkeit zur kommunikativen Validierung beschrieben. Bei dieser Methode werden die Forschungsergebnisse durch Experten aus der Praxis auf Plausibilität und Angemessenheit geprüft und bewertet (vgl. Flick 2022, S.

538). In dieser Arbeit soll, aufgrund der Forschungssituation, die kommunikative Validierung über Workshops mit Experten durchgeführt werden. Ein Workshop wird in diesem Zusammenhang als Veranstaltung verstanden, in welcher die Teilnehmenden praktische Übungen durchführen und Themen erarbeiten (vgl. Duden 2024e; Nolte 2023, S. 2f.).

Des Weiteren stellt die Triangulation der Ergebnisse verschiedener Methoden eine Art der Validierung dar (vgl. Schreier und Odağ 2020, S. 167). Hier werden z. B. deduktive und induktive Kategorien in der Inhaltsanalyse oder die Ergebnisse aus Interviews und Beobachtungen miteinander verglichen, um valide Ergebnisse zu erzeugen.

Ein dritter Validierungsansatz sieht die prototypische Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse vor. Der angepasste Planungsprozess wird prototypisch durchgeführt, um eine flexible Montageanlage zu planen und aufzubauen.

In Kombination der drei Validierungsansätze kann die Validierung der Forschungsergebnisse durchgeführt und die Validität nachgewiesen werden.

Die Abbildung 2 zeigt zusammenfassend die Forschungstätigkeiten.

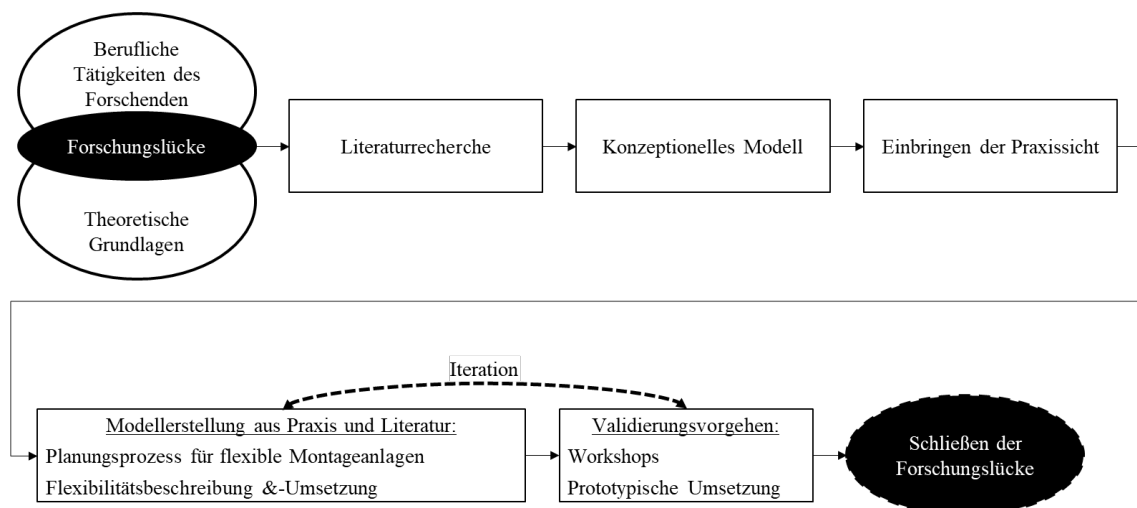


Abbildung 2: Übersicht des Forschungskonzepts dieser Arbeit

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Vorgehensweise zur Beantwortung der *LFF* basiert auf der Design Science Research (DSR) Methode. Ziel dieser Methode ist es, die Grenzen menschlichen oder organisatorischen Wissens durch die Entwicklung und Anwendung von Methoden und Modellen zu erweitern. DSR verbindet dabei praktische Probleme mit bestehenden Lücken in der Wissenschaft, um durch einen iterativen Forschungszyklus Mehrwerte für Theorie und Praxis zu erzeugen (vgl. vom Brocke et al. 2020, S. 1ff.). Die Forschungsumgebung der Praxis beschreibt Probleme, Ziele und Aufgaben. Durch die Betrachtung der aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse wird in der DSR Methode die theoretische Lücke hergeleitet, welche dann in Theorien geformt werden. Ausgehend von dem praktischen Problem und

der theoretischen Lücke werden geeignete Theorien und Modelle entwickelt und über Empirie iterativ überprüft. So soll eine Theorie durch den Abgleich mit empirischen Daten zu einem finalen Modell verfeinert werden, sodass sowohl die praktischen Probleme adressiert als auch die theoretischen Lücken geschlossen werden können (vgl. vom Brocke et al. 2020, S. 2f.).

Vor diesem Hintergrund ist diese Arbeit wie folgt aufgebaut: Die Herausforderungen, die sich für die automatisierte Montage in Organisationen unter dem Einfluss des anhaltenden Mass-Customization-Effekts ergeben, wurden bereits kurz dargestellt. Im folgenden Abschnitt – Kapitel 2 – werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die in einen klaren Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit resultieren. In Kapitel 3 folgt anschließend eine Auseinandersetzung mit dem Stand der Forschung. Dieser wird auf Basis einer systematischen internationalen Literaturrecherche aufgearbeitet und mündet in einem ersten konzeptionellen Flexibilitätsmodell, sodass eine erste Forschungsfrage beantwortet werden kann.

Das Kapitel 4 beschreibt daraufhin das empirische Forschungskonzept zur Evaluation des konzeptionellen Flexibilitätsmodells durch eine Multiple Case Study in der Automobilindustrie. Kapitel 5 erarbeitet auf Basis der Ergebnisse der Multiple Case Study – aus Experteninterviews und teilnehmenden Beobachtungen – eine erste Iteration des konzeptionellen Flexibilitätsmodells. Dadurch wird eine praxisorientierte Sicht integriert, die zur Beantwortung einer zweiten Forschungsfrage führt. Kapitel 6 verfeinert das ursprüngliche konzeptionelle Flexibilitätsmodell, indem es um die Praxissicht ergänzt und zu einem finalen Flexibilitätsmodell zusammengefasst wird. So wird auf Grundlage des identifizierten organisatorischen Problems und der theoretischen Forschungslücke die Beantwortung der dritten Forschungsfrage erreicht. Das Kapitel 7 beschreibt daraufhin die Validierung der Forschungsergebnisse. Hierbei wird das finale Flexibilitätsmodell in einer prototypischen Umsetzung angewendet und mithilfe von Validierungsworkshops mit Experten aus der Automobilindustrie überprüft. Den Abschluss bildet das Kapitel 8, in welchem die zentralen Inhalte dieser Arbeit zusammengefasst und kritisch reflektiert werden. Zudem wird in diesem letzten Kapitel auf den weiteren Forschungsbedarf eingegangen.

Die inhaltliche Struktur dieser Arbeit ist zusammengefasst in der Abbildung 3 dargestellt.

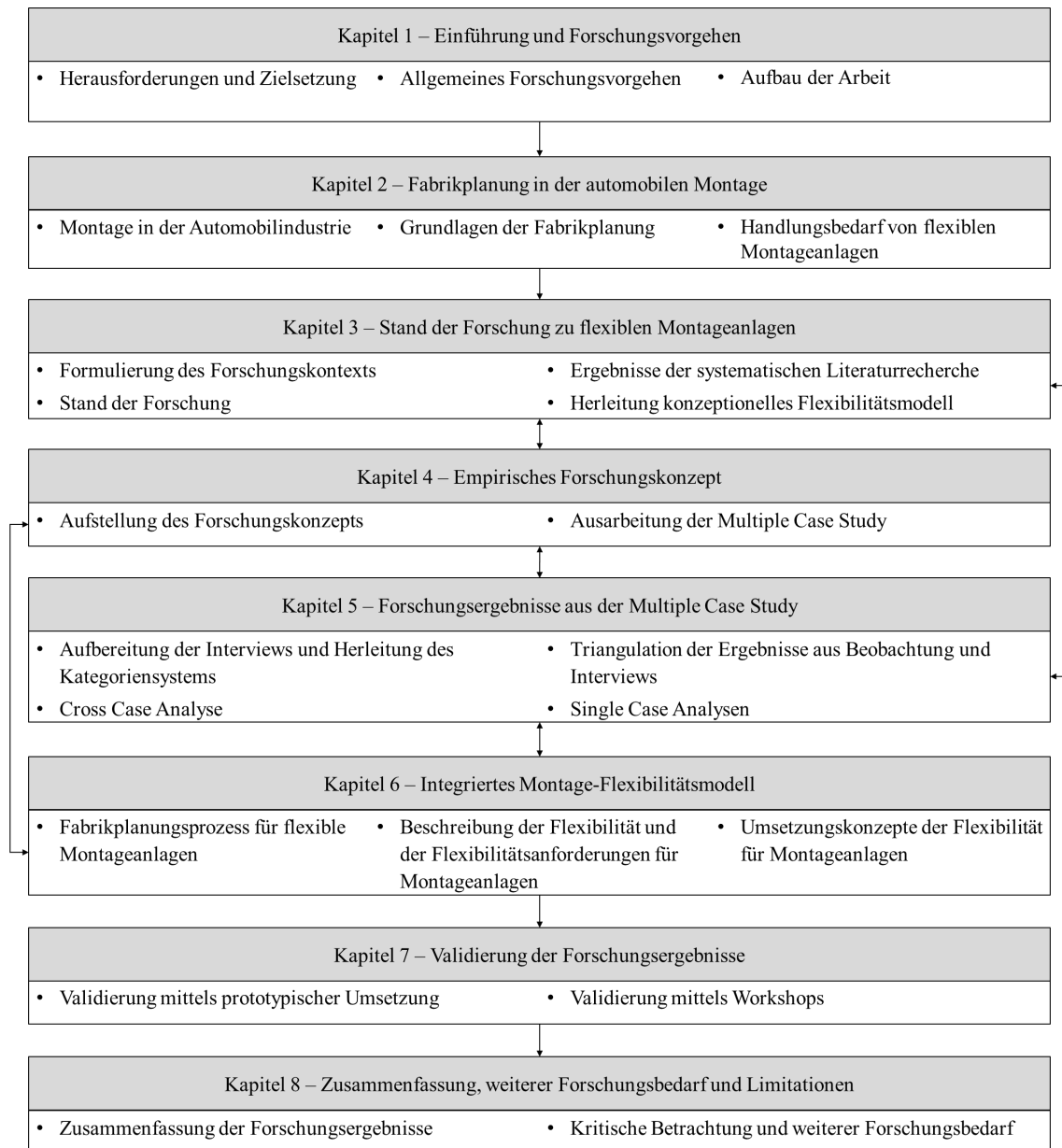


Abbildung 3: Aufbau der Arbeit

2 Fabrikplanung in der automobilen Montage

Das folgende Kapitel beschreibt den Forschungskontext der vorliegenden Arbeit und geht dabei auf folgende Themen näher ein. Der Abschnitt 2.1 beschreibt dabei die Montage in der Automobilindustrie, während der Abschnitt 2.2 die Grundlagen der Fabrikplanung als übergeordnetes Konstrukt beschreibt. Das Ziel des Kapitels ist die thematische Einführung in die aktuellen Rahmenbedingungen und Prozesse der Fabrikplanung, sodass der Abschnitt 2.3 in der Formulierung eines Handlungsbedarfs endet.

2.1 Montage in der Automobilindustrie

Dieser Abschnitt beschreibt die Automobilindustrie als Betrachtungsobjekt der Arbeit und geht auf die zugehörige Montagegestaltung ein. Dies wird in den weiteren Unterkapiteln erläutert.

2.1.1 Grundlagen der Automobilindustrie

Die Automobilindustrie zählt zu den größten Industriezweigen in Deutschland, Europa und weltweit. In Deutschland stellt das produzierende Gewerbe nach dem Dienstleistungssektor den zweitgrößten Wirtschaftsbereich dar (Statistisches Bundesamt 2025b). Innerhalb dieses Bereichs sind fast 800.000 Menschen in der Automobilindustrie beschäftigt (Statistisches Bundesamt 2025a). Europaweit steigt diese Zahl auf rund 13 Millionen (European Automobile Manufacturers' Association 2024). Auch im globalen Vergleich finden sich zwei Unternehmen der Automobilindustrie unter den 15 umsatzstärksten Unternehmen (Fortune 2025).

Neben den Fahrzeugherstellern (Original Equipment Manufacturer – OEM) stellen die Zulieferer einen zentralen Bestandteil der Automobilindustrie dar, da bis zu 85% der Fahrzeugkomponenten von ihnen bereitgestellt werden. Die OEMs übernehmen anschließend das finale Zusammenbauen und Fertigstellen der Fahrzeuge (vgl. Häcker 2012, S. 6; Nieuwenhuis und Wells 2015, S. 43f.). Der Produktionsprozess der OEMs gliedert sich typischerweise in vier aufeinanderfolgende Bereiche: Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage. Nach Abschluss der Montage folgen die Fertigstellung und schließlich die Auslieferung der Fahrzeuge (vgl. Kern 2021, S. 27; Kropik 2021, S. 14ff.; Schmidt 2021, S. 79; Stadler et al. 2008, S. 146).

Die fertigen Fahrzeuge werden anhand optischer, technischer und marktorientierter Merkmale in verschiedene Segmente unterteilt (Kraftfahrt-Bundesamt 2024). Insgesamt unterscheidet die Europäische Kommission neun Fahrzeugsegmente. Diese reichen vom A-Segment für Kleinstwagen bis zum F-Segment für die Luxusklasse. Ergänzt wird diese Einteilung durch Segmente für Sportwagen, Geländewagen und Vans. Eine Übersicht der einzelnen Segmente ist in Tabelle 1 dargestellt (Europäische Kommission 1999, 2025).

Tabelle 1: Fahrzeugsegmente in der Automobilindustrie i. A. a. (Europäische Kommission 2025)

Segment	Beschreibung
A-Segment	Kleinstwagen
B-Segment	Kleinwagen
C-Segment	Mittelklasse
D-Segment	Obere Mittelklasse
E-Segment	Oberklasse
F-Segment	Luxusklasse
S-Segment	Sportwagen
J-Segment	Geländewagen
M-Segment	Multivan

Wie viele andere Produkte durchlaufen auch Fahrzeuge einen Produktlebenszyklus, der sich von der Markteinführung bis zur Marktablösung erstreckt. Der Produktlebenszyklus beschreibt die zeitliche oder situationsbedingte Entwicklung eines Untersuchungsgegenstands – z. B. eines Produktes. Klassischerweise wird dieser in fünf Phasen unterteilt: Einführung, Wachstum, Reife, Sättigung und Degeneration (vgl. Dreher 2024, S. 78f.).

In der Einführungsphase erfolgt im Produktionskontext der sogenannte Produktionsanlauf, also die Integration neuer Produkte in die Produktion. Dieser gliedert sich in der Automobilindustrie typischerweise in drei Abschnitte: die Vorserie, die Nullserie und den Hochlauf zur Serienproduktion (vgl. Dreher, S. 87ff.). Bereits in diesen frühen Phasen müssen die erforderlichen Betriebsmittel für die Produktion der Produkte vorhanden sein, um den Anlauf möglichst seriennah umsetzen zu können. Das Aufbauen von Betriebsmitteln oder anderer Hilfsmittel für neue Produkte ist in der Automobilindustrie aufgrund der hohen Projektvolatilität häufig mit erheblichen Kosten sowie Risiken verbunden (vgl. Derleşa et al. 2024, S. 485).

Gegen Ende des Produktlebenszyklus wird in der Automobilindustrie häufig eine Modellpflege – auch Produktaufwertung genannt – durchgeführt. Diese umfassen gezielte technische oder gestalterische Änderungen, die neue Marktanreize schaffen und die Attraktivität des bestehenden Produktes erhöhen sollen. Gleichzeitig ermöglichen diese Maßnahmen die Integration neuer Technologien oder Designelemente in bestehende Produkte. Infolgedessen entstehen häufig überlappende Produktlebenszyklen, da mehrere Produktaktualisierungen nacheinander erfolgen, bevor eine völlig neue Produktgeneration entwickelt wird.

Da jede Phase des Produktlebenszyklus unterschiedliche Anforderungen an die Produktion und Betriebsmittel stellt, ist es essentiell die Betriebsmittel effizient auszulegen, um eine leistungsfähige Produktion sicherzustellen (vgl. Dreher 2024, S. 47). Der Übergang zu einer Modellpflege oder einem neuen Produkt ist regelmäßig mit erheblichen Investi-

tionen in Betriebsmittel verbunden. Selbst kleinere Produktänderungen, z. B. bei der Einführung eines neuen Derivats – also einer neuen Variante auf Basis eines bestehenden Fahrzeugs – erfordern häufig kostenintensive Anpassungen der Betriebsmittel (vgl. Rupp und Müller 2020, S. 1431).

2.1.2 Montage im automobilen Produktionsprozess

Der automobilen Produktionsprozess gliedert sich in die Prozessschritte Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage, welche nacheinander durchlaufen werden (vgl. Kropik 2021, S. 14; Stadler et al. 2008, S. 146).

Im ersten Prozessschritt – dem Presswerk – werden aus Metallrollen verschiedene Fahrzeugteile durch mechanische Pressen geformt. Ungefähr 10% der Prozesse im Presswerk werden dabei vom Menschen durchgeführt (vgl. Kropik 2021, S. 15f.).

Im Karosseriebau werden die Pressteile mit weiteren Bauteilen zu einer fertigen Fahrzeugkarosse zusammengebaut. Um die Fahrzeugkarosse herzustellen, werden die Bauteile vor allem miteinander verklebt und verschweißt. Diese Prozesse werden wie im Presswerk nur zu 10% vom Menschen durchgeführt (vgl. Kropik 2021, S. 16 & 19f.; Stadler et al. 2008).

Die fertigen Fahrzeugkarossen werden darauffolgend zur Lackiererei transportiert, wo die unterschiedlichen Farben der Fahrzeuge aufgebracht werden können. Durch den wiederholten Auftragsprozess der Farben in Kombination mit Trocknungsprozessen wird die Lackierung der Fahrzeuge erreicht. Diese Prozesse werden zu ca. 40% vom Menschen durchgeführt (vgl. Kropik 2021, S. 16 & 23f.).

Die Montage als letzter Bereich des automobilen Produktionsprozesses stellt den Fokusbereich dieser Arbeit dar. In der Montage werden geometrisch bestimmte Bauteile zu Einheiten zusammengefügt (vgl. Lotter 2012a, S. 1f.). Das Fügen umfasst im Sprachgebrauch verschiedene Verfahren, bei denen mehrere Bauteile dauerhaft miteinander verbunden werden. Typische Verfahren sind das Zusammensetzen oder Kleben (vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2003, S. 3f.). Je nach Branche und Produkt können Montageprozesse 15-70% der gesamten Fertigungsdauer ausmachen (vgl. Lotter 2012a, S. 3). Der Anteil der Montage an der gesamten Fertigungsdauer und den Fertigungskosten liegt in der Automobilindustrie bei ca. 30-50% (vgl. Altinisik et al. 2022, S. 653; Lotter 2012a, S. 3).

Die Montage lässt sich in weitere Bereiche unterteilen. Vorbereitende Tätigkeiten wie die Vormontage von Motoren oder Batterien gehen der Endmontage voraus (vgl. Kropik 2021, S. 26ff.). Die Endmontage bildet den abschließenden Abschnitt, in dem Einzelteile und vorbereitete Baugruppen vollständig zusammengebaut werden (vgl. Dictionary of Production Engineering IV 2020, S. 174). Die Prozesse in der Endmontage reichen vom

Verschrauben der Sitze über das Verkleben von Scheiben bis hin zur Befüllung mit Kühlflüssigkeiten und der Inbetriebnahme elektrischer Komponenten (vgl. Kropik 2021, S. 31f.; Schmidt 2021, S. 10). Auch der Fahrwerkseinbau, die sogenannte „Hochzeit“, sowie das Montieren von Innenverkleidungen sind Teil der Endmontage (vgl. Kropik 2021, S. 30). Im Folgenden werden unter dem Begriff Montage sowohl die Vormontagen als auch die Endmontage verstanden.

Die automobile Montage ist geprägt von einer hohen *Variantenanzahl* und wechselnden Fahrzeugtypen. Im Zusammenspiel mit mittleren bis hohen *Jahresproduktionsvolumen* wird die Montage daher als variantenreiche Serienproduktion beschrieben (vgl. Kern 2021, S. 6; Kropik 2021, S. vi; Küber 2017, S. 1). Dabei sinkt in der Regel mit steigendem Fahrzeugpreis – von Segment A zu Segment F – das *Jahresproduktionsvolumen* (vgl. Verband der Automobilindustrie 2025).

Organisiert wird die automobile Montage dabei vorherrschend als Fließmontage, bei der Montagelinien eine hohe Produktivität ermöglichen (vgl. Fisel 2019, S. 2; Kellner et al. 2020, S. 78; Hottenrott et al. 2023, S. 1144; Ivanov et al. 2021, S. 299). Auf einer Montagelinie werden – abhängig vom jeweiligen OEM – ein oder mehrere Fahrzeugvarianten oder sogar unterschiedliche Fahrzeugmodelle hintereinander montiert. Bei mehreren Fahrzeugen auf einer Montagelinie wird von einer Mixed Model Montagelinie gesprochen (vgl. Hottenrott et al. 2023, S. 1147; Yilmazlar et al. 2024, S. 206f.; Rese et al. 2024, S. 104). Die *Variantenanzahl* variiert in der Automobilindustrie innerhalb der Fahrzeugsegmente. In höherpreisigen Segmenten wie der Oberklasse und der Luxusklasse sind stark individualisierte Fahrzeuge stärker nachgefragt als in anderen Segmenten der Automobilindustrie (vgl. Kropik 2021, S. 290).

Für die Umsetzung der Fließmontage werden definierte Arbeitsstationen mit zugehörigen Arbeitsinhalten in der Planung festgelegt. Diese Takte werden während der Montage in einer definierten Reihenfolge durchlaufen. Dabei ist für jeden Takt eine bestimmte Zeit zur Durchführung der Arbeitsinhalte vorgesehen – die sogenannte *Taktzeit* (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 155). Diese wird unternehmensspezifisch bestimmt (vgl. Kropik 2021, S. 33) und variiert in der Automobilindustrie stark in Abhängigkeit von dem erforderlichen *Jahresproduktionsvolumen* der jeweiligen Segmente. Die *Taktzeit* kann bis auf eine Minute sinken, was einem geforderten Produktionsvolumen von 60 Fahrzeugen pro Stunde entspricht (vgl. Kern 2021, S. 29).

Grundsätzlich besteht ein Zusammenhang zwischen der *Variantenanzahl*, der Häufigkeit bestimmter Varianten und der *Taktzeit*: Je höher die *Variantenanzahl* der Produkte, desto länger ist die *Taktzeit* der entsprechenden Montage (vgl. Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 147ff.; Kampker et al. 2019, S. 475ff.).

Heutzutage wird der Großteil der Montageprozesse manuell von Menschen durchgeführt. Der *Automatisierungsgrad* liegt bei ca. 15% und stellt damit den niedrigsten Wert im gesamten automobilen Produktionsprozess dar (vgl. Kropik 2021, S. 16). Ursache hierfür ist die besondere Situation in der Montage, in welcher der Großteil der Produktvarianten gebildet wird. Die damit verbundene Komplexität macht eine Automatisierung aufwendig und kostspielig (vgl. Kampker et al. 2019, S. 474; Kropik 2021, S. 40; Lotter et al. 2016, S. 102f.). Dennoch verspricht ein höherer *Automatisierungsgrad* Effizienzgewinne – insbesondere durch die Reduktion von Fertigungszeiten und -kosten (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 36f.; Bauernhansl et al. 2014, S. 77). Entsprechend werden automatisierte Montageprozesse so gestaltet, dass sie eine möglichst hohe Ausbringung erzielen (vgl. Bauernhansl et al. 2014, S. 77). Somit ist der *Automatisierungsgrad* in den niedrigpreisigen Segmenten auch tendenziell höher als in anderen Segmenten, da sich die Automatisierung bei hohen *Jahresproduktionsvolumen* eher rentiert als bei niedrigen *Jahresproduktionsvolumen* in anderen Segmenten (vgl. Kropik 2021, S. 40).

Zusammenfassend können die Ausprägungen von Montagesystemen in der Automobilindustrie durch die Charakteristika *Variantenanzahl*, *Jahresproduktionsvolumen*, *Taktzeit* und *Automatisierungsgrad* beschrieben werden.

2.1.3 Planung und Umsetzung der automatisierten Montage

Für die Durchführung automatisierter Montageprozesse werden in der Montage Betriebsmittel eingesetzt (vgl. Dictionary of Production Engineering IV 2020, S. 174). Im Kontext der automatisierten Montage sind diese Betriebsmittel Montageanlagen, welche die Montageprozesse durchführen. In dieser Arbeit werden Montageanlagen stets als vollautomatisiert betrachtet, sodass Montageprozesse – insbesondere Fügeprozesse – ohne den Menschen ablaufen. Diese unterscheiden sich von Automatisierungsvorhaben in anderen Prozessschritten der Automobilproduktion, da die Montage den finalen Abschnitt bildet und sich dort Fehler aus vorangegangenen Fertigungsprozessen kumulieren (vgl. Hesse 2012b, S. 19). Zudem wirken sich die zahlreichen manuellen Prozesse in der Umgebung der Montageanlagen auf deren Gestaltung und Betrieb aus.

In der Literatur werden Montageanlagen häufig als Robotersysteme beschrieben, welche typischerweise aus einem Roboter mit Roboterarm und Drehgelenk, einem Gestell, auf dem der Roboter montiert ist, sowie einem Endeffektor am Ende des Roboterarms bestehen. Weitere Bestandteile sind die Materialbereitstellung, die Peripherie, die Sicherheitstechnik und die Robotersteuerung (vgl. Hesse 2012a, S. 265ff.; Hesse und Malisa 2016, S. 30 & S. 530f.).

Bei den in Montageanlagen eingesetzten Robotern handelt es sich häufig um Industrieroboter. Diese werden als programmierbarer Mehrzweck-Manipulator mit mindestens drei programmierbaren Achsen definiert (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 29; Internationale

Organisation für Standardisierung 2011, S. 2). Häufig eingesetzte Bauformen sind der Drehgelenkroboter, der Portalroboter und der Parallelroboter.

Die Hauptvorteile des Drehgelenkroboters liegen in einer verhältnismäßig hohen Flexibilität durch sechs frei programmierbare Achsen. Die Gelenkanordnung ähnelt dem menschlichen Arm, wodurch wechselnde Arbeitsräume ermöglicht werden (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 52). Deshalb ist der Drehgelenkroboter die am häufigsten eingesetzte Roboterart in der Montage (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 392).

Der Portalroboter steht in einem vordefinierten Rahmen, in welchem sich der Arbeitsbereich des Roboters befindet. Dieser eignet sich insbesondere für Be- und Entladeaufgaben, da dieser sich im arbeitsfreien Raum bewegt und somit nur wenig Bodenfläche beansprucht (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 50f.; Wiendahl et al. 2024, S. 392f.).

Parallelroboter sind hingegen für Aufgaben wie das Verpacken von Kleinteilen, das Bestücken von Leiterplatten oder auch pick-and-place Aufgaben prädestiniert. Aufgrund der Bauform können im Vergleich zum Drehgelenkroboter hohe Beschleunigungen erreicht werden, allerdings ist ihr Arbeitsraum konstruktionsbedingt eingeschränkt (vgl. Hesse 2012a, S. 267f.; Hesse und Malisa 2016, S. 53f.).

In der Montage werden die unterschiedlichen Roboterformen je nach Anwendungsfall eingesetzt. Die drei genannten Bauformen sind in der Abbildung 4 dargestellt. Der Bereich (a) zeigt den Drehgelenkroboter, (b) den Portalroboter und (c) den Parallelroboter.

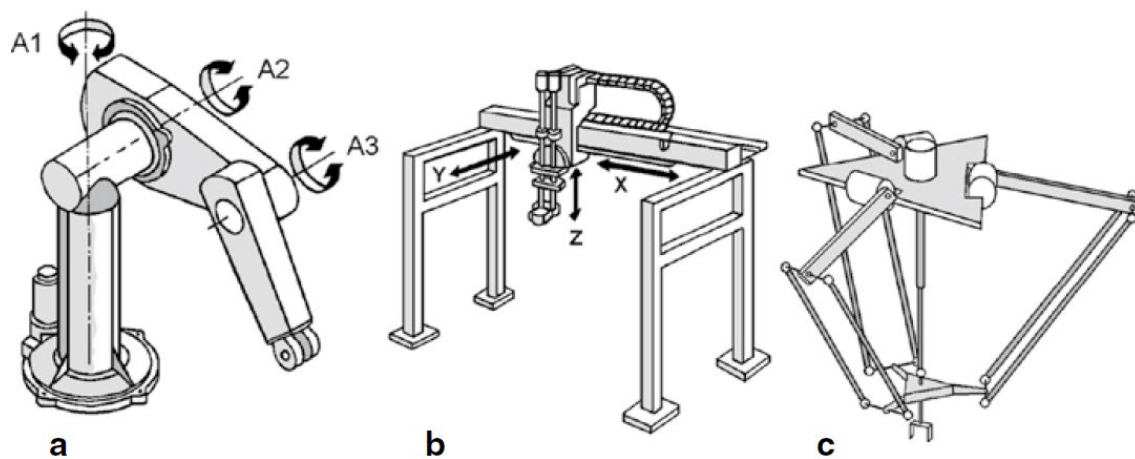


Abbildung 4: Ausführungsbeispiele für Montageroboter (Hesse 2012a, S. 268)

Das Gestell, auf welchem der Roboter montiert ist, dient bei Montageanlagen zur Erhöhung der Reichweite. Bei Drehgelenkrobotern (a) kann dies durch eine zusätzliche Bewegungseinheit erfolgen, während beim Portalroboter (b) der Rahmen, in welchem sich der Roboter bewegt, das Gestell bildet (vgl. Hesse und Malisa 2016).

Ein weiterer Bestandteil der Montageanlage ist der Endeffektor, zu dem Greifer, Werkzeuge sowie Mess- und Prüfwerkzeuge gehören. Über Kupplungssysteme können die Endeffektoren je nach Anwendungsfall montiert und ausgetauscht werden (vgl. Hesse

2012a, S. 242; Hesse und Malisa 2016, S. 265). Besonders bei Fügeaufgaben kommen Greifer als Endeffektoren zum Einsatz, die nicht nur Bauteile halten und bewegen, sondern auch die Montageprozesse ausführen (vgl. Chatti et al. 2019, S. 789; Hesse 2012a, S. 242).

Die Sensorik in Montageanlagen übernimmt vielfältige Aufgaben: Diese ermöglicht der Montageanlage, Informationen über den eigenen Zustand und die Umgebung zu erfassen. Dazu zählen unter anderem die Überwachung der Greifwerkzeuge sowie die Kraft- und Bewegungssteuerung. Die Sensorik ist somit ein unverzichtbarer Bestandteil jeder Montageanlage (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 97).

Die Materialbereitstellung hat die Aufgabe, die benötigten Bauteile in der Montageanlage zu lagern, zuzuführen, zu vereinzeln und zu positionieren (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 533). Zuführeinrichtungen übernehmen den Transport von kurzen Strecken und andere Aufgaben wie das Vereinzeln oder Sortieren (vgl. Burggräf et al. 2021a, S. 290; Hesse und Malisa 2016, S. 498). Ziel der Zuführung ist es, das Bauteil aus einer Bereitstellung in die Fügeposition zu überführen (vgl. Nyhuis et al. 2012, S. 288). Weitere Komponenten sind z. B. Handlineinheiten. Die Handlineinheiten transportieren Bauteile von einem Ort zu einem anderen – etwa von Magazinen zur Montageanlage, wo sie anschließend durch die Zuführeinrichtung in die Fügeposition gebracht werden. Die Materialbereitstellung übernimmt also das Handling der Bauteile innerhalb der Montageanlage (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 530).

Die Peripherie beschreibt alle zusätzlichen Einrichtungen, welche den effektiven Betrieb der Montageanlage sicherstellen. So kann z. B. bei Montageanlagen mit mehreren Endeffektoren ein Greiferwechselsystem in der Peripherie platziert werden, an welchem der Roboter einen Endeffektor austauschen kann (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 294). Weitere Beispiele sind Prüf- und Messsysteme, welche je nach Anwendungen erforderlich sein können (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 533).

Für den Einsatz von Robotern in der Montage sind strenge Sicherheitsvorschriften einzuhalten, um Menschen und Betriebsmittel in der Umgebung zu schützen (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 162ff.). Gefährdungen können mechanischer, thermischer oder auch elektrischer Natur sein (vgl. Internationale Organisation für Standardisierung 2011, S. 23). Die Sicherheitsmaßnahmen umfassen sowohl interne Sicherheitssysteme in den Robotern als auch externe Schutzmaßnahmen wie Sicherheitszäune oder Scanner zur Absicherung des Arbeitsbereichs (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 174).

Nach den physischen Komponenten ist auch die Steuerung ein zentraler Bestandteil von Montageanlagen. Diese gilt als die „Intelligenz“ der Montageanlage und beeinflusst die Eigenschaften sowie Programmierbarkeit. Die Steuerung umfasst den Programmablauf, die Roboterbewegung, die Kommunikation mit der Peripherie und den Bedienpersonen

sowie den Datenaustausch (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 174). Über Schnittstellen kommuniziert die Steuerung mit der Peripherie und anderen Systemen.

Durch technischen Fortschritt kommen heute auch kollaborative Roboter (Cobots) zum Einsatz. Diese arbeiten ohne trennende Schutteinrichtung direkt mit dem Menschen zusammen und erhöhen dabei sowohl Produktivität als auch Sicherheit. Cobots existieren in stationärer und mobiler Ausführung. Durch die mobile Ausführung können die Cobots besonders gut für Transportaufgaben eingesetzt werden (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 333; Gisi 2024, S. 78f.).

In der Praxis werden Montageanlagen am vorgesehenen Einsatzort aufgebaut und anschließend in Betrieb genommen (vgl. Kropik 2021, S. 452). Die Inbetriebnahme umfasst die Parametrierung sowie die Funktionsprüfung als Vorbereitung für den produktiven Betrieb (vgl. Burggräf et al. 2021a, S. 290). Während des Betriebs ist die Instandhaltung essentiell, um die Funktionsfähigkeit der Montageanlage langfristig sicherzustellen (vgl. Kropik 2021, S. 197).

Die Planung und Umsetzung von Montageanlagen erfolgt dabei im Rahmen der übergeordneten Fabrikplanung. Um Montageanlagen effizient zu dimensionieren und in Montagesysteme integrieren zu können, sind die grundlegenden Strukturen der Fabrikplanung erforderlich. Im folgenden Kapitel werden daher die Grundlagen der Fabrikplanung erläutert, sodass der theoretische Rahmen für die Planung und Umsetzung von Montageanlagen in der Automobilindustrie geschaffen wird.

2.2 Grundlagen der Fabrikplanung

Dieser Abschnitt soll die Grundlagen der Fabrikplanung beschreiben. Bestandteil davon sind die Abschnitte zum Planungsprozess, zur Montageplanung und zur Betriebsmittelplanung, sodass der theoretische Rahmen für die Montagegestaltung aus der Automobilindustrie aufgespannt werden kann.

2.2.1 Planungsprozess in der Fabrikplanung

Eine Fabrik beschreibt die physischen und logischen Mittel für die Umsetzung von Produktionsprozessen und umfasst Gebäude sowie auch technisches Equipment, wie Betriebsmittel für die Durchführung von Fertigungsprozessen (vgl. Laperrière und Reinhart 2014, S. 500). Die Planung befasst sich mit dem Prozess einen definierten Plan zu erstellen und die daraus resultierenden Aktivitäten umzusetzen, um ein klares Ziel zu erreichen. Bezogen auf eine Fabrik umfasst die Fabrikplanung somit die Planung von Tätigkeiten sowie Betriebsmitteln, welche für die Durchführung von Fertigungsprozessen erforderlich sind (vgl. Laperrière und Reinhart 2014, S. 946ff.).

Die Fabrikplanung sowie die Planung von Betriebsmitteln als Detailaufgabe der Fabrikplanung lassen sich in unterschiedliche Arten unterteilen. Unterschieden werden hierbei

Planungsfälle, Planungsebenen und Planungsphasen, einschließlich der jeweiligen Planungshorizonte (vgl. Burggräf und Schuh 2021; Verein Deutscher Ingenieure 2011).

Die Planungsfälle beschreiben den Anlass eines Fabrikplanungsprojekts. Häufig liegt diesem eine Divergenz zwischen dem Soll- und Ist-Zustand zugrunde, welche als Auslöser für die Planung dient (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 3; Ivanov et al. 2021, S. 268f.). Die Literatur unterscheidet dabei zwischen vier (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 4; Wiendahl et al. 2024, S. 464; Schmidt 2021, S. 20) und fünf Planungsfälle (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 4; Grundig 2021, S. 17ff.). Konsens aller Quellen besteht hinsichtlich der *Neuplanung* als ersten Planungsfall. Diese wird als *Greenfield-Planung* bezeichnet, da sie ohne Restriktionen durch bestehende Gebäude, Gelände, etc. erfolgt. Der Planungsaufwand ist hierbei hoch, was jedoch eine möglichst optimale Gestaltung der Fabrik ermöglicht (vgl. Burggräf und Schuh 2021, S. 4; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 4; Grundig 2021, S. 17).

Ein weiterer Planungsfall ist die *Umplanung*, bei der bestehende Fabrikstrukturen unter Berücksichtigung vorhandener Restriktionen geplant werden (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 4; Wiendahl et al. 2024, S. 30). In Abhängigkeit von der Literaturquelle wird unter der *Umplanung* auch die *Erweiterung* vorhandener Fabriken verstanden (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 4). Andere Quellen hingegen behandeln die *Erweiterung* als eigenständigen Planungsfall (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 4f.; vgl. Grundig 2021, S. 18; Wiendahl et al. 2024, S. 464). Diese umfasst eine intensivere Nutzung der vorhandenen Flächen oder im Extremfall eine Ausgliederung von Tätigkeiten an einen weiteren Standort (vgl. Grundig 2021, S. 18). Sowohl die *Umplanung* als auch die *Erweiterung* werden im Gegensatz zur Neuplanung als *Brownfield-Planung* beschrieben (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 4).

Der *Rückbau* einer Fabrik beschreibt einen nächsten Planungsfall, welcher den systematischen Abbau von vorhandenen Fabrikstrukturen zum Zwecke der Flächenfreigabe für eine Nachnutzung beschreibt (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 4f.; Grundig 2021, S. 18; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 4; Wiendahl et al. 2024, S. 464). Ursachen hierfür können unter anderem veränderte Umsatzentwicklungen oder die Auslagerung einzelner Produktionsstufen sein (vgl. Grundig 2021, S. 18).

Der Planungsfall der *Revitalisierung* wird in der Literatur einerseits als Teilaspekt des Rückbaufalls (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 30) und andererseits als eigenständiger Planungsfall gesehen (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 5; Grundig 2021, S. 19; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 4). Als Planungsfall beschreibt die *Revitalisierung* die Aufbereitung einer stillgelegten Fabrik zur erneuten produktiven Nutzung (vgl. Grundig 2021, S. 19; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 4).

Für die weitere Betrachtung werden vier Planungsfälle zugrunde gelegt. Die Erweiterungsplanung wird dabei mit der Umplanung als *Brownfield-Planung* zusammengefasst (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 4; Schmidt 2021, S. 20; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 4), da die detaillierte Unterscheidung für die Thematik dieser Arbeit nicht ausschlaggebend ist:

- Neuplanung
- Umplanung
- Rückbau
- Revitalisierung

Die Fabrikplanung wird auf unterschiedlichen Ebenen durchgeführt (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 6). Diese Ebenen beschreiben mit steigendem Detailgrad die Systemlevel der Fabrikplanung (vgl. Westkämper 2007, S. 11). Die höchste Ebene stellt das *Produktionsnetzwerk* dar, in welcher strategische Entscheidungen wie Make-or-Buy Entscheidungen oder Änderungen im Produktportfolio getroffen werden. Nachfolgend steht der *Produktionsstandort* – die Fabrik – als Teil eines Produktionsnetzwerks, welcher in verschiedene *Bereiche* gegliedert ist (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 10f.; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 6; Wiendahl et al. 2024, S. 113ff.). Zu den *Bereichen* einer Fabrik zählen bspw. die Qualitätssicherung oder die Montage (vgl. Bergholz 2005, S. 110; Burggräf et al. 2021c, S. 11).

Mit weiter steigendem Detailgrad werden *Systeme* beschrieben, welche sich aus mehreren *Arbeitsplätzen* zusammensetzen und z. B. ein Montagesystem bilden (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 11; Wiendahl et al. 2024, S. 113). Die unterste Hierarchieebene stellen die *Arbeitsplätze* dar, an denen einzelne Prozesse durch Menschen oder Maschinen durchgeführt werden (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 11; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 6f.; Wiendahl et al. 2024, S. 116f.).

In Ergänzung zu diesen fünf dargestellten Ebenen der Fabrik wird bei *Wiendahl et al. (2024)* eine sechste Ebene, die *Zelle*, eingeführt, die zwischen *System* und *Arbeitsplatz* angesiedelt ist. Die *Zelle* besteht aus mehreren *Arbeitsplätzen* und dient der Durchführung einer Prozessfolge. Dies hat zur Folge, dass in dieser Darstellung die *Systeme* aus *Zellen* gebildet werden. Für die vorliegende Arbeit werden jedoch die fünf Hierarchieebenen wie in der Abbildung 5 dargestellt zugrunde gelegt. Die zusätzliche Ebene der *Zelle* kann als umfangreicher Arbeitsplatz verstanden und somit in die Ebene *Arbeitsplatz* integriert werden.

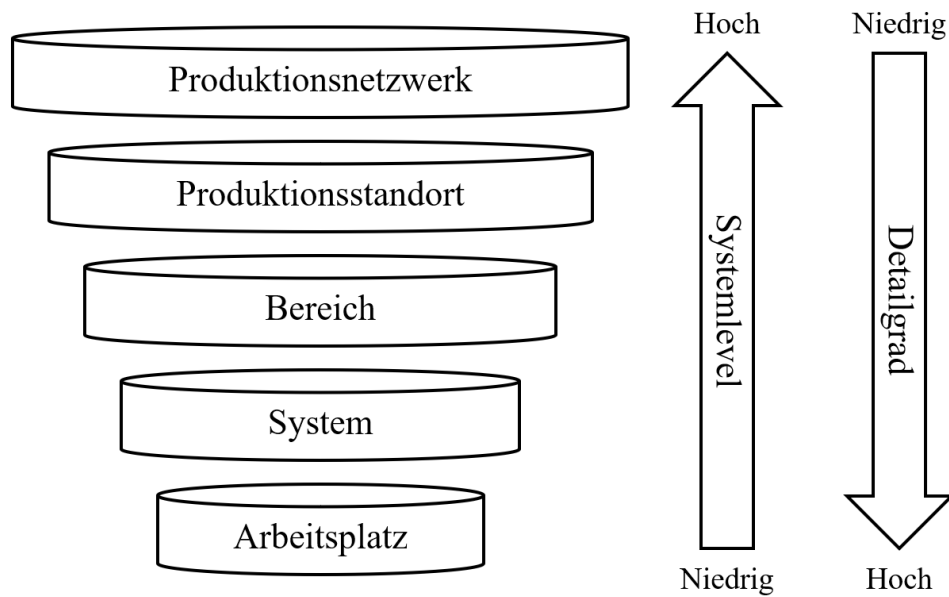


Abbildung 5: Hierarchieebenen der Fabrik i. A. a. (Burggräf et al. 2021c, S. 11; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 6; Westkämper 2007, S. 11; Wiendahl et al. 2024, S. 113)

Nach der Beschreibung von Planungsfällen und -ebenen werden abschließend noch Planungsphasen unterschieden, die für alle Planungsfälle in der Fabrikplanung Anwendung finden. Die konkreten Inhalte dieser Planungsphasen können jedoch je nach Planungsfall variieren.

Die wissenschaftliche Literatur unterscheidet verschiedene Planungsphasen in der Fabrikplanung. Diese verschiedenen Planungskonzepte unterscheiden sich bspw. im Detailgrad oder im Planungsvorgehen. Einige Planungskonzepte schließen die spätere Umsetzung mit ein während andere die Umsetzung klar von der Planung abgrenzen (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 28; Ivanov et al. 2021, S. 269; Mohr et al. 2024, S. 1973; Verein Deutscher Ingenieure 2011; Wiendahl et al. 2024, S. 22).

Bei der Analyse der Planungsphasen über die verschiedenen Planungskonzepte hinweg lassen sich Gemeinsamkeiten erkennen. Die Inhalte stimmen miteinander überein, werden lediglich unterschiedlich auf Planungsphasen verteilt.

Für die Betrachtung dieser Arbeit werden in Summe sieben verschiedene Planungsphasen – *Zielfestlegung, Grundlagenermittlung, Konzeptplanung, Detailplanung, Realisierungsvorbereitung, Realisierungsüberwachung* und *Hochlaufbetreuung* – unterschieden (vgl. Mohr et al. 2024, S. 1973; Ivanov et al. 2021, S. 269 ff.; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 8). Diese sieben Planungsphasen werden sowohl in der internationalen Literatur als auch in Standardrichtlinien beschrieben und umfassen auch die Inhalte der anderen Planungskonzepte. Im Folgenden werden die verschiedenen Planungsphasen beschrieben.

Zielfestlegung: In dieser Phase werden die Grundsteine für die Fabrikplanungsprojekte definiert. Die Aufgabenstellung wird strukturiert, um eine zielgerichtete Planung zu ermöglichen. Zudem soll durch die Definition der Ziele die Bewertung des Endergebnisses ermöglicht werden (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 9f.; Wiendahl et al. 2024, S. 189f.). Häufig liegt der Fokus der *Zielfestlegung* auf der Kosteneffizienz und der späteren Ausbringungsmenge der Produktion. Aus den derzeitigen Marktsituationen wird die Forderung formuliert, dass Flexibilität von Fabriken erforderlich ist, um einen wirtschaftlichen Fabrikbetrieb zu erreichen. So soll die Flexibilität in die *Zielfestlegung* mit integriert werden, auch wenn diese potenziell in Konkurrenz zu Kosteneffizienz steht. Über die Laufzeit eines Produktes sind die gesteigerten Anschaffungskosten, die häufig mit der Flexibilität einhergehen, vorteilhafter für die Kosteneffizienz, da die Reaktion auf sich ändernde Rahmenbedingungen einfacher umzusetzen ist (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 46f.; Grundig 2021, S. 53ff.; Kaucher et al. 2023, S. 16f.; Wiendahl et al. 2024, S. 197f.).

Grundlagenermittlung: Hier werden die Eingangsgrößen für die anstehende Planung ermittelt. Wesentliche Faktoren sind die Art und *Variantenanzahl* der zu produzierenden Produkte sowie die notwendigen Betriebsmittel (vgl. Mohr et al. 2024, S. 1976f.; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 11f.; Wiendahl et al. 2024, S. 234f.). Diese dienen als Produktionsmittel und umfassen unter anderem Materialien, Geräte oder technische Anlagen (vgl. Duden 2024a; Wiendahl et al. 2024, S. 540).

Konzeptplanung: Auf Basis der Grundlagenermittlung ist das Ziel dieser Phase die Entwicklung eines technischen und organisatorischen Konzepts für das Planungsprojekt. Nach dem technischen Konzept werden die notwendigen Betriebsmittel ausgewählt und dimensioniert. Somit können erste Konzepte für die Umsetzung des Planungsprojekts mit Hinblick auf die Planungsgrundlagen erstellt werden (vgl. Ivanov et al. 2021, S. 269f.; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 12f.; Wiendahl et al. 2024, S. 271). Diese können dann diskutiert werden, bis dann ein Konzept weiter verfolgt wird.

Detailplanung: Die in der *Konzeptplanung* gewonnenen Ergebnisse werden nun konkretisiert. Für ein ausgewähltes Konzept erfolgt eine detailliertere Planung. Es werden ein Feinlayout sowie Kostenabschätzungen für das Planungsprojekt erstellt. Außerdem werden Lastenhefte formuliert und die Arbeitsorganisation des Planungsobjekts definiert (vgl. Ivanov et al. 2021, S. 270f.; Mohr et al. 2024, S. 1976f.; Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 15; Wiendahl et al. 2024, S. 383). Ein Lastenheft enthält die Anforderungen an z. B. Betriebsmittel und wird vom Auftraggeber verfasst, um den Liefer- und Leistungsumfang für Auftragnehmer zu definieren (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2001, S. 2).

Realisierungsvorbereitung: Die Umsetzung der beschriebenen Leistungsumfänge aus der *Detailplanung* soll in dieser Planungsphase konkret vorbereitet werden. Die Inhalte der

Lastenhefte werden an geeignete Auftragnehmer vergeben, damit die anschließende Realisierung erfolgen kann (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 17f.; Wiendahl et al. 2024, S. 463f.).

Realisierungsüberwachung: In dieser Phase erfolgt der Aufbau der Betriebsmittel unter Einhaltung etwaiger Sicherheitsmaßnahmen. Ziel ist es den Aufbau in der vereinbarten Zeit, den entsprechenden Kosten und den Qualitätsstandards zu gewährleisten (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 18f.; Wiendahl et al. 2024, S. 465f.).

Hochlaufbetreuung: Die *Hochlaufbetreuung* als letzte Planungsphase umfasst die Inbetriebnahme der Betriebsmittel. Wenn die Inbetriebnahme erfolgt ist, erfolgt in dieser Phase noch die Bewertung der Zielerreichung, wodurch ein Rückschluss auf die Phase 1 – *Zielfestlegung* erfolgt (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 20f.; Wiendahl et al. 2024, S. 466f.).

Die Planungsphasen werden in der Abbildung 6 zusammengefasst. Darüber hinaus sind für alle Fabrikplanungsprojekte die Grundlagen des Projektmanagements gemäß der DIN 69904 übergreifend relevant (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 9).

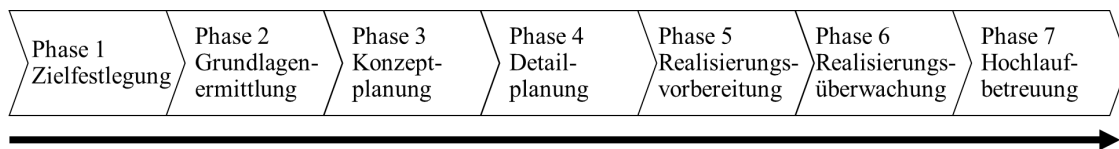


Abbildung 6: Planungsphasen von Fabrikplanungsprojekten i. A. a. (Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 8)

Die zeitliche Dimension der Fabrikplanung lässt sich über den Planungshorizont abbilden. Da Fabrikplanungsprojekte Unternehmen über mehrere Jahre hinweg oder länger beeinflussen können, wird die Fabrikplanung als Teilaufgabe der *Unternehmensplanung* verstanden. In diesem Zusammenhang erfolgt eine Differenzierung in *operative*, *taktische* und *strategische* Planungshorizonte. Diese Einteilung stammt aus der Produktionsprogrammplanung und lässt sich mit Blick auf die Fabrikplanung wie folgt charakterisieren (vgl. Grundig 2021, S. 64; Ivanov et al. 2021, S. 361; Wiendahl et al. 2024, S. 30f.).

Operativer Horizont: Dieser umfasst eine Wirkungsdauer von wenigen Tagen bis hin zu etwa einem Jahr. In diesem Planungshorizont werden in der Fabrikplanung bspw. Mengengrößen und Produkttypen festgelegt, um eine präzise Planung und Steuerung des Produktionsablaufs zu ermöglichen (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 130; Grundig 2021, S. 64; Schenk et al. 2014, S. 295).

Taktischer Horizont: Im taktischen Planungshorizont, der sich etwa über zwei bis zu fünf Jahre erstreckt, werden Produktarten und -sortimente definiert. Darüber hinaus erfolgt in diesem Planungshorizont in der Regel auch die Planung von Betriebsmitteln (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 130; Grundig 2021, S. 64; Wiendahl et al. 2024, S. 30).

Strategischer Horizont: Dieser Planungshorizont erstreckt sich über Zeiträume von mehr als fünf Jahren. Es werden häufig weitreichende Investitionsentscheidungen getroffen, wie z. B. die Wahl von Standorten oder die Definition neuer Produktfelder sowie grober Absatzmengen (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 130; Grundig 2021, S. 64; Wiendahl et al. 2024, S. 30).

2.2.2 Charakterisierung von Montagesystemen

Die Charakterisierung der Montage als ein Bereich der Fabrik hängt maßgeblich von der Produktionsart des jeweiligen Unternehmens ab. Grundsätzlich wird zwischen der Einmalproduktion und Wiederholproduktion unterschieden. Diese variieren insbesondere in Bezug auf die *Jahresproduktionsmenge* und *Wiederholhäufigkeit* gleicher oder ähnlicher Produkte (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 156ff.; Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 43).

Einmalproduktion: Die Einmalproduktion bezieht sich auf individuelle Erzeugnisse, bspw. Produktionsanlagen, welche mit der Stückzahl eins gefertigt werden (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 156).

Wiederholproduktion: Die Wiederholproduktion wird weiter unterteilt in Mehrfachproduktion, Variantenproduktion, Serienproduktion und Massenproduktion. Diese unterscheiden sich vorrangig durch eine zunehmende *Jahresproduktionsmenge* (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 156f.; Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 43). Die Produktionsarten der Wiederholproduktion grenzen sich zusätzlich zu der *Jahresproduktionsmenge* durch die *Wiederholhäufigkeiten* ab.

Mehrfachproduktion: Die Mehrfachproduktion beschreibt das Produzieren eines Bauteils mehrfach und in zeitlicher Nähe (vgl. Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 43).

Variantenproduktion: Die Variantenproduktion beschreibt die Produktion von verschiedenen *Variantenanzahlen* eines Grundbauteils (vgl. Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 43).

Serienproduktion: Die Serienproduktion beschreibt daraufhin die Produktion von größeren Stückzahlen desselben Bauteils (vgl. Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 43).

Massenproduktion: Die Massenproduktion umschreibt die Produktionsart mit der höchsten *Jahresproduktionsmenge*, bei welcher kontinuierlich die gleichen Bauteile produziert werden (vgl. Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 43).

Neben den Produktionsarten werden verschiedene Organisationstypen unterschieden, welche für jede Produktionsart die wirtschaftlichste Montagestruktur beschreiben. Diese beschreiben vor allem die physische Anordnung von Arbeitsplätzen und auch Betriebsmitteln. Folgende Typen sind relevant:

Baustellen- und Gruppenmontage: Die Baustellen- und Gruppenmontage beschreiben Montageprinzipien mit stationären Arbeitsplätzen, bei denen sich die Menschen und Betriebsmittel zum Bauteil bewegen (vgl. Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 53).

Reihen- und *Taktstraßenmontage*: Diese beschreiben Montageprinzipien mit bewegten Montageobjekten entlang einer definierten Montagelinie (vgl. Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 53).

Die *Fließmontage* unterscheidet sich von der *Reihen-* und *Taktstraßenmontage* durch zusätzlich bewegte Arbeitsplätze (vgl. Holtewert und Wiendahl 2020, S. 139f.).

Typische Anwendungsbeispiele für die Organisationstypen sind die *Baustellenmontage* im Anlagenbau (vgl. Matt et al. 2015, S. 9) oder die *Fließmontage* in der Automobilindustrie (vgl. Golz 2013, S. 5; Ivanov et al. 2021, S. 299). Die Zuordnung von Produktionsarten und Organisationstypen zeigt die Abbildung 7.

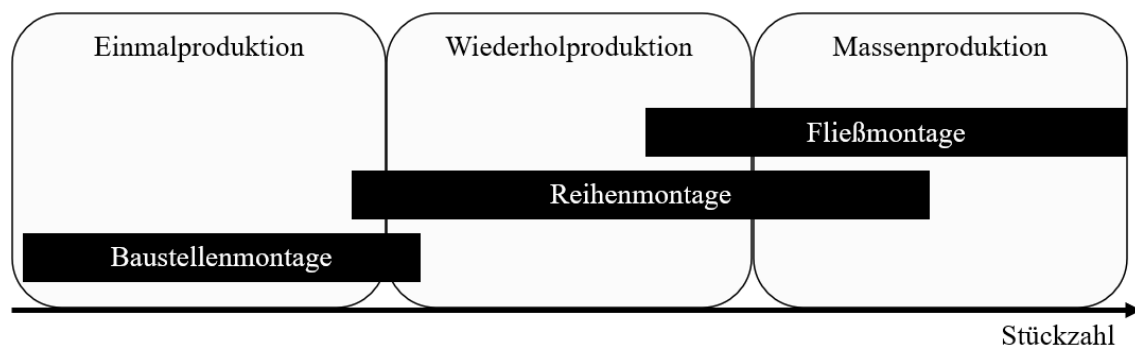


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Produktionsarten und Organisationstypen der Montage i. A. a. (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 158; Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 42ff.)

Wie in der Abbildung 7 zu sehen, lassen sich die verschiedenen Organisationstypen der Montage unterschiedlichen Stückzahlbereichen und damit auch Produktionsarten zuordnen.

Die *Baustellenmontage* ist ein Organisationstyp, der typischerweise für einen kleinen Stückzahlbereich zum Einsatz kommt. Durch die stationäre Gestaltung bewegt sich zusätzlich zum Menschen und den Betriebsmitteln auch das benötigte Material zum Montageobjekt. Eine klare Aufgabenaufteilung für die Montage der Bauteile erfolgt in der Regel nicht. Dieser Organisationstyp ermöglicht eine hohe Flexibilität, geht jedoch mit einem erhöhten Platzbedarf einher (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 154; Lotter 2012c, S. 147).

Die *Reihenmontage* stellt eine Fortentwicklung dar, bei der die Montageobjekte entsprechend einer logischen Abfolge der Montageprozesse räumlich angeordnet sind. Bei hoher Produktvielfalt kann die Abfolge durch Abzweigungen oder parallele Arbeitsplätze ergänzt werden. Die *Reihenmontage* bietet eine hohe Produktivität und ist daher besonders für die Wiederholproduktion geeignet (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 155; Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 53).

Die *Fließmontage* ähnelt strukturell der *Reihenmontage*, unterscheidet sich jedoch durch die Integration einer festgelegten *Taktzeit*, die den zeitlichen Ablauf der Montageprozesse je Arbeitsplatz regelt. Es werden dabei folgende *Fließmontagen* unterschieden:

Kontinuierliche Fließmontage: bewegte Montageobjekte

Stationäre Fließmontage: ruhende Montageobjekte

Zentrale Merkmale der *Fließmontage* sind eine hohe Produktivität, eine gute Automatisierbarkeit sowie eine geringe Flexibilität. Eingesetzt wird die *Fließmontage* häufig in der Serien- und Massenproduktion (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 155; Dictionary of Production Engineering IV 2020, S. 178ff.; Lotter 2012d, S. 135ff.).

Die Arbeitsplätze in den verschiedenen Organisationstypen können in manuelle, automatisierte oder hybride Systeme unterteilt werden. Die manuelle Montage ist gekennzeichnet durch eine hohe Flexibilität und eignet sich insbesondere für geringe *Stückzahlen* mit hohen *Variantenanzahlen* (vgl. Lotter 2012e, S. 167f.; Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 54f.).

Die automatisierte Montage nutzt Montageanlagen für Montageprozesse. Diese bieten eine hohe Effizienz bei großen *Stückzahlen*, sind jedoch starr und wenig flexibel und bei hohen *Stückzahlen* sowie hoher *Variantenanzahlen* mit erheblichen Kosten verbunden. Zusätzlich werden auch die Qualität und die Prozesssicherheit der Montage durch eine Automatisierung erhöht (vgl. Kropik 2021, S. 39f.; Lotter 2012e, S. 167f.; Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 49ff.).

Die hybriden Montagesysteme kombinieren manuelle und automatisierte Arbeitsplätze und eignen sich dann für mittlere *Stückzahlen* und *Variantenanzahlen* und bieten eine mittlere Flexibilität. Durch die gezielte Integration von automatisierten Montageprozessen können sich wirtschaftliche Vorteile ergeben (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 561f.; Lotter 2012e, S. 167ff.; Lotter et al. 2016, S. 103f.; Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 54).

Der Mix aus manuellen und automatisierten Montageprozessen kann mittels eines *Automatisierungsgrads* gemessen und verglichen werden. Je höher der *Automatisierungsgrad*, desto stärker ist die automatisierte Montage ausgeprägt (vgl. Chatti et al. 2019, S. 174). Die Charakteristiken der Montagesysteme sind in der Abbildung 8 zusammengefasst.

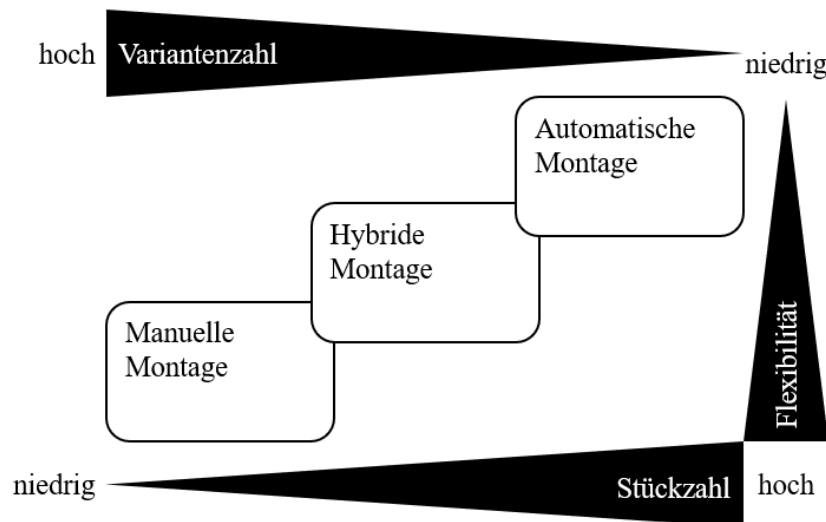


Abbildung 8: Charakteristika von Montagesystemen i. A. a. (Lotter 2012e, S. 168)

In der Montage werden unabhängig von den Organisationstypen und Arten von Arbeitsplätzen Betriebsmittel zur Unterstützung oder zur Übernahme von Montageprozessen eingesetzt. Wie und wo Betriebsmittel eingesetzt werden, wird bei der Planung der untersten Planungsebene – *Arbeitsplatz* – ermittelt. Je nachdem wie ein Montagesystem aufgebaut ist, interagieren die Betriebsmittel mehr oder weniger mit den Menschen in der Montage (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 506).

2.2.3 Grundlagen der Betriebsmittelplanung

Die Planung von Betriebsmitteln stellt einen Teilbereich der Planung von Fertigungssystemen dar. Unter Betriebsmittelplanung ist im Detail die Dimensionierung und Strukturierung der Betriebsmittel gemeint. Während sich die Dimensionierung mit dem Mengengerüst und der Art von Ressourcen, wie bspw. Betriebsmittel oder Arbeitskräfte, zur Erfüllung eines definierten Produktionsprogramms befasst, beschreibt die Strukturierung die Ordnung von Funktionseinheiten, etwa Arbeitsstationen, um eine optimale räumliche Anordnung entlang des Prozessablaufs zu erreichen (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 123f.; Grundig 2021, S. 83f.; Schenk et al. 2014, S. 306ff.; Wiendahl et al. 2024, S. 268ff.).

Unabhängig vom Planungsfall beginnt die Dimensionierungsaufgabe mit dem geplanten Produktionsprogramm, welches das Mengengerüst an Produkten für ein Projekt vorgibt. Da die Definition des Mengengerüsts eine mittelfristige Aufgabe innerhalb der Fabrikplanung darstellt, erfolgt auch der Beginn der Dimensionierung im mittelfristigen Planungshorizont, also etwa zwei bis fünf Jahre vor Produktionsbeginn (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 124f.; Grundig 2021, S. 83f.). In der industriellen Praxis ist das Produktionsprogramm jedoch nicht als feste Größe zu betrachten, da dieses von einer gewissen Dynamik geprägt ist. Aus diesem Grund empfiehlt sich eine flexible Gestaltung der Betriebsmittel, um sich an veränderte Produktionsprogramme anpassen zu können (vgl. Grundig 2021, S. 63f.).

Diese Dynamik gewinnt besonders bei Planungsaufgaben mit hohem Genauigkeitsbedarf, wie z. B. der präzisen Auslegung von Betriebsmitteln, an Bedeutung. Fehler oder Ungenauigkeiten führen im späteren Betrieb zu Ineffizienzen, die nur begrenzt kompensiert werden können (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 126). Um negativen Folgen der Dynamik entgegenzuwirken, werden in der Betriebsmittelplanung verschiedene Szenarien berücksichtigt, sodass im späteren Betrieb kleinere Schwankungen ausgeglichen werden können (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 129).

Die Dimensionierung der Betriebsmittel lässt sich in zwei Teilbereiche gliedern: die Festlegung der Art und Anzahl der Betriebsmittel. Die Auswahl der Betriebsmittelart richtet sich nach dem technologischen Verfahren, wie dem eingesetzten Fügeverfahren der betroffenen Bauteile. Die Betriebsmittellanzahl ergibt sich aus dem quantitativen Bedarf jedes Betriebsmittels (vgl. Grundig 2021, S. 84). Je nach Planungsfall variieren die Kapazitätsanforderungen der Betriebsmittel: Im Fall einer Umplanung werden bestehende Betriebsmittel in die Kapazitätsberechnung einbezogen, während bei einer Neuplanung der Kapazitätsbedarf vollständig über das Produktionsprogramm abgeleitet wird (vgl. Grundig 2021, S. 85f.).

Nach Abschluss der Dimensionierung erfolgt die Strukturierung im Sinne der Anordnung der Betriebsmittel. Diese richtet sich nach der Montagegestaltung, im Falle der Automobilindustrie häufig nach der Gestaltung der Montagelinien. Zusätzlich fließt auch der Ablauf der Montageprozesse in die Anordnungsplanung ein, um ein Ideallayout zu bestimmen (vgl. Grundig 2021, S. 103).

2.2.4 Veränderungsfähigkeit in der Fabrikplanung

Die aktuellen, dynamischen Rahmenbedingungen verlangen nach der Fähigkeit einer Fabrik und von Betriebsmitteln, sich flexibel an veränderte Produktionsanforderungen anpassen zu können. Diese Fähigkeit wird als *Veränderungsfähigkeit* bezeichnet (vgl. El-Maraghy 2005, S. 261f.; Fisel 2019, S. 20f.; Wiendahl et al. 2024, S. 96f.) und umfasst weitere Ausprägungen wie *Flexibilität*, *Wandlungsfähigkeit*, *Rekonfigurierbarkeit* und *Agilität* (vgl. Fisel 2019, S. 21ff.; Wiendahl et al. 2024, S. 97ff.). Unter *Flexibilität* wird die Anpassung innerhalb festgelegter Systemgrenzen verstanden (vgl. Bochmann 2018, S. 18f.), während die *Wandlungsfähigkeit* Veränderungen über diese Systemgrenzen hinaus beschreibt (vgl. Bochmann 2018, S. 18f.). Die *Rekonfigurierbarkeit* beschreibt vor allem im englischsprachigen Raum veränderungsfähige Fertigungssysteme, welche auch als *Reconfigurable Manufacturing System* (RMS) bezeichnet werden (vgl. Koren et al. 1999). Die *Agilität* wiederum umfasst eine unternehmensweite, strategische Fähigkeit, die Produktionsleistung schnell an wechselnde Marktbedingungen anzupassen (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 114).

Ergänzend vervollständigen *Resilienz* und *Robustheit* den Begriffskomplex der Veränderungsfähigkeit. Während *Robustheit* die Fähigkeit beschreibt, unter veränderten Bedingungen eine konstante Leistung aufrechtzuerhalten und Störungen ohne Anpassungen zu überstehen (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 114f.), zielt *Resilienz* darauf ab, sich nach einer Störung möglichst schnell zu erholen und das Ausgangsniveau der Leistung wiederherzustellen (vgl. Ivanov et al. 2021, S. 498; Wiendahl et al. 2024, S. 114f.).

Zur Beschreibung der *Flexibilität* von Fertigungssystemen existieren verschiedene Flexibilitätsarten: Maschinen-, Material-, Operation-, Prozess-, Route-, Produkt-, Volumen-, Expansion-, Programm-, Produktion- und Marktflexibilität (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 296f.).

Die ersten drei, Maschinen-, Material- und Operationsflexibilität, gelten als Komponentenflexibilität und beziehen sich auf einzelne Komponenten des Fertigungssystems. Die nächsten fünf Flexibilitätsarten – die Systemflexibilität – betreffen das gesamte Fertigungssystem (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 296f.). Daraus ergibt sich wiederum die aggregierte Flexibilität, welche übergeordnete Systemebenen beschreiben (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 313). Diese Zusammenhänge sind in der Abbildung 9 dargestellt.

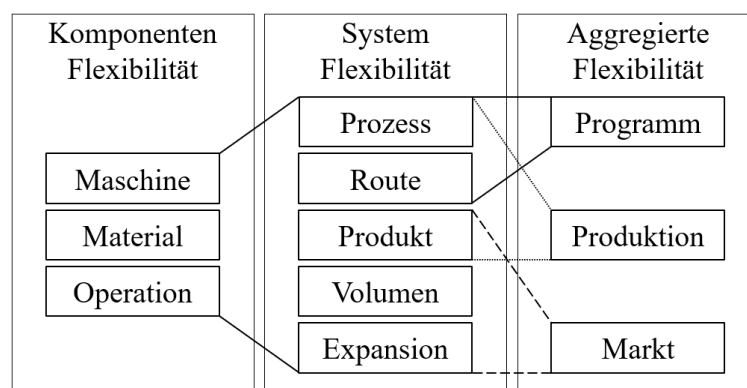


Abbildung 9: Flexibilitäten von Fertigungssystemen i. A. a. (Sethi und Sethi 1990, S. 297)

Die erste Gruppe an Flexibilitätsarten ist die Komponentenflexibilität, welche aus der *Maschinen-*, *Material-* und *Operation-Flexibilität* besteht. Die *Maschinen-Flexibilität* beschreibt die Fähigkeit einer Maschine (Betriebsmittel) verschiedenen Tätigkeiten, ohne größeren Änderungsaufwand durchführen zu können. Die *Material-Flexibilität* umfasst die Fähigkeit, verschiedene Bauteile effizient zu handhaben, etwa im Transport zwischen verschiedenen Maschinen. Schließlich bezeichnet die *Operation-Flexibilität* die Fähigkeit eines Betriebsmittels, ein Produkt auf unterschiedlicher Weise zu produzieren (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 298ff.).

Die Systemflexibilität als nächste Gruppe wird aus den *Prozess-*, *Route-*, *Produkt-*, *Volumen-*, *Expansion-Flexibilitäten* gebildet (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 297). Die *Pro-*

zess-Flexibilität stellt auf der Ebene eines Montagesystems die Fähigkeit dar verschiedene Produkttypen, ohne großen Änderungsaufwand montieren zu können (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 302). Darüber hinaus beschreibt die *Route-Flexibilität* die Fähigkeit eines Systems, ein Produkt durch verschiedene Materialflüsse zu produzieren (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 305). Die *Produkt-Flexibilität* beschreibt in Abgrenzung zur *Prozess-Flexibilität*, die Fähigkeit Produkte in das System zu integrieren oder verschiedene Produkte auszutauschen (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 304). Die *Volumen-Flexibilität* ist dann die Fähigkeit eines Systems wirtschaftlich bei verschiedenen Ausbringungsmengen zu operieren (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 307). Die letzte Flexibilitätsart der System-Flexibilität – die *Expansions-Flexibilität* – ist die Fähigkeit eines Systems, die Aufgabenumfänge und Kapazität einfach zu vergrößern (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 309).

Die letzte Gruppe ist die Aggregierte Flexibilität, bestehend aus *Programm-*, *Produktion-*, und *Markt-Flexibilität* (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 297). Die *Programm-Flexibilität* meint die Fähigkeit, dass ein System unbewacht für eine lange Zeit laufen kann (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 310). In Ergänzung beschreibt die *Produktion-Flexibilität* meint die Gesamtheit an Produkten, die ein System ohne große Investitionen in Betriebsmittel, produzieren kann (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 311). Die letzte Flexibilitätsart – die *Markt-Flexibilität* – meint die Fähigkeit des Systems, einfach auf wechselnde Marktbedingungen reagieren zu können (vgl. Sethi und Sethi 1990, S. 312).

Aufbauend auf der Beschreibung der Veränderungsfähigkeit in der Fabrikplanung diskutiert die Literatur auch konkrete Umsetzungsmöglichkeiten, wie diese Fähigkeiten in der Praxis umgesetzt werden kann. Hierbei wird insbesondere auf die sogenannten Wandlungsbefähiger verwiesen, welche auf übergeordneten Fabrikebenen Veränderungen ermöglichen sollen. Es werden die *Universalität*, *Mobilität*, *Skalierbarkeit*, *Modularität* und *Kompatibilität* unterschieden. Unter *Universalität* wird die Dimensionierung sowie eine Gestaltung für unterschiedliche Bedarfe verstanden. Die *Mobilität* beschreibt die Möglichkeit, dass sich Objekte innerhalb der Fabrik möglichst frei örtlich bewegen können. Eine Umsetzungsmöglichkeit ist z. B., dass Maschinen auf Rollen gestellt werden sollen. Die *Skalierbarkeit* wird als Wandlungsbefähiger so definiert, dass eine Fabrik atmungsfähig in Bezug auf Technik, Personen und Räumlichkeiten sein soll. Darüber hinaus bezieht sich die *Modularität* auf die Verwendung von funktionsfähigen, standardisierten Bausteinen für die Fabrik, während *Kompatibilität* die Vernetzung zwischen den Materialien, Informationen und auch Medien sowie Energie beschreibt (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107).

Zusätzlich liefern die RMS Rekonfigurationsaspekte für Betriebsmittel. Diese sind *Modularität*, *Integrierbarkeit*, *Anpassbarkeit*, *Konvertierbarkeit*, *Skalierbarkeit* und *Diagnosefähigkeit*. Dazu werden beispielhaft Umsetzungsmöglichkeiten definiert, sodass eine

Umsetzung in Betriebsmitteln durchgeführt werden kann (vgl. Koren et al. 1999; Koren und Shpitalni 2010).

Integrierbarkeit in den RMS: Maschinen gleicher Art lassen sich in einem vorgegebenen Rahmen einsetzen. Diese werden daraufhin über Transportsysteme mit dem restlichen System verbunden (vgl. Koren und Shpitalni 2010, S. 136).

Skalierbarkeit in den RMS: Neue Maschinen können einfach in das System eingebracht werden und dann mit in den Prozess eingebunden werden (vgl. Koren und Shpitalni 2010, S. 136).

Konvertierbarkeit in den RMS: Die Charakteristik der Konvertierbarkeit soll durch eine Anpassung der Hard- und Software durchgeführt werden. Dies ist durch die Prämisse der gleichen Produktarten aus den RMS möglich (vgl. Koren und Shpitalni 2010).

2.3 Handlungsbedarf von flexiblen Montageanlagen

Das Kapitel 2 behandelt die Grundlagen und Charakteristika der Fabrikplanung sowie der industriellen Montage in der Automobilindustrie, mit besonderem Fokus auf Montageanlagen als Betriebsmittel. Diese Montageanlagen werden bislang überwiegend mit dem Blick auf die Ausbringungsmenge und Kosteneffizienz für spezifische Montageprozesse und Bauteile geplant. Im Betrieb der Montageanlage führt eine zunehmende Automatisierung jedoch zu einer sinkenden Flexibilität (vgl. Kropik 2021, S. 20; Lotter 2012a, S. 1ff.; Lotter 2012e, S. 167f.).

Gleichzeitig erhöht eine wachsende Anzahl an Produktvarianten die Komplexität der Produktion, verkürzt die Produktlebenszyklen und stellt Fabriken sowie Betriebsmittel – insbesondere Montageanlagen – vor neue Herausforderungen (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 21). Dies führt zu einem steigenden Bedarf an zusätzlichen Betriebsmitteln sowie an Produktions- und Lagerflächen (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 234). Da sich zudem die ursprünglichen Planungsgrundlagen verändern, resultieren aus verkürzten Produktlebenszyklen häufigere Anpassungen oder Neuanschaffungen von Betriebsmitteln (vgl. Grundig 2021, S. 83f.). Damit entstehen neue Anforderungen, die eine Anpassung der Fabrikplanung in der Automobilindustrie an die aktuellen Rahmenbedingungen notwendig machen.

Moderne Montageanlagen ermöglichen dank ihrer Leistungsfähigkeit zwar erhebliche Kostenvorteile (vgl. Bauernhansl et al. 2020, S. 102). Dennoch sind Planungsprojekte bislang primär auf Kosteneffizienz und Ausbringungsmenge ausgerichtet – ein Zielsystem, das zunehmend mit den wachsenden Flexibilitätsanforderungen kollidiert. Zwar geht die Flexibilität mit höheren Anschaffungskosten einher, sie steigert jedoch maßgeblich die Reaktionsfähigkeit auf neue oder wechselnde Produkte (vgl. Burggräf et al. 2021c, S.

20f.; Kaucher et al. 2023, S. 15; Wiendahl et al. 2024, S. 96f.). Die gegenwärtige Gestaltung der Montageanlagen genügt daher nicht mehr, um den heutigen dynamischen und volatilen Rahmenbedingungen gerecht zu werden (vgl. Bauernhansl et al. 2014, S. 103f.).

Besonders die automobile Montage ist hiervon betroffen. Diese ist geprägt durch eine hohe *Variantenanzahl* in der Serienmontage, den gleichzeitigen Zusammenbau verschiedener Fahrzeugmodelle und einen steigenden *Automatisierungsgrad*. Innerhalb der Fließmontage variiert die Gestaltung der Montage zudem je nach Fahrzeugsegment, sodass sich abweichende Anforderungen der Flexibilität ergeben können. Hinzu kommt, dass die Fabrik- und Betriebsmittelplanung zunehmend durch zahlreiche Faktoren, darunter dynamische Marktsituationen, individualisierte Produkte und Globalisierung beeinflusst wird (vgl. Grundig 2021; Burggräf und Schuh 2021; Wiendahl et al. 2024). Diese Entwicklungen erfordern situationsbedingte Anpassungen, um den wechselnden Bedarfen gerecht zu werden (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 96). Insbesondere aufgrund fortlaufender Änderungen an Produkten, Produktionsprogrammen oder anderen Rahmenbedingungen während der Planung und nach der Inbetriebnahme der Betriebsmittel, müssen diese häufig angepasst werden. Diese Umplanungen verursachen zusätzliche Kosten und beeinflussen die Planbarkeit.

Aus diesem Spannungsfeld ergibt sich der Forschungskontext sowie die daraus abgeleitete *LFF*. Bei der Formulierung der *LFF* liegt der Fokus auf dem beschriebenen Forschungsbedarf, flexible Betriebsmittel in der Montage zu planen und umzusetzen. Für die Automobilindustrie wäre es dabei ein klarer Vorteil, wenn die Flexibilität von Montageanlagen in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments geplant werden könnte. Zwar sind einige übergeordnete Aspekte und Flexibilitätsanforderungen in der Fabrikplanung bereits in der Literatur beschrieben, es fehlt jedoch eine konkrete Methodik, mit der insbesondere flexible Montageanlagen in der automobilen Montage geplant werden können. Es stellt sich nun aber die Frage wie die übergeordneten Aspekte und Anforderungen auf die Ebene der Betriebsmittel heruntergebrochen werden können, sodass sich die *LFF* wie folgt ergibt:

LFF: Wie lässt sich die Flexibilität in Montageanlagen systematisch planen, gestalten und konzeptionell implementieren?

Daraus ergibt sich ein Effizienzpotenzial für Fabriken und insbesondere für die automatisierte Montage, indem Flexibilität bereits in die Betriebsmittel – also den Montageanlagen – integriert wird. Dieses Potenzial liegt vor allem in einem dynamischen Umfeld, wie der Automobilindustrie vor (vgl. Hottenrott et al. 2023, S. 1144f.; Rupp und Müller 2020, S. 1431f.).

Die derzeitigen Modelle und Planungsvorgehen berücksichtigen die Flexibilität – vor allem in der Betriebsmittelplanung – nicht explizit, sodass das Effizienzpotenzial für die

Montage nicht genutzt werden kann. Es braucht ein neues Modell für die Planung von flexiblen Montageanlagen, welches vor allem für die automatische Montage in der Automobilindustrie genutzt werden kann. Durch ein solches Modell soll die Flexibilität in Betriebsmitteln – je nach spezifischen Anforderungen je Unternehmen – geplant werden. Auf Basis der bisherigen theoretischen Betrachtung ergeben sich Anforderungen an ein solches Modell. Die erste Anforderung an ein Flexibilitätsmodell ist, dass dieses den derzeitigen Planungsprozess klar um die Flexibilität für Montageanlagen in der Automobilindustrie ergänzt:

Anforderung 1:

Integration der Flexibilität als Zielgröße von Montageanlagen in den Planungsprozess

Weitergehend haben sich die Produktlebenszyklen in der Automobilindustrie in den vergangenen Jahrzehnten signifikant verkürzt – seit den späten 1980er Jahren um nahezu 50% (vgl. Braun et al. 2022, S. 42; Dreher 2024, S. 3f.; Kaucher et al. 2023, S. 15). Diese Dynamik stellt OEMs vor erhebliche Herausforderungen (vgl. Rupp und Müller 2020, S. 1431f.), insbesondere bei der Planung von Montageanlagen. Anpassungen müssen heute sowohl in größerem Umfang als auch in deutlich kürzerer Zeit realisiert werden (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 96). Kritisch wird dies insbesondere bei Montagelinien, auf denen parallel mehrere Fahrzeugprojekte montiert werden. Hier überlagern sich mehrere Produktlebenszyklen, was häufig zu Umplanungen der eingesetzten Montageanlagen führt (vgl. Kern 2021, S. 50).

Angesichts dieser veränderten Rahmenbedingungen ist eine Neuausrichtung der Planung und Gestaltung von Montageanlagen erforderlich. Eine Analyse der Planungshorizonte zeigt, dass die Betriebsmittelplanung insbesondere im taktischen Planungshorizont (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 130; Wiendahl et al. 2024, S. 30) durch die Konzept- und Detailplanung bestimmt wird. Daraus ergibt sich die folgende Anforderung:

Anforderung 2:

Einordnung der Planungshorizonte in die Planungstätigkeiten der Betriebsmittelplanung unter Berücksichtigung der aktuellen Flexibilitätsanforderungen

In Bezug auf die Flexibilität beschreibt die aktuelle Literatur verschiedene Flexibilitätsaspekte und auch Rekonfigurationsaspekte für übergeordnete Fabrikebenen oder auch Fertigungsbetriebsmittel (vgl. Koren et al. 1999; Koren und Shpitalni 2010; Sethi und Sethi 1990). Ein Flexibilitätsmodell sollte die Flexibilitätsaspekte – spezifisch für automatische Montagesysteme – im Modell integrieren:

Anforderung 3:

Charakterisierung der Flexibilität von Montageanlagen

Da Montageanlagen oft monolithisch und starr aufgebaut sind, um eine möglichst hohe Performance für einen spezifischen Anwendungsfall zu bieten (vgl. Hesse und Malisa 2016, S. 529ff.), zeigen die Wandlungsbefähiger und Umsetzungsmöglichkeiten des RMS Möglichkeiten auf, diese Charakteristik im Sinne einer Steigerung der Flexibilität zu ändern. Die Umsetzung der Flexibilität in Montageanlagen verspricht die derzeitigen Anforderungen besser zu erfüllen und stellt somit eine Anforderung an ein Flexibilitätsmodell dar. Dazu müssten Umsetzungsmöglichkeiten für die definierte Flexibilität von Montageanlagen beschrieben werden:

Anforderung 4:

Spezifikation von Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität in Montageanlagen.

Ausgehend von der *LFF* und den vier Anforderungen an ein Flexibilitätsmodell zur Beantwortung der *LFF*, können detailliertere Forschungsfragen (FF) erarbeitet und definiert werden. In einem ersten Schritt fragt die *FF1* nach relevanten Aspekten der Flexibilität für die Planung von Montageanlagen in der Fabrikplanung und die entsprechende Umsetzung. Es soll aufgezeigt werden, wie derzeit die Flexibilität in Fabriken und vor allem Betriebsmitteln eingebracht wird. Die Basis für diese Ausarbeitung ist eine internationale Literaturrecherche zu den Begriffen *Montage*, *Flexibilität* und *Automatisierung*. Die *FF1* ergibt sich daraus zu:

FF1: Wie wird Flexibilität im Planungsprozess in Montageanlagen theoretisch konzipiert und umgesetzt?

Des Weiteren stellt sich die Frage, wie die industrielle Praxis die Flexibilität in Montageanlagen betrachtet und einplant. Im Fokus steht der Betrachtungsraum der automobilen Montage mit dem Blick auf die Montageanlagen. In dieser *FF2* soll die industrielle Sicht aufgenommen und mit der theoretischen Sichtweise verglichen werden. Mit diesen Ansprüchen ergibt sich die *FF2* zu:

FF2: Wie operationalisiert die industrielle Praxis Flexibilität in der Planung von Montageanlagen und welche Abweichungen bestehen zu theoretischen Modellen?

Abschließend soll untersucht werden, wie ein finales integriertes Modell zur Unterstützung der Planung flexibler Montageanlagen entwickelt werden kann. Dieses Modell soll sowohl theoretische als auch praktische Perspektiven diskutieren und vereinen. Dabei sollen die branchenspezifischen Anforderungen der Automobilindustrie – als Betrachtungsobjekt – mit berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich die *FF3* zu:

FF3: Wie lässt sich ein integriertes Modell zur Planung flexibler Montageanlagen in der Automobilindustrie entwickeln?

Durch die drei FF sollen die Forschungslücke geschlossen und die definierten Anforderungen an ein Flexibilitätsmodell für die Flexibilität von Betriebsmitteln erfüllt werden.

3 Stand der Forschung zu flexiblen Montageanlagen

Die definierte *LFF* soll durch eine internationale, systematische Literaturrecherche vertieft werden, um einen Stand der Forschung auszuarbeiten. Dazu beschreibt der Abschnitt 3.1 den Forschungskontext und die systematische Literaturrecherche. Die Ergebnisse der Literaturrecherche diskutiert der Abschnitt 3.2, bevor der Abschnitt 3.3 den Stand der Forschung in Form eines konzeptionellen Flexibilitätsmodells – als Antwort auf die *FFI* – beschreibt.

3.1 Formulierung des Forschungskontextes

Zur Identifikation des Forschungskontextes aus dem Bereich der Planung von Montageanlagen mit Fokus auf Flexibilität wurde eine internationale, systematische Literaturrecherche durchgeführt. Ziel dieser Recherche war es, relevante Veröffentlichungen zu erfassen und systematisch aufzubereiten. Die Interpretation vorhandener wissenschaftlicher Erkenntnisse führt häufig zur Generierung neuen Wissens, weshalb die methodische Durchführung in der Literaturrecherche von besonderer Wichtigkeit ist (vgl. vom Brocke et al. 2009, S. 1).

Aus den theoretischen Grundlagen in Kapitel 2 lassen sich verschiedene Suchbegriffe ableiten, welche potenziell relevante Veröffentlichungen adressieren: *Flexibilität*, *Montage* und *Automatisierung*. Zur umfassenden Abdeckung relevanter Veröffentlichungen erfolgte eine entsprechende Kombination dieser Begriffe sowie die Ergänzung um Synonyme und verwandte Begriffe für die Literaturrecherche. Die verwendeten Begriffe zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Darstellung der relevanten Suchbegriffe für die Literaturrecherche

Suchbegriffe	Synonym/ verwandte Begriffe
<i>Flexibility</i>	Flexibilität, Reconfigurability, Changeability, Rekonfigurierbar, Wandlungsfähig
<i>Assembly</i>	Montage, Production, Manufacturing, Produktion, Fertigung
<i>Automation</i>	Automatisierung

Für den Suchvorgang wurden die Suchbegriffe mittels boolescher Operatoren kombiniert: Innerhalb eines Suchbegriffs erfolgte eine Verknüpfung verwandter Begriffe durch OR, während die Suchbegriffe untereinander mit AND verknüpft wurden. Der Platzhalter „*“ ermöglichte die Berücksichtigung verschiedener Wortendungen. Daraus ergab sich die finale Suchabfrage in Form eines Queries:

“(Flexib* OR Reconfigurab* OR Rekonfigurierbar* OR Changeab* OR Wandlung*)
AND (production OR Produktion OR manufacturing OR Fertigung OR assembly OR
Montage) AND (automat*)”

Die Recherche basierte auf vordefinierten Suchkriterien und erfolgte in den Datenbanken *Springer Professional*, *Science Direct* und *IEEE Xplore*. *Science Direct* und *Springer Professional* sind aufgrund der umfangreichen Anzahl an Veröffentlichungen (vgl. ConferenceInc 2025; Mohr et al. 2024, S. 1973) besonders hervorzuheben als primäre Datenbanken. Durch Filter wie das Fachgebiet oder den industriellen Kontext konnte die Relevanz der Suchergebnisse sichergestellt werden. Nach Sichtung aller Volltexte erfolgte eine Rückwärts- sowie eine Vorwärtssuche der relevanten Veröffentlichungen. Die Rückwärtssuche analysierte Quellen, die in relevanten Veröffentlichungen zitiert wurden. Die Vorwärtssuche untersuchte Veröffentlichungen, welche relevante Quellen zitieren (vgl. vom Brocke et al. 2009, S. 2; Webster und Watson 2002, S. 16). Die Entwicklung der Suchergebnisse je Datenbank während der Recherche zeigt die Tabelle 3.

Tabelle 3: Ergebnisse der Literaturrecherche

Datenbank	Initiale Ergebnisse	Finale Ergebnisse
Springer	3.167	34
Science Direct	731	
IEEE Xplore	74	

Insgesamt konnten 34 relevante Veröffentlichungen identifiziert werden, welche *Flexibilität*, *Automatisierung* und *Montage* sowie verwandte Begriffe thematisieren.

Die relevanten Veröffentlichungen wurden zur vertieften Analyse thematisch klassifiziert. Die Klassifizierung basierte auf den inhaltlichen Schwerpunkten der internationalen Veröffentlichungen.

Aus der Analyse der 34 Veröffentlichungen ließen sich drei übergeordnete Themengebiete ableiten. Aus der Analyse der Themengebiete konnten Kategorien für die Analyse der Veröffentlichungen erarbeitet werden. Die erste Kategorie umfasst 19 Veröffentlichungen zu *flexiblen Fertigungssystemen*. Zehn weitere Veröffentlichungen befassten sich mit *flexiblem Systems Engineering* und bilden somit die zweite Kategorie. Die dritte Kategorie beschreibt das *Automatisierungspotenzial* von Bauteilen und umfasst vier Veröffentlichungen. Innerhalb dieser Kategorien erfolgte durch eine vertiefte Analyse die Identifikation zusätzlicher Unterkategorien.

Die erste Kategorie, *flexible Fertigungssysteme*, kann dadurch weiter in *Mensch-Roboter Kollaboration*, *flexible Planungskonzepte* und *rekonfigurierbare Fertigungssysteme* spezifiziert werden. Die Kategorie *flexibles Systems Engineering* wurde durch die Analyse der Literatur in *modulares Systems Design* und *wandelbare Informationstechnologie* aufgeteilt. Als letztes wurde die Kategorie *Automatisierungspotenzial* in die Unterkategorien *produktweise* und *prozessweise* untergliedert.

Darüber hinaus zeigt die Analyse der Veröffentlichungen, dass verschiedene Planungshorizonte als relevante Einflussgrößen identifiziert werden konnten. Nach der Recherche in den Ergebnissen der Literaturrecherche ergaben sich die Zeiträume *kurzfristig*, *mittelfristig* und *langfristig* aus der Produktionsprogrammplanung als relevante Einflussgrößen. In der Fabrikplanung werden verschiedene Planungsschritte in den unterschiedlichen Planungshorizonten durchgeführt, diese Thematik wurde zur Kategorie *Planungshorizonte* zusammengefasst.

3.2 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche

Die Ergebnisse aus der Literaturrecherche werden anhand der Kategorien analysiert. Die Aufteilung der 34 relevanten Veröffentlichungen nach den Kategorien und Unterkategorien wird im Folgenden dargestellt. Die Tabelle 4 zeigt die 21 Veröffentlichungen aus der Kategorie *flexible Fertigungssysteme* und ordnet die Veröffentlichungen den Unterkategorien zu.

Tabelle 4: Autoren aus der Kategorie flexible Fertigungssysteme

Kategorie	Unterkategorie	Autor
Flexible Fertigungssysteme	Mensch-Roboter Kollaboration	Lotter (2012)
		Scholer (2018)
	Flexible Planungskonzepte	Garrel et al. (2014)
		Kern et al. (2015)
		Foith-Förster und Bauernhansl (2015)
		Fries et al. (2020)
		Erlach (2020)
		Stark et al. (2020)
		Fries et al. (2021)
		Burggräf und Schuh (2021)
		Kern (2021)
	Rekonfigurierbare Fertigungssysteme	Koren et al. (1999)
		Wiendahl et al. (2007)
		Katz (2007)
		Koren und Shpitalni (2010)
		Azab et al. (2013)
		Marks et al. (2018)
		Prasad und Jayswal (2019)
		Fechter und Dietz (2020)
		Koren (2020)
		Abadi et al. (2021)

Zwei der 21 Veröffentlichungen aus der Kategorie *flexible Fertigungssysteme* lassen sich der Unterkategorie *Mensch-Roboter Kollaboration* (MRK) zuordnen. Scholer (2018) und Lotter (2012) beschreiben die MRK als ein Mittel zur Steigerung der Flexibilität in der automatisierten Montage. Durch die Kombination der manuellen Tätigkeiten der Menschen mit den automatisierten Prozessschritten der Roboter wird ein hybrides Montagesystem geformt (vgl. Lotter 2012b; Scholer 2018).

Neun weitere Veröffentlichungen befassen sich mit *flexiblen Planungskonzepten*. Garrel et al. (2014) thematisieren verschiedene Arten der Flexibilität und deren Integration in die Montage sowie interne und externe Einflussgrößen auf die Flexibilitätsanforderungen (vgl. Garrel et al. 2014). Stark et al. (2020) beschreiben dazu beispielhafte Kriterien, wie z. B. Änderungen an Ausbringungsmengen infolge externer Einflüsse (vgl. Stark et al. 2020). Zur Bewältigung interner und externer Einflüsse schlagen Kern et al. (2015) modulare Montagesysteme vor, die den starren Charakter klassischer Montagelinien auflösen. Durch dieses modulare Konzept ist es möglich, fahrzeugspezifische Montagedurchläufe zu realisieren, bei denen nur die benötigten Montagearbeitsplätze genutzt werden (vgl. Kern et al. 2015; Kern 2021). Foith-Förster und Bauernhansl (2015) beschreiben ein weiteres Planungskonzept für flexible Montagegestaltung, welches den Einsatz von Prozessmodulen vorschlägt, die gezielt angesteuert werden können (vgl. Foith-Förster und Bauernhansl 2015). Darüber hinaus beschreiben Fries et al. (2020, 2021) das Konzept eines „Fluid Manufacturing System“, welches eine dynamische Anpassung der Montage an wechselnde Anforderungen ermöglichen soll (vgl. Fries et al. 2021). Grundlage hierfür bildet eine kundenorientierte Produktionsplanung und -steuerung (vgl. Fries et al. 2020). Erlach (2020) fokussiert die automatisierte Montage und beschreibt eine Vorgehensweise für eine wandlungsfähige Auslegung bereits zu Planungsbeginn, um spätere Anpassungen zu erleichtern (vgl. Erlach 2020). Burggräf und Schuh (2021) liefern ein Handbuch zur Fabrikplanung, welches die Modularisierung verschiedener Fabrikebenen, von der gesamten Fabrik bis runter auf die Ebene der Montageanlagen, adressiert (vgl. Burggräf und Schuh 2021).

Die dritte Unterkategorie der *flexiblen Fertigungssysteme* bilden die *rekonfigurierbaren Fertigungssysteme*, zu der zehn Veröffentlichungen zugeordnet werden. Das Konzept der Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) wurde von Koren et al. (1999) eingeführt und verfolgt einen Ansatz angepasster Flexibilität. Dabei werden Produktionsanlagen für einen Prozessschritt auf Produktfamilien ausgelegt, also auf Bauteilgruppen mit ähnlichen Charakteristiken (z. B. geometrische Verhältnisse). Die Rekonfiguration erfolgt innerhalb eines definierten Flexibilitätskorridors, der die Varianten der Produktfamilie abdeckt. Zur Realisierung des Flexibilitätskorridors werden sechs verschiedene Aspekte vorgeschlagen: Skalierbarkeit, Konvertierbarkeit, Diagnosefähigkeit, Modularität, Integrierbarkeit und Anpassbarkeit (vgl. Katz 2007; Koren 2020; Koren et al. 1999; Koren und

Shpitalni 2010; Marks et al. 2018; Prasad und Jayswal 2019). *Wiendahl et al. (2007)* übertragen das RMS auf Montagesysteme, wobei die Flexibilität in diesen Reconfigurable Assembly Systems (RAS) durch MRK Anwendungen erreicht wird (vgl. Wiendahl et al. 2007). *Abadi et al. (2021)* beschreiben eine Methodik zur Modularisierung von Produktionsanlagen, bei der Produktmodule identifiziert und zur Rekonfiguration genutzt werden (vgl. Abadi et al. 2021). Ergänzend beschreiben *Azab et al. (2013)* einen Regelkreis zur Bewertung der aktuellen Konfiguration eines RMS und zur Entscheidung über erforderliche Rekonfigurationen (vgl. Azab et al. 2013). *Fechter und Dietz (2020)* stellen Bewertungskriterien für die Bestimmung des Grades der Wandlungsfähigkeit von Fertigungssystemen bereit (vgl. Fechter und Dietz 2020).

Weitere sieben Literaturergebnisse lassen sich der Kategorie *flexibles Systems Engineering* zuteilen. Die Tabelle 5 zeigt diese Einteilung der Autoren.

Tabelle 5: Autoren aus der Kategorie flexibles Systems Engineering

Kategorie	Unterkategorie	Autor
Flexibles Systems Engineering	Modulares Systems Design	Klein (2014)
		Ahmadzadeh und Masehian (2015)
		Buck (2015)
		Hüttemann et al. (2019)
	Wandelbare Informationstechnologie	Andresen et al. (2005)
		Brusaferri et al. (2014)
		Fechter (2020)

Diese Kategorie fokussiert auf die technische Implementierung der Flexibilität in automatisierten Betriebsmitteln. In der Unterkategorie *modulares Systems Design* beschreibt *Buck (2015)* die Modularisierung mechatronischer Komponenten zur Wiederverwendung. Ein entsprechender Baukasten soll prozessorientierte mechatronische Systeme ermöglichen (vgl. Buck 2015). *Klein (2014)* entwickelt ein weiteres Konzept, bei welchem modulare Produktionsanlagen basierend auf Montageprozessen gestaltet werden. Die Modulidentifikation erfolgt über eine Analyse bestehender Produktionsanlagen (vgl. Klein 2014). Zusätzlich untersuchen *Hüttemann et al. (2019)* den Einsatz mobiler Roboter zur Durchführung einfacher Montageaufgaben (vgl. Hüttemann et al. 2019). *Ahmadzadeh und Masehian (2015)* stellen verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten modularer Robotersysteme vor und beschreiben verschiedene Methoden zur Implementierung wie etwa Modularisierung (vgl. Ahmadzadeh und Masehian 2015).

Die zweite Unterkategorie *wandelbare Informationstechnologie (IT)* wird durch drei Veröffentlichungen repräsentiert. *Andresen et al. (2005)* entwickeln ein Modell zur Bewertung der Wandlungsnotwendigkeit von IT Systemen, welches deren Reaktionsfähigkeit auf externe Einflüsse erhöht (vgl. Andresen et al. 2005). *Fechter (2020)* beschreibt eine

Roboterprogrammierung für MRK Anwendungen zur Unterstützung der Wandlungsfähigkeit (vgl. Fechter 2020). Eine weitere IT Strategie wird von *Brusaferri et al. (2014)* vorgeschlagen, mit der RMS verifiziert werden können. Diese Strategie basiert auf cyber-physischen Systemen (vgl. Brusaferri et al. 2014).

Der Kategorie *Automatisierungspotenzial* werden sechs Veröffentlichungen zugeordnet, welche in der Tabelle 6 dargestellt sind.

Tabelle 6: Autoren aus der Kategorie Automatisierungspotenzial

Kategorie	Unterkategorie	Autor
Automatisierungspotenzial	Prozessweise	Ross (2002)
		Deuse et al. (2014)
	Produktweise	Eskilander (2001)
		Boothroyd (2005)
		Hesse (2012)
		Madappilly und Mork (2021)

Die Veröffentlichungen aus dieser Kategorie lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: *prozessweises* und *produktweises Automatisierungspotenzial*. Das *prozessweise Automatisierungspotenzial* betrifft die Eignung spezifischer Fügeprozesse für eine Automatisierung. *Ross (2002)* beschreibt eine quantitative Methode zur Bewertung des Automatisierungspotenzials von Montageprozessen (vgl. Ross 2002). Weitergehend analysieren *Deuse et al. (2014)* manuelle Bewegungsarten und weisen diesen Automatisierungsfaktoren zu, um das Automatisierungspotenzial zu beurteilen (vgl. Deuse et al. 2014).

Vier weitere Veröffentlichungen befassen sich mit dem *produktweisen Automatisierungspotenzial*. *Eskilander (2001)* formuliert Leitlinien zur automatisierungsgerechten Produktgestaltung sowie eine Bewertungsmethodik (vgl. Eskilander 2001). *Boothroyd (2005)* und *Hesse (2012)* behandeln ebenfalls Leitlinien für montage- und automatisierungsgerechte Produktgestaltung (vgl. Boothroyd 2005; Hesse 2012b). *Madappilly und Mork (2021)* verfeinern die beschriebenen Ansätze und berücksichtigen industriespezifische Anforderungen wie etwa Mass-Customization (vgl. Madappilly und Mork 2021).

Ein ergänzendes Analysekriterium der Literaturergebnisse bilden die Planungshorizonte der Produktionsprogrammplanung, welche die Veröffentlichungen aus allen Kategorien betrachtet. Durch die Differenzierung in *kurzfristige*, *mittelfristige* und *langfristige* Planungshorizonte ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Montage und die entsprechende Flexibilität in Montageanlagen. 13 der 34 analysierten Veröffentlichungen thematisieren diese Planungshorizonte in verschieden starken Ausprägungen. *Burggräf und Schuh (2021)* diskutieren über alle Planungshorizonte hinweg Planungsinhalte für automatisierte Betriebsmittel, die je nach Planungshorizont variieren (vgl. Burggräf und Schuh 2021). Des Weiteren beschreiben weitere Veröffentlichungen, wie in einem kurzen

Planungshorizont Änderungen in Fertigungssystemen erreicht werden können (vgl. Andresen et al. 2005; Azab et al. 2013; Erlach 2020; Foith-Förster und Bauernhansl 2015; Fries et al. 2020; Hüttemann et al. 2019; Kern 2021; Kern et al. 2015; Prasad und Jayswal 2019; Wiendahl et al. 2007). *Ross (2002)* beschreibt im kurzen Planungshorizont Anpassungen an Bauteilen, sodass die Montageart kurzzyklisch verbessert werden kann (vgl. Ross 2002). Darüber hinaus beschreibt *Eskilander (2001)* Effekte der automatisierungsgerechten Produktgestaltung über den kurzfristigen und langfristigen Planungshorizont hinweg (vgl. Eskilander 2001).

3.3 Herleitung des konzeptionellen Flexibilitätsmodells

Aus der Analyse der relevanten Veröffentlichungen aus der internationalen systematischen Literaturrecherche lassen sich wesentliche Kriterien ableiten, die zur Beschreibung der Flexibilität von Montageanlagen gemäß dem aktuellen Stand der Forschung erforderlich sind. Die bisherige Ausarbeitung dieser Arbeit zeigt, dass insbesondere der Planungsprozess in der Fabrikplanung mit den jeweiligen Planungshorizonten, die Aspekte der Flexibilität und entsprechende Umsetzungsmöglichkeiten zum Erreichen von Flexibilität entscheidende Kriterien darstellen. Aus den drei Kriterien, basierend auf den formulierten Anforderungen, kann somit ein konzeptionelles Flexibilitätsmodell theoretisch hergeleitet werden.

Der Planungsprozess aus der Fabrikplanung berücksichtigt Anforderungen an Flexibilität auf unterschiedlichen Ebenen der Fabrik und in verschiedenen Projektphasen. Vor allem in der Zielfestlegung – der ersten Planungsphase – nimmt die Flexibilität in der heutigen Zeit stetig an Wichtigkeit zu und ergänzt die klassischen Zielsetzungen wie Kosteneffizienz und Ausbringungsmenge (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 28; Erlach 2020, S. 12; Garrel et al. 2014). Die Flexibilitätsanforderung wird übergeordnet für die Ebenen der Fabrik formuliert. Somit gelten die Flexibilitätsforderungen aus der Zielsetzung auch für die Produktionsebene – also auch für die Montageanlagen. Abseits von der klassischen Montagegestaltung in der Automobilindustrie werden verschiedene Fertigungssysteme beschrieben, welche die Flexibilitätsanforderungen besser umsetzen können als die Fließmontage in der Automobilindustrie. Es werden in Ergänzung zu den RMS (vgl. Koren 2020; Koren et al. 1999) z. B. Fluid Manufacturing Systems (vgl. Fries et al. 2021) und auch Matrix Montagesysteme (vgl. Kern 2021; Kern et al. 2015) beschrieben. Diese werden durch wandlungsfähige Fertigungssysteme (vgl. Foith-Förster und Bauernhansl 2015) und die RAS (vgl. Wiendahl et al. 2007) ergänzt. Diese Fertigungssysteme zielen darauf ab, durch bereits vorgehaltene Flexibilität durch z. B. freie Materialflusssysteme anstatt starrer Montagelinien, Anpassungskosten zu reduzieren (vgl. Fries et al. 2020; Fries et al. 2021; Kern et al. 2015). Damit diese Flexibilität in Fertigungssystemen genutzt werden kann, sind kurze Planungshorizonte notwendig (vgl. Burggräf et al. 2021c, S. 47).

Auch wenn die beschriebene Literatur die Flexibilität auf übergeordneten Fabrikebenen beschreibt, können die Zielsetzungen der Flexibilität auch für Montageanlagen in der Automobilindustrie relevant sein.

In Bezug auf die Montageanlagen spielt insbesondere der mittelfristige – taktische – Planungshorizont eine zentrale Rolle, da hier die Dimensionierung der Montageanlagen erfolgt (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 130; Grundig 2021, S. 64; Wiendahl et al. 2024, S. 30), welche die spätere Flexibilität und die Flexibilitätsanforderungen mit betrachtet. Durch die Betrachtung der Flexibilität in der Dimensionierung kann diese im späteren Betrieb genutzt werden. Dennoch können auch die anderen Planungshorizonte – operativ und strategisch – relevant sein. Über die Anforderung der kurzen Planungshorizonte zum Nutzen der Flexibilität rückt der operative Planungshorizont in den Vordergrund. Auch der strategische Planungshorizont beeinflusst die Betriebsmittelplanung, indem dort die Grundsteine für die Planungsprojekte gelegt werden.

Neben der Einbindung der Flexibilität in den Planungsprozess ist es notwendig, die für Montageanlagen in der Automobilindustrie relevanten Flexibilitätsaspekte detailliert zu betrachten. Nach *Sethi und Sethi (1990)* stellt etwa die Maschinenflexibilität einen wesentlichen Aspekt dar. Ergänzend bieten die Modelle des RMS weiterführende Aspekte, die speziell auf Produktionsanlagen abzielen (vgl. Koren et al. 1999; Koren und Shpitalni 2010). Diese Aspekte werden von *Koren (1999, 2020)* wie folgt angegeben: *Modularität, Integrierbarkeit, Anpassbarkeit, Konvertierbarkeit, Diagnosefähigkeit* und *Skalierbarkeit* (vgl. Koren 2020; Koren et al. 1999). *Wiendahl et al. (2007)* erweitern die RMS für die Montage und erweitern die sechs Aspekte für ein RMS noch um die *Mobilität* (vgl. Wiendahl et al. 2007). Auch *Hüttemann et al. (2019)* beschreiben die *Mobilität* als relevanten Aspekt, um die Reaktionsfähigkeit von Montagesystemen zu steigern (vgl. Hüttemann et al. 2019). Des Weiteren identifiziert *Klein (2014)* für Produktionsanlagen noch die *Wiederverwendbarkeit* als Aspekt (vgl. Klein 2014).

Für die einzelnen Flexibilitätsaspekte werden zudem noch Umsetzungsmöglichkeiten abgeleitet, sodass diese gezielt in der Planung der Montageanlagen eingebracht werden können. Auf Basis der Wandlungsbefähiger nach *Wiendahl et al. (2024)* und den RMS nach *Koren und Shpitalni (2010)* können übergeordnete Umsetzungsmöglichkeiten für die Flexibilität angegeben werden. Darunter sind:

Transportsysteme: Um eine Integrierbarkeit zu gewährleisten, sollen die verschiedenen Montageanlagen durch Transportsysteme miteinander verbunden werden, sodass später weitere Betriebsmittel in das System integriert werden können (vgl. Koren und Shpitalni 2010). Die Transportsysteme sollen sowohl für den Transport von Produkten als auch von Betriebsmitteln geeignet sein, damit diese – entsprechend den aktuellen Anforderungen

– flexibel innerhalb der Montagesysteme angeordnet werden können (vgl. Hüttemann et al. 2019).

Universalität: Die Montageanlagen sollen universell einsetzbar sein, das heißt, diese sollen verschiedenen Anforderungen in Bezug auf Technologien und Montageprozesse gerecht werden (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107).

Rollen: Für eine Mobilität in Montageanlagen wird vorgeschlagen, diese bspw. auf Rollen zu stellen. Dadurch kann eine flexible Ortsveränderung innerhalb des Montagesystems realisiert werden (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107).

Vorhalte: Zur Erreichung einer Skalierbarkeit sollen weitere Montageanlagen in das Montagesystem eingebracht werden können. Dies soll über Vorhalte in Platz oder auch Technik ermöglicht werden (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107).

Standard Bausteine: Zur Förderung der Modularität und der Umsetzung sogenannter Plug & Produce Lösungen wird der Einsatz standardisierter Bausteine beschrieben (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107). Auch Klein (2014) und Ahmadzadeh und Masehian (2015) betonen die Bedeutung standardisierter Bausteine, um wiederverwendbare und auch hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeit optimierte Produktionsanlagen gestalten zu können. Auf Grundlage dieser Bausteine können Baukästen für die Gestaltung flexibler Produktionsanlagen entwickelt werden (vgl. Buck 2015).

Vernetzung: Um andere Aspekte zu realisieren, soll eine Vernetzung vorgehalten werden, sodass es bspw. einheitliche Schnittstellen gibt, sodass mehrere Montageanlagen miteinander verbunden werden können (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107).

Hard- und Software: Durch den Einsatz anpassungsfähiger Hard- und Software Komponenten sollen bspw. Produktwechsel in RMS ermöglicht werden (vgl. Koren und Shpitalni 2010). Andresen et al. (2005) heben die Rolle von IT-Systemen hervor, um Fabriken auf zukünftige Veränderungen vorzubereiten.

Die drei herausgearbeiteten Kriterien – der Planungsprozess inkl. Planungshorizonte, die detaillierten Flexibilitätsaspekte sowie spezifische Umsetzungsmöglichkeiten – entsprechen den formulierten Anforderungen aus Kapitel 2. Gemeinsam bilden die Kriterien ein konzeptionelles Flexibilitätsmodell für Montageanlagen, welches in der Abbildung 10 dargestellt ist. Dieses konzeptionelle Flexibilitätsmodell stellt somit die Antwort der *FFI* dar, welche nach einer theoretischen Betrachtung der Flexibilität im Planungsprozess von Montageanlagen gefragt hat.

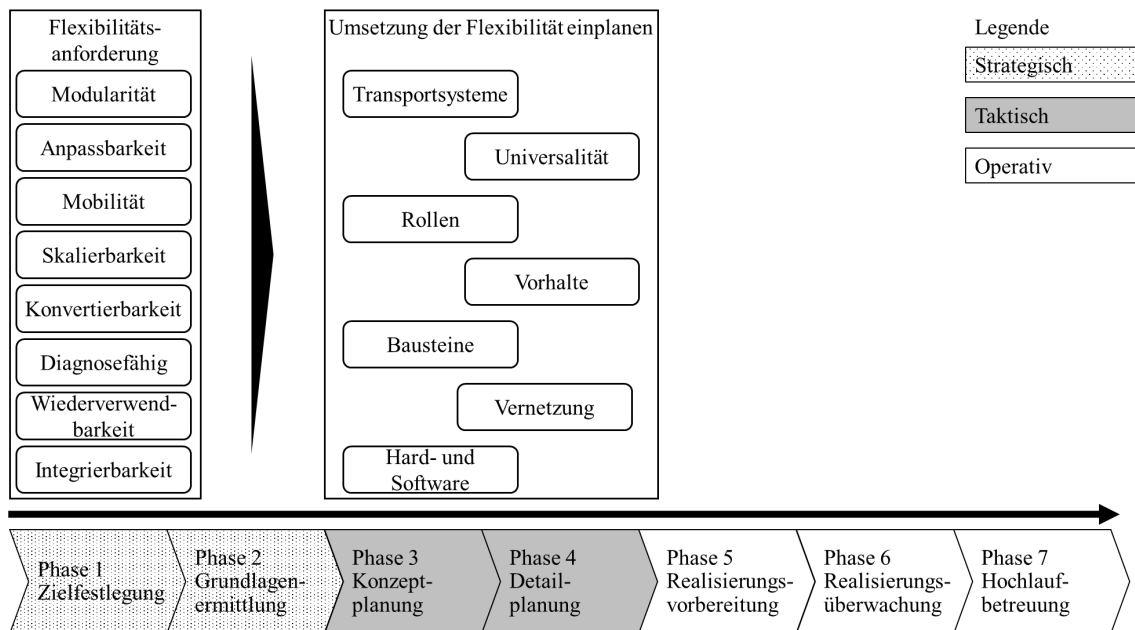


Abbildung 10: Konzeptionelles Flexibilitätsmodell für die Flexibilität von Montageanlagen

Dieses konzeptionelle Flexibilitätsmodell bildet die Basis für die weitere empirische Ausarbeitung dieser Arbeit.

Im weiteren Forschungsvorgehen für die Beantwortung der *FF2* und *FF3* fungiert das konzeptionelle Flexibilitätsmodell als Basis der empirischen Ausarbeitung. Über eine Multiple Case Study in der Automobilindustrie soll eine Praxissicht auf die Thematik erarbeitet werden. Die empirischen Daten sollen durch leitfadenbasierte *Experteninterviews* und *teilnehmende Beobachtungen* aufgenommen werden. Durch qualitative und quantitative Analyse von Interviewtranskripten und Datenaufnahmeprotokollen soll die Praxissicht aufgenommen werden. Die verschiedenen Datenanalysearten und die unterschiedlichen Fälle sollen zusätzlich im Rahmen einer Triangulation miteinander verglichen und diskutiert werden. So können die Erkenntnisse gestärkt und im ersten Schritt bereits validiert werden.

4 Erstellung des empirischen Forschungskonzepts

Das nachfolgende Kapitel erarbeitet das Forschungskonzept dieser Arbeit. Der Abschnitt 4.1 leitet eine Multiple Case Study in der Automobilindustrie her, sodass empirische Daten aus der Industrie in Bezug auf das konzeptionelle Flexibilitätsmodell aufgenommen werden können. Darauf fasst der Abschnitt 4.2 das empirische Forschungskonzept dieser Arbeit noch einmal zusammen.

4.1 Aufstellung des empirischen Forschungskonzepts

Bei *explorativer*, qualitativ orientierter Forschung stehen insbesondere Feldforschung oder Fallstudien im Zentrum. Methoden sind das Interview oder die teilnehmende Beobachtung (vgl. Mayring 2010, S. 231f.). Case Studies – also Fallstudien – sind nach Yin (2018) besonders geeignet für die hier mit „wie“ formulierten Forschungsfragen (vgl. Yin 2018, S. 13):

1. *Wie wird Flexibilität im Planungsprozess in Montageanlagen theoretisch konzipiert und umgesetzt?*
2. *Wie operationalisiert die industrielle Praxis Flexibilität in der Planung von Montageanlagen und welche Abweichungen bestehen zu theoretischen Modellen?*
3. *Wie lässt sich ein integriertes Modell zur Planung flexibler Montageanlagen in der Automobilindustrie entwickeln?*

In dieser Arbeit wird eine *explorative*, qualitative Case Study mit Experteninterviews und teilnehmenden Beobachtungen durchgeführt. Die Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 beschreiben die Herleitung und Auswertung der Experteninterviews, während das Kapitel 4.1.3 die Case Study aus der Automobilindustrie darstellt.

4.1.1 Herleitung der Experteninterviews

Das Experteninterview als Methode zielt darauf ab, das spezialisierte Wissen der Interviewten zu nutzen. Dabei stellt sich zunächst die Frage, wer als Experte gilt. Die Auswahl an geeigneten Personen sollte stets auf Basis der Forschungsfragen erfolgen. Weitere Interviewformen wie das Paarinterview, das Gruppeninterview oder das personenzentrierte Interview entstammen ebenfalls der qualitativen Forschung, sind jedoch im Kontext dieser Arbeit nicht zielführend, da explizit Spezialistenwissen erforderlich ist, um die Forschungsfragen dieser Arbeit beantworten zu können. Dafür sind die Experteninterviews besonders geeignet, um praxisbezogenes, technisches Wissen aufzunehmen (vgl. Helfferich 2022; Mey und Mruck 2020, S. 322).

Neben der Interviewform unterscheidet sich auch die Art und Weise, wie die Interviews geführt werden. Von wenig strukturierten über halbstrukturierte bis zu vollständig strukturierten Interviews mit Leitfäden finden sich verschiedene Ansätze in der Forschung (vgl. Mey und Mruck 2007, S. 249). Insbesondere in der qualitativen Forschung werden häufig

halbstrukturierte oder strukturierte, leitfadengestützte Interviews durchgeführt. Zusätzlich ist der Einsatz von Leitfäden auch eine bevorzugte Methode für Experteninterviews, um durch die stärkere Struktur Sachfragen prägnant beantwortet zu bekommen (vgl. Mey und Mruck 2007, S. 257; Helfferich 2022, S. 888).

Bei Leitfadeninterviews wird in der Regel ein einheitlicher Interviewleitfaden erstellt, welcher in allen Interviews verwendet wird. Bei der Leitfadenerstellung stehen unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten zur Verfügung, etwa hinsichtlich der Frageform oder des Strukturgrads. Fragen können von klassischen *Frage-Antwort-Schemata* bis zu *Erzählaufforderung-Erzählung-Schemata* reichen. Während Ersteres einer klaren Reihenfolge folgt, ermöglichen Letztere eher narrative Antworten. Der Strukturgrad betrifft sowohl die Formulierung als auch die Abfolge der Fragen und sollte, je nach Forschungsdesign, so offen wie möglich und so strukturiert wie nötig gestaltet sein (vgl. Helfferich 2022, S. 881f.).

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Mix aus den beiden Fragearten genutzt, sodass einerseits klare quantifizierbare Antworten und andererseits Detailwissen durch Erzählungen als Ergebnis der Fragen erreicht werden können. Die Fragen orientieren sich am konzeptionellen Flexibilitätsmodell sowie an den Forschungsfragen. Die Erstellung des Leitfadens folgt dem in Tabelle 7 dargestellten Schema. Jede Interviewfrage leitet sich aus dem Forschungskontext ab und verfolgen ein klares Ziel für die Beantwortung der FF.

Der finale Leitfaden umfasst elf offene Fragen, welche in einer vorgegebenen Reihenfolge gestellt werden. Der Leitfaden orientiert sich an dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell. Dieser startet mit Fragen zum Planungsprozess inkl. der Planungshorizonte, gefolgt von Fragen zu den Flexibilitätsaspekten und passenden Umsetzungsmöglichkeiten für Montageanlagen.

Ziel ist es, die Inhalte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell z. B. auf Vollständigkeit und auf mögliche Abweichungen in einer Praxissicht zu prüfen. In Bezug auf den Planungsprozess repräsentieren die Planungshorizonte dieses Themengebiet im Interviewleitfaden. Dabei wird nicht der grundsätzliche Planungsprozess hinterfragt, sondern speziell die Planungshorizonte im Hinblick auf Montageanlagen betrachtet. Die Anzahl der Planungshorizonte wird ebenso thematisiert wie deren Definition und Priorisierung, um eine Abschätzung der praktischen Relevanz im Vergleich zur Theorie herstellen zu können.

Gleiches wird auch für die Flexibilitätsaspekte durchgeführt. Auch hier werden die Vollständigkeit und eine Einschätzung der Interviewten zu den Flexibilitätsaspekten erfragt. Ergänzend werden Fragen zu den Umsetzungsmöglichkeiten gestellt, die sich jeweils auf einzelne Flexibilitätsaspekte beziehen.

Der finale Interviewleitfaden ist im Abschnitt D1 im Anhang dargestellt.

Aufstellung des empirischen Forschungskonzepts

Tabelle 7: Schema zur Erstellung des Interviewleitfadens

Kategorie	#	Interviewfragen	Quelle innerhalb des Forschungskontextes	Begründung für die Verwendung

Zur Vorbereitung der Experteninterviews wurde ein Probeinterview durchgeführt, um erste methodische Anpassungen vorzunehmen und Unreinheiten zu beseitigen (vgl. Mey und Mruck 2007, S. 269f.; Weichbold 2014, S. 302f.).

Zur Dokumentation und zur Sicherstellung der *Reliabilität* des Forschungsprozesses wird jedes Interview in einer Tabelle erfasst (Tabelle 8). Dabei werden Informationen wie die entsprechende Case, der Aufgabenbereich der Interviewten, die Interviewsprache sowie das Befragungs- und Transkriptionsdatum dokumentiert. Ebenso werden methodische Anpassungen nach jedem Interview vermerkt.

Tabelle 8: Interviewtracking

#	Typ	Interview-code	Aufgabenbereich	Sprache	Dauer [h]	Befragungs-datum	Transkriptions-datum	Methodik-änderung
---	-----	----------------	-----------------	---------	-----------	------------------	----------------------	-------------------

Auch die Auswertung der Interviewinhalte wird systematisch dokumentiert. Einerseits werden zentrale Aussagen stichwortartig auf einem Datenaufnahmeprotokoll festgehalten. Dies ist in der Abbildung 11 blanko dargestellt.

DATA-COLLECTION-PROTOCOL

Datum: _____
Interviewnummer: _____

Case: _____

1

Gibt es weitere Zeithorizonte, die von Relevanz sein können?

2

Sind weniger Zeithorizonte evtl. schon ausreichend?

3

Wie definieren sie einen **operativen** Zeithorizont in der automobilen Montage?

4

Wie definieren sie einen **taktischen** Zeithorizont in der automobilen Montage?

5

Wie definieren sie einen **strategischen** Zeithorizont in der automobilen Montage?

6

Welcher Zeithorizont hat für automatische Montageanlagen die größte Wichtigkeit?

7

Gibt es weitere Flexibilitätsaspekte, die von Relevanz sein können?

8

Sind weniger Flexibilitätsaspekte eventuell schon ausreichend?

9

Welche der Flexibilitätsaspekte haben für automatische Montageanlagen die größte Wichtigkeit?

10

Wie können die Flexibilitätsaspekte gestalterisch erreicht werden?

11

Was sind Ausprägungen der Flexibilitätsaspekte von automatischen Montageanlagen?

Bennet Schulz | Planung Lackiererei und Montage

UNTERNEHMENSLOGISTIK Nutzfahrzeuge

Abbildung 11: Datenaufnahmeprotokoll für die Interviews

Andererseits werden die Interviews per Audioaufnahme aufgezeichnet und anschließend transkribiert. Da es sich um unternehmensinterne Datenaufnahmen handelt, bedarf es bei der Befragung der Experten einer Genehmigung der Datenschutzbeauftragten sowie dem Betriebsrat. Nach der Genehmigung des Interviewleitfadens muss für die Audioaufnahme

die Zustimmung der Experten eingeholt werden. Dieses Formular ist im Anhang in Abschnitt D2 – in der deutschen Sprache – dargestellt. Des Weiteren wird im Abschnitt D3 des Anhangs ein beispielhaftes Einladungsschreiben für die Experteninterviews abgebildet.

Nach den Interviews werden die Transkripte gemeinsam mit den Notizen aus dem Datenaufnahmeprotokoll verwendet, um eine strukturierte Auswertung zu ermöglichen und die *Reliabilität* des Vorgehens abzusichern.

4.1.2 Auswertung der Experteninterviews

Für die Auswertung von Texten aus der qualitativen Forschung gibt es zahlreiche Methoden. Es werden z. B. die *Grounded Theory*, die *Biographieforschung*, die *Konversationsanalyse* oder die *qualitative Inhaltsanalyse* unterschieden (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 691; Reichertz 2014, S. 69; Yin 2018, S. 168f.). In dieser Arbeit kommt die Methode der *qualitativen Inhaltsanalyse* zur Anwendung (vgl. Mayring und Fenzl 2022). Diese Analyseform eignet sich besonders zur strukturierten Auswertung umfangreicher Texte. Der zentrale Vorteil gegenüber anderen Methoden liegt in der Regelgeleitetheit, wodurch die Nachvollziehbarkeit und intersubjektive Überprüfbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden können. Ein Kategoriensystem bildet das zentrale Unterscheidungskriterium zu anderen inhaltsanalytischen Methoden (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 691f.; Kuckartz und Rädiker 2014, S. 394f., 2022, S. 38f.). Die Vorgehensweise der qualitativen Inhaltsanalyse in Anlehnung an *Mayring und Fenzl (2022)* ist in der Abbildung 12 dargestellt.

Aufstellung des empirischen Forschungskonzepts



Abbildung 12: Vorgehen der qualitativen Inhaltsanalyse i. A. a. (Mayring und Fenzl 2022, S. 699)

Im Schritt 1 der qualitativen Inhaltsanalyse erfolgt die Festlegung der Analyseeinheiten. Diese beinhalten die *Kodiereinheit*, die *Kontexteinheit* und die *Auswertungseinheit* und sollten bereits vor der eigentlichen Analyse definiert werden, um die Einhaltung der Gütekriterien sicherzustellen. Die *Kodiereinheit* bezeichnet den kleinsten Textbestandteil, der noch einer Kategorie zugeordnet werden kann. Die *Kontexteinheit* legt fest, welches Material für die Kategorisierung genutzt wird und die *Auswertungseinheit* beschreibt die Gesamtheit der Textportionen, die mit dem Kategoriensystem analysiert werden (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 694f.).

Die Schritte 2-4 werden unterschieden in deduktive Kategorienanwendung und induktive Kategorienbildung:

Deduktiver Ansatz: Im Schritt 2a werden die deduktiven, theoriebasierte Kategorien formuliert, welche auf das Material angewendet werden. Schritt 3a beinhaltet die Entwicklung eines Kodierleitfadens, welcher zu jeder Kategorie Definitionen sowie Abgrenzungskriterien beschreibt. Zur Veranschaulichung werden sogenannte Ankerbeispiele genutzt, welche typische Statements je Kategorie darstellen. Mit dem Kodierleitfaden wird unter Schritt 4a die Anwendung der deduktiven Kategorien auf das Datenmaterial durchgeführt (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 696).

Der Kodierleitfaden für diese Arbeit ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Kodierleitfaden für die qualitative Inhaltsanalyse i. A. a. (Mayring 2022, S. 696)

Hauptkategorie				
Kategorien	Name	Definition	Ankerbeispiele	Anzahl
-	-	-	-	-

Induktiver Ansatz: Ergänzend wird ein induktives Vorgehen gewählt, bei dem im Schritt 2b die Kategorien direkt aus dem Material entwickelt werden. In Schritt 3b wird das Abstraktionsniveau festgelegt, welches definiert, auf welcher konzeptuellen Ebene die Kategorien gebildet werden. Im Schritt 4b erfolgt anschließend die Anwendung der induktiven Kategorien (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 695).

In dieser Arbeit wird der deduktive und induktive Ansatz der Kodierung der Transkripte kombiniert. Auf Basis des konzeptionellen Flexibilitätsmodells und des daraus erarbeiteten Interviewleitfadens, können deduktive Kategorien erstellt werden. Darüber hinaus wird der induktive Ansatz mit in das Forschungsvorgehen aufgenommen, sodass Erkenntnisse, die über die deduktiven Kategorien hinausgehen oder die deduktiven Kategorien detaillieren, in neue – induktive – Kategorien überführt werden.

Nach dem initialen Kategorisieren des Materials wird im Schritt 5 das Kategoriensystem überarbeitet und die bisherige Kategorisierung überprüft (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 702). Daraufhin folgt ein finaler Durchgang durch das gesamte Material.

In Schritt 7 wird die Coderübereinstimmung überprüft. Zur Sicherstellung der Intracoderübereinstimmung kodiert die ursprünglich auswertende Person das Material erneut, ohne Einsicht in die ursprüngliche Kategorisierung zu haben. Durch dieses Vorgehen kann die *Reliabilität* gemessen werden. Zusätzlich wird zur Prüfung der InterCoderübereinstimmung das Material von einer weiteren Person unabhängig kodiert. Eine Übereinstimmung ist ein Maß für die Objektivität der Vorgehensweise. Hierbei ist es auch ausreichend einige Bereiche erneut prüfen zu lassen, da die interpretativen Bestandteile vor allem in der Kategorienbildung einen gewissen Spielraum bedingen (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 695).

Schritt 8 umfasst die qualitative und ergänzend auch die quantitative Auswertung der Kategorien aus dem Kategoriensystem. Neben inhaltlichen Analysen kann bspw. auch die Häufigkeit der Nennung einzelner Kategorien erfasst und analysiert werden (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 703). Diese Kombination qualitativer und quantitativer Methoden sowie induktiver und deduktiver Ansätze wird als Mixed-Methods Ansatz beschrieben und gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie eine differenziertere Bearbeitung komplexer Fragestellungen ermöglicht (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 700f.; Yin 2018, S. 63f.). Das finale Kategoriensystem bildet daraufhin die Grundlage der späteren Analyse. Interviewstatements werden Kategorien – wie beschrieben – regelgeleitet zugeordnet, was zur Sicherung der *Reliabilität* der Forschung beiträgt (vgl. Mayring 2022, S. 693).

Das Kategoriensystem dieser Arbeit umfasst sowohl deduktiv als auch induktiv entwickelte Kategorien. Darüber hinaus können innerhalb des Kategoriensystems hierarchische Strukturen bestehen, etwa Haupt- und Unterkategorien in Ergänzung zu den Kategorien (vgl. Mayring und Fenzl 2022, S. 544f.). Eine schematische Darstellung der Textdaten und des Kategoriensystems ist in der Abbildung 13 veranschaulicht. Es wird dargestellt, wie die aufgenommenen Daten während der Analyse Kategorien zugeordnet werden könnten.

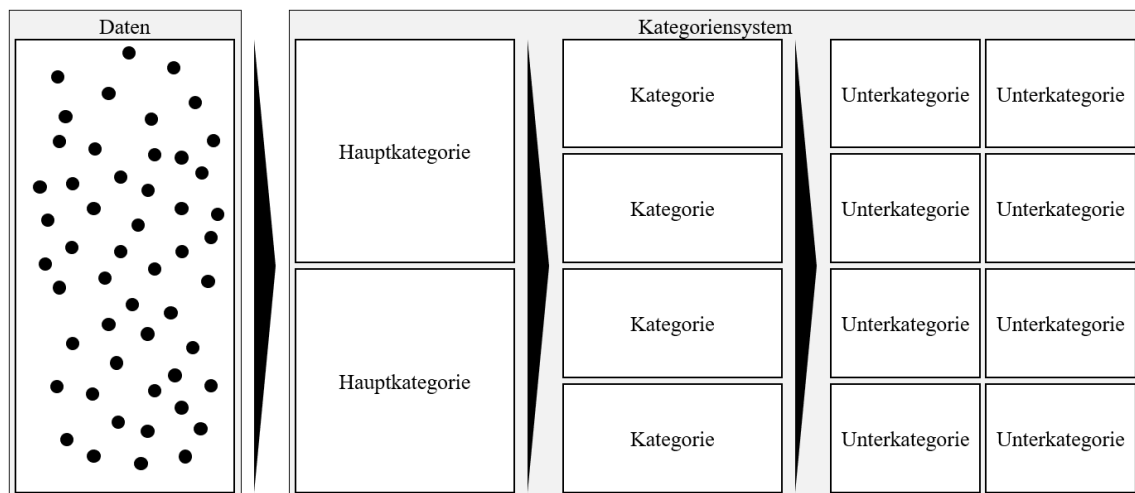


Abbildung 13: Darstellung Kategoriensystem i. A. a. (Mayring und Fenzl 2022, S. 544f.)

Da der Leitfaden der Experteninterviews theoriegeleitet entwickelt wurde, lassen sich bereits vor Beginn der Interviews deduktive Kategorien zur Analyse definieren. Diese Kategorienbildung erfolgt unabhängig vom erhobenen Material, etwa auf Grundlage bestehender Theorie oder des Interviewleitfadens selbst (vgl. Kuckartz und Rädiker 2022, S. 71f.).

Aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell lassen sich bereits deduktive Kategorien für die qualitative Inhaltsanalyse definieren. Als Hauptkategorien bieten sich die Themengebiete *Planungsprozess inkl. Planungshorizonte* (*dHk1*), *Flexibilitätsaspekte* (*dHk2*) und *Umsetzungskonzepte der Flexibilität* (*dHk3*) an, da sie die zentralen Dimensionen des konzeptionellen Flexibilitätsmodells repräsentieren. Diese werden im Folgenden näher definiert:

Planungsprozess inkl. Planungshorizonte: Die Hauptkategorie *dHk1* bündelt Statements, die sich mit der zeitlichen Dimension von Flexibilität in der automatisierten Montage befassen. Dazu zählen sowohl Statements zur Vollständigkeit der im Flexibilitätsmodell dargestellten *Planungshorizonte* als auch deren Definitionen und Einordnung aus unterschiedlichen Sichtweisen.

Flexibilitätsaspekte: Diese Hauptkategorie *dHk2* umfasst alle Statements, welche sich auf die Ausgestaltung und Umsetzung der Flexibilität in Montageanlagen beziehen. Es

wird erwartet, dass insbesondere die Fragen sieben bis neun des Interviewleitfadens relevante Statements für diese Hauptkategorie liefern. Inhaltlich reichen die zugehörigen Statements von allgemeinen Beschreibungen bis hin zu einer Priorisierung der einzelnen Flexibilitätsaspekte.

Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität: In dieser Kategorie werden Statements erfasst, die mögliche Art und Weisen zur Realisierung von Flexibilität in Montageanlagen beschreiben. Die Fragen zehn und elf des Interviewleitfadens könnten hierzu Informationen liefern.

Innerhalb der Hauptkategorien lassen sich weitere deduktive Kategorien identifizieren. Für die Hauptkategorie *Planungsprozess inkl. Planungshorizonte* ergeben sich aus dem Interviewleitfaden mehrere spezifische Kategorien:

Priorität Planungshorizonte dK1: Diese Kategorie umfasst Statements zur Priorität der verschiedenen Planungshorizonte für flexible Montageanlagen. Vor allem die dritte Frage aus dem Interviewleitfaden kann Statements zu dieser Kategorie erzeugen.

Anzahl Planungshorizonte dK2: Ziel ist es, die Angemessenheit und Vollständigkeit der im konzeptionellen Flexibilitätsmodell enthaltenen Planungshorizonte zu prüfen. Relevante Statements können vor allem die Fragen eins und zwei aus dem Interviewleitfaden erzeugen.

Definition der Planungshorizonte – operativ dK3, taktisch dK4, strategisch dK5: Diese drei Kategorien zielen auf eine präzise Definition und zeitliche Einordnung der einzelnen Planungshorizonte ab. Entsprechende Statements können durch die Fragen drei bis fünf aus dem Interviewleitfaden erzeugt werden.

Es ergeben sich somit die folgenden fünf Kategorien für die *dHk1* (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Kategorien der deduktiven Hauptkategorie Planungsprozess inkl. Planungshorizonte

Hauptkategorie	Kategorie
Planungsprozess inkl. Planungshorizonte (dHk1)	Priorität Planungshorizonte (dK1)
	Anzahl Planungshorizonte (dK2)
	Definition Operativ (dK3)
	Definition Taktisch (dK4)
	Definition Strategisch (dK5)

Auch für die *dHk2* ergeben sich aus dem Interviewleitfaden zwei Kategorien. Die Fragen zu den Flexibilitätsaspekten betreffen die *Priorität* und *Anzahl der Flexibilitätsaspekte*. Des Weiteren wird erfragt, wie die *Flexibilität umgesetzt* werden kann.

Priorität Flexibilitätsaspekte dK6: Diese Kategorie sammelt Statements, die sich mit der Relevanz und Gewichtung einzelner Flexibilitätsaspekte für flexible Montagesysteme mit

Montageanlagen befassen. Besonders die Frage neun liefert hierzu potenzielle Informationen.

Anzahl Flexibilitätsaspekte dK7: Ziel dieser Kategorie ist es, Statements zur Vollständigkeit und eventuellen Ergänzungsbedarfen der im konzeptionellen Flexibilitätsmodell dargestellten Flexibilitätsaspekte zu erfassen. Relevante Informationen können sich insbesondere aus den Fragen sieben und acht des Interviewleitfadens ergeben.

Es ergibt sich somit das folgende Bild für die Kategorien der *dHk2* (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Kategorien der deduktiven Hauptkategorie Flexibilitätsaspekte

Hauptkategorie	Kategorie
Flexibilitätsaspekte (dHk2)	Priorität Flexibilitätsaspekte (dK6)
	Anzahl Flexibilitätsaspekte (dK7)

Für die *dHk3 Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität* werden durch die theoretische Betrachtung keine weiteren deduktiven Kategorien erstellt.

Insgesamt resultieren aus den drei Hauptkategorien somit sieben deduktive Kategorien, welche das initiale, deduktive Kategoriensystem für die spätere Textanalyse darstellen. Dieses Kategoriensystem wird im Verlauf der Textanalyse auf Basis der erhobenen Daten weiterentwickelt und ergänzt. Generell gilt, dass durch den Mixed-Methods Ansatz – also die Kombination von deduktiven und induktiven Kategorien – die inhaltliche Tiefe der Ergebnisse erhöht werden kann (vgl. Kuckartz und Rädiker 2022, S. 70ff.).

4.1.3 Herleitung der Multiple Case Study in der Automobilindustrie

Mittels Case Studies können die Experteninterviews durchgeführt und die Forschungsfragen beantwortet werden. Diese Forschungsmethode eignet sich besonders für Fragestellungen, die auf das „*Wie*“ oder „*Warum*“ abzielen. Außerdem fokussiert sich diese Methode auf aktuelle Ereignisse und erfordert keine Kontrolle über das Untersuchungsobjekt. Damit unterscheidet sich die Case Study von experimentellen Designs oder klassischen Umfragen (vgl. Yin 2018, S. 9ff.). Ein weiterer Vorteil der Case Studies liegt in der Möglichkeit, das Untersuchungsobjekt in einem möglichst natürlichen Kontext zu analysieren, wodurch diese sich zugleich von Laboruntersuchungen abgrenzen (vgl. Mayring 2023, S. 50).

Die Case Study umfasst Experteninterviews und soll durch *teilnehmende Beobachtungen* ergänzt werden. Letztere stellt einen zentralen Bestandteil qualitativer Forschung dar und gilt in Kombination mit Interviews als bewährte Methodik *explorativer* Forschung (vgl. Mayring 2020, S. 12). Im Gegensatz zur passiven Beobachtung nimmt der Forschende bei der teilnehmenden Beobachtung eine aktive Rolle ein (vgl. Yin 2018, S. 123f.). Für die systematische Erfassung der *Beobachtungen* sollte ein Leitfaden entwickelt und die

Ergebnisse präzise protokolliert werden (vgl. Schreier 2020, S. 24). In dieser Arbeit erfüllt ein Datenaufnahmeprotokoll diese Doppelfunktion als Leitfaden und Dokumentationsinstrument. Das Datenaufnahmeprotokoll orientiert sich am konzeptionellen Flexibilitätsmodell sowie an den Flexibilitätsaspekten und Planungshorizonten der Flexibilität. Dieses Datenaufnahmeprotokoll ist in der Abbildung 14 dargestellt.

DATA-COLLECTION-PROTOCOL		
		Datum: _____ Interviewnummer: _____
		Case: _____
Aspekt	Ausprägung	Zeithorizont [operativ, taktisch, strategisch]
Mobilität		
Wiederverwendbar		
Skalierbar		
Diagnosefähig		
Modular		
Konvertierbar		
Anpassbar		
Integrierbar		

LFD 
UNTERNEHMENSBLOGISTIK Nutzfahrzeuge

Bennet Schulz | NP-PM - Planung Lackiererei und Montage

Abbildung 14: Leitfaden und Datenaufnahmeprotokoll der teilnehmenden Beobachtung
Die Kombination mehrerer Datenquellen, Interviews und Beobachtungen, erlaubt die Triangulation der Ergebnisse. Liegen dabei Übereinstimmungen zwischen den Datenquellen vor, gilt die Aussagekraft der Ergebnisse als gestärkt (vgl. Yin 2018, S. 126f.).

Die *Interviews* und *teilnehmenden Beobachtungen* sind integrale Bestandteile des Case Study Designs. Im nächsten Schritt ist festzulegen, welche Form einer Case Study für das Forschungsprojekt geeignet ist. Das Case Study Design umfasst die Fragestellung, die „propositions“, also eventuelle initiale Konzepte welche vorliegen können. Darauf folgend sollten die Logik um die aufgenommenen Daten mit den propositions zu koppeln sowie die Kriterien zur Interpretation der Ergebnisse definiert werden (vgl. Yin 2018, S. 27ff.). Für dieses Forschungsprojekt liegen die Fragestellungen in Form der Forschungsfragen und die propositions in Form des konzeptionellen Flexibilitätsmodells bereits vor.

Im nächsten Schritt wird der eigentliche Case (dt. der Fall) definiert. Dieser Fall kann Personen, Events oder Organisationen umfassen (vgl. Yin 2018, S. 28f.). Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Planung von Montageanlagen in der Automobilindustrie. Dementsprechend sollte der Fall oder die Fallstudie in der Automobilindustrie verortet sein.

Grundsätzlich werden Case Studies mit einem oder auch mehreren Fällen unterschieden. Es werden Single und Multiple Case Studies mit einer (holistic) oder mehreren Analyse-einheiten (auch Embedded Units of Analysis – EUA) unterschieden. So ergeben sich vier grundsätzliche Arten der Case Study Forschung (vgl. Yin 2018, S. 47f.). Ein Hauptunterschied von Multiple Case Studies zu Single Case Studies ist, dass die Ergebnisse der Multiple Case Study häufig als überzeugender und robuster gelten, da Ergebnisse aus mehreren Quellen miteinander verglichen werden. Gleichzeitig sind Multiple Case Studies zeit- und ressourcenaufwändiger für Forschende. Die verschiedenen Arten der Case Study Gestaltung sind in der Abbildung 15 dargestellt.

Bei der Durchführung von Multiple Case Studies ist die Replikationslogik entscheidend. Die einzelnen Fälle sollten entweder ähnliche Ergebnisse erwarten lassen (*literal replication*) oder sich durch begründete Unterschiede auszeichnen (*theoretical replication*). Wenn die aggregierte Analyse der einzelnen Fälle die angedachte Wirkung erzeugt, sind die Ergebnisse besonders überzeugend und unterstreichen somit die initialen propositions (vgl. Yin 2018, S. 55ff.).

Im Zusammenhang der Automobilindustrie können etwa verschiedene Automobilsegmente jeweils einen Fall bilden. Bei einer solchen Multiple Case Study wäre eine *theoretical replication* zu erwarten, da die jeweiligen Segmente der Automobilindustrie voneinander abweichen. Diese Erwartung der unterschiedlichen Ergebnisse über die Segmente der Automobilindustrie hinweg ist der Grund, weswegen eine Multiple Case Study für den Anwendungsfall dieser Arbeit gewählt wurde.

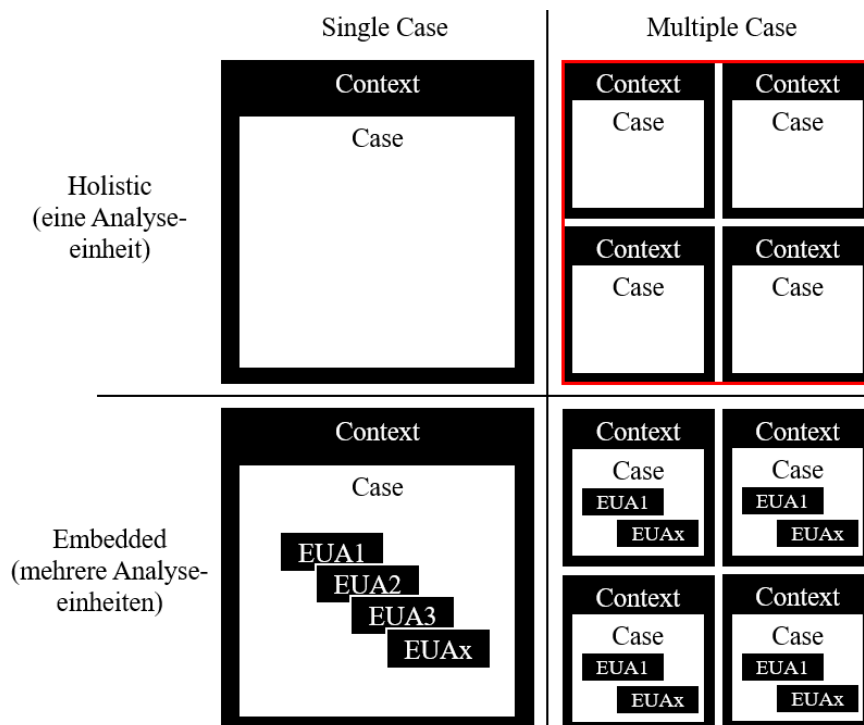


Abbildung 15: Verschiedene Typen von Case Study Forschung i. A. a. (Yin 2018, S. 48)

Zusätzlich ist zu bestimmen, ob ein holistisches (eine Analyseeinheit) oder ein eingebettetes (embedded), mit vielen EUAs, Case Study Design angewendet wird. Bei der holistischen Gestaltung werden die Ergebnisse der Datenaufnahme für eine Fallstudie als eine EUA betrachtet. Bei der eingebetteten Gestaltung erfolgt die Analyse zusätzlich mit weiteren EUAs je Fallstudie, welche nicht auf die Fallstudie aggregiert werden (vgl. Yin 2018, S. 60f.). Für diese Arbeit ist das holistische Design anzuwenden, da je OEM (Fallstudie) die Montage der Fokus ist und keine weiteren EUAs eingebracht werden. So ergibt sich eine holistische Multiple Case Study für diese Arbeit. In einem nächsten Schritt müssen die einzelnen Fälle ermittelt und auch unterschieden werden.

Wie bereits erwähnt, sollen die Fälle in dieser Arbeit verschiedene OEMs der Automobilindustrie repräsentieren. Ziel ist es, ein möglichst breites Spektrum der Fahrzeugsegmente aus der Automobilindustrie abzudecken, um eine möglichst umfassende Analyse zu ermöglichen.

Für die Multiple Case Study sollten die Fälle so gewählt werden, dass OEMs für jedes Segment der Automobilindustrie vertreten sind. Im Zuge des *purposive Sampling* sollen die Fälle so ausgewählt werden, dass eine möglichst hohe Verallgemeinerung der späteren Ergebnisse für den entsprechenden Betrachtungsraum, erreicht werden kann (vgl. Mey und Ruppel 2018, S. 210; Nyimbili und Nyimbili 2024, S. 90f.; Yin 2018, S. 40f.). Für diese Arbeit wurden fünf Fälle definiert, welche die Automobilindustrie abdecken sollen. Diese sind die Fälle „Volumen“, „Sport“, „Luxus“, „Premium“ und „leichte Nutzfahrzeug“ (LNFZ). Für eine erste Charakterisierung der Fälle werden die Fahrzeugsegmente welche die einzelnen OEMs produzieren angegeben (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Zuordnung der Fälle zu den Fahrzeugsegmenten

Fall	Fahrzeugsegmente
Volumen	A-, B-, C-, J-Segment
Sport	S-, J-Segment
Luxus	F-, J-Segment
Premium	D-, E-, F-, J-Segment
LNFZ	M-Segment

Durch diese Auswahl an OEMs deckt die Multiple Case Study alle Segmente der Automobilindustrie ab.

Für die teilnehmende Beobachtung wird je Fall eine europäische Fabrik der OEMs besucht, sodass eine Vergleichbarkeit durch ähnliche regulatorische und technische Rahmenbedingungen besteht. Auch die Interviews werden vor Ort bei den OEMs durchgeführt, um eine passende Interviewsituation schaffen zu können.

Zusammenfassung: Empirisches Forschungskonzept zur Beantwortung der Forschungsfragen

Die Interviewten der Experteninterviews werden über die Thematik der Multiple Case Study ermittelt. Da es sich um die Planung von Montageanlagen handelt, kommen Experten aus den Bereichen der Planung Automatisierung und Montage in Frage. Je Fall sollen je zwei Personen aus der Planung Automatisierung und der Planung Montage befragt werden.

4.2 Zusammenfassung: Empirisches Forschungskonzept zur Beantwortung der Forschungsfragen

Zusammengefasst konnte dieses Kapitel das weitere Forschungskonzept erarbeiten. Auf Basis des konzeptionellen Flexibilitätsmodells – als Antwort der *FF1* – erfolgt die weitere methodische Ausgestaltung dieser Arbeit.

Für die Beantwortung der *FF2* soll eine Multiple Case Study in der Automobilindustrie durchgeführt werden, um eine Praxissicht auf das konzeptionelle Flexibilitätsmodell aufzunehmen. Im Zuge von leitfadenbasierten Experteninterviews und teilnehmenden Beobachtungen werden empirische Daten aufgenommen. Diese Daten sollen daraufhin mittels Triangulation und durch einen Mixed-Methods Ansatz analysiert werden, sodass durch die qualitative und quantitative Analyse die Praxissicht erarbeitet werden soll.

Nachdem dann die Praxissicht auf das konzeptionelle Flexibilitätsmodell aufgenommen wurde, soll ein finales Flexibilitätsmodell erarbeitet werden, sodass die *FF3* beantwortet werden kann. Dieses Modell soll ein integriertes Flexibilitätsmodell darstellen, das aus der Diskussion des konzeptionellen Flexibilitätsmodells mit der Praxissicht erarbeitet wird und die gestellten Anforderungen aus Kapitel 2 erfüllt.

Dieses finale Flexibilitätsmodell wird dann in Zuge der Validierung verifiziert und validiert. In Ergänzung der Triangulation in der Datenanalyse soll das finale Flexibilitätsmodell durch eine prototypische Umsetzung in einer Montageanlage und Workshops mit weiteren Experten validiert werden.

Die Inhalte des Forschungskonzepts sind zusammenfassend in der Abbildung 16 dargestellt.

Erstellung des empirischen Forschungskonzepts

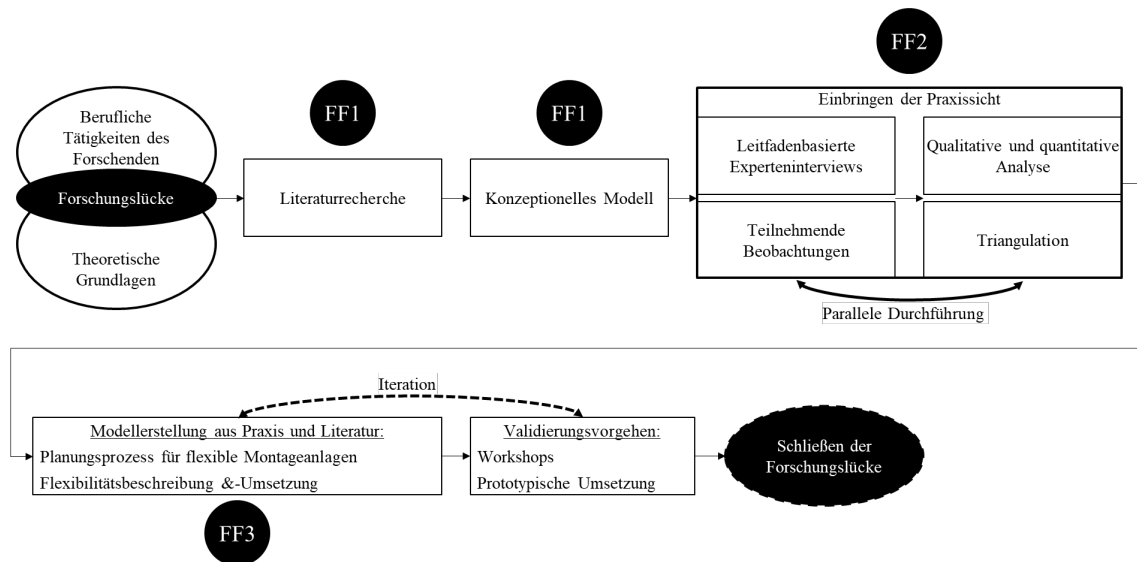


Abbildung 16: Forschungskonzept zur Beantwortung der FF

5 Forschungsergebnisse aus der Multiple Case Study

Die Ergebnisse der Multiple Case Study werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben, um am Ende ein praxisorientiertes Flexibilitätsmodell zu erarbeiten. Nach der Erarbeitung des finalen Kategoriensystems wird die Multiple Case Study analysiert. Beginnend mit Single Case Analysen, in denen jeder Fall für sich analysiert wird. Darauf folgt eine Cross Case Analyse, bei der die Interviewergebnisse und Beobachtungen der einzelnen Fälle zusammengeführt werden. Nach einer Triangulation der beiden Datenquellen – Interviews und Beobachtungen – wird in Abschnitt 5.5 das praxisorientierte Flexibilitätsmodell aus der Analyse abgeleitet.

5.1 Aufbereitung der Interviews und Herleitung des Kategoriensystems

Die Interviewdurchführung wurde mittels einer Trackingtabelle dokumentiert. Das finale Interviewtracking ist in der Tabelle 13 dargestellt. Der Interviewtyp betrifft den entsprechenden übergeordneten Aufgabenbereich der Interviewten, meist unterschieden nach Montage- und Automatisierungsplanung. Einige Experten sind in beiden Aufgabenbereichen tätig, wie es in dem Fall „Luxus“ zutrifft. Des Weiteren wird je Experte eine detaillierte Beschreibung des Aufgabenumfangs dokumentiert.

Der Fokus der Experten liegt bei der Automatisierung grundsätzlich auf der Montage, wobei die Experten aus der Montageplanung häufig im Bereich Fahrwerk oder Exterieur arbeiten. Aufgrund unterschiedlicher Schwerpunkte in der täglichen Arbeit der Experten können bei der Analyse der Interviewtranskripte spezifischere Rückschlüsse gezogen werden.

Da die OEMs in ganz Europa verteilt waren, wurden die Interviews in verschiedenen Sprachen durchgeführt. Die meisten wurden auf Deutsch geführt, einige jedoch auch auf Englisch. Ein Interview stellte einen Sonderfall dar: Hier war eine Dolmetscherin erforderlich, welche die englischen Fragen in das Spanische übersetzte, sodass der Experte die Fragen beantworten konnte.

Ein weiterer Aspekt des Interviewtrackings ist die Dauer der Interviews. Diese betrug im Mittel 48 Minuten und variierte zwischen 20 Minuten und einer Stunde und 15 Minuten. Zusätzlich wurden noch das Datum der Befragung sowie der Transkription dokumentiert. Die Transkription erfolgte durch den Forschenden stets zeitnah – innerhalb einer Woche nach dem jeweiligen Interview. Bei zwei Interviews wurde keine Zustimmung zur Audioaufnahme für die spätere Transkription erteilt. Die Ergebnisse dieser Interviews wurden daher über die Datenaufnahmeprotokolle vermerkt und mit in die Analyse einbezogen.

Zuletzt wird dokumentiert, ob sich im Verlauf der Interviews Methodikänderungen ergeben haben, um die Interviews kontinuierlich zu verbessern. Bis einschließlich Interview

Nummer drei wurden entsprechende Methodikänderungen vorgenommen. Diese betrafen insbesondere eine angepasste Struktur während der Interviewdurchführung. Nach dem Probeinterview wurde dokumentiert, dass das konzeptionelle Flexibilitätsmodell vor den Interviewfragen in größerer Detailtiefe erläutert werden sollte. In den weiteren Interviews – bis Interview Nummer drei – wurden weitere Verfeinerungen in der Formulierung der Fragen und der Erklärung des konzeptionellen Flexibilitätsmodells vorgenommen. Ab Interview Nummer vier, wurde die Methodik während der Interviews nicht weiter angepasst.

Tabelle 13: Finales Interviewtracking

#	Typ	Interview-code	Aufgabenbereich	Sprache	Dauer [h]	Befragungs-datum	Transkriptions-datum	Methodik-änderung
	Probeinterview	0	Praktikant	de	01:00:00	23.10.2023	-	Ja
1	Automatisierungs-planung	LNfZ1	Automatisierungs-planung Montage	de	01:15:00	07.11.2023	09.11.2023	Ja
2	Montageplanung	LNfZ2	Montageplanung Fahrwerk	de	01:02:00	13.11.2023	13.11.2023	Ja
3	Automatisierungs-planung	LNfZ3	Automatisierungs-planung Montage	de	00:37:00	14.11.2023	15.11.2023	Ja
4	Automatisierungs-planung	V1	Automatisierungs-planung Montage	en-es	00:56:00	28.11.2023	01.12.2023	-
5	Montageplanung	V2	Montageplanung Finish	en	00:37:00	28.11.2023	01.12.2023	-
6	Montageplanung	V3	Montageplanung Exterieur	de	00:48:00	29.11.2023	-	-
7	Automatisierungs-planung	V4	Automatisierungs-planung Montage	en	00:54:00	29.11.2023	01.12.2023	-
8	Automatisierungs-planung	S1	Automatisierungs-planung Montage/ Fördertechnik	de	00:44:00	07.12.2023	08.12.2023	-
9	Montageplanung	P1	Montageplanung Fahrwerk	de	00:49:00	11.12.2023	15.12.2023	-
10	Automatisierungs-planung	P2	Automatisierungs-planung Montage	de	00:50:00	11.12.2023	15.12.2023	-
11	Montageplanung	P3	Montageplanung Fahrwerk	de	00:48:00	12.12.2023	15.12.2023	-
12	Automatisierungs-planung	P4	Automatisierungs-planung Montage	de	00:43:00	12.12.2023	15.12.2023	-
13	Montageplanung	LNfZ4	Montageplanung Exterieur	de	00:42:00	20.12.2023	20.12.2023	-
14	Automatisierungs-planung	S2	Automatisierungs-planung Montage/ Fördertechnik	de	00:57:00	06.02.2024	-	-
15	Automatisierung-planung/ Montageplanung	L1	Montage	en	00:34:00	03.04.2024	08.04.2024	-
16	Automatisierung-planung/ Montageplanung	L2	Montage (Befüllung)	en	00:49:00	03.04.2024	08.04.2024	-
17	Automatisierung-planung/ Montageplanung	L3	Montage	en	00:20:00	03.04.2024	08.04.2024	-

Für die Textanalyse und die Ausarbeitung des finalen Kategoriensystems wurden die Transkripte der einzelnen Interviews in einer Datei aggregiert (vgl. Schulz 2024f) und analysiert, sodass Kernaussagen zu jeder Frage des Interviewleitfadens aufgenommen werden konnten. Diese Analyse wurde in der Tabelle 14 durchgeführt. Aufgenommen wurden relevante Textstellen, Informationen über das entsprechende Interview – also Interviewnummer, Fall und Arbeitsfeld der interviewten Person –, das Statement, die Quellenangabe aus dem Transkript und die Zuordnung zu den Kategorien.

Tabelle 14: Vorgehensweise zur Textanalyse

#	Interview-nummer	Fall	Arbeitsfeld	Statement	Quelle [Transkript Alle]	Hauptkategorie [Deduktiv]	Kategorie [Deduktiv]
---	------------------	------	-------------	-----------	-----------------------------	------------------------------	-------------------------

In der initialen Tabelle wurden zunächst nur Spalten für die deduktiven Hauptkategorien mit den entsprechenden Kategorien angegeben. Diese wurden im Verlauf mehrerer Materialdurchgänge – nach dem Prozess der qualitativen Inhaltsanalyse (siehe Abbildung 12) – entsprechend ergänzt und verfeinert.

Der erste Materialdurchlauf hat die vordefinierten deduktiven Kategorien analysiert. Die in Summe 467 *Statements* sollen den Kategorien zugeordnet werden. Die nicht passenden *Statements* wurden unter *Sonstiges* zusammengefasst, um diese in den weiteren Analysen zu induktiven Kategorien zusammenzufassen. Die Tabelle 15 zeigt die Verteilung der *Statements* je Kategorie nach dem ersten Materialdurchlauf. Von der Gesamtheit der *Statements* konnten 28% der *dHk1 – Planungsprozess inkl. Planungshorizonte*, 38% der *dHk2 – Flexibilitätsaspekte*, 31% der *dHk3 – Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität* und 3% der Kategorie *Sonstiges* zugeordnet werden. Des Weiteren konnten die *Statements* im ersten Materialdurchlauf noch den deduktiven Kategorien *dK1* bis *dK7* zugeordnet werden. Eine weitere Besonderheit im ersten Materialdurchlauf waren *Statements* aus der *dHk2*, welche keine der weiteren Kategorien zugeordnet werden konnten. Diese wurden als *Sonstiges* auf der Ebene der Kategorien vermerkt.

Tabelle 15: Kategorisierung nach dem ersten Materialdurchlauf

Kategorie	Anzahl Statements
dHk1	133
dK1	37
dK2	16
dK3	28
dK4	24
dK5	28
dHk2	177
dK6	109
dK7	65
Sonstiges	3
dHk3	146
Sonstiges	11

In einem weiteren Materialdurchlauf konnten die Statements, welche mit *Sonstiges* kategorisiert wurden, induktiven Kategorien zugeordnet werden. Die elf ausgewählten Statements auf Ebene der Hauptkategorien beschreiben alle übergeordnete Themen aus der jeweiligen Montage, sodass sich die induktive Hauptkategorie *iHk8 Situation der Montage* ergab.

Situation der Montage: In dieser induktiven Kategorie werden Statements zusammengefasst, welche abseits des konzeptionellen Modells und den deduktiven Hauptkategorien für relevant eingestuft wurden. Ein beispielhaftes Statement ist „[...] ich würde fast behaupten, der Ansatz [Flexibilität in der Planung] ist noch gar nicht in den Köpfen“ (Schulz 2024a, S. 2).

Dahingegen beschreiben die drei sonstigen Statements aus der *dHk2* Themen, welche nicht Teil des Interviewleitfadens waren. Nach der Analyse der Statements ist eine Gemeinsamkeit zu erkennen. Es werden Möglichkeiten zur Messung der Flexibilität in der Montage beschrieben. Somit ergibt sich die induktive Kategorie *iK9* zu *Messbarkeit der Flexibilität*, welche im Folgenden erläutert wird.

Messbarkeit der Flexibilität: Als induktive Kategorie unter der *dHk2* beschreibt diese Möglichkeiten, wie die Flexibilität messbar gemacht werden kann. Die Statements werden nach diesem Beispiel der *iK9* zugeordnet: „ist wahrscheinlich auch messbar über meinen Personaleinsatz“ (Schulz 2024c, S. 299).

In einem dritten Materialdurchlauf konnte die Kategorisierung überprüft und verfeinert werden. Die *dK7* konnte durch ein weiteres Analysieren in detaillierte induktive Kategorien aufgeteilt werden. Es ergeben sich die Unterkategorien *Allgemeine Funktion (iK7a)*, *Eingangsgröße (iK7b)*, *Vollständigkeit (iK7c)* und *Zusammenfassen (iK7d)*.

Allgemeine Funktion: Statements, die dieser Unterkategorie zugeordnet wurden, beschreiben Flexibilitätsaspekte, die eine allgemeine Funktion erfüllen und nicht zwangsläufig einen Einfluss auf die Flexibilität einer Montageanlage haben. Ein beispielhaftes Statement dieser Unterkategorie ist: „[...] *ist eigentlich eine Grundfunktion, die nichts mit flexibel zu tun hat*“ (Schulz 2024c, S. 247).

Eingangsgröße: Dieser Unterkategorie werden Statements zugeordnet, die Aussagen treffen, durch welche Aspekte eine Flexibilität umgesetzt werden kann. Ein Beispiel für ein Statement dieser Unterkategorie ist: „[...] *something that has to be or should be done in order to accomplish the other aspects*“ (Schulz 2024b, S. 469).

Vollständigkeit: Ausschlaggebend für diese Unterkategorie waren Statements in Bezug auf die Flexibilitätsaspekte, in welchen die Interviewten die Anzahl der vorgeschlagenen Flexibilitätsaspekte anpassen oder deren Anzahl zustimmen. Ein Statement für diese Unterkategorie ist: „*Es gab oder es gibt aktuell nicht diesen einen oder zwei Punkte, die mir fehlen*“ (Schulz 2024a, S. 6).

Zusammenfassen: Der Unterkategorie *iK7d* werden Statements zugeordnet, in welchen ein Zusammenfassen von Flexibilitätsaspekten aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell vorgeschlagen wird. Somit ist diese Unterkategorie von der Unterkategorie *Vollständigkeit* abzugrenzen. Statements für die Unterkategorie *Zusammenfassen* sind z. B.: „[...] *gehen ja in das gleiche Themengebiet*“ (Schulz 2024a, S. 52) oder „[...] *is very similar to [...]*“ (Schulz 2024e, S. 137).

Die Tabelle 16 fasst die Unterkategorien der *dK7* noch einmal zusammen.

Tabelle 16: Detaillierung der *dK7* nach dem dritten Materialdurchlauf

Kategorie	Unterkategorie
dK7 – Anzahl Flexibilitätsaspekte	iK7a – Allgemeine Funktion
	iK7b – Eingangsgröße
	iK7c – Vollständigkeit
	iK7d – Zusammenfassen

Die Unterkategorien *iK7a* – *iK7b* konnten nach der Zuordnung der Statements noch weiter quantitativ analysiert werden. Die Aufteilung der 65 Statements aus der *dK7* ist in der Abbildung 17 dargestellt. Die *iK7d* macht den größten Anteil der Statements aus der *dK7* aus. Dahingegen ist die *iK7c* mit einem Anteil von 9% am schwächsten vertreten.

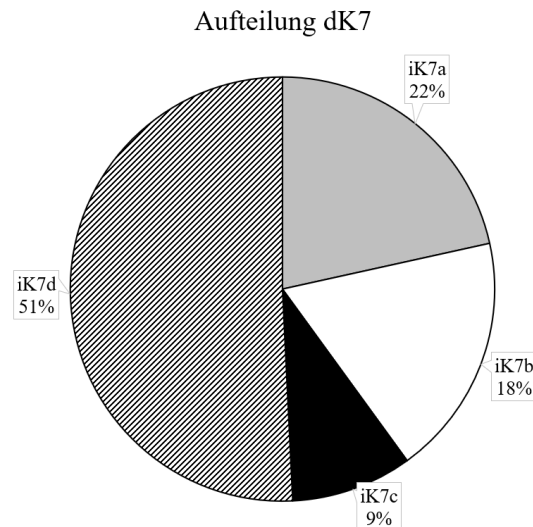


Abbildung 17: Verteilung der induktiven Unterkategorien der dK7

In dem dritten Materialdurchlauf konnten noch weitere induktive Kategorien bestimmt werden. Die Statements aus den *dK1* – *dK5* können noch detaillierter unterschieden werden. Beginnend mit der *dK1*, der *Priorität der Planungshorizonte* aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell. Anhand der Analyse unterscheiden sich die Statements in der Auslegung der Planungshorizonte. Es werden die *Planungs-* und die *Reaktionssicht* unterschieden. Somit ergeben sich zwei induktive Unterkategorien der *dK1*, *iK1a* – *Planung* und *iK1b* – *Reaktion*. Die beiden Unterkategorien können wie folgt unterschieden werden.

Planung: Die Unterkategorie beschreibt Statements zur *Priorität der Planungshorizonte*, die sich auf die Planung von Montageanlagen beziehen. Ein Ankerbeispiel dafür ist z. B. „*I'd say for a fully automated assembly station, you wouldn't need to plan long term, but you would certainly need to plan midterm*“ (Schulz 2024b, S. 391).

Reaktion: Diese Unterkategorie umfasst im Gegensatz zur Planungssicht (*iK1a*) Statements, welche die direkte Umsetzung der Flexibilität einer Montageanlage beschreiben. Ein passendes Beispiel aus dem Transkript ist „*am schönsten wäre natürlich, wenn man eine Flexibilität so schnell wie möglich umsetzen kann*“ (Schulz 2024a, S. 60).

Nach der Analyse der Aussagen der *dK1* ergibt sich die detaillierte Verteilung der Unterkategorien. Diese Verteilung ist in der Abbildung 18 dargestellt. Die Aussagen häufen sich leicht auf der Seite der *iK1a* im Vergleich zur *iK1b*.

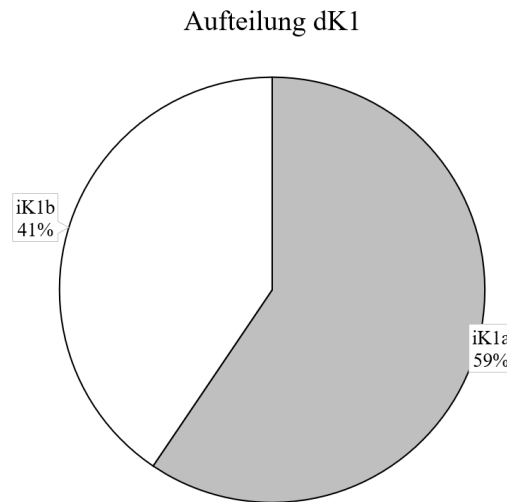


Abbildung 18: Verteilung der induktiven Unterkategorien der dK1

Im nächsten Schritt ergaben sich auch für die *dK2* induktive Unterkategorien. Um die Vollständigkeit der Planungshorizonte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell zu verifizieren, teilen sich die Statements in die Unterkategorien *Erweiterung (iK2a)*, *Reduktion (iK2b)* und *Vollständigkeit (iK2c)* auf.

Erweiterung: Die *iK2a* fasst Statements zusammen, welche die vorgeschlagenen drei Planungshorizonte als nicht ausreichend ansehen und mindestens einen weiteren Horizont vorschlagen. Ein Beispiel hierzu ist: „[...] müssen wir einen Zeitraum dazu packen“ (Schulz 2024a, S. 17).

Reduktion: Für diese Kategorie sind Statements relevant, welche eine Reduzierung der vorgeschlagenen Planungshorizonte benennen. Statements zur Orientierung sind z. B. „[...] you should need like only two [...]“ und „[...] aspect would always fall inside one of those anyway“ (Schulz 2024b, S. 413).

Vollständigkeit: Die *Vollständigkeit* fasst dann Statements zusammen, welche die vorgeschlagenen drei Planungshorizonte bestätigen. Ein prägnantes Ankerbeispiel hierzu ist „I would minimize it to three, not go beyond that because pretty much everything fits within those categories“ (Schulz 2024b, S. 388).

Die Verteilung der getätigten Statements der *iK2a – iK2c* ist in der Abbildung 19 zu sehen. Die meisten Statements konnten der *iK2b* zugeordnet werden, gefolgt von der *iK2c*. Die *iK2a* umfasst am wenigsten zugeordnete Statements.

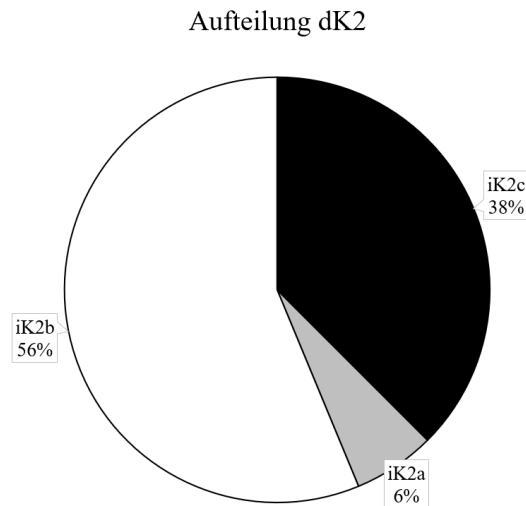


Abbildung 19: Verteilung der induktiven Unterkategorien der dK2

Die nächsten induktiven Kategorien, welche sich aus dem dritten Materialdurchlauf ergaben, betreffen die Kategorien *dK3*, *dK4* und *dK5*. Die drei Kategorien beschreiben jeweils Definitionen der Planungshorizonte aus dem Interviewleitfaden. Bei der Analyse aller Statements aus den drei Kategorien konnten einheitliche Unterkategorien je Kategorie definiert werden. Für die Definition der Planungshorizonte wurde auf Basis der Statements entweder ein *Projektbeispiel* genannt oder auch ein klarer *Zeitraum* in Monaten oder Jahren angegeben. Somit bilden *Projektbeispiel iK*a* und *Zeitraum iK*b* die induktiven Unterkategorien entsprechend für die Kategorien *dK3*, *dK4* und *dK5*.

Projektbeispiel: Die Unterkategorie beschreibt Definitionen der Planungshorizonte, welche auf *Projektbeispielen* aus dem automobilen Produktlebenszyklus stammen. Orientierung zur Zuordnung der Statements zu dieser Unterkategorie gibt das folgende Statement. „Kurze Typintegrationen; z. B. Produktaufwertungen“ (Schulz 2024c, S. 320).

Zeitraum: Diese Unterkategorie umfasst Statements, welche Definitionen für die Planungshorizonte klar angibt. Ein beispielhaftes Statement ist „[...] was mache ich im nächsten Monat oder im nächsten Jahr“ (Schulz 2024a, S. 51).

Die Zuteilung der Statements aus den Kategorien *dK3* – *dK5* zu den entsprechenden Unterkategorien zeigt die Abbildung 20. Es werden in jeder Kategorie mehr direkte *Zeiträume* als *Projektbeispiele* genannt.

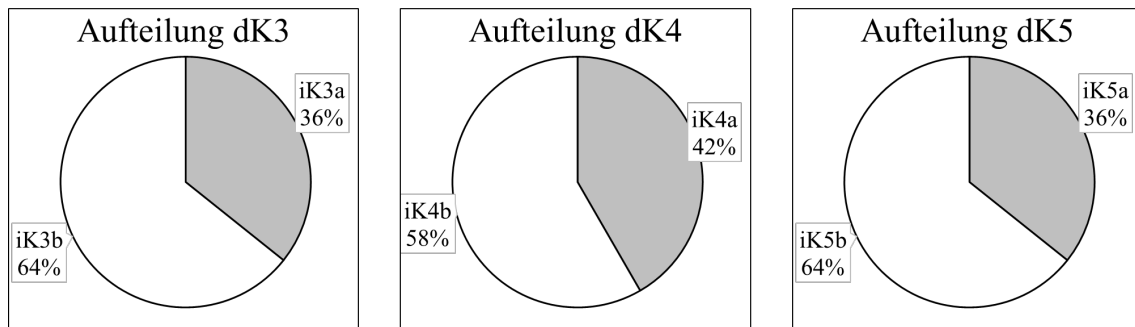


Abbildung 20: Verteilung der induktiven Unterkategorien der dK3 bis dK5

Zusätzlich konnten die Statements der *iHk8* weiter spezifiziert werden. Nach der Analyse der Statements ergeben sich zwei weitere Kategorien, *Ausgangssituation Montage – iK8a* und *Zielsituation der Montage – iK8b*.

Ausgangssituation Montage: Im Zuge dieser Kategorie sind Statements in die Analyse aufgenommen worden, welche die Ist Situation der Montage in der Automobilindustrie beschreiben. Ein Ankerbeispiel ist „*Steht etwas in Stahl und Eisen [...] müssen wir nach Bedarf irgendwelche Flexibilitäten hineinbekommen, da sich das Produkt geändert hat*“ (Schulz 2024a, S. 3).

Zielsituation der Montage: Die Kategorie beschreibt Statements, in denen die Interviewten die Zielsituation der automobilen Montage benennen. „*Wir möchten auch in der Montage die Prozesse soweit automatisieren*“ (Schulz 2024a, S. 2) ist ein passendes Beispiel aus dieser induktiven Kategorie.

Nach dem dritten folgte der finale Materialdurchlauf, um die Intracoderübereinstimmung zu gewährleisten und somit die Kategorisierung zu finalisieren. Die Tabelle 17 zeigt das Ergebnis der Kategorisierung der Statements aus der Multiple Case Study. Die deduktiven Kategorien aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell und dem Interviewleitfaden wurden um induktive Kategorien erweitert, sodass alle Statements einer Kategorie zugeordnet werden konnten.

Durch mehrere Materialdurchgänge konnten die Intracoderübereinstimmung und die externe Validität sichergestellt werden. Die InterCoderübereinstimmung wurde in dieser Arbeit nicht umgesetzt. Da die Kategorienbildung von der Kompetenz der Personen und dem aktiven Tun abhängig ist, ist keine intersubjektive Übereinstimmung zu erwarten. Somit ist es nicht sinnvoll, die Kategorienbildung über eine InterCoderübereinstimmung auf die Reliabilität hin zu untersuchen (vgl. Kuckartz und Rädiker 2022, S. 82f.).

Tabelle 17: Finales Kategoriensystem

Hauptkategorie	Kategorie	Unterkategorie
Planungsprozess und Planungshorizonte <i>dHk1</i>	Priorität Planungshorizont <i>dK1</i>	Planung <i>iK1a</i>
		Reaktion <i>iK1b</i>
	Anzahl Planungshorizont <i>dK2</i>	Erweiterung <i>iK2a</i>
		Reduktion <i>iK2b</i>
		Vollständigkeit <i>iK2c</i>
	Definition Operativ <i>dK3</i>	Projektbeispiel <i>iK3a</i>
		Zeitraum <i>iK3b</i>
	Definition Taktisch <i>dK4</i>	Projektbeispiel <i>iK4a</i>
		Zeitraum <i>iK4b</i>
	Definition Strategisch <i>dK5</i>	Projektbeispiel <i>iK4a</i>
		Zeitraum <i>iK4b</i>
Flexibilitätsaspekte <i>dHk2</i>	Priorität Flexibilitätsaspekte <i>dK6</i>	-
	Anzahl Flexibilitätsaspekte <i>dK7</i>	Allgemeine Funktion <i>iK7a</i>
		Eingangsgröße <i>iK7b</i>
		Vollständigkeit <i>iK7c</i>
		Zusammenfassen <i>iK7d</i>
	Messbarkeit der Flexibilität <i>iK9</i>	-
Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität <i>dHk3</i>	-	-
Situation der Montage <i>iHk8</i>	Ausgangssituation der Montage <i>iK8a</i>	-
	Zielsituation der Montage <i>iK8b</i>	-

Mit dem ausgearbeiteten Kategoriensystem kann die weitere Analyse der Multiple Case Study nach einzelnen Fällen, die Cross Case Analyse und die Triangulation der Ergebnisse durchgeführt werden.

5.2 Single Case Analysen

Das folgende Kapitel beschreibt die inhaltlichen Ergebnisse der Multiple Case Study. Die Ergebnisse werden in diesem Abschnitt nach den einzelnen Fällen beschrieben und im Nachhinein zusammengefasst.

5.2.1 Analyse des Falls „Volumen“

In dem Fall „Volumen“ werden in Summe vier Experten aus Anlagen- und Automatisierungsplanung in die Datenaufnahme integriert. In der Fabrik des Volumen OEMs werden vor allem Fahrzeuge aus den Segmenten A bis C montiert. Dazu kommen noch Fahrzeuge aus dem Segment J.

Planungsprozess inkl. Planungshorizonte

Die Planungshorizonte waren mit mehreren Fragen Teil der Interviews. Zu Beginn soll die Vollständigkeit der drei Planungshorizonte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell bewertet werden. Die Interviewten sagen, dass nicht mehr als die drei vorgeschlagenen Planungshorizonte unterschieden werden sollten. Jedoch deuten 50% der Interviewten an, einen der Planungshorizonte streichen zu wollen. Statements aus der *dK2* sagen *taktisch und operativ gehen fließend ineinander über*¹ und *„so you should need like only two short and long term“* (Schulz 2024e, S. 91). Da nur ein Experte eine klare Reduktion der Planungshorizonte anspricht, können die drei Planungshorizonte weiter verfolgt werden.

Zur Überprüfung der Planungshorizonte – *operativ*, *taktisch* und *strategisch* – wurde während der Interviews eine Einschätzung der Interviewten erfragt. Zusätzlich sollte die *Priorität der Planungshorizonte (dK1)* im Hinblick auf die Flexibilität erfragt werden. Durch die Unterscheidung der *Priorität der Planungshorizonte* nach den Unterkategorien *Planung (iK1a)* und *Reaktion (iK1b)* ergeben sich zwei verschiedene Rangfolgen:

- Aus *Planungssicht* wird der *strategische* Planungshorizont als der wichtigste genannt, gefolgt vom *operativen* Planungshorizont. Der *taktische* Planungshorizont ist somit am unwichtigsten für Planungsaufgaben nach den Experten des Falls „Volumen“.
- Mit dem Fokus auf die Reaktion auf Änderungen der Rahmenbedingungen ändert sich die Rangfolge: Der *taktische* Planungshorizont wird als am wichtigsten angesehen, gefolgt von dem *operativen* Planungshorizont. Der *strategische* Planungshorizont wird hier als am unwichtigsten gesehen

Darüber hinaus beschreiben Statements aus den Kategorien *dK3* bis *dK5* Definitionen der Planungshorizonte, unterteilt nach Zeitangaben in Monaten und Jahren sowie passenden Projektbeispielen. Für den *operativen* Zeitraum beschreiben die Interviewten aus dem Fall „Volumen“ einen Zeitraum von ca. sechs Monaten bis zu einem Jahr. Statements der *iK3b* dazu lauten z. B. *„till three month you can consider it operational“* (Schulz 2024e, S. 93) oder *„[operativ] is less than a year“* (Schulz 2024e, S. 128).

Der *taktische* Planungshorizont wird mit einem Zeitraum von sechs Monaten bis hin zu fünf Jahren angegeben. Die Interviewten sagen bspw. *„between more than one year and three years“* (Schulz 2024e, S. 129). Ein weiteres Statement aus der *iK4b* lautet, *taktisch ist ein bis fünf Jahre*².

¹ Die Aussage stammt aus einem Interview, bei welchem der Audioaufnahme nicht zugestimmt wurde. Die Inhalte stammen somit aus dem Datenaufnahmeprotokoll des Interviews.

² Die Aussage stammt aus einem Interview, bei welchem der Audioaufnahme nicht zugestimmt wurde. Die Inhalte stammen somit aus dem Datenaufnahmeprotokoll des Interviews.

Für den *strategischen* Planungshorizont reichen die Angaben von mehreren Monaten bis zu über fünf Jahren. Ein passendes Statement der *iK5a* umfasst, dass dieser Planungshorizont Projekte beschreibt, die ohne klaren Fahrzeugbezug durchgeführt werden.

Die Abbildung 21 zeigt die Zeiträume der Planungshorizonte aus dem Fall „Volumen“. Es werden als Boxplot die Maximal- und Minimalangaben sowie der Median, der Mittelwert (x) als auch die mittleren 50% der Angaben dargestellt.

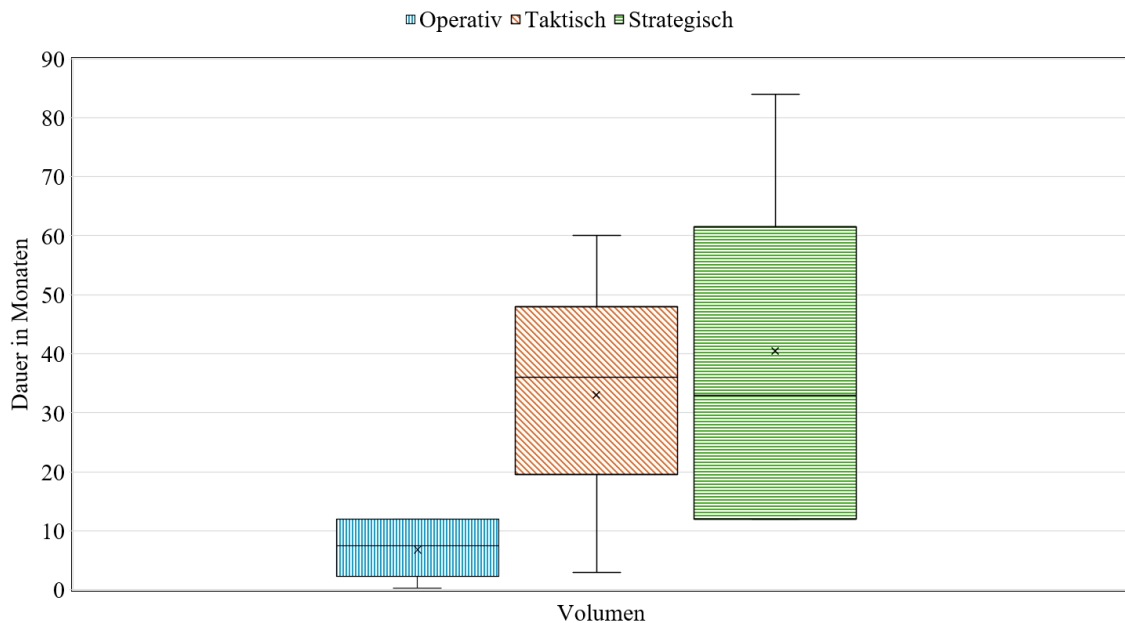


Abbildung 21: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „Volumen“

Flexibilitätsaspekte

Die Analyse der Interviews zeigt, dass in dem Fall „Volumen“ nicht alle Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell auf Zustimmung gestoßen sind. Von den acht Aspekten werden sieben als relevant erachtet. In keinem der Interviews wurde *Modularität* als relevant benannt. In der *iK7b* finden sich Statements, die *Modularität* als vorgelagerte Voraussetzung beschreiben, um andere Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell umsetzen zu können.

Des Weiteren wurde der Aspekt *Mobilität* von 50% der Experten als relevant beschrieben. In Bezug auf die Relevanz von *Mobilität* wurden zusätzlich Statements der *iK7d – Zusammenfassen* – zugeordnet. Mehrere Interviewte beschreiben eine inhaltliche Nähe zwischen *Mobilität* und *Wiederverwendbarkeit*.

Darüber hinaus wurde auch die Relevanz der Aspekte *Diagnosefähigkeit* und *Anpassbarkeit* in dem Fall „Volumen“ eingeschränkt. *Diagnosefähigkeit* wird laut einem Statement aus der *iK7a* als Grundfunktion von Montageanlagen verstanden, ohne direkten Einfluss auf die Flexibilität. Bezüglich der *Anpassbarkeit* beschreiben 50% der Interviewten, dass

es mit der *Konvertierbarkeit* gleichzusetzen sei. Die Aussagen lassen sich der *iK7b* zuordnen, sodass eine Zusammenfassung der beiden Aspekte im Rahmen des Falls „Volumen“ denkbar wäre.

Neben der Relevanz der Flexibilitätsaspekte wird nach dem Interviewleitfaden auch die Priorität der Flexibilitätsaspekte erfragt. *Skalierbarkeit* wurde dabei als wichtigster Aspekt für eine Flexibilität genannt. Es folgten *Integrierbarkeit*, *Konvertierbarkeit* und *Wiederverwendbarkeit*, die ebenfalls eine hohe Priorität erhalten. Die Bedeutung der *Diagnosefähigkeit* wurde in einem Interview vor allem für Instandhaltungsthemen hervorgehoben, ohne klar eine Bedeutung für die Flexibilität zu beschreiben.

Im Weiteren haben die Interviewten *Anpassbarkeit*, *Diagnosefähigkeit* und *Mobilität* genannt, wobei die *Mobilität* als am wenigsten wichtig eingeschätzt wurde. Ein passendes Statement der *dK6* lautet: „*Mobility [...] is important, but it's what I told you, [...] it's a dream, but it's not so, so realistic*“ (Schulz 2024e, S. 137).

Zudem wurde in einem Interview die Bedeutung des Aspekts *Anpassbarkeit* besonders betont. Die Priorisierung innerhalb der Interviews wurde methodisch mithilfe von Moderationskarten durch die Experten vorgenommen. Um ein Ranking für den gesamten Fall zu ermitteln, wurden Punktzahlen je Flexibilitätsaspekt vergeben und auf die Gesamtanzahl der Flexibilitätsaspekte bezogen.

Die Abbildung 22 zeigt das Ranking des Falls „Volumen“. Es ist z. B. zu erkennen, dass *Skalierbarkeit* als am wichtigsten bewertet wurde. Zudem wird deutlich, dass *Modularität*, wie bereits beschrieben, als Eingangsvoraussetzung verstanden wurde und daher in dieser Darstellung keine Punkte erhält.

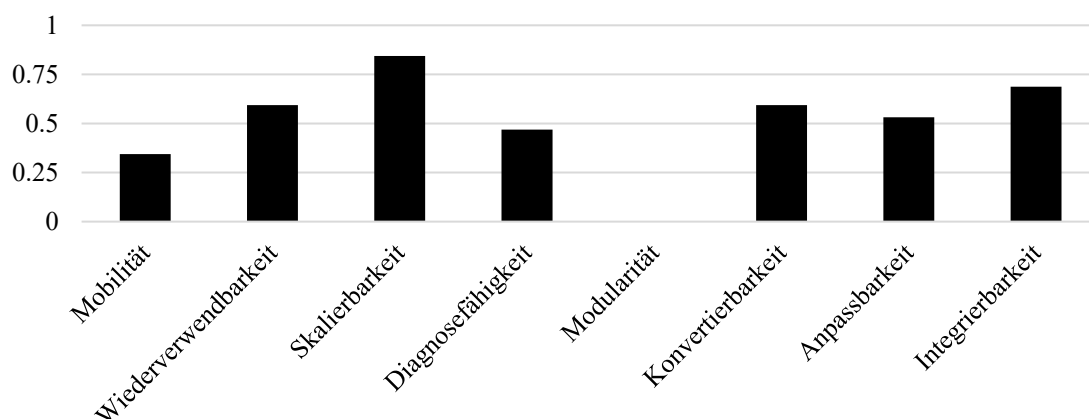


Abbildung 22: Prioritätsranking der Flexibilitätsaspekte des Falls „Volumen“

Die Ergebnisse der Prioritätsbewertung betrachten zu diesem Zeitpunkt noch keine eventuellen Zusammenfassungen von Flexibilitätsaspekten, wie es in den Statements der *iK7d* beschrieben wurde.

Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität

Die letzten Fragen zum Thema Flexibilitätsaspekte zielen darauf ab, wie die Flexibilität in Montageanlagen konkret umgesetzt werden könnte. Die entsprechenden Statements entstammen der *dHk3*. Viele der Flexibilitätsaspekte können laut den Experten des Falls „Volumen“ über den Einsatz von Modulen umgesetzt werden – vor allem *Konvertierbarkeit*, *Integrierbarkeit* und *Wiederverwendbarkeit*.

Eine weitere häufig genannte Umsetzungsmöglichkeit von Flexibilität ist das Bilden von Vorhalten. Vorhalte meinen hier, dass bereits in der Planung der Montageanlagen z. B. Plätze für zukünftige, ungewisse Folgeprojekte vorgesehen werden sollen. Vor allem die *Skalierbarkeit* wird laut den Interviewten durch solche Vorhalte umgesetzt. Auch die *Anpassbarkeit* könnte durch Vorhalte an technischem Equipment umgesetzt werden.

Für die *Anpassbarkeit* und *Konvertierbarkeit* sollen entsprechende Endeffektoren zum Einsatz kommen, die vor allem durch Universalität die Flexibilität erreichen. Im Zuge der *Integrierbarkeit* war der Fokus der Interviewten auf der Software von Montageanlagen sowie auf standardisierten Schnittstellen in Hard- und Software. Die Experten verstehen dabei die Steuerungen der Montageanlagen als Software, während die übrigen Bestandteile – mit Ausnahme von Peripherie und Sicherheitstechnik – als Hardware gezählt werden.

Abschließend wurde in dem Fall „Volumen“ die Umsetzung von *Mobilität* beschrieben. Die Interviewten sagen, dass die Montageanlagen z. B. auf Räder oder andere Transportmittel gestellt werden könnten. Abhängig von der jeweiligen Montageanlage scheint die Umsetzung der *Mobilität* durch Räder unrealistisch – wie es in dem Statement aus der *dK1* bereits gesagt wurde.

Beobachtung

Ein weiterer Teil des Falls „Volumen“ war die teilnehmende Beobachtung in der Montage des OEMs. Im Rahmen dieser – gemeinsam mit den Experten – konnten bereits umgesetzte Flexibilitätsaspekte in den Montageanlagen analysiert werden. Zusätzlich werden noch Fragen zur Umsetzung der Aspekte gestellt. Zu sehen waren die Aspekte *Wiederverwendbarkeit*, *Skalierbarkeit* und *Integrierbarkeit*.

Die *Wiederverwendbarkeit* wurde durch den Einsatz von Standards in den Bestandteilen der Montageanlagen umgesetzt. Dadurch können diese für neue Anwendungsfälle erneut genutzt werden.

Im Hinblick auf die *Skalierbarkeit* wurden Bestandteile der Montageanlagen durch Vorhalte überdimensioniert, um kurzfristig reaktionsfähig zu sein. Bspw. sind die Roboter in der Lage schneller zu operieren, als es in der derzeitigen Situation erforderlich ist.

Zuletzt wurde die *Integrierbarkeit* durch den Einsatz universeller Hardware – vor allem Endeffektoren – erreicht. Dadurch können Prozesse desselben Fügeverfahrens für ähnliche Bauteile auch kurzfristig integriert werden. Zu sehen war dieser Aspekt in einer Montageanlage, die Schriftzüge an der Karosserie der Fahrzeuge anklebt.

5.2.2 Analyse des Falls „Sport“

Im Zuge des Falls „Sport“ wurde aus jedem Aufgabengebiet, Automatisierungsplanung und Anlagenplanung ein Experte befragt. In der Fabrik des Sport OEMs aus der Multiple Case Study werden vor allem Fahrzeuge aus den Segmenten S und J montiert.

Planungsprozess inkl. Planungshorizonte

Im Zuge der Planungshorizonte wird zunächst die Anzahl der Planungshorizonte im Vergleich zum konzeptionellen Flexibilitätsmodell thematisiert. Nach der Analyse der Datenaufnahmeprotokolle und des Interviewtranskripts stimmen die Interviewten den drei vorgeschlagenen Planungshorizonten zu, sodass diese grundsätzlich für die Planung von Montageanlagen genutzt werden können.

In Bezug auf die Priorität der Planungshorizonte kann angegeben werden, dass diese von den Experten primär als Reaktionszeitraum verstanden werden. In diesem Verständnis ist der *kurzfristige* Planungshorizont am wichtigsten, da es in jeder Situation in der Montage essentiell ist, die „*Maschine am Laufen*“ (Schulz 2024d, S. 361) zu halten, sodass Fahrzeuge produziert werden können. Der *strategische* Zeitraum wird dann als am unwichtigsten angegeben, sodass der *taktische* den mittleren Rang belegt.

Zusätzlich zu der Priorität geben die Interviewten Statements zu den Definitionen der Planungshorizonte an. Die entsprechenden Angaben sind in der Abbildung 23 dargestellt. Demnach umfasst der *operative* Planungshorizont – für eine Reaktion – einen Zeitraum von bis zu einem Monat. Daraufhin wird der *taktische* Planungshorizont mit einem Zeitraum von bis zu einem Jahr definiert, während der *strategische* Planungshorizont alle Zeiträume darüber hinaus abdeckt. Die Experten geben diesen strategischen Zeitraum übereinstimmend mit drei Jahren an.

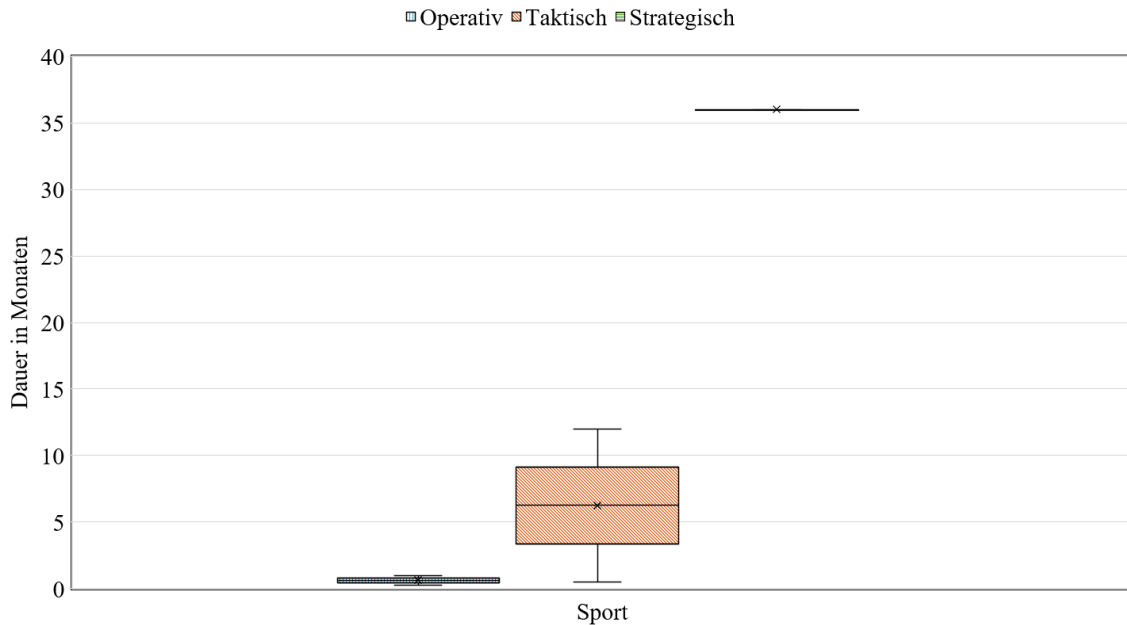


Abbildung 23: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „Sport“

Nach den Angaben der Zeiträume werden für die Planungshorizonte Projektbeispiele angegeben. Der *operative* Planungshorizont betrifft Produktänderungen, für welche die Montageanlagen angepasst werden müssen. Die nächstgrößere Maßnahme, ein Beispiel für den *taktischen* Planungshorizont wäre eine Produktintegration in die Montage. Darüber hinaus geben die Statements verschiedene Beispiele für den *strategischen* Zeitraum an. Es werden Layoutänderungen oder das Aufbauen von Montageanlagen angegeben.

Flexibilitätsaspekte

Die Interviewten des Falls „Sport“ sehen zwei der acht Flexibilitätsaspekte des konzeptionellen Flexibilitätsmodells als nicht relevant an: *Diagnosefähigkeit* und *Modularität*. In der *iK7a* wird die *Diagnosefähigkeit* als „*grundsätzliche Aufgabe*“ (Schulz 2024d, S. 367) beschrieben, weshalb keine klare Zuordnung zur Flexibilität von Montageanlagen zu erkennen ist. Die *Modularität* wird in dem Fall „Sport“ als Eingangsgröße für Flexibilität verstanden.

Des Weiteren bewerten lediglich 50% der Interviewten *Wiederverwendbarkeit*, *Konvertierbarkeit* und *Integrierbarkeit* als relevant. Dies ist darin begründet, dass diese Aspekte teils mit anderen Aspekten zusammengefasst werden könnten. Die entsprechenden Statements wurden in der *iK7d* gesammelt. Die *Wiederverwendbarkeit* hat nach den Interviewten eine sehr große Ähnlichkeit zur *Mobilität* und sollte somit zusammengefasst werden. Ebenso wird eine Ähnlichkeit zwischen *Konvertierbarkeit*, *Integrierbarkeit* und *Anpassbarkeit* beschrieben. Aufgrund dieser Ähnlichkeit würden die Interviewten des Falls „Sport“ diese drei Aspekte zu einem gemeinsamen Flexibilitätsaspekt zusammenführen. Begründet wird dies dadurch, dass die drei Aspekte mittels ähnlicher Umsetzungsmöglichkeiten erreicht werden könnten.

Nach der Bewertung der Relevanz wird die Wichtigkeit der einzelnen Flexibilitätsaspekte bewertet. Der mit Abstand wichtigste Aspekt – nach den Experten des Falls „Sport“ – für eine flexible Montageanlage ist die *Skalierbarkeit*. Es folgen *Mobilität* und *Anpassbarkeit*. *Konvertierbarkeit* und *Integrierbarkeit* werden als deutlich weniger wichtig angesehen, während *Wiederverwendbarkeit* den letzten Platz in der Rangfolge einnimmt. Die Ergebnisse der Prioritätsbewertung berücksichtigen zu diesem Zeitpunkt noch keine eventuellen Zusammenfassungen von Flexibilitätsaspekten, wie es von den Statements in der *iK7d* beschrieben wurde.

Die gesammelte Prioritätsbewertung der Flexibilitätsaspekte des Falls „Sport“ zeigt die Abbildung 24.

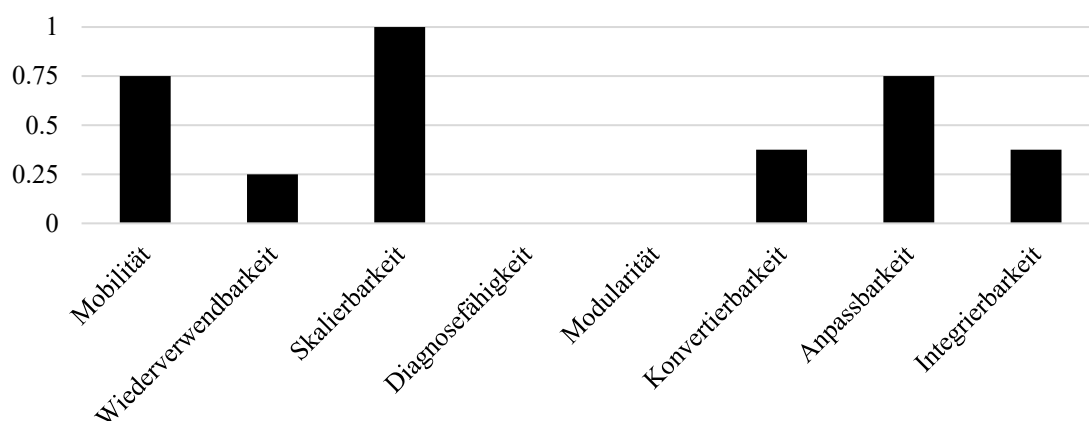


Abbildung 24: Prioritätsbetrachtung der Flexibilitätsaspekte aus dem Fall „Sport“

Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität

Für das Umsetzen der Flexibilität beschreiben die Interviewten in der *dHk3* verschiedene Möglichkeiten. Vorhalte in der Hard- und Software werden als geeignete Möglichkeiten zur Implementierung der *Skalierbarkeit* und *Anpassbarkeit* beschrieben. Des Weiteren können *Anpassbarkeit* und *Mobilität* laut den Statements des Falls „Sport“ auch über die Standardisierung in der Hard- und Software sowie durch entsprechende Schnittstellen umgesetzt werden. Zusätzlich werden Module als weitere Möglichkeit zur Umsetzung der Flexibilität genannt – insbesondere für die *Konvertierbarkeit* und *Mobilität*.

Beobachtung

Die Beobachtungen der Montageanlagen des Sport OEMs zeigen, dass *Skalierbarkeit* und *Integrierbarkeit* bereits in der Montage umgesetzt wurden. Beide Flexibilitätsaspekte werden über Vorhalte realisiert. Die aktuellen Montageanlagen sind überdimensioniert, sodass entweder die Stückzahl erhöht oder ein weiteres Fahrzeug mit gleichen Aufgaben integriert werden kann.

Diese Form der Flexibilität ist von dem Sport OEM jedoch ausschließlich im *strategischen* Planungshorizont erreichbar, da die Planungsprozesse und Produktentwicklungen einen entsprechenden Vorlauf benötigen.

Darüber hinaus konnten in der Montage auch Ansätze der *Mobilität* beobachtet werden. Dabei wurden jedoch die Bauteile auf einem FTF zu den Montageanlagen befördert, so dass die Montageanlage als solches nicht mobil war.

5.2.3 Analyse des Falls „Luxus“

Die Besonderheit an dem Fall „Luxus“ war, dass die drei Interviewten nicht klar nach Experten für Anlagenplanung und Automatisierungsplanung aufgeteilt werden konnten, da die Interviewpartner beide Aufgabenbereiche innehaben. In der Fabrik des Luxus OEMs aus der Multiple Case Study werden vor allem Fahrzeuge aus den Segmenten F und J montiert.

Planungsprozess inkl. Planungshorizonte

Die ersten Fragen zu den Planungshorizonten betreffen die Anzahl der Planungshorizonte, um die Annahmen aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell zu verifizieren. Die Mehrheit der Interviewten stimmen dem Vorschlag aus drei Planungshorizonten zu. Dazu wird in der *iK2c* gesagt: „*I would minimise it to three, not go beyond that because pretty much everything fits within those categories*“ (Schulz 2024b, S. 388). Im Gegensatz dazu wird jedoch in der *iK2b* angemerkt „*Mid term or the tactical aspect would always fall inside one of the others anyway*“ (Schulz 2024b, S. 413). Dadurch ergibt sich ein Vorschlag zur Reduktion der Planungshorizonte, da Tätigkeiten aus dem *taktischen* Planungshorizont nicht trennscharf zu den Tätigkeiten aus dem *operativen* und *strategischen* Planungshorizont sind.

Im Weiteren wird die Priorität der Planungshorizonte erfragt. In Bezug auf den Fall „Luxus“ wird in beiden Sichtweisen auf die Priorität – Planung (*iK1a*) und Reaktion (*iK1b*) – der *operative* Planungshorizont als am wichtigsten angesehen. Folgende Statements wurden dazu analysiert:

- Aus der *iK4a* „*it'll always be within operational*“ (Schulz 2024b, S. 416),
- Aus der *iK4b* „*Absolutely do it in the very shortest time because the longer things take to do, the more money it's costing. It's engineers time, it's planning time. It's supplier time*“ (Schulz 2024b, S. 392).

Im Widerspruch zu dem präferierten kurzfristigen Reaktions- und Planungshorizont wird aber aus der *dK3* Folgendes gesagt: „*it would be very difficult to react operationally. Unless it was something as similar as or as simple as reprogramming a robot*“ (Schulz 2024b, S. 392). Diese Aussage wird durch ein weiteres Statement unterstrichen: „*short*

term is very difficult to react to unless you've got a very flexible system“ (Schulz 2024b, S. 391), was die Umsetzung der Flexibilität weiter motiviert.

Im Zuge der Prioritätsbewertung folgt auf den *operativen* Planungshorizont der *strategische*. In einem Interview wird jedoch gesagt, „[...] *you wouldn't need to plan long term, but you would certainly need to plan midterm*“ (Schulz 2024b, S. 391). Hier wird die Planungsaufgabe für Montageanlagen in dem *taktischen* Planungshorizont verortet, so dass der *strategische* Planungshorizont mit dem Fokus der Montageanlagen als weniger wichtig angesehen wird. Aus der Reaktionssicht wird der *taktische* Planungshorizont als am zweitwichtigsten bewertet, da dort meistens die Planung der Montageanlagen erfolgt.

Der dritte Abschnitt zu den Fragen der Planungshorizonte betrifft die Definitionen der einzelnen Planungshorizonte. Der *operative* Planungshorizont beschreibt nach dem Fall „Luxus“ einen Zeitraum von sechs bis 18 Monaten und umfasst Aufgaben wie Integrationen eines neuen Fahrzeugmodells oder einer neuen Variante. Die *iK6a* sammelt die Statements dazu, wie z. B. „[*operational*] *very quickly or model year changes, emergency changes [...]*“ (Schulz 2024b, S. 388). Darüber hinaus beschreibt der *taktische* Planungshorizont alle Tätigkeiten innerhalb der nächsten drei Jahre und der *strategische* Planungshorizont alles darüber hinaus. Die Definitionen der Planungshorizonte sind in der Abbildung 25 als Boxplot dargestellt.

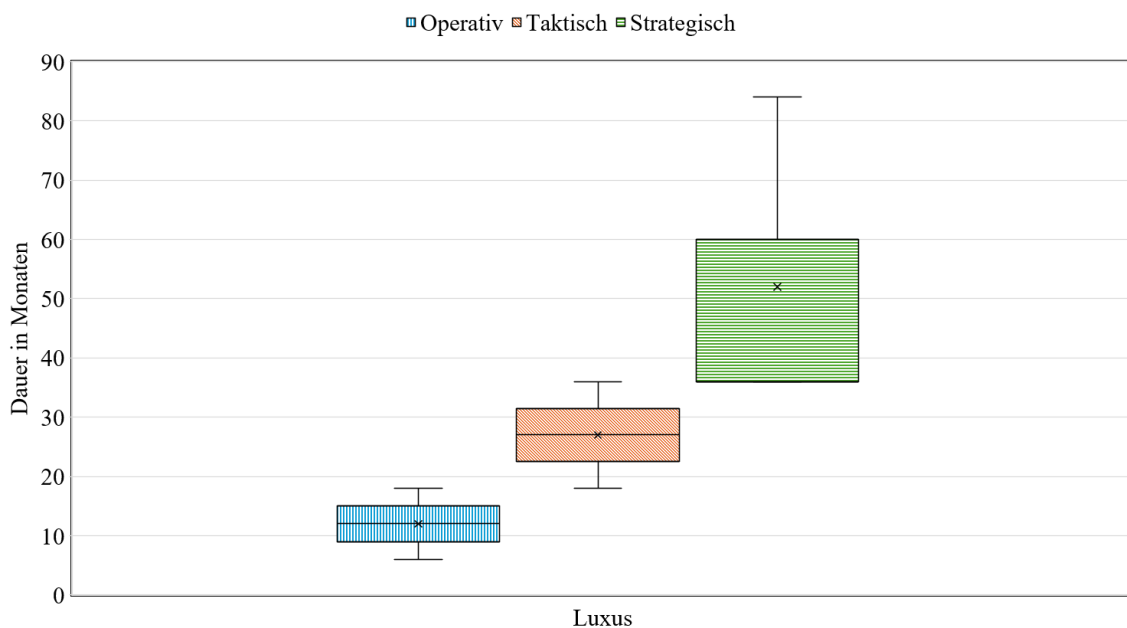


Abbildung 25: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „Luxus“

Die Experten geben hierzu auch Tätigkeiten an, die teils im *operativen* aber auch im *taktischen* Planungshorizont liegen: „*I think model year changes will fall between the midterm and short term*“ (Schulz 2024b, S. 389). Der *strategische* Planungshorizont beschreibt nun Tätigkeiten über den *taktischen* Planungshorizont hinaus. Folgendes

Tätigkeitsbeispiel fällt in diesen Planungshorizont: „*far in the future where we're planning for future facilities, how do we make it flexible*“ (Schulz 2024b, S. 388). Des Weiteren wird ein weiteres Beispiel für den *strategischen* Planungshorizont angegeben: „*the integration comes in where you can use standard components*“ (Schulz 2024b, S. 434).

Flexibilitätsaspekte

Die Fragen aus dem Interviewleitfaden zur Relevanz der Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell ergeben, dass sieben der acht Aspekte als relevant angesehen werden. Für die *Modularität* wird z. B. gesagt: „*something that has to be or should be done in order to accomplish the other aspects*“ (Schulz 2024b, S. 469).

Des Weiteren haben die Interviewten mehrere Aussagen zur *Diagnosefähigkeit* getätigt. In einem Interview wird gesagt „*diagnosability, I think that's actually quite important and that's a very good one. [...] In terms of just automation*“ (Schulz 2024b, S. 426). Ein weiteres Statement aus einem anderen Interview lautet „*you should always be measuring your results*“ (Schulz 2024b, S. 469). Trotz dieser Einschränkungen wird *Diagnosefähigkeit* von der Mehrheit der Interviewten aus dem Fall „Luxus“ als relevant für die Flexibilität eingeschätzt.

Zusätzlich wird die Relevanz der Flexibilitätsaspekte *Wiederverwendbarkeit*, *Konvertierbarkeit* und *Integrierbarkeit* während der Interviews eingeschränkt. Laut der Interviewten ist *Integrierbarkeit* ein Teil der *Anpassbarkeit* und sollte in diesen integriert werden. Dieses Zusammenfassen wird wie folgt begründet: „*Customization and integrability together. [...] I think customization has a broader attachment*“ (Schulz 2024b, S. 398). Darüber hinaus wird vorgeschlagen auch die *Konvertierbarkeit* mit der *Anpassbarkeit* zusammenzufassen, da die beiden Aspekte nicht klar voneinander zu unterscheiden sind – in Bezug auf die Umsetzung in Montageanlagen.

Für den Aspekt *Wiederverwendbarkeit* schlagen die Experten des Falls „Luxus“ ein Zusammenfassen mit zwei unterschiedlichen Flexibilitätsaspekten vor. Erstens mit *Mobilität* und zweitens mit *Integrierbarkeit*. Die Statements aus der iK7d beschreiben dazu einerseits „*mobility and reusability [...], because it is from multiple locations then possible to be used at different locations. It's the same thing really*“ (Schulz 2024b, S. 420) sowie „*[reusability] keep it in mobility, but the reusability falls under that title*“ (Schulz 2024b, S. 420). Und andererseits „*so integration and reusability, they're very similar, aren't they? If you can integrate it, you can, you can start reusing it*“ (Schulz 2024b, S. 470). Somit scheint der Flexibilitätsaspekt *Wiederverwendbarkeit* in dem Fall „Luxus“ kein eigener Flexibilitätsaspekt einer Montageanlage zu sein.

Im Rahmen der Gespräche wurde noch ein weiterer, zusätzlicher Flexibilitätsaspekt vorgeschlagen. Ein Interviewter nennt die *Maintainability* als Aspekt. Dieser Aspekt beschreibt „*how easy is it for maintenance to make changes or to fix things [...]*“ (Schulz

2024b, S. 393). Im Zuge des Interviews wird jedoch zu *Maintainability* gesagt: „*In order for it to be flexible. Yeah, you need it to be usable, and if it's not maintained, it won't be usable*“ (Schulz 2024b, S. 396). Dieses Statement kann somit der *iK7b* – *Eingangsgröße* zugeordnet werden und beschreibt eine Bedingung für ein Umsetzen der Flexibilität.

Für den nächsten Themenblock aus dem Interviewleitfaden wird die Wichtigkeit der Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell bewertet. Eventuelle Zusammenfassungen der Interviewten finden hier noch keine Anwendung. Die *Modularität* wird jedoch bereits als Eingangsgröße angesehen und ist somit nicht Teil der Bewertung. Als wichtigster Flexibilitätsaspekt wird die *Anpassbarkeit* genannt, gefolgt von der *Skalierbarkeit* auf Rang zwei. Die Faktoren *Integrierbarkeit* und *Mobilität* folgen darunter. Die letzten beiden Ränge belegen die *Konvertierbarkeit* und auf dem geteilten letzten Platz sind *Diagnosefähigkeit* und *Wiederverwendbarkeit*. Die Abbildung 26 zeigt das Prioritätsranking des Falls „Luxus“.

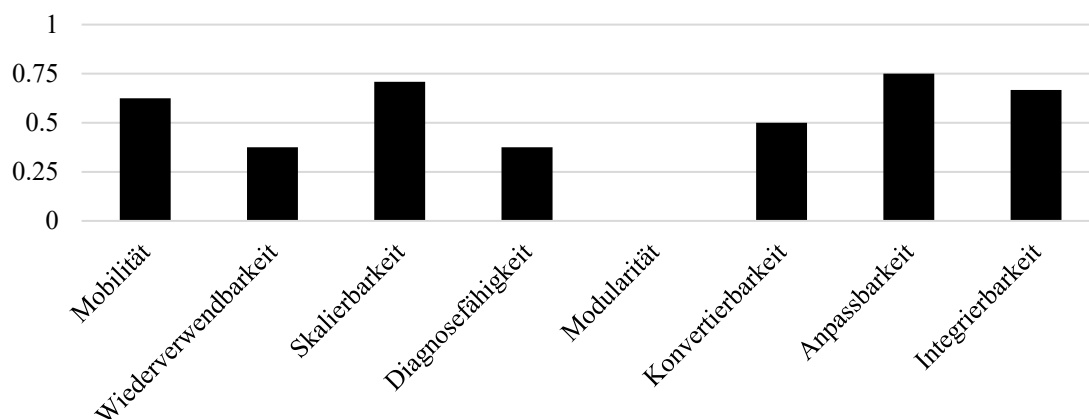


Abbildung 26: Darstellung des Prioritätsrankings des Falls „Luxus“

Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität

Folgend wurden von den Interviewten Umsetzungsmöglichkeiten für die Flexibilität in Montageanlagen angegeben. Die *Skalierbarkeit* als einer der wichtigsten Flexibilitätsaspekte kann laut den Interviewten hauptsächlich über das Bilden von Vorhalten umgesetzt werden. So könnte die Produktion kurzfristig verdoppelt werden. Hierzu ein Statement aus der *dHk3* zum Bilden von Vorhalten: „*Are we going to have any more roofs in future? What was the future plan? OK, so we reserve those spaces. So we think currently we have two different roofs, but in the future we may have five*“ (Schulz 2024b, S. 405).

Die Umsetzung der Flexibilität über Vorhalte wird in dem Fall „Luxus“ auch für die *Anpassbarkeit* als auch die *Konvertierbarkeit* genannt. Des Weiteren sind zusätzlich sowohl Produktstandards und Universalgreifer notwendig, um die *Anpassbarkeit*, *Konvertierbarkeit* und auch die *Wiederverwendbarkeit* zu erreichen. Hierbei wird durch die Experten

der Vorteil von Universalgreifern im Vergleich zu spezifischen Greifern erläutert: „*Specialised tool. It then is not so easy [to reuse] and things become old and finding parts is difficult for them and maintaining them is difficult and by that time technology may have moved on*“ (Schulz 2024b, S: 400).

Auch der Einsatz von Modulen spielt eine große Rolle bei der Umsetzung der Flexibilitätsaspekte. Die *Wiederverwendbarkeit*, *Anpassbarkeit*, *Integrierbarkeit*, *Konvertierbarkeit* und *Skalierbarkeit* können nach dem Fall „Luxus“ durch Module umgesetzt werden. Zu der *Skalierbarkeit* passt ein Statement aus der dHk3: „*With one cell I just double it up to build four cars instead of two cars. It's that scalability and it's just the same module. It's a copy and paste, copy and paste*“ (Schulz 2024b, S. 399).

Beobachtung

Im Zuge der Beobachtungen wurden ausgewählte Montageanlagen des Luxus OEMs betrachtet. Aufgrund eines geringen *Automatisierungsgrades* konnten nur wenige Montageanlagen analysiert werden. Die vorhandenen Anlagen berücksichtigen jedoch bereits Flexibilitätsaspekte in der Gestaltung.

Durch die Einbringung von Vorhalten – in diesem Fall eine Überdimensionierung an Platz und Geschwindigkeit in den Montageanlagen – konnten die Aspekte *Skalierbarkeit* und *Integrierbarkeit* umgesetzt werden. Die *Skalierbarkeit* kann in dieser Gestaltung in einem *operativen* Planungshorizont geändert werden. Eine Integration erfordert hingegen einen etwas längeren Zeitraum, da auch physische Bauteile in der Montageanlage ergänzt werden müssten.

Zusätzlich sind die Montageanlagen in der Fabrik des OEMs in der Lage, wiederverwendet zu werden. Durch Module können Teile der Montageanlage für einen neuen Anwendungsfall weiter- oder wiederverwendet werden. Dies ist jedoch lediglich in einem *strategischen* Planungshorizont möglich, da die Wiederverwendung erst nach dem Ende der aktuellen Nutzung erfolgen kann.

5.2.4 Analyse des Falls „Premium“

In dem Fall „Premium“ wurden vier Experten aufgeteilt in Anlagen- und Automatisierungsplanung in die Datenaufnahme integriert. In der Fabrik des Premium OEMs aus der Multiple Case Study werden vor allem Fahrzeuge aus den Segmenten D bis F montiert. Dazu kommen noch Fahrzeuge aus dem Segment J.

Planungsprozess inkl. Planungshorizonte

Für den Teil der Interviews, der die Planungshorizonte betrifft, wird zu Beginn die Vollständigkeit der Planungshorizonte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell erfragt. 50% der Befragten könnten sich vorstellen, einen der drei vorgeschlagenen Planungshorizonte zu streichen, wenn die Aufgaben in der Planung von Montageanlagen betrachtet

werden. Dazu Statements aus der iK2b: „Mindestens zwei [Planungshorizonte]. [...], du hast einmal das aktive Fahrzeugprojekt das du umsetzen möchtest und dafür musst du ja kurzfristig was tun und umsetzen. Aber [...]man müsste irgendwie ein Nachfolgefahzeug auch immer mit betrachten“ (Schulz 2024c, S. 197) und „[...] über diesen mittelfristig könnte man vielleicht sogar diskutieren“ (Schulz 2024c, S. 237).

Die weiteren Experten des Falls „Premium“ stimmen den Inhalten aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell zu.

Die Wichtigkeit der Planungshorizonte wird mit den nächsten Fragen ermittelt. Aus Planungssicht der Planungshorizonte wird der *strategische* Planungshorizont als am wichtigsten angesehen. Es wird folgendes Statement dazu gegeben „für die wirkliche Automatisierung ist eigentlich das Strategische mit am wichtigsten“ (Schulz 2024c, S. 241). In Ergänzung sagt ein anderer Experte „ich will mich ja künftig aufstellen und nicht im Tagesgeschäft rumexperimentieren“ (Schulz 2024c, S. 282), sodass der *operative* Planungshorizont am unwichtigsten bewertet wird.

Im Kontrast wird aus Reaktionssicht, der *taktischen* Planungshorizont als am wichtigsten und der *Strategische* als am unwichtigsten angesehen. Auch die Wichtigkeit des *operativen* Planungshorizonts wird in einem Interview hervorgehoben: „also vom Arbeitsumfeld her ist natürlich der operative wichtig, also das muss ja funktionieren. Was später kommt, weiß man erstens noch nicht und ist im zweiten Schritt dann deswegen auch noch gar nicht so wichtig“ (Schulz 2024c, S. 202).

Nach der Wichtigkeit der Planungshorizonte werden diese definiert. Der *operative* Planungshorizont geht nach den Experten bis zu einem Zeitraum von zwei Jahren. Beispiele dazu sind „ein Modellzyklus“ (Schulz 2024c, S. 237), „Typintegrationen“ (Schulz 2024c, S. 320), also kleine Produktänderungen oder andererseits „operativ ist immer, was ungeplant schnell passieren muss“ (Schulz 2024c, S. 325).

Darüber hinaus geht der *taktische* Planungshorizont laut den Experten bis zu vier Jahren in die Zukunft. Es werden Fahrzeugintegrationen oder der Projektstart von weiteren Modellderivaten als Beispiele genannt.

Alles, was den *taktischen* Planungshorizont überschreitet, ist damit dann dem *strategischen* Zeitraum zuzuordnen. Der *strategische* Planungshorizont beschreibt dann Tätigkeiten über Fahrzeugprojekte hinweg, „das sind sogar noch andere Technologien die mit dazu spielen“ (Schulz 2024c, S. 323). Die Zeiträume der Planungshorizonte sind in der Abbildung 27 als Boxplots dargestellt.

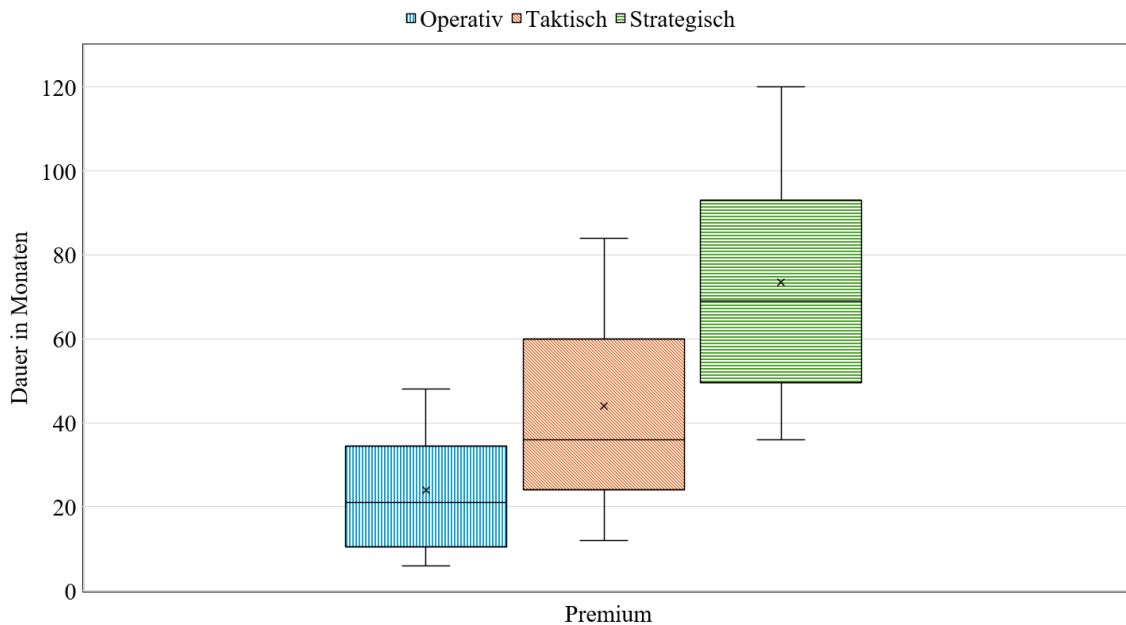


Abbildung 27: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „Premium“

Flexibilitätsaspekte

Die Analyse der Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell des Falls „Premium“ ergibt, dass lediglich sechs der acht Flexibilitätsaspekte als relevant angesehen werden. Die *Diagnosefähigkeit* und *Modularität* sind nach den Interviewten nicht Teil der Beschreibung der Flexibilität. Zu der *Diagnosefähigkeit* sagen die Experten „[...] also grundsätzlich muss jede Anlage diagnosefähig sein, das ist nichts flexibilitäts-spezifisches“ (Schulz 2024c, S. 211) und „[...] das ist eigentlich eine Grundfunktion, die hat mit flexibel gar nichts zu tun“ (Schulz 2024c, S. 247). Diese Statements beschreiben somit aus der iK7a die *Diagnosefähigkeit* als allgemeine Funktion für Montageanlagen. In Bezug auf die *Modularität* kann ein Statement aus der iK7b angegeben werden: „[bei der Modularität] könnten wir es sogar ähnlich spielen [Grundfunktion analog Diagnosefähigkeit], wobei ich glaube, modular ist jetzt eher in dem Sinne, dass man sagt, man hat gleichartige Anlagenteile“ (Schulz 2024c, S. 247) so können dann Flexibilitätsaspekte umgesetzt werden.

Von allen Interviewten wird lediglich die *Skalierbarkeit* als uneingeschränkt relevant angesehen. Die übrigen Flexibilitätsaspekte – *Mobilität*, *Wiederverwendbarkeit*, *Konvertierbarkeit*, *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* – werden durch die Interviewten in der Relevanz eingeschränkt. Einerseits sagt ein Experte, „es hat jeder eine Daseinsberechtigung“ (Schulz 2024c, S. 205). Und andererseits schlagen einige Statements ein Zusammenfassen von Flexibilitätsaspekten an.

Zum einen wird vorgeschlagen *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* zu einem Flexibilitätsaspekt zusammenzufassen. Ein passendes Statement dazu lautet: „Neue Aufgaben

[Anpassbar] weil die Aufgabenempfänge müssen sich ja dann ähneln, wenn es wo integriert werden soll und das wäre dann eine zweite Aufgabe in dem Sinn“ (Schulz 2024c, S. 209).

Des Weiteren schlagen mehrere Experten vor, *Konvertierbarkeit* und *Anpassbarkeit* zusammenzufassen. Begründet wird dies mit einem fließenden Übergang in der technischen Umsetzung der beiden Aspekte: „was ist jetzt zwischen konvertierbar und anpassbar [der Unterschied]. Das ist für mich fließend“ (Schulz 2024c, S. 245).

Es wird auch eine dritte Kombination der Flexibilitätsaspekte von den Experten vorgeschlagen. Die *Mobilität* und *Wiederverwendbarkeit* könnten zusammengefasst werden, da diese ähnliche technische Umsetzungsmöglichkeiten bedingen.

Die Interviewfragen zu der Wichtigkeit folgen auf die Relevanz der Flexibilitätsaspekte. Aggregiert über die Interviews des Falls „Premium“ ist die *Anpassbarkeit* am wichtigsten, gefolgt von der *Skalierbarkeit*. Darauf folgen die *Integrierbarkeit*, die *Mobilität* und *Wiederverwendbarkeit*. Mit Abstand am unwichtigsten war die *Konvertierbarkeit*.

Das Ranking wurde durch die eventuellen Zusammenfassungen der Flexibilitätsaspekte beeinflusst, da einige Experten ihre Zusammenfassungen der Flexibilitätsaspekte in das Ranking übernommen haben. Die Ansichten der Experten zur *Diagnosefähigkeit* und *Modularität* wurden in der Abbildung bereits umgesetzt, sodass diese nicht im Ranking inkludiert sind. Ein Ranking dieses Falls ist in der Abbildung 28 dargestellt.

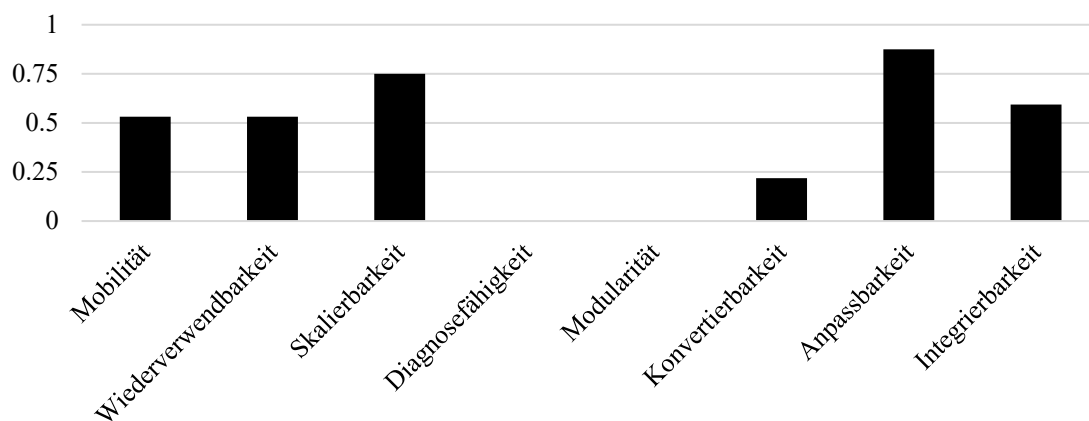


Abbildung 28: Darstellung des Prioritätsrankings des Falls „Premium“

Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität

Weitergehend beschreiben die Interviewten Umsetzungsmöglichkeiten für die Flexibilitätsaspekte. Für die *Anpassbarkeit* schlagen die Interviewten verschiedene Möglichkeiten für die Umsetzung in Montageanlagen vor. Nach standardisierten Bauteilen und Produkten werden von der Mehrheit der Experten vor allem Vorhalte als Möglichkeit genannt.

Die Umsetzungsmöglichkeit des Überdimensionierens – also das Bilden von Vorhalten – wird auch für die *Konvertierbarkeit* und *Skalierbarkeit* angegeben. Für die *Konvertierbarkeit* kann so Platz für neue, andere Aufgaben in der Montageanlage geschaffen werden. Im Zuge der *Skalierbarkeit* kann durch eine Überdimensionierung auf eine gestiegene Nachfrage kurzfristig reagiert werden. Ein Experte schränkt das Bilden von Vorhalten durch ein Statement aus der dHk3 ein: „*skalierbar ist das nächste Thema, wobei man dann irgendwann aufpassen muss beim Skalieren ist halt wie weit hoch will ich skalieren, da brauche ich schon wieder ein strategisches Ziel*“ (Schulz 2024c, S. 246). Die Einschränkung ändert jedoch nichts an der grundsätzlichen Möglichkeit, die *Skalierbarkeit* über Vorhalte umzusetzen.

Ein weiterer Flexibilitätsaspekt kann nach den Interviewten über die Einplanung von Vorhalten umgesetzt werden – *Integrierbarkeit*. Durch vorgehaltenen Platz können, neue Produkte integriert werden.

Weitere Umsetzungsmöglichkeiten – für die *Integrierbarkeit* – sind nach den Interviewten Universalgreifer, Module und sogenannte Schnellkupplungen für die Endeffektoren an den Robotern. Die Schnellkupplungen beschreiben technisches Equipment, mit dem Komponenten der Montageanlagen in kurzer Zeit ausgetauscht werden können, z. B. Greiferwechselsysteme. Die Basis sind Standardschnittstellen der einzelnen Komponenten. Dazu ein Statement aus der dHk3: „*Wirklich einfach abzukoppeln und die Struktur in der Halle so auszulegen, dass ich auch an jedem beliebigen Ort ohne großen Aufwand aufzubauen*“ (Schulz 2024c, S. 306).

Wie auch die *Integrierbarkeit* kann laut den Statements aus dem Fall „Premium“ auch die *Wiederverwendbarkeit* durch den Einsatz von Modulen umgesetzt werden. „*Also die Wiederverwendbarkeit bedingt eigentlich, dass ich einzelne Module habe*“ (Schulz 2024c, S. 327) sagt ein Experte. Zusätzlich werden Standards als Umsetzungsmöglichkeit der *Wiederverwendbarkeit* angegeben. So kann auch in kurzer Zeit die Montageanlage wiederverwendet werden.

Für die *Mobilität* stellen auch die Schnellkupplungen eine Umsetzungsmöglichkeit dar. Für größere Montageanlagen beschreiben die Experten des Falls „Premium“ noch eine weitere Umsetzungsmöglichkeit für die *Mobilität*. Ein Experte schlägt vor, die gesamte Montageanlage auf Platten zu stellen, um diese z. B. durch Transportmittel wie Gabelstapler an einen anderen Verwendungsort innerhalb der Montage zu bringen. Die Reaktionsgeschwindigkeit kann nach den Experten durch diese Gestaltung erhöht werden: „*Du bist dann einfach schneller. Habe ich auch schon gesehen von einer Firma [...], die haben das Ganze ähnlich wie Seecontainer gebaut*“ (Schulz 2024c, S. 334).

Beobachtung

Bei der *teilnehmenden Beobachtung* innerhalb der Montage des Premium OEMs wurden bereits einige der Flexibilitätsaspekte in den Montageanlagen umgesetzt. Die *Wiederverwendbarkeit*, *Skalierbarkeit* und *Anpassbarkeit* sind in den Montageanlagen bereits integriert.

Standardisierte Schnittstellen ermöglichen die *Wiederverwendbarkeit*, wodurch Komponenten der Montageanlage nach der initialen Nutzung für neue Aufgaben eingesetzt werden können.

Die *Skalierbarkeit* wird – wie in den Interviews beschrieben – durch Vorhalte in Hard- und Software umgesetzt.

Zuletzt wird die *Anpassbarkeit* durch Universalgreifer umgesetzt, welche in Kombination mit entsprechenden Produktstandards eine schnelle Reaktion auf Änderungen ermöglicht. Durch diese Gestaltung der *Anpassbarkeit* ist auch eine Integration eines gleichen Montageprozesses in den Montageanlagen im *taktischen* Planungshorizont möglich.

5.2.5 Analyse des Falls „LNFZ“

In dem Fall „LNFZ“ wurden in Summe vier Experten aus Anlagen- und Automatisierungsplanung in die Datenaufnahme integriert. Eine Besonderheit in dem Fall „LNFZ“ ist, dass eine stark abweichende Variante eines Fahrzeugs von diesem OEM an einem weiteren Ort zu Ende gebaut wird, um die Varianz unter Kontrolle zu halten. In der Fabrik des LNFZ OEMs aus der Multiple Case Study werden vor allem Fahrzeuge aus dem Segment M montiert.

Planungsprozess inkl. Planungshorizonte

Zu Beginn der Interviews wird die Vollständigkeit der Planungshorizonte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell von den Experten bewertet. Der Konsens innerhalb dieses Falls ist, dass nicht mehr als die drei Planungshorizonte erforderlich sind. Ein Statement unterstreicht dies: „*die kennt man kurzfristig, mittelfristig, langfristig und in unterschiedlichen Themengebieten wird das ja so verfolgt*“ (Schulz 2024a, S. 1).

Jedoch gibt die Mehrheit der Interviewten an, dass eventuell weniger als die drei Planungshorizonte ausreichen könnten. „*wenn man was weglassen kann, dann denke ich eher kurzfristig*“ (Schulz 2024a, S. 29) und „*frage ist, ob man kurzfristig nicht auch streichen könnte in der ganzen Bewertung [...]*“ (Schulz 2024a, S. 6) sprechen für eine Reduktion der vorgeschlagenen Planungshorizonte.

In den weiteren Verläufen der Gespräche ergibt sich jedoch, dass die drei Planungshorizonte beibehalten werden können. Die Experten begründen dies mit: „*weil könnte ja was kommen an Anforderungen und die kann man ja auch dann. Sag ich mal realisieren ja, für einige wenige Prozesse in der Montage ne nicht für ne ganze Montage*“ (Schulz 2024a,

S. 6). Hier wird zwar die Relevanz des *operativen* Planungshorizonts bekräftigt, zeitgleich jedoch eingeschränkt, da nicht alle Tätigkeiten in der Planung von Montageanlagen in diesem Planungshorizont umsetzbar sind.

Eine weitere Sondersituation wird für den Flexibilitätsaspekt *Mobilität* beschrieben. Ein zusätzlicher Planungshorizont „*sehr kurzfristig*“ (Schulz 2024a, S. 6) könnte ergänzt werden: „*natürlich brauche ich jetzt so eine Mobilität sofort*“ (Schulz 2024a, S. 17). Jedoch fällt dieser Vorschlag in den *operativen* Planungshorizont und stellt einen Sonderfall innerhalb dieses Planungshorizonts dar, sodass der sehr kurzfristige Planungshorizont nicht ergänzt wird.

Der nächste Bereich des Interviewleitfadens befasst sich mit der Priorität der Planungshorizonte und versucht zu ermitteln, welcher Planungshorizont für die Flexibilität am ausschlaggebendsten ist.

Die Planungssicht beschreibt zu Beginn den *operativen* Planungshorizont als am unwichtigsten. Dies passt zu den Statements, in welchen die Reduktion der Planungshorizonte durch ein potenzielles Streichen des *operativen* Planungshorizonts andiskutiert wurde. Ein Statement aus der *iK1a* sagt dazu „*das kurzfristige [planen] wäre ein Einzelfall, ein Sonderfall [...]*“ (Schulz 2024a, S. 3). Der wichtigste Planungshorizont nach den LNFZ Experten ist der *Taktische*. Dazu passt folgendes Statement „*im Endeffekt unsere Projekte dauern ja länger, [...] wir gucken immer auf drei bis vier Jahre*“ (Schulz 2024a, S. 3). Zusätzlich wird auch die Wichtigkeit des *strategischen* Planungshorizonts bekräftigt „*für mich ist die Ausrichtung tatsächlich zu sagen, was mach ich denn mittelfristig und langfristige*“ (Schulz 2024a, S. 1).

Im Kontrast zur Planungssicht beschreibt die Reaktionssicht ein abweichendes Prioritätsranking. Der *operative* Planungshorizont wird nun als am wichtigsten beschrieben. Mehrere Statements beschreiben dies: „*Am schönsten wäre natürlich, wenn man eine Flexibilität so schnell wie möglich umsetzen kann. Wenn das operative dann in den Vordergrund rückt*“ (Schulz 2024a, S. 60), „*wenn die Anlage flexibel eingesetzt werden soll, brauchen wir die Flexibilität ganz kurzfristig*“ (Schulz 2024a, S. 19) und „*wenn ich das jetzt aus der Produktion sehe. Wäre natürlich operativ, dass die Anlage erst einmal funktioniert, am wichtigsten*“ (Schulz 2024a, S. 52). All diese Statements führen zu dem Ranking des *operativen* Planungshorizonts. Nach dem *operativen* Planungshorizont folgt der *Taktische* auf dem zweiten Rang und der *Strategische* auf dem dritten Rang.

Die Definition der einzelnen Planungshorizonte folgt auf das Prioritätsranking. Der Zeitraum für den *operativen* Planungshorizont reicht für die Experten von wenigen Stunden, Wochen bis hin zu maximal drei Jahren. Im Mittel über die Interviews des Falls „LNFZ“ ergibt sich der Zeitraum zu knapp über zwei Jahren. Als Projektbeispiel wird das Tagesgeschäft genannt: „*operativ [...], das ist ja das was du aktuell gerade*

machst“ (Schulz 2024a, S. 51) und „kurzfristig ist die nächste Anlage [oder] Montage, die wir planen“ (Schulz 2024a, S. 4).

Der *taktische* Planungshorizont darüber hinaus wird im Mittel mit fünf Jahren angegeben. Die Angaben reichen von vielen Wochen bis zu mehreren Jahren. Verschiedene Projekt-tätigkeiten werden von den Interviewten für den Planungshorizont angegeben. Zum einen geht es, im *taktischen* Planungshorizont in Bezug auf ein Fahrzeugprojekt um ein „*neues Derivat oder bei einer Modellpflege was zu machen*“ (Schulz 2024a, S. 28) und des Weiteren geht es auch um übergeordnete Aufgaben wie z. B. „*wir automatisieren Bereiche, behalten aber noch aktuell manuelle schwierige Prozesse wie Leitungsverlegungen [...] wo wir der Meinung sind oder auch Bewertungen gemacht haben, dass sie aktuell nicht wirtschaftlich automatisierbar sind*“ (Schulz 2024a, S. 2).

Bezogen auf den *strategischen* Planungshorizont gibt die Mehrheit der Interviewten an, dass dieser Planungshorizont bis zu 10 Jahre und darüber hinaus Tätigkeiten beschreibt. Dies wäre bspw. ein vollständig neues Fahrzeugprojekt, welches über ein neues Derivat oder eine Modellpflege hinaus geht. Die Abbildung 29 zeigt in Ergänzung einen Boxplot der Planungshorizonte aus dem Fall „LNFZ“.

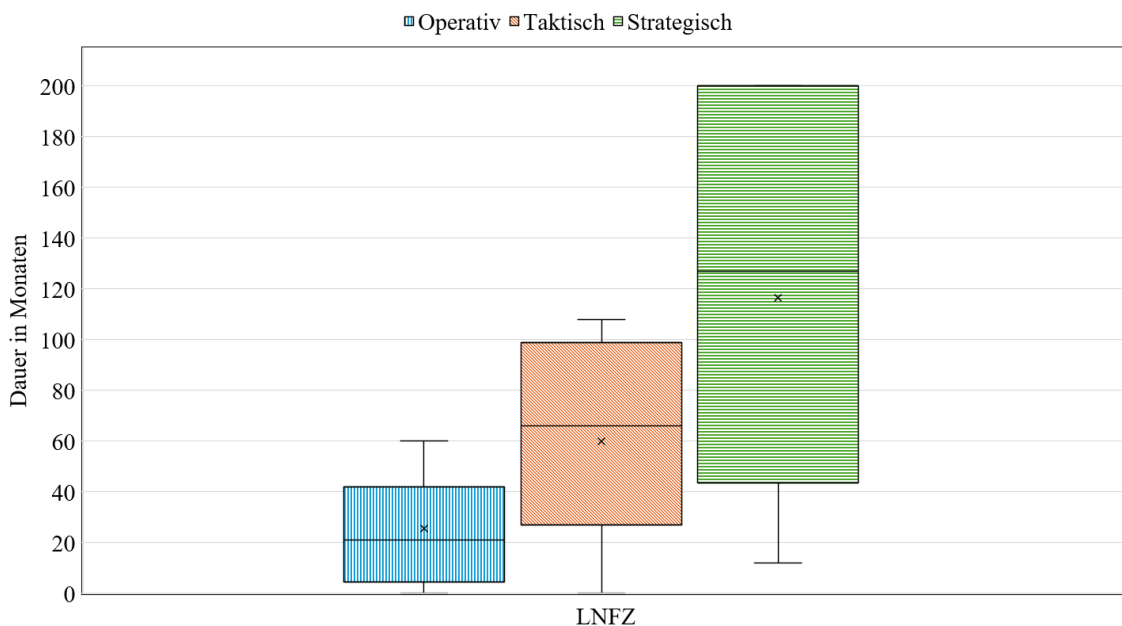


Abbildung 29: Boxplot der Planungshorizonte des Falls „LNFZ“

Flexibilitätsaspekte

Die Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell werden von den Experten weitestgehend bestätigt. Lediglich der Aspekt *Diagnosefähigkeit* wird von allen Interviewten als nicht Teil der Beschreibung der Flexibilität gesehen. Zur *Diagnosefähigkeit* werden aus der iK7a folgende Statements abgegeben. Zum einen „*[Diagnosefähigkeit] sehr wichtig, unabhängig davon, ob die Anlage flexibel ist*“ (Schulz 2024a, S. 39)

und zum anderen „*Diagnosefähig sehe ich erstmal nicht ganz so wichtig in Bezug auf eine flexibel aufgebaute Anlage*“ (Schulz 2024a, S. 66).

In Bezug auf die anderen Flexibilitätsaspekte wurde auch *Modularität* weitestgehend als nicht relevant angesehen. Die Mehrheit sieht die *Modularität* als Eingangsgröße für eine Flexibilität. Folgendes wird angegeben, einerseits „*man muss modular sein, um überhaupt flexibel sein zu können*“ (Schulz 2024a, S. 40) und andererseits „*[Modularität] also du wirst dadurch ja nicht flexibler*“ (Schulz 2024a, S. 56).

Die Flexibilitätsaspekte – *Mobilität, Skalierbarkeit, Konvertierbarkeit und Anpassbarkeit* – werden von allen Interviewten als relevant angesehen. Die weiteren zwei Aspekte – *Wiederverwendbarkeit* und *Integrierbarkeit* – werden teils als relevant angesehen und teils mit anderen Aspekten zusammengefasst.

Die meisten Experten sehen die *Wiederverwendbarkeit* im Zusammenhang mit der *Mobilität*. Es wird angegeben, dass der Aspekt *Wiederverwendbarkeit* in das gleiche Themengebiet geht, wie die *Mobilität*. Ein Statement sagt: „*wenn ich es generell mobil einsetzen kann, kann ich es auch wo anders wiederverwenden*“ (Schulz 2024a, S. 52). Ein weiterer Experte bestätigt dieses Statement mit, „*wenn eine Anlage mobil ist, dann kann ich die auch wiederverwenden. An einer anderen Stelle oder wenn sie wiederverwendbar ist, ist sie für mich auch mobil. Die beiden Sachen bedingen sich irgendwie so gegenseitig*“ (Schulz 2024a, S. 65). Ein dritter Experte sagte darüber hinaus, dass die *Wiederverwendbarkeit* eine strategische Art der *Mobilität* sei.

Für die *Integrierbarkeit* wird vorgeschlagen, diese mit der *Konvertierbarkeit* und *Anpassbarkeit* zusammenzufassen, „*weil konvertierbar – Änderungen der Aufgaben möglich – und anpassbar – mehrere Aufgaben bei gleichen Fügeverfahren – die Integrierbarkeit schon einschließen*“ (Schulz 2024a, S. 64). So wird angegeben, dass wenn die Aspekte *Konvertierbarkeit* und *Anpassbarkeit* in einer Montageanlage umgesetzt sind, auch eventuelle Integrationen ermöglicht werden.

In Bezug auf das Zusammenfassen von Flexibilitätsaspekten wird grundsätzlich gesagt, dass wenn Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell zusammengefasst werden, die Präzision der Unterscheidung zwischen den Aspekten leidet.

Die Flexibilitätsaspekte werden in den folgenden Fragen des Leitfadens priorisiert. Über den gesamten Fall „LNFZ“ ergibt sich die *Anpassbarkeit* als wichtigster Aspekt mit der *Skalierbarkeit* folgend auf dem zweiten Rang. Zu der *Skalierbarkeit* wird bspw. gesagt, „*Skalierbarkeit nach oben setzen. Dass ich frei über die Stückzahlen verfügen kann*“ (Schulz 2024a, S. 53). So könnten alle Stückzahlen wirtschaftlich in einer Montage umgesetzt werden. Die *Konvertierbarkeit* und *Mobilität* folgen in der Rangfolge auf die *Skalierbarkeit*.

In der Rangfolge folgen daraufhin *Integrierbarkeit*, *Wiederverwendbarkeit* und *Modularität*. Zur *Wiederverwendbarkeit* sagt ein Experte: „*Wiederverwendbar ist ein Thema, was ich nicht ganz nach oben priorisieren würde und werde, weil das bei uns im Business gar nicht so häufig vorkommt*“ (Schulz 2024a, S. 9). Bei den letzten drei Rängen ist anzumerken, dass die *Integrierbarkeit* und *Wiederverwendbarkeit* als zugehörig zu anderen Flexibilitätsaspekten gesehen wurden, und die *Modularität* wurde lediglich von einem Experten als relevant angesehen, was die geringere Priorität erklären kann.

Die Zusammenfassung der Prioritätsbewertung der Flexibilitätsaspekte ist in der Abbildung 30 abgebildet.

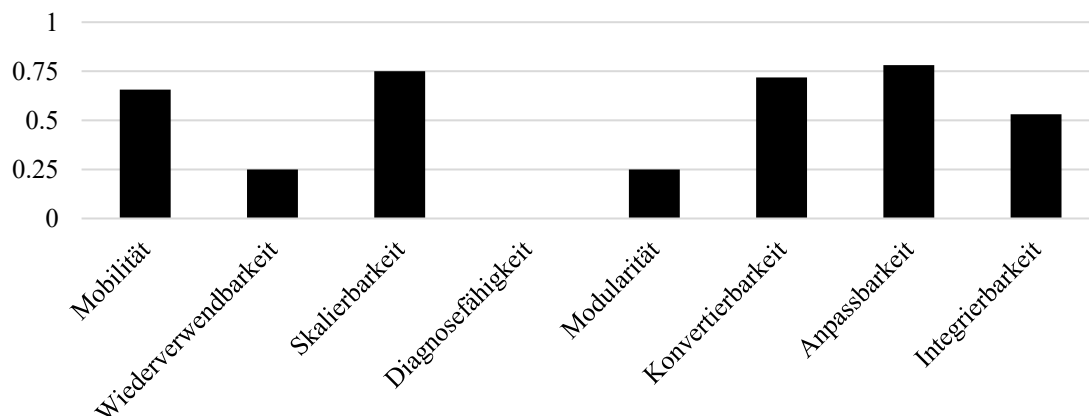


Abbildung 30: Priorität der Flexibilitätsaspekte in dem Fall „LNFZ“

Das vorgeschlagene Zusammenfassen der Flexibilitätsaspekte ist in dieser Prioritätsbetrachtung noch nicht integriert.

Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität

Zuletzt werden zu den Flexibilitätsaspekten noch potentielle Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilitätsaspekte erfragt. Beginnend mit der *Anpassbarkeit*, geben die Experten einerseits Standards in der Hard- und Software und den Produkten sowie Vorhalte an. Zu der Hard- und Software sagen die Experten „*neue Aufgaben,[...] einfach einzubinden mit Docking*“ (Schulz 2024a, S. 7) sodass der Greifer „*ausschlaggebend für die Anpassbarkeit ist*“ (Schulz 2024a, S. 24). Zu den Produktstandards folgen weitere Statements. Diese helfen der *Anpassbarkeit*, wenn Bauteile „*eine z. B. Aufnahme dran [haben] die immer gleich ist*“ (Schulz 2024a, S. 55).

Die *Skalierbarkeit* als zweiter Aspekt in der Rangfolge lässt sich nach den Interviewten durch Vorhalte – also ein Überdimensionieren der Hard- und Software – erreichen. So wird ermöglicht, dass schneller produziert werden kann. Im Zuge der Überdimensionierung der *Skalierbarkeit* sagt ein Statement „*[es ist im] Endeffekt eine Prämisse bei Herstellung und beim Bau der Anlage. Wir werden dort immer ein Limit setzen müssen, das hat auch was mit dem wirtschaftlichen Faktor zu tun*“ (Schulz 2024a, S. 8).

Der nächste Aspekt – *Konvertierbarkeit* – kann vor allem über Module und Standardanlagenbestandteile umgesetzt werden, wodurch eine Anpassung für neue Aufgaben ermöglicht wird.

Darüber hinaus wird für die *Mobilität* angegeben, dass diese über FTF, Räder oder andere Transportmittel umgesetzt werden kann. Auch sagen die Experten, dass es möglich ist, die Montageanlage auf eine Platte zu stellen, welche dann bewegt werden kann. Ein Experte schränkt die Anwendbarkeit der *Mobilität* jedoch ein. Das Statement aus der *dHk3* lautet: „*Mobilität geht wahrscheinlich nur bei kleineren Stationen*“ (Schulz 2024a, S. 49). Der Experte hat sich mit der Hochzeit in der Montage des OEMs beschäftigt. Durch die großen miteinander verketteten Montageanlagen scheint die *Mobilität* kein sinnvoller Anwendungsfall für den Experten zu sein.

Der nächste Flexibilitätsaspekt *Integrierbarkeit* kann ebenfalls über Vorhalte umgesetzt werden. Durch extra Platz in Montageanlagen, wird eine Integration erleichtert. Zusätzlich ist der Einsatz von Modulen eine Art und Weise zum Umsetzen der *Integrierbarkeit*. Dies „*macht es natürlich einfacher für die Anlage und für die Integration*“ (Schulz 2024a, S. 56). So kann die Integration von weiteren Fahrzeugen in die Montage schneller erfolgen.

Bezogen auf die *Wiederverwendbarkeit* wird der Einsatz von Modulen als Umsetzungsmöglichkeit angegeben. Da ein Experte auch die *Modularität* als Flexibilitätsaspekt versteht – und nicht als Eingangsgröße –, kann auch für die *Modularität* eine Möglichkeit zur Umsetzung angegeben werden. Eine *Modularität* kann bspw. durch Standards in Hard- und Software umgesetzt werden, welche dann als Module in Montageanlagen implementiert werden können.

Beobachtung

Nach den Interviews folgte die *teilnehmende Beobachtung* – gemeinsam mit den Experten – an den jeweiligen Montageanlagen in einer Fabrik des OEMs. Der wichtigste Flexibilitätsaspekt *Anpassbarkeit* ist in der Montage des OEMs noch nicht zu sehen. Die Anlagentechnik wäre in einem gewissen Rahmen dazu in der Lage, es fehlen jedoch Standards in den Produkten, welche eine *Anpassbarkeit* im *operativen* Planungshorizont ermöglichen würden.

Die *Skalierbarkeit* jedoch ist bereits in den Montageanlagen implementiert. Durch das Überdimensionieren der Montageanlage kann auf z. B. Änderungen in der Stückzahlanforderung reagiert werden.

Für die *Konvertierbarkeit* konnten ähnliche Themen beobachtet werden, wie für die *Anpassbarkeit*. Eine Umsetzung ist derzeit nicht zu sehen.

Die *Wiederverwendbarkeit* ist durch Standardschnittstellen bereits möglich und auch schon umgesetzt worden. Die Hochzeit stellt dabei eine besondere Montageanlage dar. Eine *Wiederverwendbarkeit* ist hier grundsätzlich möglich, wurde jedoch in der Vergangenheit nicht genutzt, da dies im Gesamtsystem der Montage zu komplex geworden wäre. Stattdessen wurde für ein neues Fahrzeugprojekt eine neue, weitere Montageanlage aufgebaut.

Weitere Flexibilitätsaspekte konnten nicht in den Montageanlagen in der Fabrik der Case LNFZ gesehen werden.

5.2.6 Zusammenfassung der Single Case Analysen

Dieser Abschnitt soll die Single Case Analysen der fünf OEMs aus der Multiple Case Study zusammenfassen und somit die folgende Cross Case Analyse und die Triangulation der Datenquellen vorbereiten.

Fall „Volumen“

Die vier Experten des Falls „Volumen“ beschreiben in der Praxis die folgenden Zeiträume für die Planungshorizonte (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „Volumen“

Planungshorizont	Mittelwert [Monate]	Median [Monate]
Operativ	6,81	7,5
Taktisch	33	36
Strategisch	40,5	33

Die Nähe von Mittelwert und Median zeigt eine Übereinstimmung der Experten. Bei der Planung wird hierbei der *strategische* Planungshorizont als am wichtigsten bewertet, wobei der *taktische* Planungshorizont im Betrieb einer Montageanlage an Relevanz gewinnt und fokussiert betrachtet werden sollte.

Zusätzlich wurden die Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell betrachtet. Für die Experten des Falls „Volumen“ sind die *Skalierbarkeit* und die *Integrierbarkeit* besonders wichtig. In Montageanlagen sollten diese Flexibilitätsaspekte vor allem über Module und Vorhalte an Platz umgesetzt werden.

Im Zuge der teilnehmenden Beobachtung wurde gesehen, dass die Flexibilitätsaspekte *Wiederverwendbarkeit*, *Skalierbarkeit* und *Integrierbarkeit* durch Standards, Vorhalte und Universalität schon teils in der Montage des OEMs umgesetzt werden.

Fall „Sport“

In dem Fall „Sport“ beantworten zwei Experten die Fragen aus dem Interviewleitfaden. Aus Sicht der Montageanlage, aus der Reaktionssicht geben die Experten in der Tabelle 19 den Mittelwert und Median der Zeiträume für die Planungshorizonte an.

Tabelle 19: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „Sport“

Planungshorizont	Mittelwert [Monate]	Median [Monate]
Operativ	0,63	0,63
Taktisch	6,25	6,25
Strategisch	36	36

Die beiden Experten stimmen bei ihren unabhängigen Interviews mit ihren Angaben der Zeiträume der Planungshorizonte vollständig überein. Somit sind auch der Mittelwert und der Median identisch in diesem Fall.

Im Zuge der Flexibilitätsaspekte sehen die Experten die *Skalierbarkeit* als am wichtigsten an, gefolgt von der *Mobilität* und der *Anpassbarkeit*. Diese drei Flexibilitätsaspekte sollen laut den Experten über Vorhalte und Standards in der Gestaltung von Montageanlagen umgesetzt werden.

Die *Skalierbarkeit* als auch die *Integrierbarkeit* waren in den Montageanlagen des OEMs bereits umgesetzt. Im Zuge der Beobachtungen in der Fabrik des OEMs wurden vor allem Vorhalte eingesetzt, um eine Reaktionsfähigkeit der Montageanlagen zu erhöhen.

Fall „Luxus“

In dem Fall „Luxus“ haben die drei Experten jeweils die Anlagen- und Automatisierungsplanung der Montageanlagen übernommen. Für die Planungshorizonte geben diese die folgenden Zeiträume an (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „Luxus“

Planungshorizont	Mittelwert [Monate]	Median [Monate]
Operativ	12	12
Taktisch	27	27
Strategisch	52	36

Die Planungshorizonte dauern nach den Experten im Mittel 12, 27 oder 52 Monate für den *operativen*, *taktischen* und *strategischen* Planungshorizont. Die Experten stimmen mit ihren Angaben überein, da Mittelwert und Median größtenteils übereinstimmen. Lediglich im *strategischen* Planungshorizont wird die Streuung der Angaben breiter.

Die Flexibilitätsaspekte betreffend, geben die Experten an, dass die *Anpassbarkeit* am wichtigsten ist für Montageanlagen, gefolgt von der *Skalierbarkeit*. Die Experten wollen

diese Flexibilitätsaspekte hauptsächlich über Vorhalte in der Hard- und Software der Montageanlage umsetzen.

Die Umsetzungsmöglichkeit über Vorhalte konnte in der Fabrik des Luxus OEMs für die *Skalierbarkeit* und *Integrierbarkeit* beobachtet werden. Zudem sind die Montageanlagen in der Lage wiederverwendet zu werden, in dem Module in den Bestandteilen der Montageanlagen eingesetzt werden.

Fall „Premium“

In dem Fall „Premium“ wurden vier Experten befragt. In Bezug auf die Planungshorizonte gaben diese die folgenden Definitionen für die Planungshorizonte an (siehe Tabelle 21).

Tabelle 21: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „Premium“

Planungshorizont	Mittelwert [Monate]	Median [Monate]
Operativ	24	21
Taktisch	44	36
Strategisch	73,5	69

Auch wenn der Mittelwert und der Median leicht voneinander abweichen, ist durch den kleinen Unterschied in den Definitionen eine Übereinstimmung zu erkennen.

Die Flexibilitätsaspekte für das Segment des Falls „Premium“ werden wie folgt priorisiert. Die *Anpassbarkeit* wird gefolgt von der *Skalierbarkeit* als am wichtigsten angesehen. Für die Montageanlagen sollten diese Flexibilitätsaspekte durch Vorhalte und Standards erreicht werden.

Vorhalte als Umsetzungsmöglichkeit konnten in der Fabrik des OEMs beobachtet werden, um eine *Skalierbarkeit* zu erreichen. Zusätzlich verfügen die Montageanlagen teils über standardisierte Schnittstellen und Universalität, sodass eine *Wiederverwendbarkeit* und *Anpassbarkeit* erreicht werden kann.

Fall „LNFZ“

Für die Fallstudie „LNFZ“ wurden vier Experten befragt. Im Bereich der Planungshorizonte haben die Experten die Zeiträume der Planungshorizonte angegeben. Diese Definition ist in Form des Mittelwerts und des Medians über den gesamten Fall in der Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Mittelwert und Median der Zeiträume der Planungshorizonte des Falls „LNFZ“

Planungshorizont	Mittelwert [Monate]	Median [Monate]
Operativ	25,5	21
Taktisch	60	66
Strategisch	116,5	127

Die Spanne der Planungshorizonte reicht von ca. 20 Monaten bis zu 120 Monaten für den *operativen* und *strategischen* Planungshorizont. Der Mittelwert und der Median weichen in den Definitionen der Experten nur leicht voneinander ab, sodass eine Übereinstimmung für diesen Fall erreicht werden konnte.

Für das spezifische Segment des LNFZ OEMs werden die *Anpassbarkeit* und *Skalierbarkeit* als wichtigste Flexibilitätsaspekte in Montageanlagen angesehen. Standards in den Montageanlagen in Kombination mit Vorhalten sollten diese Flexibilitätsaspekte umsetzen.

Die Vorhalte wurden für die *Skalierbarkeit* in Montageanlagen in der Fabrik des OEMs bereits umgesetzt. Zudem konnten auch Standardschnittstellen beobachtet werden, welche eine *Wiederverwendbarkeit* ermöglichen sollen.

Die Single Case Analysen haben gezeigt, dass je Segment in der Automobilindustrie und somit je Fall und Montagesystem, unterschiedliche Anforderungen und Sichtweisen zu Planungshorizonten und Flexibilitätsaspekten vorliegen. Diese individuellen Erkenntnisse sollen im Folgenden in der Cross Case Analyse zusammengefasst werden, sodass ein praxisorientiertes Flexibilitätsmodell erstellt werden kann.

5.3 Cross Case Analyse

Nach den Single Case Analysen erfolgt eine aggregierte Analyse der Ergebnisse, um gesammelt Erkenntnisse zu schaffen.

5.3.1 Cross Case Analyse der Interviews

Die Cross Case Analyse beginnt mit einer quantitativen Auswertung der Datenaufnahmeprotokolle und der Statements je Kategorie. Bei den Analysen werden die Planungshorizonte vor den Flexibilitätsaspekten bearbeitet.

Planungshorizonte

In Bezug auf die Planungshorizonte stimmten die Experten über alle Fälle hinweg den drei Planungshorizonten aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell zu. Daher kann nun die Priorität dieser im Hinblick auf Montageanlagen betrachtet werden. Die Single Case Analysen haben bereits zwei verschiedene Sichtweisen offenbart – die Planungs- und Reaktionssicht. Diese beiden Sichtweisen werden im Folgenden über alle Fälle hinweg verglichen.

Es zeigen sich klare Tendenzen seitens der Interviewten hinsichtlich der Bedeutung der jeweiligen Planungshorizonte für flexible Montageanlagen. Für die Planungssicht ist der *strategische* Planungshorizont klar am wichtigsten, während sich dies in der Reaktions-sicht deutlich ändert. Für die Planungssicht wird bspw. gesagt, „[...] für mich ist die *Ausrichtung tatsächlich zu sagen, was mach ich denn mittelfristig und langfristig*“ (Schulz 2024a, S. 1). Jedoch für die Reaktionssicht: „*Strategisch wäre dann zweitrangig*“ (Schulz 2024a, S. 52). Hier wird der *strategische* Planungshorizont als am unwichtigsten angesehen.

Der *operative* Planungshorizont verhält sich wie der *Strategische*, lediglich in der Prioritätsbewertung andersherum. In der Planungssicht ist der *operative* Planungshorizont am wenigsten wichtig, jedoch in der Reaktionssicht klar am wichtigsten. Die Experten sagen dazu: „*Also vom Arbeitsumfeld her ist natürlich der operative wichtig, also das muss ja funktionieren [...]*“ (Schulz 2024c, S. 202) und „*am schönsten wäre natürlich, wenn man eine Flexibilität so schnell wie möglich umsetzen kann. Wenn das operative dann in den Vordergrund rückt*“ (Schulz 2024a, S. 60). Jedoch wird hierzu in der Planung gesagt: „*Das kurzfristige [planen] wäre ein Einzelfall, ein Sonderfall*“ (Schulz 2024a, S. 3).

Der *taktische* Planungshorizont wird in beiden Sichtweisen ähnlich bewertet und liegt in der Priorität zwischen den anderen beiden Planungshorizonten. Das folgende Zitat fasst die Bewertung des *taktischen* Planungshorizonts zusammen: „[...] *Was später kommt, weiß man erstens noch nicht und ist im zweiten Schritt dann deswegen auch noch gar nicht so wichtig*“ (Schulz 2024c, S. 202).

Aus dieser Betrachtung wird die Notwendigkeit einer schnellen Reaktionsfähigkeit der Montageanlage deutlich, da der *operative* Planungshorizont im Vordergrund steht. Dagegen liegt der Fokus in der Planungssicht klar auf der strategischen Betrachtung, wo bspw. die Zielsetzungen für die folgenden Projekte gesetzt werden. Hier muss dann die Fokussierung auf eine flexible Gestaltung der Montageanlagen angestrebt werden. Eine weitere Schlussfolgerung kann sein, dass die Tätigkeiten in der Planung die dem *strategischen* Planungshorizont zugeordnet werden, in der heutigen dynamischen Zeit in einem kurzfristigeren Planungshorizont durchgeführt werden sollten, um eine schnelle Reaktion zu ermöglichen.

Die Priorität der Planungshorizonte ist in der Abbildung 31 dargestellt.

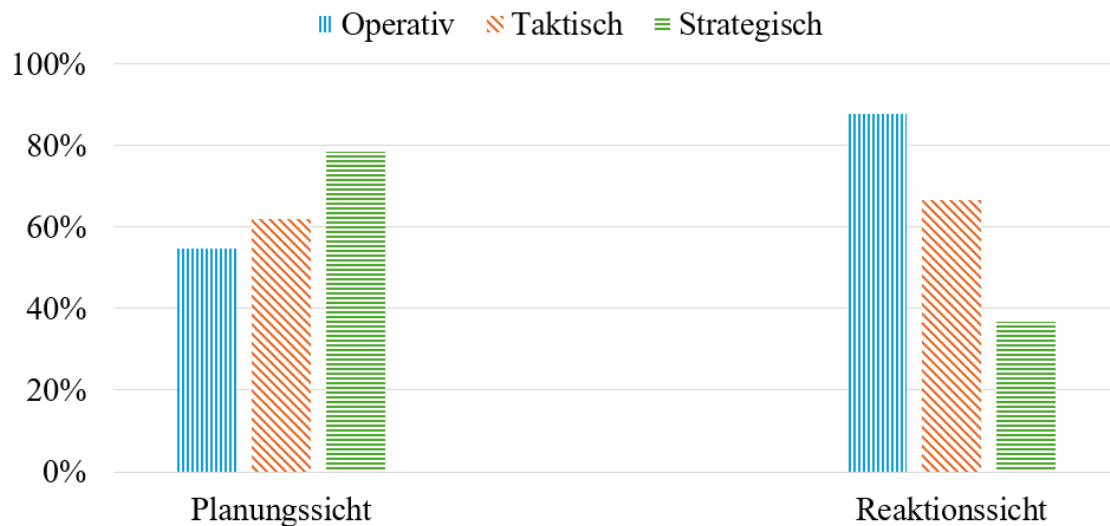


Abbildung 31: Cross Case Analyse der Priorität der Planungshorizonte

Des Weiteren ist ein Abgleich der Definitionen der einzelnen Planungshorizonte ebenfalls Bestandteil der Multiple Case Study. Im Zuge des *operativen* Planungshorizonts geben die Interviewten der Fälle LNFZ und Premium Zeiträume von mehr als 20 Monate an, wobei der Mittelwert über alle Fälle hinweg bei 15 Monaten liegt. Vor allem die Experten der Fälle Sport und Volumen senken den Mittelwert deutlich. Die Experten aus dem Fall „Sport“ nennen für den *operativen* Planungshorizont lediglich wenige Wochen. Diese Einschätzung könnte darauf zurückzuführen sein, dass alle Zitate der Experten auf die Reaktionssicht der Planungshorizonte hinweisen. Zu der Definition des operativen Planungshorizonts wird bspw. gesagt, dass „operativ, das ist natürlich ganz klar Störbehebung“ (Schulz 2024d, S. 358). Vor diesem Hintergrund erscheint die abweichende Zeitangabe des Falls „Sport“ nachvollziehbar.

Auch die Experten des Falls „Volumen“ sehen den *operativen* Planungshorizont ebenfalls als deutlicher kürzer an, als es im Mittelwert angegeben wird. Hier könnte ein Zusammenhang zu der Prioritätsbewertung aus der Single Case Analyse bestehen, in welcher der *operative* Planungshorizont eine gesteigerte Bewertung in der Planungssicht erhält. Die Angaben der Interviewten aus dem Fall „Luxus“ liegen im *operativen* als auch in den anderen beiden Planungshorizonten stets wenige Monate unter dem Mittelwert der Multiple Case Study. Im Gegensatz dazu zeigen die Fälle LNFZ und Premium über alle Planungshorizonte hinweg überdurchschnittlich lange Zeiträume.

Der *taktische* Planungshorizont wird im Mittel mit 31 Monaten angegeben. Die Zeiträume der Fälle Luxus, LNFZ, Premium und Volumen reichen dabei von 27 bis 60 Monaten.

Darüber hinaus liegt der *strategische* Planungshorizont im Mittel bei knapp 68 Monaten, also bei etwa fünfeinhalb Jahren. Diese Bewertung wird maßgeblich durch die Einschätzung der Interviewten aus dem Fall „LNFZ“ beeinflusst, welche diesen Planungshorizont im Mittel bei etwas über neuneinhalb Jahren sehen.

Die Abbildung 32 zeigt einen Vergleich der angegebenen Zeiträume zu den Planungshorizonten. Es wird jeweils der Mittelwert über alle Fälle hinweg mit dem gemittelten Wert aus der Multiple Case Study verglichen.

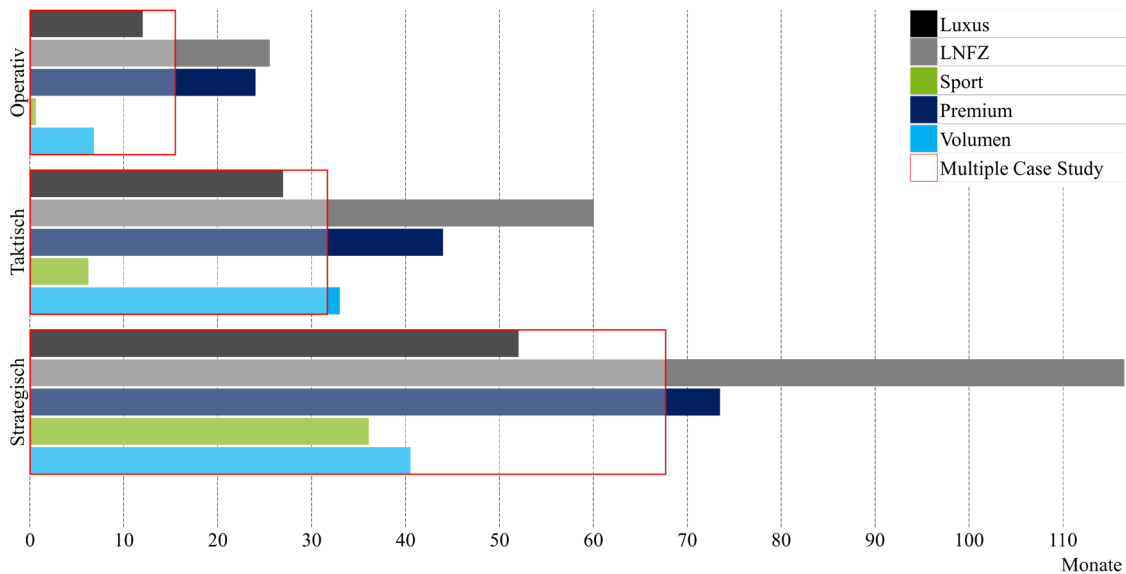


Abbildung 32: Cross Case Analyse der angegebenen Planungshorizonte

Die Angaben der Zeiträume der Planungshorizonte können für die Fälle auch mit Beispielen aus Fahrzeugprojekten verglichen werden. Durch die unterschiedlichen Segmente der Automobilindustrie können weitere Unterschiede aufgezeigt werden.

Beginnend mit dem *operativen* Planungshorizont nennen die Experten drei verschiedene Beispiele, welche thematisch ähnliche Aussagen zusammenfassen: Modellpflege, der Anlagenbestand und die aktuellen Planungsaufgaben werden dem *operativen* Planungshorizont zugeordnet. Das Projektbeispiel Modellpflege wurde darüber hinaus auch im *taktischen* und *strategischen* Planungshorizont genannt – im *taktischen* Planungshorizont jedoch nur von zwei Experten und im *strategischen* Planungshorizont lediglich von einem Experten.

Im *taktischen* Planungshorizont werden drei weitere Projektbeispiele beschrieben. Am häufigsten wird das neue Fahrzeugprojekt genannt, gefolgt von aktuellen Planungsaufgaben und neuen Automatisierungsumfängen. Die Aussagen des *taktischen* Planungshorizonts grenzen sich insofern vom *operativen* Planungshorizont ab, als dass keine Projektbeispiele mehr genannt wurden, welche die vorhandenen Montageanlagen beschreiben.

Darüber hinaus wird im *strategischen* Planungshorizont erneut das neue Fahrzeugprojekt sowie die Modellpflege genannt. Jedoch beschreiben die Interviewten auch ein neues Montagelayout oder Aufgaben ohne klaren Fahrzeugprojekt. Dadurch lässt sich der *strategische* Planungshorizont weiter abgrenzen.

Die Abbildung 33 zeigt eine Zusammenfassung der Projektbeispiele je Planungshorizont aus der Multiple Case Study. Es wird der Anteil der Projektbeispiele auf die Gesamtanzahl der genannten Projektbeispiele je Planungshorizont aufgezeigt.

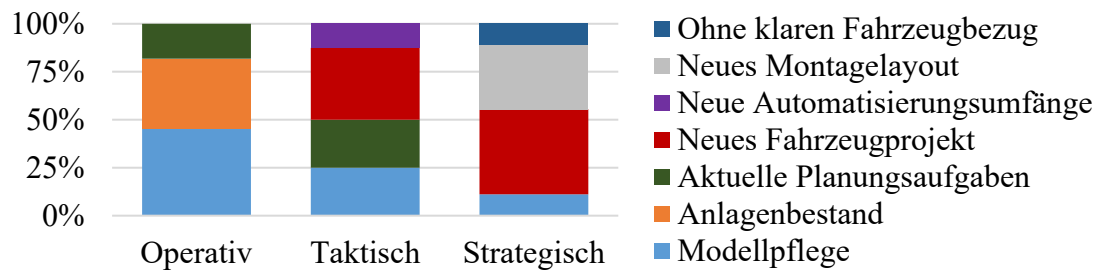


Abbildung 33: Cross Case Analyse zu den Projektbeispielen je Planungshorizont

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die Planungshorizonte nicht immer eindeutig voneinander abzugrenzen sind. Dennoch können übergeordnete Projektbeispiele zu den Planungshorizonten zugeordnet werden:

Operativer Planungshorizont: Aufgaben, die den Anlagenbestand oder kleine Änderungen am aktuellen Anlagenbestand betreffen.

Taktischer Planungshorizont: Aufgaben, die neue Montageanlagen und auch neue Fahrzeugprojekte umfassen.

Strategischer Planungshorizont: Aufgaben, die übergeordnete Themen wie ein ganzes Montagelayout betreffen. Diese Aufgaben haben laut den Interviewten häufig keinen direkten Bezug zu konkreten Fahrzeugprojekten mehr.

Anzahl Flexibilitätsaspekte

Die Abbildung 34 zeigt zu Beginn der gesammelten Analyse die Relevanz der Flexibilitätsaspekte über alle Fälle hinweg. Besonders die *Diagnosefähigkeit* und die *Modularität* fallen in der Relevanz ab. Lediglich ca. 5% der Interviewten geben an, dass die *Modularität* eine Relevanz für die Flexibilität von Montageanlagen hat. Gleichzeitig finden sich in über 70% der Interviews Aussagen, in denen *Modularität* als Eingangsgröße für die Flexibilität genannt wird. Einige Interviewten betonen jedoch, dass die *Modularität* anstatt eine Eingangsgröße, eine allgemeine Funktion für Montageanlagen sei. Lediglich ein Interview schlägt vor, die *Modularität* mit der *Skalierbarkeit* zusammenzufassen.

Des Weiteren wird auch die *Diagnosefähigkeit* von weniger als 20% der Interviewten als relevant für die Flexibilität angesehen. Die Interviewten sagen, dass die *Diagnosefähigkeit* eine allgemeine Funktion – für jede Montageanlage – sei und kein spezifischer Aspekt für die Flexibilität.

Die *Skalierbarkeit* wird – im Kontrast zur *Modularität* und *Diagnosefähigkeit* – von allen Interviewten als relevant bewertet. Ein Statement gibt zur *Skalierbarkeit* an „skalierbar

ist auf jeden Fall wichtig, weil schneller werden ist irgendwo limitiert, aber auch langsamer hatten wir schon mal“ (Schulz 2024a, S. 7). Die Relevanz der *Skalierbarkeit* wird somit nicht in Frage gestellt.

Die weiteren Flexibilitätsaspekte werden von der Mehrheit der Interviewten als relevant angesehen und bedürfen weiterer Betrachtung und der Diskussion mit den Umsetzungsmöglichkeiten für die Flexibilität, um eine finale Aussage zu den Flexibilitätsaspekten zu tätigen.

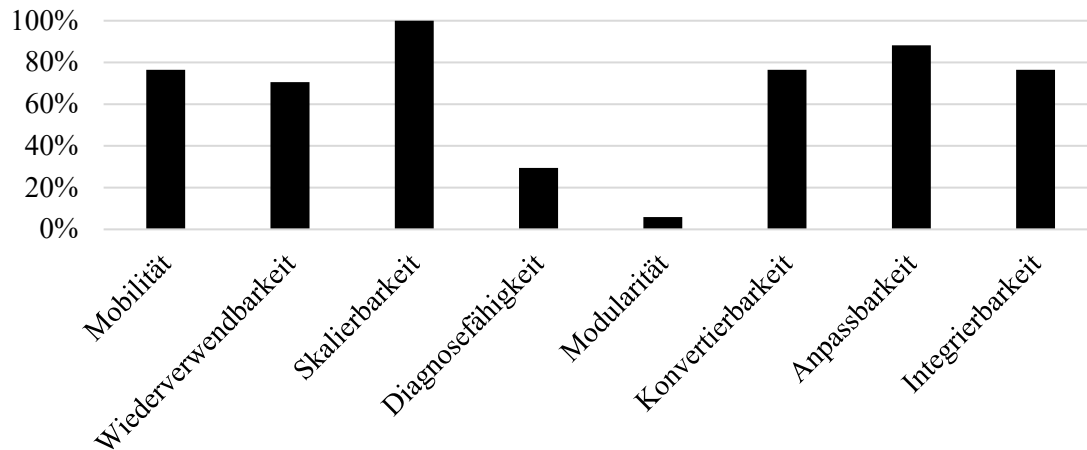


Abbildung 34: Darstellung der Relevanz der Flexibilitätsaspekte über die Multiple Case Study

Die *Mobilität* wird von ca. 76% der Interviewten als relevant eingeschätzt. Zusätzlich geben etwa 50% an, dass dieser Flexibilitätsaspekt mit anderen Flexibilitätsaspekten zusammengefasst werden könnte. Alle Statements, die ein Zusammenfassen beschreiben, beziehen sich auf eine Kombination von *Mobilität* und *Wiederverwendbarkeit*. Statements sagen bspw. folgendes „I'll probably keep it as mobility, [...], but the reusability falls under that title“ (Schulz 2024b, S. 420), „eigentlich müsstest du die *Mobilität* in die *Wiederverwendbarkeit* integrieren“ (Schulz 2024c, S. 210) und *wiederverwendbar ist die strategische Art von Mobilität*³. Die Indikationen zur *Mobilität* lassen sich somit weiter mit den Statements zum Flexibilitätsaspekt *Wiederverwendbarkeit* vergleichen. Die Mehrheit der Statements spricht sich für das Zusammenfassen mit der *Mobilität* aus. Zwei Interviews schlagen vor, dass der Aspekt *Wiederverwendbarkeit* auch mit weiteren Aspekten – *Anpassbarkeit* oder *Integrierbarkeit* – zusammengefasst werden könnte. Aufgrund der geringen Anzahl an Nennungen wird im Folgenden jedoch nur das potenzielle Zusammenfassen von *Mobilität* und *Wiederverwendbarkeit* diskutiert.

Die weiteren drei Flexibilitätsaspekte – *Konvertierbarkeit*, *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* – werden in der Multiple Case Study zwischen 76% und 80% von den Interview-

³ Die Aussage stammt aus dem Datenaufnahmeprotokoll des Interviews 1 aus dem Fall „LNFZ“.

ten als relevant angesehen. Die Mehrheit der Statements in Bezug auf ein Zusammenfassen der *Konvertierbarkeit* deuten ein potenzielles Zusammenfassen mit der *Anpassbarkeit* an. Aus jedem Fall liegen hierzu Statements vor, z. B.: „convertible also covers customization“ (Schulz 2024e, S. 100) oder „was ist jetzt zwischen konvertierbar und anpassbar [der Unterschied]. Das ist für mich fließend“ (Schulz 2024c, S. 245).

Zusätzlich wird in zwei Fällen vorgeschlagen die *Konvertierbarkeit*, *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* zusammenzuführen. Die Experten sagen, dass die *Integrierbarkeit*, *Anpassbarkeit* und *Konvertierbarkeit* alle ähnlich sind, wobei sich *Anpassbarkeit* und *Konvertierbarkeit* unterscheiden⁴ und „weil konvertierbar – Änderungen der Aufgaben möglich – und anpassbar – mehrere Aufgaben bei gleichen Fügeverfahren – die Integrierbarkeit schon einschließen“ (Schulz 2024a, S. 64). Daraus ergibt sich die Indikation, dass die *Integrierbarkeit* sich auf die *Anpassbarkeit* und *Konvertierbarkeit* aufteilen kann. Die Experten haben hierfür die Montageanlagen im Blick und kommen zu dem Fazit, dass wenn die *Anpassbarkeit* und *Konvertierbarkeit* umgesetzt wurde, auch die *Integrierbarkeit* umgesetzt ist.

Eine Analyse des Transkripts zu der *Integrierbarkeit* zeigt, dass Interviewte aus vier der fünf Fällen eine stärkere Gemeinsamkeit der *Integrierbarkeit* mit der *Anpassbarkeit* sehen als mit der *Konvertierbarkeit*. Dies passt zu den Statements, die im Zusammenhang mit der *Konvertierbarkeit* getroffen wurden.

Wird zuletzt noch die *Anpassbarkeit* über alle Fälle im Transkript analysiert, können zwei weitere Vorschläge zum Zusammenfassen ergänzt werden. In jeweils einem Fall wird ein Zusammenhang mit der *Skalierbarkeit* oder der *Wiederverwendbarkeit* angesprochen. Das Statement zur *Wiederverwendbarkeit* bleibt dabei jedoch vage, während zum potenziellen Zusammenfassen mit der *Skalierbarkeit* angegeben wird, dass durch das Zusammenfassen die Beschreibung der Flexibilität verwässert werden würde.

Nach der initialen Diskussion zu der Relevanz und Anzahl der Flexibilitätsaspekte können die Indikationen der Experten aus der Industrie wie folgt zusammengefasst werden.

- I. Die *Modularität* kann für die Beschreibung der Flexibilitätsaspekte des praxisorientierten Flexibilitätsmodells rausgelöst werden, da die Experten diesen Aspekt als eine Eingangsvoraussetzung für eine Flexibilität ansehen.
- II. Die *Diagnosefähigkeit* ist eine allgemeine Funktion einer Montageanlage ohne klaren Bezug auf die Flexibilität und kann somit für das praxisorientierte Flexibilitätsmodell – aus den Flexibilitätsaspekten – rausgelöst werden.

⁴ Die Aussage stammt aus einem Interview, bei welchem der Audioaufnahme nicht zugestimmt wurde. Die Inhalte stammen aus dem Datenaufnahmeprotokoll des Interviews 14 aus dem Fall „Sport“.

- III. Die *Mobilität* und *Wiederverwendbarkeit* können für das praxisorientierte Flexibilitätsmodell zusammengefasst werden. Hierbei wird dann eine allgemeine Beschreibung der beiden Aspekte verfolgt, wo Anlagenbestandteile an einer anderen Stelle erneut genutzt werden sollen.
- IV. Die *Skalierbarkeit* bleibt als einzelner Flexibilitätsaspekt im praxisorientierten Flexibilitätsmodell erhalten.
- V. Die *Konvertierbarkeit* bleibt – trotz der Ähnlichkeiten mit der *Anpassbarkeit* und auch *Integrierbarkeit* – ein eigenständiger Flexibilitätsaspekt. Hintergrund sind Statements die eine abweichende Umsetzung dieses Flexibilitätsaspekts in Montageanlagen im Vergleich zu den anderen beiden Flexibilitätsaspekten beschreiben.
- VI. Die *Anpassbarkeit* kann mit der *Integrierbarkeit* zusammengefasst werden, da die *Integrierbarkeit* mit einem Erreichen der *Anpassbarkeit* mit umgesetzt werden kann.

Priorität der Flexibilitätsaspekte

Nach der Relevanz der vorgeschlagenen Flexibilitätsaspekte folgt die Analyse der Priorität dieser. Durch den Vergleich der einzelnen Fälle mit der aggregierten Priorität über alle Fälle hinweg lassen sich weitere Schlussfolgerungen treffen. Die beiden Flexibilitätsaspekte *Diagnosefähigkeit* und *Modularität* wurden bereits aus der Darstellung herausgenommen, da die beiden Aspekte nur in weniger als 50% der Fälle eine Priorität erreichen. Dies bestätigen die *Indikationen I* und *II* zu den Flexibilitätsaspekten.

Der erste Flexibilitätsaspekt ist die *Mobilität*. In den Fällen Premium und Volumen wird diese unterdurchschnittlich wichtig eingeschätzt, während die anderen drei Fälle – Sport, LNFZ und Luxus – die *Mobilität* als überdurchschnittlich wichtig einschätzen. Dieses Muster kehrt sich bei der *Wiederverwendbarkeit* um. Eine mögliche Interpretation dieses Ergebnisses ist, dass die beiden Aspekte als ähnlich wahrgenommen werden und die Interviewten je Fall eine der beiden Definitionen als passender für die Beschreibung der beiden Aspekte fanden. Eine solche Interpretation stützt die *Indikation III*. In der Gesamtbetrachtung der Flexibilitätsaspekte belegen die *Mobilität* und die *Wiederverwendbarkeit* die Plätze vier und sechs.

Die *Skalierbarkeit* als der wichtigste Aspekt über die Multiple Case Study hinweg ist vor allem in den Fällen Sport und Volumen von gesteigerter Bedeutung. Durch die starke Bewertung der *Skalierbarkeit* aus dem Fall „Sport“ übertrifft die *Skalierbarkeit* die *Anpassbarkeit* in der Priorität. Die Bedeutung der *Skalierbarkeit* wird in den Interviews besonders betont „[Platz] eins ist ganz klar die Skalierbarkeit. Aus meiner Sicht ein sehr großer Vorteil [...]“ (Schulz 2024d, S. 368). Da die *Skalierbarkeit* über alle Fälle hinweg

als wichtig angesehen wurde, kann auch die *Indikation IV* durch diese Daten bestätigt werden.

Die *Konvertierbarkeit* – auf Platz fünf im Prioritätsranking – wird durch die Fälle unterschiedlich bewertet. Besonders die Experten aus den Fällen LNFZ und Volumen sprechen sich für die *Konvertierbarkeit* aus. Zusätzlich bewerten auch die Experten aus dem Fall „Luxus“ die *Konvertierbarkeit* als leicht überdurchschnittlich.

Die *Anpassbarkeit* – der zweitwichtigste Flexibilitätsaspekt – wird von den Experten aus vier der fünf Fällen als überdurchschnittlich wichtig für die Flexibilität angesehen. Lediglich der Fall „Volumen“ sieht den Flexibilitätsaspekt als weniger wichtig an.

Von der *Anpassbarkeit* ausgehend nimmt die Priorität zur *Integrierbarkeit* ab. Die Fälle „Luxus“, und „Volumen“ sehen die *Integrierbarkeit* als überdurchschnittlich wichtig an. Dies spricht dafür, dass der Aspekt grundsätzlich in der Automobilindustrie wichtig ist, wenn die beiden Extreme der Segmente den Flexibilitätsaspekt als wichtig ansehen.

Auffällig ist zudem, dass die Experten des Falls „Luxus“ als einzige die drei Aspekte *Konvertierbarkeit*, *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* als überdurchschnittlich wichtig ansehen. Die drei Flexibilitätsaspekte beschreiben Arten der Flexibilität in denen sich Aufgaben in verschiedenen Ausmaßen ändern oder neue Aufgaben durch Integrationen hinzukommen. Dies scheint insbesondere für das Montagesystem im Luxussegment von zentraler Bedeutung zu sein.

Die Abbildung 35 zeigt die Darstellung des Prioritätsrankings über alle Fälle hinweg.

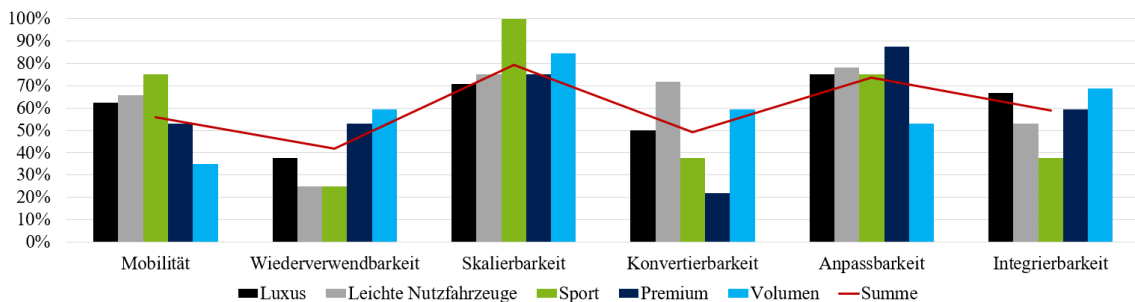


Abbildung 35: Cross Case Darstellung der Priorität der Flexibilitätsaspekte

Die übrigen *Indikationen V* und *VI* können durch die Analysen der Prioritätsrankings weder bestätigt noch widerlegt werden, sodass diese im Bereich der Umsetzungsmöglichkeiten weiter betrachtet werden müssen. Zudem muss auch die *Indikation III* weiter diskutiert werden. Es konnte noch keine klare Entscheidung zum Zusammenfassen der *Mobilität* mit der *Wiederverwendbarkeit* formuliert werden.

Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität

Der dritte Teil der Datenaufnahme befasst sich mit der Frage, wie die Flexibilitätsaspekte in Montageanlagen umgesetzt werden könnten. Insgesamt beschreiben die Experten neun

Gruppen von Umsetzungsmöglichkeiten. Jede Gruppe fasst ähnliche Arten von Umsetzungsmöglichkeiten zusammen.

Retrofit: Retrofit beschreibt nach den Experten der Multiple Case Study ein „wieder fit machen“ der Montageanlage oder einzelner Bestandteile. Bereits vorhandene Montageanlagen können durch kleine Aktualisierungen der Bestandteile für neue Anwendungsfälle befähigt werden.

Intelligente Software: Die Experten beschreiben, dass durch eine Art künstliche Intelligenz die Flexibilität einer Montageanlage gesteigert werden könnte. Gemeint ist Software, welche über die Laufzeit neue oder geänderte Aufgaben erlernen und somit die Reaktionsfähigkeit erhöhen kann.

Transportmittel: Diese Gruppe an Umsetzungsmöglichkeiten umfasst Transportmöglichkeiten, die das örtliche Versetzen von Montageanlagen ermöglichen sollen. Diese reichen von Aufnahmen für Gabelstapler für einen Transport über Rollen unterhalb der Montageanlage bis zu FTF, welche die Montageanlage transportieren.

Grundplatte: Diese Gruppe beschreibt Konzepte, bei welchen die Montageanlage auf einer Platte vormontiert wird. Diese kann dann bspw. über eine einzelne Schnittstelle zur Fabrik in Betrieb genommen werden.

Universalität: Die Universalität als Gruppe von Umsetzungsmöglichkeiten basiert auf Statements der Experten, welche den Einsatz von Universalgreifmitteln als Endeffektoren in Montageanlagen vorschlagen, um die Geometrieabhängigkeit zu den Bauteilen zu reduzieren. Dieses Konzept ist jedoch auch in anderen Bestandteilen der Montageanlage anwendbar, sodass sich die Gruppe Universalität ergibt.

Standards: Durch den Einsatz standardisierter Bausteine in der Hard- und Software der Montageanlagen soll die Reaktionsfähigkeit der Montageanlagen gesteigert werden. Die Experten nennen auch Produktstandards als Möglichkeit die Flexibilität zu erhöhen. Da sich diese Maßnahme jedoch auf die Produktgestaltung und nicht die Anlagengestaltung bezieht, wird dies nicht weiter betrachtet.

Vorhalte: Durch eine Überdimensionierung der Montageanlagen in Hard- und Software könnte die Reaktionsfähigkeit gesteigert werden. Insbesondere eine Erweiterung kann beschleunigt und mit reduziertem Aufwand durchgeführt werden.

Modular: Der Einsatz von Modulen, welche miteinander kombiniert und untereinander ausgetauscht werden können, verspricht laut den Experten die Flexibilität von Montageanlagen zu erhöhen – dies gilt für die Hard- und Software der Montageanlage.

Schnellkupplungen: Vor allem für die Endeffektoren sollen Schnellkupplungen eine Umsetzungsmöglichkeit zur Steigerung der Flexibilität sein. Jedoch können auch andere Be-

standteile der Montageanlage wie die Peripherie über Schnellkupplungen mit den restlichen Bestandteilen verbunden werden, um eine schnelle Reaktionsfähigkeit zu erreichen. Somit wird die allgemeine Gruppe Schnellkupplungen gebildet.

Diese Gruppen werden im Folgenden mit den sechs Flexibilitätsaspekten *Mobilität*, *Wiederverwendbarkeit*, *Skalierbarkeit*, *Konvertierbarkeit*, *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* kombiniert, um spezifische Umsetzungsmöglichkeiten je Flexibilitätsaspekt für das praxisorientierte Flexibilitätsmodell zu erarbeiten.

Für den Flexibilitätsaspekt *Mobilität* beschreiben die Experten sechs Gruppen von Umsetzungsmöglichkeiten. Die am häufigsten genannte Möglichkeit ist der Einsatz von Schnellkupplungen. Diese betreffen die Verbindungsart der Bestandteile der Montageanlage, lassen jedoch offen, wie die Montageanlage den Einsatzort ändern kann. Dies wird von den Interviewten in den nächsten beiden Umsetzungsmöglichkeiten beschrieben. Einerseits können Grundplatten genutzt werden, auf denen die Bestandteile der Montageanlage gesammelt auf einer Platte montiert werden sollen, sodass die Montageanlagen zu einem anderen Verwendungsort transportiert werden können. Dort könnte die Platte dann wieder über Schnellkupplungen in Betrieb genommen werden. Um den Transport der Grundplatte oder der Montageanlage zu realisieren, wird von den Interviewten andererseits noch die Gruppe Transportmittel beschrieben. Weiter gab es noch drei Einzelnennungen an Umsetzungsmöglichkeiten für die *Mobilität* – Standards, Vorhalte und auch modulare Gestaltung.

Auch für die *Wiederverwendbarkeit* gibt es eine Häufung bei Umsetzungsmöglichkeiten, die von mehreren Interviewten angegeben werden. Standards ermöglichen eine einfache *Wiederverwendbarkeit*, da die Rahmenbedingungen durch Standards immer gleich sein sollen, sodass funktionsfähige Bestandteile weiter- und auch wiedergenutzt werden können. Des Weiteren ermöglicht eine modulare Gestaltung den Einsatz definierter Module, welche wiederverwendet oder bei Defekten ausgetauscht werden können. Eine weitere Mehrfachnennung ist die Möglichkeit der Schnellkupplungen. Diese beschleunigen und vereinfachen nach einer Wiederverwendung die erneute Inbetriebnahme der Montageanlage. Weitere Einzellösungen für die *Wiederverwendbarkeit* sind die Universalität oder das Durchführen eines Retrofits der Montageanlage.

Für den Flexibilitätsaspekt *Skalierbarkeit* werden von den Interviewten lediglich zwei Möglichkeiten der Umsetzung vorgeschlagen. Dabei wird die Möglichkeit Vorhalte von allen Interviewten genannt. Durch die Vorhalte in der Hard- und Software ist eine Steigerung oder Senkung z. B. der Stückzahlen in Montageanlagen einfacher und vor allem schneller möglich. Diese Umsetzungsmöglichkeit ist die einzige aus den Interviews, welche von allen Experten genannt wurde. Dies spiegelt erneut die bisherige Relevanz der *Skalierbarkeit* der Cross Case Analyse wider. Als weitere Umsetzungsmöglichkeit wird

der Einsatz von Modulen beschrieben, welche im Falle einer Skalierung erweitert oder reduziert werden können.

Für den Flexibilitätsaspekt *Konvertierbarkeit* geben die Interviewten erneut eine kompakte Liste an, was für eine einheitliche Meinung spricht. Die am meisten genannte Möglichkeit ist die modulare Gestaltung der Montageanlage – vor allem am Endeffektor –, sodass die Montageanlage für neue, abweichende Aufgaben konvertiert werden kann. Für dieses Themengebiet spricht auch die nächste Umsetzungsmöglichkeit. Über Schnellkupplungen können erneut kurzfristig andere Endeffektoren oder Bestandteile an der Montageanlage angebracht werden – um eine Konvertierung zu erreichen. Der Einsatz von Standards ist für mehrere Interviewte auch eine Umsetzungsmöglichkeit der *Konvertierbarkeit*. Standardisierte Bestandteile in Montageanlagen ermöglichen eine schnelle Änderung der Aufgaben. Die letzte genannte Umsetzungsmöglichkeit für die *Konvertierbarkeit* ist der Einsatz von Vorhalten. Dieser zusätzliche Platz – vor allem in der Hardware – befähigt die Montageanlage für andere Aufgaben, auch wenn der Platzbedarf steigen sollte.

Für die *Anpassbarkeit* werden fünf verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten angegeben. Die am häufigsten Genannte ist der Einsatz von Vorhalten – insbesondere in der Software –, um neue, aber ähnliche Aufgaben in einer Montageanlage umzusetzen. Nach den Vorhalten wird auch der Einsatz von Universalität – vor allem Universalgreifer – von vielen Interviewten genannt, sodass ein Wechsel zu einem ähnlichen Montageprozess ermöglicht wird. Lediglich die Geometrien der Bauteile schränken diese Umsetzungsmöglichkeit ein. Die nächste Umsetzungsmöglichkeit – Standards – soll eine Anpassung zu anderen, ähnlichen Aufgaben bei bspw. anderen Fahrzeugen erleichtern. Des Weiteren geben die Interviewten noch zwei weniger häufig genannte Lösungen für die Umsetzung der *Anpassbarkeit* an – Module und Schnellkupplungen.

Die Umsetzungsmöglichkeiten für die *Integrierbarkeit* zeigen weniger Übereinstimmung bei den Experten. Es werden mehrere Umsetzungsmöglichkeiten mit einer geringeren Häufigkeit genannt. Am stärksten Vertreten ist die Umsetzungsmöglichkeit über Module. So kann die Integration von potenziell individualisierten Bestandteilen für neue Fahrzeugprojekte, in die Montageanlagen erreicht werden. Auch Vorhalte spielen in dieses Themengebiet ein. Durch vorgehaltenen Platz können weitere Umfänge in Hard- und Software in eine Montageanlage eingebaut werden. Nachfolgend werden wieder Schnellkupplungen genannt, um die Flexibilität zu erreichen. Durch Schnellkupplungen könnte ein weiterer Anwendungsfall in eine Montageanlage integriert werden. In einem beispielhaften Szenario kann zwischen einem ursprünglichen und integrierten Anwendungsfall der Endeffektor über Schnellkupplungen getauscht werden. Standards in Bestandteilen der Montageanlagen sind der *Integrierbarkeit* zuträglich. Auch Universalität hilft die *In-*

tegrierbarkeit, in Montageanlagen umzusetzen. Diese Möglichkeit ist vor allem bei ähnlichen Anwendungsfällen hilfreich. Als weitere Möglichkeit zur Umsetzung der *Integrierbarkeit* wird der Einsatz von intelligenter Software genannt.

Die quantitative Analyse der Umsetzungsmöglichkeiten über alle Fälle hinweg wird in der Abbildung 36 dargestellt. Die Größe der dargestellten Kreise entspricht der Häufigkeit der Nennungen je Flexibilitätsaspekt. Dabei wird deutlich, dass die Anzahl und Art der Umsetzungsmöglichkeiten je Flexibilitätsaspekt stark variieren. Während einige Flexibilitätsaspekte durch viele unterschiedliche Möglichkeiten erreicht werden können, zeigen andere klare Übereinstimmungen über die Multiple Case Study.

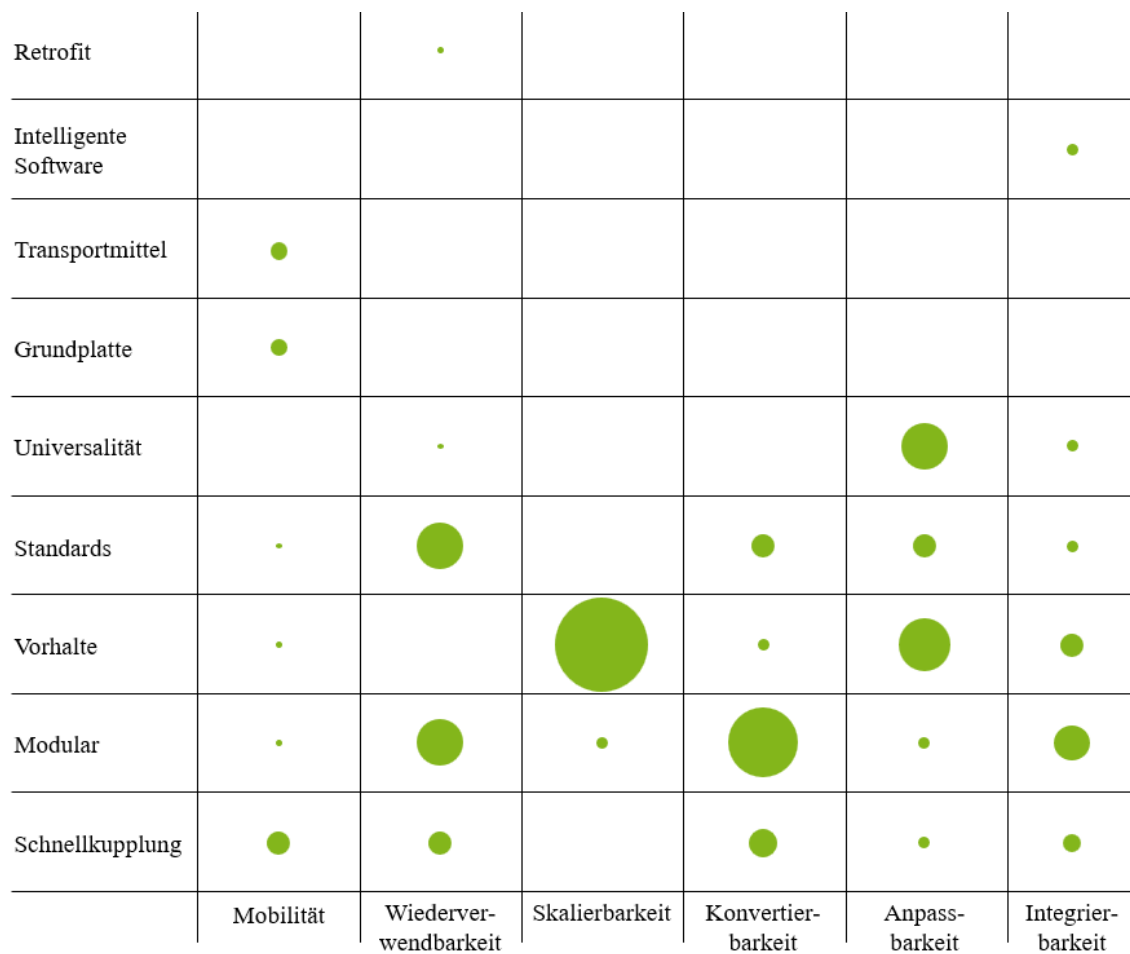


Abbildung 36: Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilitätsaspekte aus der Multiple Case Study

Nach der Analyse der Umsetzungsmöglichkeiten kann eine Entscheidung zu der *Indikation III* für das praxisorientierte Flexibilitätsmodell getroffen werden. Da sich die Umsetzungsmöglichkeiten für die *Mobilität* und *Wiederverwendbarkeit* unterscheiden, sollten diese beiden Flexibilitätsaspekte nicht zusammengefasst werden. Diese Entscheidung basiert auch darauf, dass die Experten bei einem potentiellen Zusammenfassen von Flexibilitätsaspekten angeben, dass etwas an Detailgrad verloren geht, sollte eine Differenzierung zwischen den Flexibilitätsaspekten möglich sein.

In Betracht der Abbildung 36 können zudem die *Indikationen V* bis *VI* weiter betrachtet werden. In diesen beiden Indikationen werden Gemeinsamkeiten zwischen der *Anpassbarkeit*, *Konvertierbarkeit* und *Integrierbarkeit* diskutiert, wodurch ein Zusammenfassen dieser Aspekte angedeutet wird. Auch wenn auf Basis der Interviews konzeptionelle Gemeinsamkeiten vorliegen, zeigen sich in den Umsetzungsmöglichkeiten Unterschiede. Vor allem die *Konvertierbarkeit* grenzt sich in der Umsetzung in Montageanlagen von der *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* ab, sodass die *Indikation V* auf Basis der Umsetzungsmöglichkeiten bestätigt werden kann. *Konvertierbarkeit* bleibt somit ein eigenständiger Flexibilitätsaspekt im praxisorientierten Flexibilitätsmodell.

Zwischen *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* bestehen größere Übereinstimmungen hinsichtlich der Umsetzungsmöglichkeiten. Dennoch lässt sich ein unterschiedlicher Fokus erkennen: Während sich die Umsetzung der *Anpassbarkeit* vor allem auf Universalität und Vorhalte konzentriert, basiert die Umsetzung der *Integrierbarkeit* stärker auf dem Einsatz von Modulen und Vorhalten. Mit der Begründung, dass ein Zusammenfassen die beschreibende Kraft und die praktische Anwendbarkeit des praxisorientierten Flexibilitätsmodells schwächen würde, wird die *Indikation VI* nicht bestätigt und die Flexibilitätsaspekte *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* verbleiben in dem praxisorientierten Flexibilitätsmodell.

Ergänzend zur Analyse der Umsetzungsmöglichkeiten je Flexibilitätsaspekt wird im Folgenden eine übergeordnete Analyse – unabhängig der Flexibilitätsaspekte – durchgeführt. Ziel ist es, eine übergeordnete Aussage zur Umsetzung der Flexibilität zu tätigen. Die Abbildung 37 zeigt eine Übersicht der Umsetzungsmöglichkeiten für die Flexibilität. Wird diese Darstellung mit den Erkenntnissen aus der Abbildung 36 verglichen, lassen sich Vorschläge formulieren, mit welchen Umsetzungsmöglichkeiten möglichst viele Flexibilitätsaspekte umgesetzt werden können.

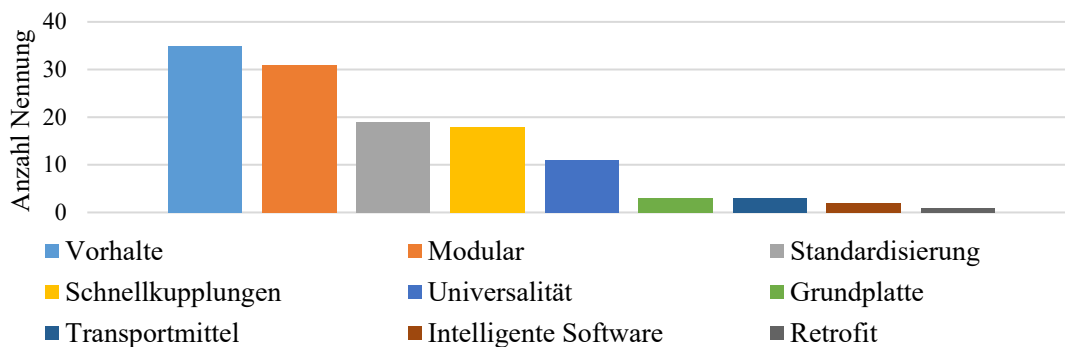


Abbildung 37: Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität nach Nennung

Die Umsetzungsmöglichkeiten Vorhalte, Modular, Standardisierung und Schnelkkupplungen werden im Durchschnitt in jedem Interview mindestens einmal als geeignete Um-

setzungsmöglichkeit für die Flexibilität genannt. Die *Skalierbarkeit*, *Anpassbarkeit*, *Integrierbarkeit*, *Konvertierbarkeit* und auch *Mobilität* können nach den Interviews durch das Einbringen von Vorhalten umgesetzt werden, wobei insbesondere die *Skalierbarkeit* den größten Nutzen aus dieser Möglichkeit zieht. Für die *Mobilität* und die *Konvertierbarkeit* werden die Vorhalte mit einer geringeren Häufigkeit genannt.

Nachfolgend wird auch der Einsatz von Modulen sehr häufig genannt und stellt die einzige Umsetzungsmöglichkeit dar, die für jeden Flexibilitätsaspekt mindestens einmal genannt wurde. Dies unterstreicht erneut die Aussage aus der *Indikation I*, dass Modularität eher als Eingangsgröße für die Flexibilität zu verstehen ist und nicht als eigenständiger Flexibilitätsaspekt. Besonders die *Konvertierbarkeit*, *Wiederverwendbarkeit* und *Integrierbarkeit* können durch den Einsatz von Modulen umgesetzt werden.

Die nächste Möglichkeit Standards stellt ebenfalls eine zentrale Umsetzungsmöglichkeit dar und wird – wie auch die Vorhalte – für fünf der sechs Flexibilitätsaspekte genannt. Lediglich die *Skalierbarkeit* kann laut den Interviewten nicht durch Standards in den Montageanlagen umgesetzt werden.

Darüber hinaus wird auch die Umsetzungsmöglichkeit Schnellkupplungen für fünf der sechs Flexibilitätsaspekt als relevant angegeben. Auch hier ist die *Skalierbarkeit* ausgenommen. Die Schnellkupplung als Umsetzungsmöglichkeit wird auch immer von mehr als einem Experten angegeben, was die Bedeutung weiter unterstreicht.

Die weiteren Umsetzungsmöglichkeiten werden anschließend weniger häufig von den Experten benannt. Ein hervorzuhebender Punkt ist die intelligente Software als Umsetzungsmöglichkeit. Dies wurde mit einer geringen Häufigkeit für die Umsetzung der Flexibilität in Montageanlagen genannt. In Anbetracht der aktuellen Entwicklung der künstlichen Intelligenz, scheint sich ein Widerspruch zu ergeben, da diese in der Gestaltung von industriellen Montageanlagen noch weniger Bedeutung zu haben scheint. Der Fokus der Experten aus der Automobilindustrie liegt nach den Ergebnissen der Multiple Case Study wohl auf klar definierten Anforderungen, ohne dass eine künstliche Intelligenz oder intelligente Software eigenständig Anpassungen oder Ähnliches in den Montageanlagen übernimmt.

Zusammenfassend geben die Interviews eine umfangreiche Übersicht, wie verschiedene Flexibilitätsaspekte in Montageanlagen umgesetzt werden könnten. Von Umsetzungsmöglichkeiten wie Vorhalte und der modularen Gestaltung, welche für mehrere Flexibilitätsaspekte eingesetzt werden können bis zu spezialisierteren Arten wie dem Universalgreifer in der Gruppe Universalität für die *Anpassbarkeit*, sind viele Alternativen benannt worden.

5.3.2 Cross Case Analyse der Beobachtungen

Im Zuge der Beobachtungen wurde für jeden OEM das jeweils spezifische Montagesystem anhand der Charakteristika – *Taktzeit*, *Variantenanzahl*, *Jahresproduktionsmenge* und *Automatisierungsgrad* – qualitativ analysiert. Folgende Erkenntnisse konnten aufgenommen werden.

Taktzeit: Diese unterscheidet sich stark zwischen den einzelnen Fällen. Der Volumen OEM weist mit etwa 60 Sekunden die kürzeste *Taktzeit* auf, während der Luxushersteller mit mind. 15 Minuten deutlich darüber liegt. Die übrigen OEMs liegen zwischen Volumen und Luxus OEM, wobei der Sport und Premium OEM eine etwas höhere *Taktzeit* aufweisen als der LNFZ OEM. Es lässt sich ein Trend erkennen, dass die *Taktzeit* mit den Segmenten von A bis F zunimmt.

Variantenanzahl: Der Volumen OEM verfolgt das Ziel, mit möglichst wenig Varianten möglichst viele Produkte zu fertigen. Der Luxus OEM hingegen fertigt eine geringe Stückzahl, dafür jedoch stark individualisierbare Produkte. Wie auch bei dem Faktor *Taktzeit* positionieren sich die anderen OEMs zwischen den Ausprägungen des Volumen und Luxus OEMs. Daraus ergibt sich ein ähnlicher Trend über die Segmente der Automobilindustrie. Die *Variantenanzahl* steigt von Segment A zu F.

Jahresproduktionsmenge: Die *Jahresproduktionsmenge* zeigt einen umgekehrten Trend im Vergleich zur *Taktzeit* und *Variantenanzahl*. Diese sinkt von Segment A zu Segment F. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die *Taktzeit*, da kürzere *Taktzeiten* auch häufig mit einer höheren *Jahresproduktionsmenge* einhergehen. Jedoch beeinflussen auch weitere Faktoren – wie Schichtmodelle oder die Anzahl unterschiedlicher Fahrzeugmodelle – die *Jahresproduktionsmenge*. Die Bewertung der *Jahresproduktionsmenge* erfolgte ergänzend zu der teilnehmenden Beobachtung noch durch die Analyse historischer Produktionsdaten der OEMs (vgl. Volkswagen Aktiengesellschaft 2024).

Automatisierungsgrad: Innerhalb der Fälle hat erneut der Volumenhersteller die stärkste Ausprägung. Dahingegen hat der Luxushersteller wieder die entgegengesetzte extreme Ausprägung. Der Sport- und Premiumhersteller haben einen vergleichsweise hohen *Automatisierungsgrad* im Vergleich zu den anderen OEMs. Der letzte Fall – LNFZ – zeigt eine mittlere Ausprägung dieses Faktors. Insgesamt schwankt der *Automatisierungsgrad* weniger stark als die anderen Faktoren. Auffällig ist jedoch der Luxus OEM, da dieser nicht das Ziel verfolgt, möglichst viele Prozesse zu automatisieren. Dies ist dem Fahrzeugsegment geschuldet, in dem die Kunden einen gesteigerten Wert auf Handarbeit legen.

Die Tabelle 23 zeigt die Ergebnisse der Unterscheidung der Fälle. Die Faktoren werden qualitativ über eine Skala von niedrig (-) über mittel (o) bis hoch (+) bewertet.

Tabelle 23: Charakterisierung der Montagesysteme der einzelnen Fälle

Fall	Taktzeit	Variantenanzahl	Jahresproduktionsmenge	Automatisierungsgrad
Volume	-	-	+	+
Sport	o	+	o	+
Luxus	+	+	-	-
Premium	o	o	+	o
LNFZ	o	o	o	o

Die *Taktzeit* wurde hierbei wie folgt bewertet: Niedrig beschreibt *Taktzeiten* bis zu zwei Minuten, mittel zwei bis sieben Minuten und hoch alle *Taktzeiten* über sieben Minuten. Die *Variantenanzahl* wurde qualitativ im Rahmen der Beobachtungen mit den Experten bewertet. Die *Jahresproduktionsmenge* wurde auf Basis der Expertenmeinungen unter Zuhilfenahme historischer Produktionsdaten der OEMs bewertet (vgl. Volkswagen Aktiengesellschaft 2024). Dabei steht niedrig für eine *Jahresproduktionsmenge* von ≤ 20.000 Fahrzeugen pro Jahr, mittel für 20.000 bis 50.000 Fahrzeugen pro Jahr und hoch für mehr als 50.000 Fahrzeuge pro Jahr. Der *Automatisierungsgrad* wurde ebenfalls qualitativ im Zuge der teilnehmenden Beobachtungen der Montagesysteme in den Fabriken der OEMs bewertet.

Des Weiteren wurden während der teilnehmenden Beobachtungen die Montageanlagen der OEMs gemeinsam mit den Experten analysiert. Diese Analyse wird im Folgenden über alle Fälle hinweg zusammengefasst.

Es konnten vier der sechs Flexibilitätsaspekte in den Montagen der OEMs in verschiedenen starken Ausprägungen erkannt werden: *Skalierbarkeit*, *Wiederverwendbarkeit*, *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit*. Der am häufigsten beobachtete Aspekt war die *Skalierbarkeit*, welche vor allem durch Vorhalte an Platz in der Peripherie und der Hard- und Software umgesetzt wurde. Dieser Flexibilitätsaspekt konnte bei allen OEMs in der gleichen Umsetzungsmöglichkeit gesehen werden.

Auch die *Wiederverwendbarkeit* wurde in den Montageanlagen umgesetzt, insbesondere durch den Einsatz von Standards. Auch diese Umsetzungsmöglichkeit ist über alle Fälle hinweg gleich.

Auch die *Anpassbarkeit* war in den Montageanlagen sichtbar, hauptsächlich über die Universalität umgesetzt. Die Besonderheit war, dass die *Anpassbarkeit* über den Universalgreifer in den drei betreffenden Fällen hinweg für den gleichen Montageprozess – das Kleben – umgesetzt wurde. Im Zusammenspiel mit Produktstandards konnte der Universalgreifer für die Umsetzung der *Anpassbarkeit* gezielt eingesetzt werden.

Der letzte beobachtete Aspekt war die *Integrierbarkeit*. In zwei Fällen wurde jeweils eine spezifische Umsetzungsmöglichkeit gesehen. In dem Fall „Luxus“ wurden Vorhalte in

der Montageanlage eingesetzt, wodurch die Möglichkeit geschaffen wurde, ein weiteres, ähnliches Produkt – im Montageprozess Kleben – zu integrieren. Des Weiteren wurde in dem Fall „Sport“ die *Integrierbarkeit* durch Standards umgesetzt – in der Hochzeit könnte so ein weiteres Fahrzeug auf der gleichen Plattform wie die derzeitigen Fahrzeuge einfacher integriert werden.

Zusammenfassend konnten während der teilnehmenden Beobachtungen die einzelnen Montagesysteme der OEMs aus der Multiple Case Study anhand der Faktoren *Taktzeit*, *Variantenanzahl*, *Jahresproduktionsmenge* und *Automatisierungsgrad* charakterisiert werden. Dies ermöglicht im weiteren Verlauf die Interpretation spezifischer Flexibilitätsanforderungen je Fahrzeugsegment. Zudem wurde in Bezug auf die Umsetzung der Flexibilität in Montageanlagen häufig der Einsatz von Vorhalten und Standards beobachtet. Durch Universalität konnte auch bei dem Montageprozess Kleben die *Anpassbarkeit* umgesetzt werden.

5.4 Triangulation der Ergebnisse aus Beobachtung und Interviews

Dieses Kapitel soll die beiden Datenquellen Beobachtungen und Interviews zusammenführen, sodass die Ergebnisse trianguliert werden können. Der Abschnitt 5.4.1 betrachtet die Charakterisierung der Montagesysteme gemeinsam mit den Flexibilitätsaspekten und der Abschnitt 5.4.2 betrachtet daraufhin die Umsetzungsmöglichkeiten für Flexibilitätsaspekte aus der Beobachtung und den Angaben aus den Interviews. Hierbei werden die Umsetzungsmöglichkeiten anhand der Expertenaussagen auch auf die Bestandteile von Montageanlagen bezogen.

5.4.1 Triangulation der Flexibilitätsanforderungen je Montagesystem

Dieser Abschnitt kombiniert die Prioritätseinschätzungen der Flexibilitätsaspekte mit den Beobachtungen der Montagesysteme. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf spezifische Flexibilitätsanforderungen je Montagesystem sowie bezogen auf die Segmente der Automobilindustrie erarbeiten. Ziel ist es, Flexibilitätsanforderungen zu formulieren, die im Zusammenhang mit den Charakteristiken der Montagesysteme stehen.

Beginnend mit der *Taktzeit*, welche mit dem Fahrzeugpreis von Segment A zu Segment F ansteigt, lassen sich verschiedene Anforderungen für Montageanlagen ableiten. So liegt der Fokus der Anlagengestaltung bei einer kurzen *Taktzeit* auf einer möglichst schnellen Ausführung der Montageaufgaben. Mit zunehmender *Taktzeit* werden die Montageprozesse der Montageanlage komplexer. So steigt bspw. die Wichtigkeit der *Skalierbarkeit* mit sinkender *Taktzeit*, während die Wichtigkeit der *Mobilität* bei längeren *Taktzeiten* zunimmt. Komplexere Montageaufgaben machen – nach der Analyse der empirischen Daten – ein Umstellen der Montageanlage wahrscheinlicher.

Die Entwicklung der *Variantenanzahl* in Bezug auf die Flexibilität zeigt weitere Muster. Je größer die *Variantenanzahl* in den Montagesystemen ist, desto höher ist die Anforderung an die Montageanlage, mehrere Produkte bearbeiten zu können. Entsprechend steigt mit zunehmender *Variantenanzahl* die Wichtigkeit von *Integrierbarkeit* und *Anpassbarkeit*. Im Gegenzug verliert die *Skalierbarkeit* an Bedeutung, je größer die *Variantenanzahl* in einem Montagesystem ist.

Für die *Jahresproduktionsmenge* können ebenfalls Zusammenhänge zu der Gestaltung von Montageanlagen formuliert werden. Diese steigt tendenziell über die Segmente der Automobilindustrie von Segment F zu Segment A. Grundsätzlich steigen die Anforderungen an die Ausbringungsmenge von Montageanlagen mit steigender *Jahresproduktionsmenge*.

Für den Faktor *Automatisierungsgrad* konnten hingegen keine klaren Zusammenhänge mit den Flexibilitätsanforderungen identifiziert werden. Dies liegt unter anderem auch daran, dass die betrachteten Montageanlagen jeweils für sich einen *Automatisierungsgrad* von 100% haben.

Werden die Anforderungen nun auf die gesamte Automobilindustrie aggregiert, ergibt sich ein Mix aus *Skalierbarkeit* und *Anpassbarkeit* als Schwerpunkt für die Gestaltung der Flexibilität. Diese beiden Flexibilitätsaspekte stellen zugleich auch die Hauptunterscheidungsmerkmale der betrachteten Montagesysteme dar. Die *Skalierbarkeit* wird, nach der Analyse wichtiger je niedriger der Fahrzeugpreis ist. Die *Anpassbarkeit* wird dann in Richtung Segment F – also mit steigendem Fahrzeugpreis – wichtiger.

5.4.2 Triangulation der Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität

Die Triangulation der Umsetzungsmöglichkeiten soll die Ergebnisse der Interviews mit den teilnehmenden Beobachtungen in den Montagesystemen der OEMs vergleichen.

Beginnend mit dem Flexibilitätsaspekt *Anpassbarkeit*, welcher mittels eines Universalgreifers in den Montageanlagen der OEMs umgesetzt wurde. Für den Anwendungsfall des Klebens stellte dies für die OEMs die bevorzugte Umsetzungsmöglichkeit dar. Andere Umsetzungsmöglichkeiten für die *Anpassbarkeit* – wie Vorhalte – wurden nicht für die Umsetzung der *Anpassbarkeit* eingesetzt, auch wenn diese in den Montageanlagen eingebracht wurden. Die Abbildung 38 stellt den Vergleich der Umsetzungsmöglichkeiten für die *Anpassbarkeit* dar. Durch die Größe der Anteile im Kreisdiagramm wird eine Häufigkeit der Nennung der Umsetzungsmöglichkeit dargestellt.

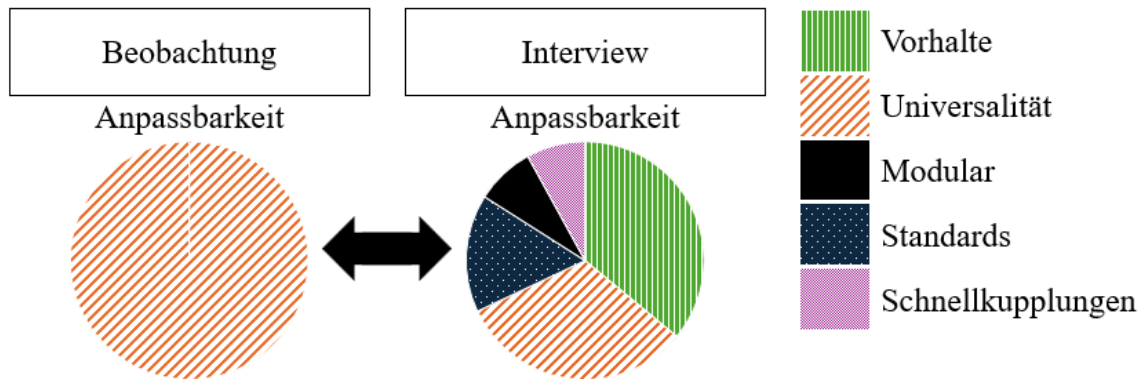


Abbildung 38: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Anpassbarkeit

Der nächste Flexibilitätsaspekt, welcher verglichen werden soll, ist die *Integrierbarkeit*. Dieser Flexibilitätsaspekt wurde in den Montagen der OEMs über zwei der sieben potenziellen Umsetzungsmöglichkeiten umgesetzt. Über Vorhalte und auch Standards in den Montageanlagen sind Integrationen von weiteren Fahrzeugprojekten möglich. Die am meisten genannte Umsetzungsmöglichkeit über Module ist für die *Integrierbarkeit* nicht umgesetzt worden. Auch die Möglichkeit Schnellkupplungen zu nutzen ist noch nicht Teil der Montageanlagen der OEMs. Der Vergleich zwischen Interview und Beobachtung ist in der Abbildung 39 dargestellt.

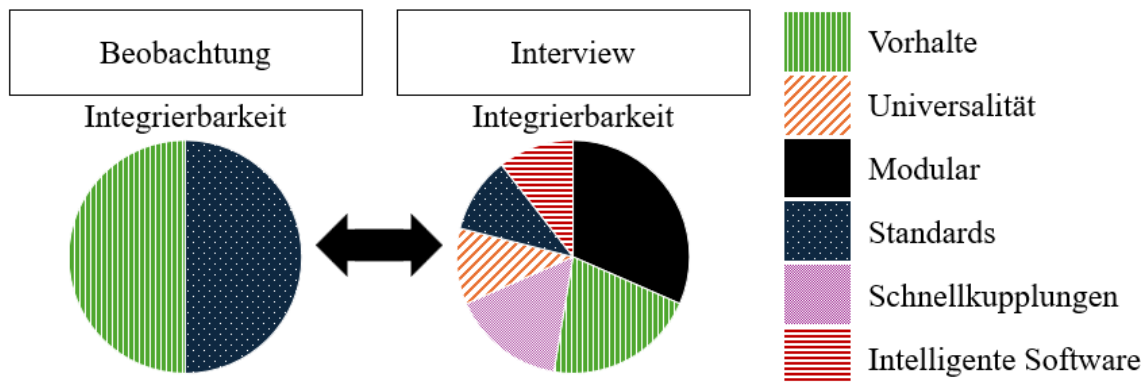


Abbildung 39: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Integrierbarkeit

In Bezug auf die *Konvertierbarkeit* wurde keine der benannten Umsetzungsmöglichkeiten in den Montageanlagen der OEMs umgesetzt. Dargestellt ist dieser Vergleich in der Abbildung 40.

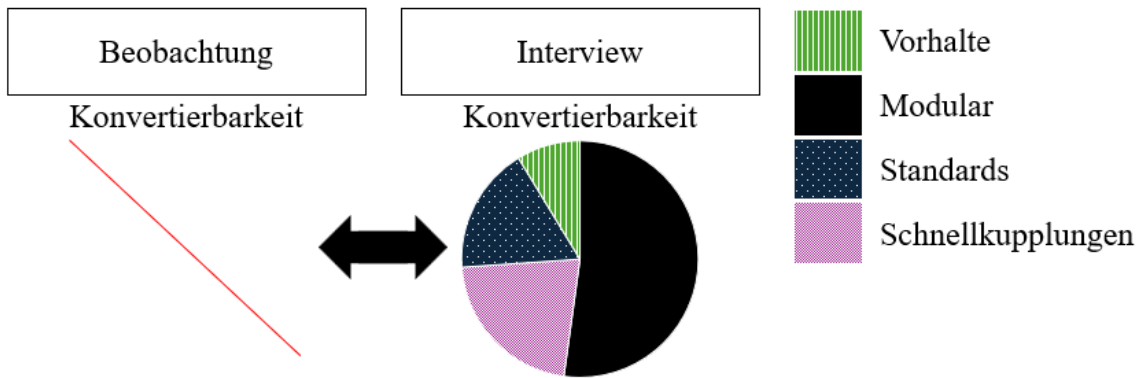


Abbildung 40: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Konvertierbarkeit
Die *Mobilität* von Montageanlagen wurde auch noch nicht in den Montagen der OEMs umgesetzt. Dies zeigt die Abbildung 41. In dem Fall „Sport“ wurde das Bauteil in der Montage über ein FTF in die Montageanlage transportiert. Hier ist somit nicht die Montageanlage als solche mobil.

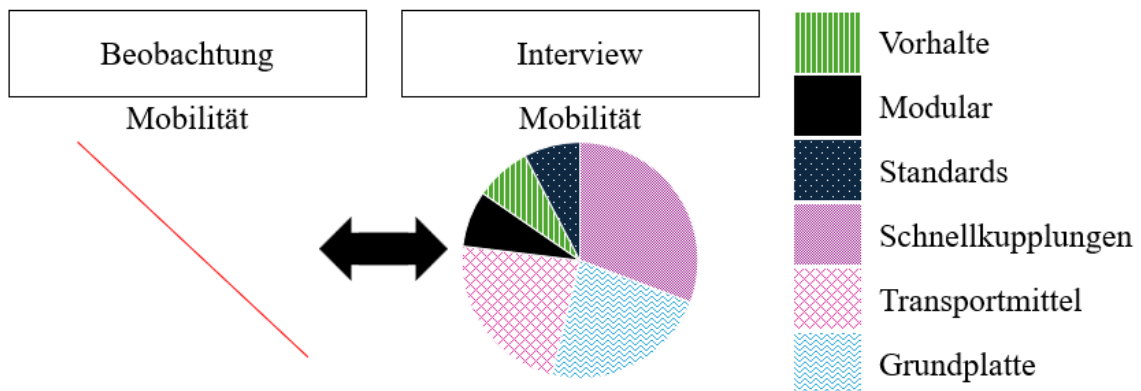


Abbildung 41: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Mobilität
Der nächste Flexibilitätsaspekt in der Triangulation ist die *Skalierbarkeit*. Die Hauptumsetzungsmöglichkeit nach den Interviews ist der Einsatz von Vorhalten. Dies konnte auch über die Beobachtungen bestätigt werden. Alle Fälle haben dies bestätigt und in den Montageanlagen umgesetzt. Die Umsetzungsmöglichkeit der Module wurde nicht in den Montageanlagen gesehen. Die Abbildung 42 zeigt diese Gegenüberstellung.

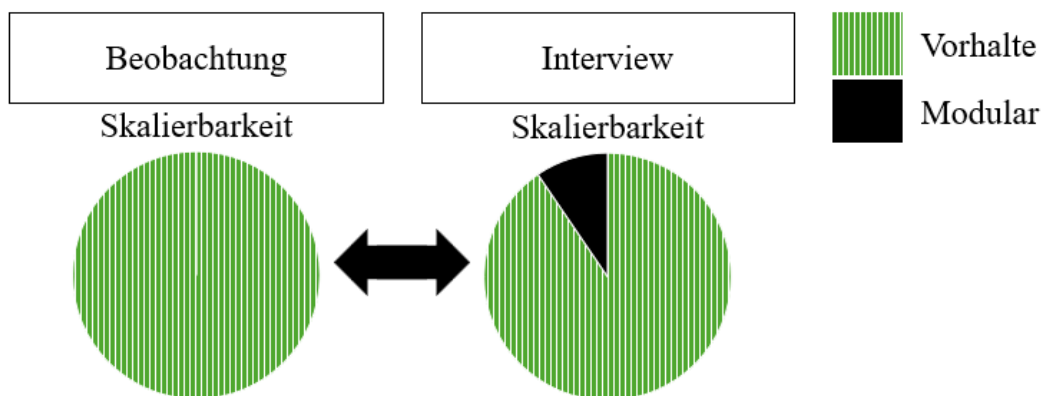


Abbildung 42: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Skalierbarkeit

Der nächste und letzte Flexibilitätsaspekt ist die *Wiederverwendbarkeit*. Hier wurde die Umsetzung über Standards in der Montage umgesetzt. Die weitere Hauptumsetzungsmöglichkeit der *Wiederverwendbarkeit* – Modular – ist jedoch nicht umgesetzt in den Montageanlagen. Diesen Vergleich zeigt die Abbildung 43.

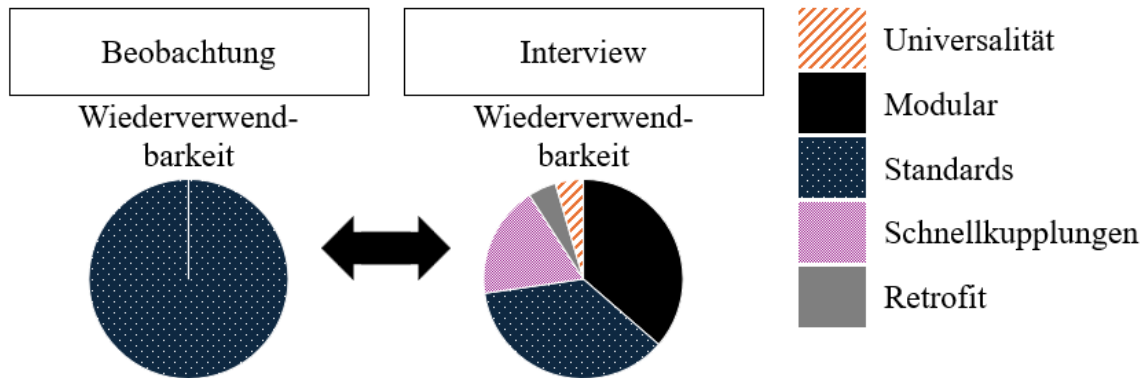


Abbildung 43: Triangulation der Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Wiederverwendbarkeit

Zusammenfassend können die einzelnen Umsetzungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit den Flexibilitätsaspekten verglichen werden. Aus diesem Vergleich sind dann zukünftige Potenziale zum Erreichen der Flexibilität in Montageanlagen zu erkennen.

Vorhalte: Vor allem für *Skalierbarkeit* und *Integrierbarkeit* genutzt obwohl auch eine gesteigerte Bedeutsamkeit für *Anpassbarkeit* angegeben wurde.

Standards: Standards in den Bestandteilen der Montageanlagen werden bei den OEMs hauptsächlich für die *Wiederverwendbarkeit* genutzt. Auch die *Integrierbarkeit* wird durch Standards umgesetzt. Dies passt zu den Angaben aus den Interviews, wo noch die *Anpassbarkeit*, *Mobilität* und *Konvertierbarkeit* als Flexibilitätsaspekte genannt wurden, welche durch Standards umgesetzt werden können.

Universalität: Die *Anpassbarkeit* wird in den Montageanlagen durch Universalität umgesetzt. Einige Interviews geben die Universalität noch für die *Integrierbarkeit* und *Wiederverwendbarkeit* an. Dies wird von den OEMs jedoch noch nicht umgesetzt.

Modular: Die modulare Gestaltung wird in den Fabriken der OEMs nicht klar in Montageanlagen umgesetzt, auch wenn dies für sechs Flexibilitätsaspekte als Umsetzungsmöglichkeit von den Experten angegeben wird. Erste Module sind in den Montageanlagen zu erkennen, welche aber nicht zur Steigerung der Flexibilität genutzt werden.

Das Ergebnis der Triangulation in Bezug auf die Umsetzungsmöglichkeiten ist somit, dass die Erkenntnisse aus den beiden Datenquellen übereinstimmen. Die Interviews geben jedoch noch deutlich mehr Umsetzungsmöglichkeiten an, was für ein weiteres Potenzial zur Steigerung der Flexibilität in Montageanlagen spricht.

Um die Umsetzungsmöglichkeiten für die verschiedenen Flexibilitätsaspekte handhabbar und anwendbar zu machen, werden diese auf die Bestandteile von Montageanlagen, Bereitstellung, Endeffektor, Gestell, Peripherie, Roboter, Sicherheitstechnik und Steuerung angewandt. Im Folgenden werden bezogen auf die Flexibilitätsaspekte, Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage angegeben. Die Darstellung für die einzelnen Flexibilitätsaspekte wird über Netzdiagramme realisiert. Je Flexibilitätsaspekt zeigt die Entfernung der Datenpunkte zum Mittelpunkt des Diagramms die Häufigkeit der Angabe der Umsetzungsmöglichkeit je Bestandteil der Montageanlagen.

Beginnend mit der Abbildung 44 werden die Umsetzungsmöglichkeiten für den Flexibilitätsaspekt *Anpassbarkeit* aufgezeigt. Die Verteilung dieser Konzepte in Bezug auf die Roboterbestandteile stammt aus den Angaben von Experten aus der Montagelanung. Das Ergebnis aus der Abbildung 44 zeigt, dass die Vorhalte vor allem in der Steuerung, der Bereitstellung sowie in der Peripherie der Anlage von großer Bedeutung sind. Zusätzlich ist die Universalität für die Steuerung, die Bereitstellung, den Endeffektor, das Gestell und auch den Roboter relevant. Durch diese breiter gefächerte Anwendbarkeit dieses Konzepts, kann die Universalität als wichtigste Umsetzungsmöglichkeit für die *Anpassbarkeit* angegeben werden. Ähnlich breit gefächert, lassen sich auch die Standards in den Montageanlagen einsetzen, um die *Anpassbarkeit* zu erreichen. In Ergänzung zu der Universalität sind die Standards auch für den Einsatz in der Sicherheitstechnik von Relevanz. Im Vergleich zu den Standards in der Anlagengestaltung sind die Standards in den Produkten auch vorteilhaft für die *Anpassbarkeit*. Zwar für weniger Bestandteile der Montageanlagen aber mit stärkerer Bedeutung. Die letzte Umsetzungsmöglichkeit für die *Anpassbarkeit* sind die Schnellkupplungen, welche für fünf der sieben Bestandteile von Montageanlagen mit geringer Relevanz zum Einsatz kommen können, um die *Anpassbarkeit* zu stärken. Die Universalität war in Summe die wichtigste Umsetzungsmöglichkeit für die *Anpassbarkeit*. Danach folgen die Vorhalte und die Standards. Somit sollten mindestens diese drei Konzepte mit in Montageanlagen eingesetzt werden, um die *Anpassbarkeit* zu erreichen.

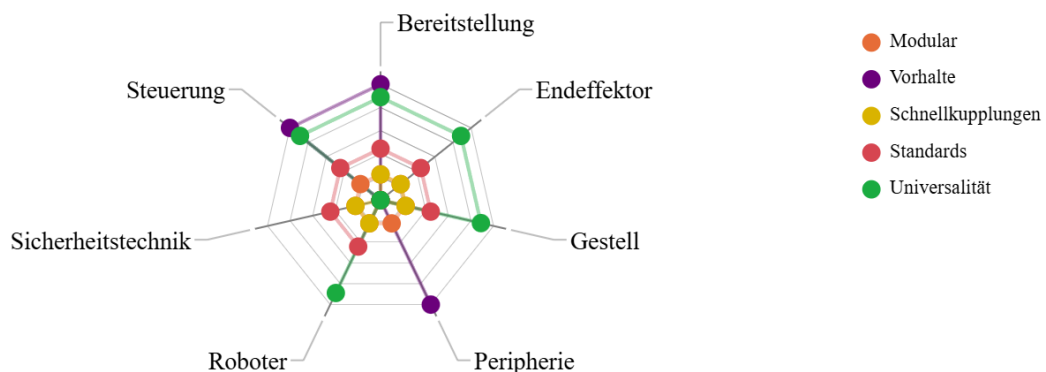


Abbildung 44: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Anpassbarkeit

Die nächste Darstellung, die Abbildung 45, zeigt die Umsetzungsmöglichkeiten bezogen auf die *Integrierbarkeit*. Dort sticht der Einsatz von Modulen heraus. Bei allen Bestandteilen der Montageanlagen bis auf die Peripherie sollten Module zum Einsatz kommen. Des Weiteren stellen die Schnellkupplungen ein Konzept dar, welches für viele Bestandteile der Montageanlage die *Integrierbarkeit* verbessern kann. In Bezug auf die *Integrierbarkeit*, stellen die Vorhalte für die Bestandteile Steuerung, Bereitstellung und Peripherie eine wichtige Umsetzungsmöglichkeit dar. Dieses spezialisiertere Konzept ist im Vergleich zu den Schnellkupplungen für weniger Bestandteile einsetzbar, verspricht dahingegen aber die Integrierbarkeit stärker zu verbessern. Die Universalität ist auch für die *Integrierbarkeit* von Relevanz für alle Bestandteile bis auf die Sicherheitstechnik und die Peripherie. Darüber hinaus stellen Standards in den Bestandteilen ein Konzept mit geringerer Bedeutung dar. Zuletzt ist das Konzept der intelligenten Software lediglich für die Steuerung der Montageanlage relevant. Zusammenfassend sollte sich der Fokus der Konzepte für die *Integrierbarkeit* auf den Einsatz von Modulen, Schnellkupplungen und auch Vorhalten konzentrieren. Zusätzlich sollte sich der Einsatz der Konzepte für die *Integrierbarkeit* auf die Bereitstellung, die Steuerung und auch den Endeffektor konzentrieren, da dort die meisten Konzepte eine Verbesserung der *Integrierbarkeit* angeben.

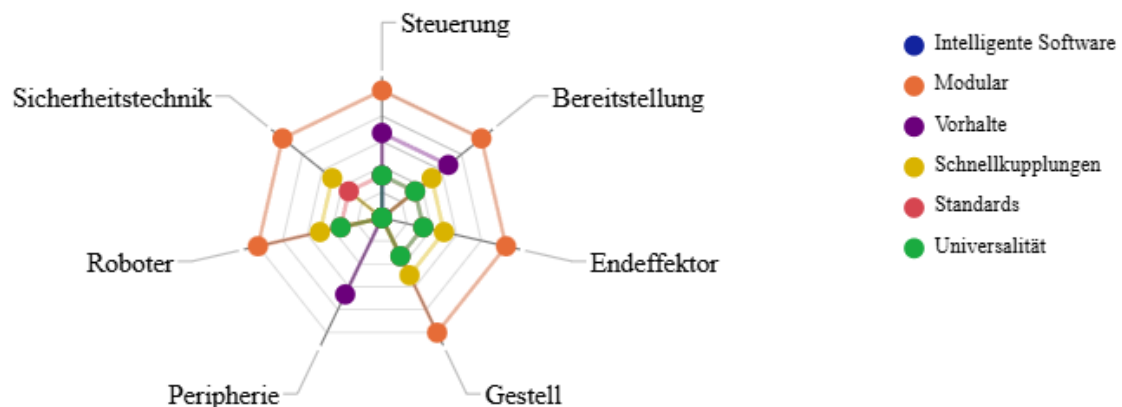


Abbildung 45: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Integrierbarkeit

Darauf folgen in der Abbildung 46 die Umsetzungsmöglichkeiten für die *Konvertierbarkeit*. In den Umsetzungsmöglichkeiten sollte der Fokus auf dem Einsatz von Modulen liegen. Für alle Bestandteile, ausgenommen von der Peripherie, kann die modulare Gestaltung zum Einsatz kommen. Dies ist auch mit Abstand die wichtigste Umsetzungsmöglichkeit für die *Konvertierbarkeit*. Nachfolgend sind die Schnellkupplungen und auch der Einsatz von Standards für die *Konvertierbarkeit* von Relevanz. Die Standards sind dabei – wie auch der Einsatz von Modulen – für alle Bestandteile außer der Peripherie relevant. Ähnlich verhält es sich mit den Schnellkupplungen, welche zusätzlich nicht auf die Steuerung bezogen werden. Die Vorhalte sind auch für die *Konvertierbarkeit* von Relevanz – für die Steuerung, die Peripherie sowie die Bereitstellung. Dabei ist der Ein-

satz der Vorhalte aber von geringerer Bedeutung für die Verbesserung der *Konvertierbarkeit*. Als Empfehlung zur Steigerung der *Konvertierbarkeit* in Montageanlagen, sollten Module, Schnellkupplungen, als auch Standards zum Einsatz kommen.

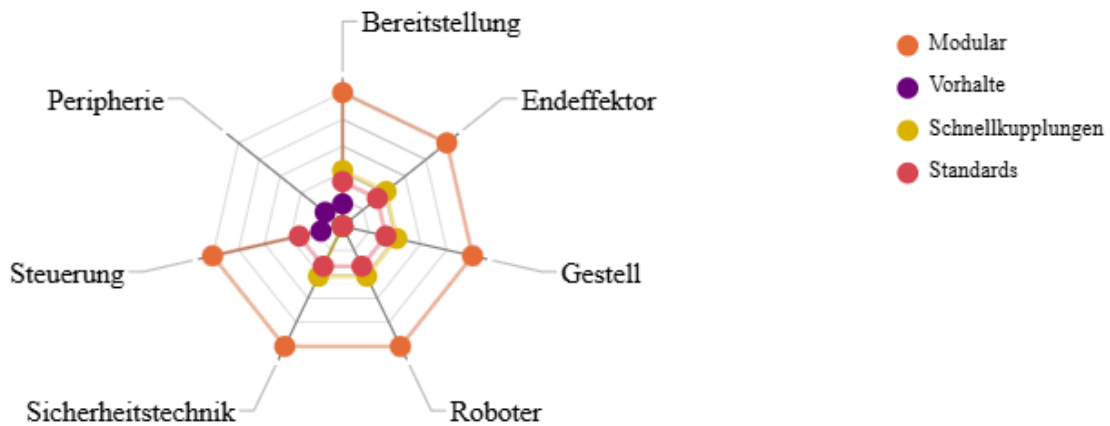


Abbildung 46: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Konvertierbarkeit

Nach der *Konvertierbarkeit* folgen in der Abbildung 47 Umsetzungsmöglichkeiten für Bestandteile der Montageanlagen für die *Mobilität*. Als Haupt-Umsetzungsmöglichkeit für die Mobilität werden die Schnellkupplungen für den Endeffektor, das Gestell, den Roboter, die Sicherheitstechnik, als auch die Bereitstellung angegeben. Von geringerer Relevanz folgen die Transportmittel und Grundplatten, welche von den Experten auf die Bestandteile Endeffektor, Gestell, Roboter und Sicherheitstechnik bezogen werden. Die restlichen Umsetzungsmöglichkeiten sind von geringerer Relevanz. Die Vorhalte sind erneut für die Bereitstellung, die Peripherie und auch die Steuerung relevant. Die Standards in der Anlage sollten für die Umsetzung der *Mobilität* in allen Bestandteilen, bis auf die Peripherie zum Einsatz kommen. Die letzte Umsetzungsmöglichkeit – Modular – kann wie auch die Standards für die Bestandteile Endeffektor, Gestell, Roboter, Sicherheitstechnik, Steuerung und Bereitstellung eingesetzt werden.

Final, sollten die Schnellkupplungen, die Grundplatte oder die Transportmittel eingesetzt werden, um die *Mobilität* einer Montageanlage zu verbessern. Dies bezieht sich nach den Ergebnissen auf fast alle Bestandteile, bis auf die Peripherie.

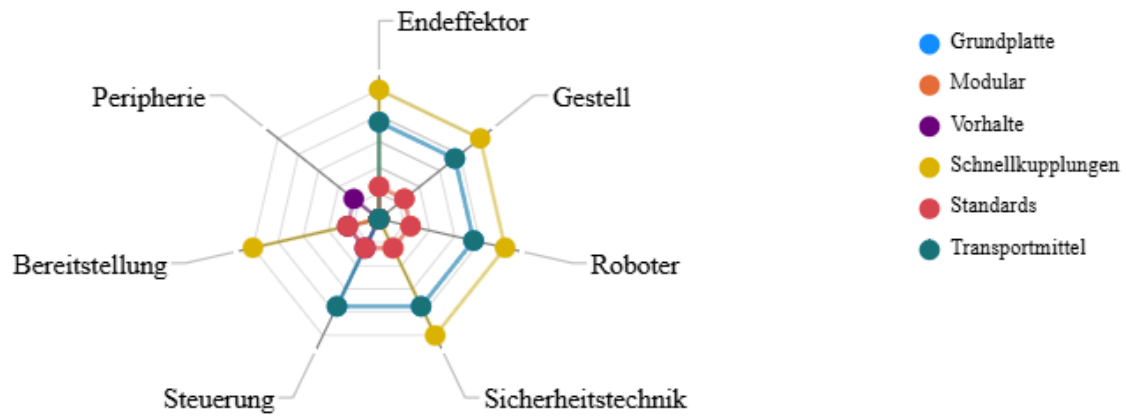


Abbildung 47: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Mobilität

Die Umsetzungsmöglichkeiten für die *Skalierbarkeit* werden in der Abbildung 48 dargestellt. Im Vergleich zu den bisherigen Flexibilitätsaspekten werden lediglich zwei Konzepte für die Umsetzung der *Skalierbarkeit* genannt. Die Vorhalte überwiegen mit der Relevanz für die *Skalierbarkeit* mit einem Bezug auf die Bestandteile der Montageanlagen Bereitstellung, Peripherie und Steuerung. Der Einsatz der Module ist dahingegen für alle Bestandteile der Montageanlagen, ausgenommen von der Peripherie, relevant. Somit sollte für die *Skalierbarkeit* ein starker Fokus auf den Einsatz von Vorhalten gesetzt werden. Wird dies mit dem Einsatz von Modulen kombiniert, kann die *Skalierbarkeit* einer Montageanlage am stärksten verbessert werden.

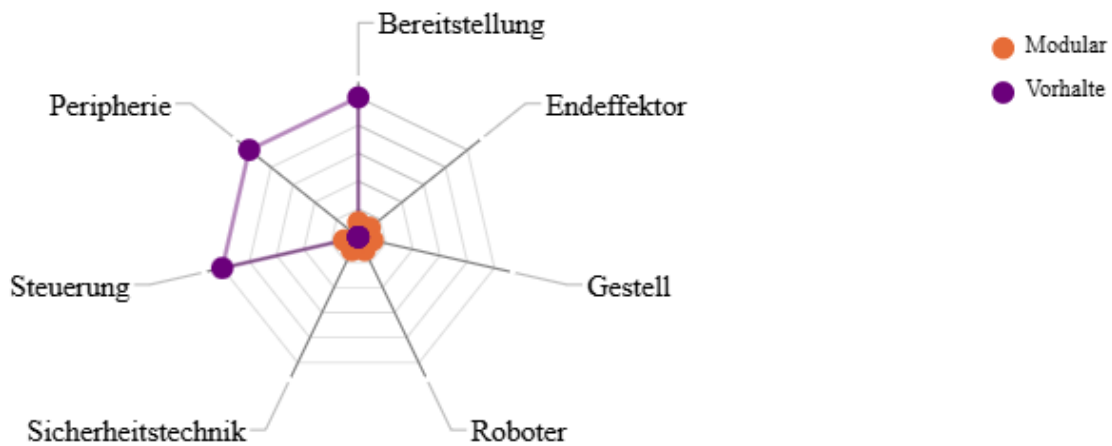


Abbildung 48: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Skalierbarkeit

Als letzten Flexibilitätsaspekt zeigt die Abbildung 49 die Umsetzungsmöglichkeiten für die Bestandteile der Montageanlagen für die *Wiederverwendbarkeit*. Am relevantesten wurde der Einsatz von Modulen und von Standards gesehen. Diese beiden sind dann für alle Bestandteile von Montageanlagen, ausgenommen von der Peripherie einsetzbar. Das nächste Konzept sind die Schnellkupplungen die für die Verbesserung der *Wiederverwendbarkeit* in der Bereitstellung, dem Endeffektor, dem Gestell, dem Roboter und der Sicherheitstechnik einzusetzen sind. Von verringerter Relevanz sind das Retrofit, welches

bis auf die Bereitstellung für alle Bestandteile der Montageanlagen eingesetzt werden sollte. Das letzte Konzept für die *Wiederwendbarkeit* ist die Universalität, welche bei fast jedem Roboterbestandteil zum Einsatz kommen soll. Lediglich die Sicherheitstechnik ist hier ausgenommen. Für die Verbesserung der *Wiederverwendbarkeit* sollten Module, Standards und Schnellkupplungen eingesetzt werden. Dies soll dann vor allem auf den Endeffektor, dem Gestell und auch den Roboter angewandt werden.

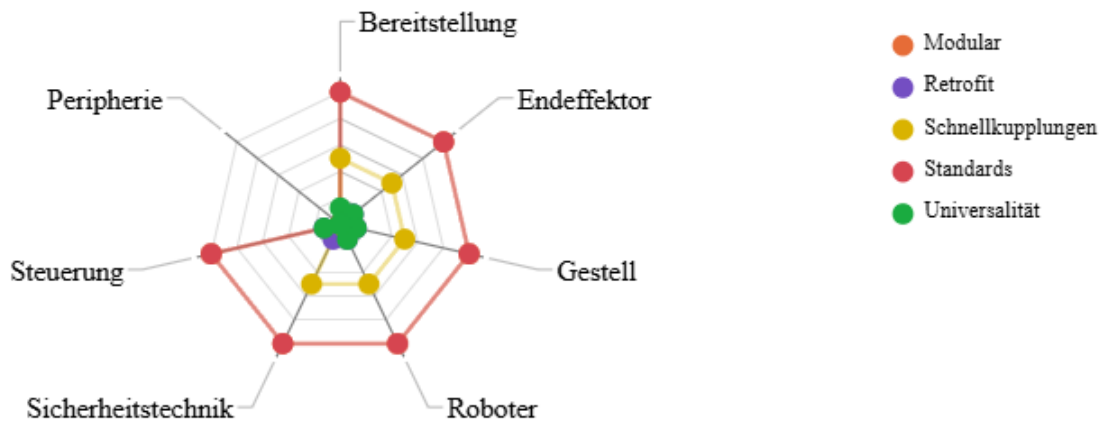


Abbildung 49: Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten je Bestandteil einer Montageanlage für die Wiederverwendbarkeit

Nach dem Bezug der Umsetzungsmöglichkeiten auf die Bestandteile der Montageanlagen und Flexibilitätsaspekte wird noch eine übergreifende Analyse für die Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität vorgestellt. Die Abbildung 50 zeigt dazu die Umsetzungsmöglichkeiten quantitativ analysiert. Die Anzahl summiert den Bezug der Umsetzungsmöglichkeiten auf die Bestandteile von Montageanlagen auf. Klar zu erkennen ist, dass die modulare Gestaltung die wichtigste Umsetzungsmöglichkeit für die Flexibilität darstellt. Nachfolgend sollte der Fokus auf dem Einsatz von Standards und auch Vorhalten, sowie Schnellkupplungen liegen. Ein letztes signifikantes Konzept ist die Universalität. Die weiteren Konzepte sind für spezifischere Flexibilitätsanforderungen nach den oben gezeigten Abbildungen zu betrachten.

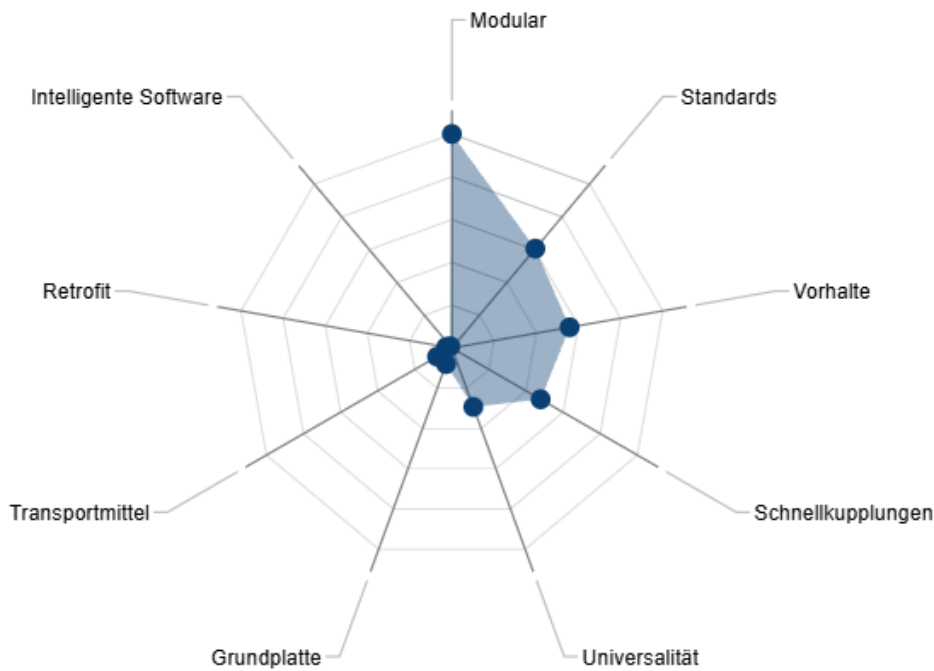


Abbildung 50: Aufsummierte Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten

Über die Einzeldarstellungen der Flexibilitätsaspekte hinaus, zeigt die Abbildung 51 eine Zusammenfassung der Umsetzungsmöglichkeiten und Bestandteile der Montageanlagen mit allen Flexibilitätsaspekten, welche in einer Kombination zwischen Umsetzungsmöglichkeit und Bestandteil umgesetzt werden können. Die Kombinationen von Umsetzungsmöglichkeit und Bestandteil werden je Zelle farblich markiert. Diese Markierungen stellen teils einzelne Aspekte und teils Gruppen von Aspekten dar. So kann die Darstellung bspw. in einem Planungsprojekt genutzt werden. Es ergibt sich je Fokus der Flexibilität ein individueller Baukasten für die Grobplanung mit passenden Umsetzungsmöglichkeiten.

	Steuerung	Endeffektor	Roboter	Gestell	Sicherheitstechnik	Bereitstellung	Peripherie	
Retrofit								Alle
Schnellkupplung								Wiederverwendbarkeit
Modular								Mobilität
Vorhalte								Anpassbarkeit + Integrierbarkeit + Wiederverwendbarkeit
Standards								Anpassbarkeit + Integrierbarkeit + Skalierbarkeit + Konvertierbarkeit + Mobilität
Universalität								Anpassbarkeit + Integrierbarkeit + Mobilität + Konvertierbarkeit + Wiederverwendbarkeit
Grundplatte								
Transportmittel								

Abbildung 51: Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilitätsaspekte für die Bestandteile von Montageanlagen

5.5 Herleitung des praxisorientierten Flexibilitätsmodells

Aus der Analyse der Multiple Case Study kann eine Praxissicht auf das konzeptionelle Flexibilitätsmodell erarbeitet werden. Das Ergebnis stellt ein praxisorientiertes Flexibilitätsmodell für die Planung von flexiblen Montageanlagen dar und soll damit die FF2 beantworten. Auf Basis des konzeptionellen Flexibilitätsmodells baut auch das praxisorientierte Flexibilitätsmodell auf dem Planungsprozess inkl. der Planungshorizonte, auf den Flexibilitätsaspekten und den Umsetzungsmöglichkeiten für die Flexibilität auf. Diese Bestandteile wurden durch die Experten hinterfragt oder auch ergänzt.

Beginnend mit den Planungshorizonten, stimmen die Experten mit dem theoretischen konzeptionellen Flexibilitätsmodell überein. Somit übernimmt das praxisorientierte Flexibilitätsmodell die drei Planungshorizonte – *operativ, taktisch und strategisch*. Diese drei Planungshorizonte werden von den Experten der Multiple Case Study unterschiedlich interpretiert. Es ergeben sich die Zeiträume für die Planungshorizonte je Segment der Automobilindustrie. Darüber hinaus werden noch definierte Planungsaufgaben den Planungshorizonten zugeordnet. *Operativ* umfasst Aufgaben, welche den vorhandenen Anlagenbestand in der Montage betreffen. *Taktisch* beschreibt dabei Aufgaben für neue Montageanlagen und auch neue Fahrzeugprojekte. Zum Schluss umfassen *strategische* Aufgaben übergeordnete Themen, wie ein ganzes Montagelayout – ohne direkten Fahrzeugbezug.

Im Bereich der Flexibilitätsaspekte weichen die Sichtweisen der Experten aus der Praxis vom konzeptionellen Flexibilitätsmodell leicht ab. Von den acht Flexibilitätsaspekten, werden durch die Diskussion der *Indikationen I bis VI, Modularität* und *Diagnosefähigkeit* als nicht relevant für die Flexibilität angesehen. *Modularität* wird als Eingangsgröße und *Diagnosefähigkeit* als allgemeine Fähigkeit für Montageanlagen gesehen. Die restlichen Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell werden auch in der Praxissicht als relevant angesehen.

Über die Flexibilitätsaspekte hinaus ergab die Analyse der empirischen Daten, dass spezifische Flexibilitätsanforderungen je Montagesystem in der Automobilindustrie formuliert werden sollten. Durch unterschiedliche *Taktzeiten, Variantenanzahlen* und *Jahresproduktionsmengen* ergeben sich abweichende Anforderungen an die Flexibilität, welche zu Beginn eines Planungsprojekts entsprechend betrachtet werden sollten.

Der letzte Bestandteil des konzeptionellen und praxisorientierten Flexibilitätsmodells sind die Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität. Die Experten aus der Automobilindustrie geben hier neun verschiedene Gruppen an, um die sechs Flexibilitätsaspekte in Montageanlagen umsetzen zu können. Zu diesen Gruppen gehören *Transportmittel, Universalität, Schnellkupplungen, Vorhalte, Retrofit, Modular, Intelligente Software, Grundplatte* und *Standards*. Durch die Analyse der Daten, konnten diese Gruppen auch auf die

Herleitung des praxisorientierten Flexibilitätsmodells

Bestandteile von Montageanlagen bezogen werden, sodass klare und zielgerichtete Umsetzungsmöglichkeiten formuliert werden können.

Die Abbildung 52 fasst die Informationen – Planungshorizonte, Flexibilitätsaspekte inkl. spezifischer Flexibilitätsanforderungen und Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität – für das praxisorientierte Flexibilitätsmodell zusammen.

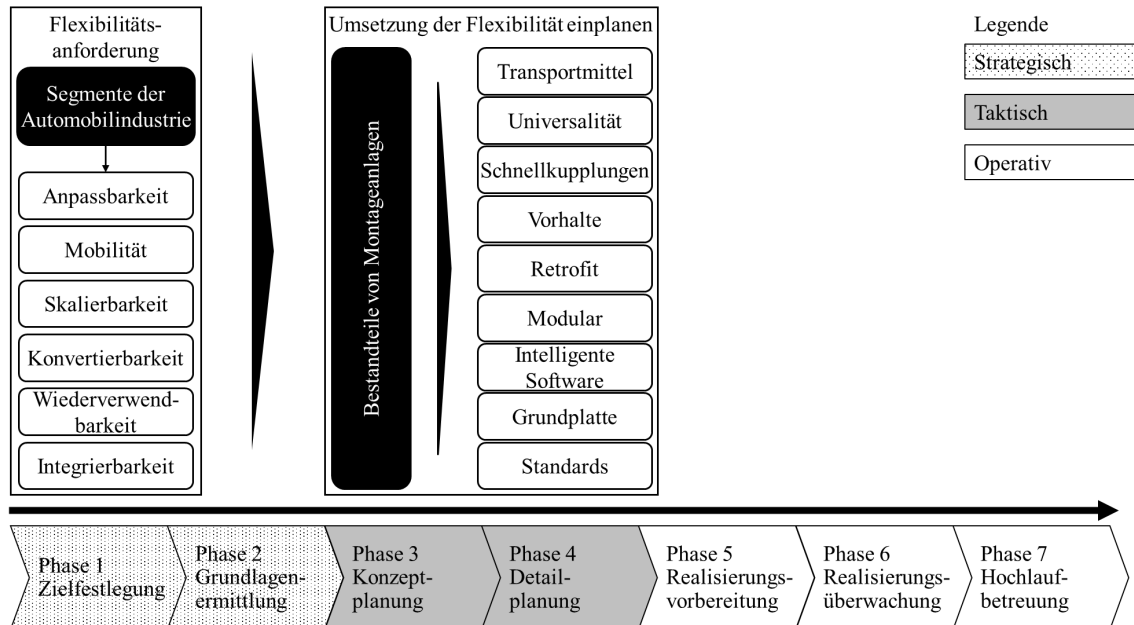


Abbildung 52: Praxisorientiertes Flexibilitätsmodell für die Planung von flexiblen Montageanlagen

6 Integriertes Montage-Flexibilitätsmodell

Dieses Kapitel soll die Ergebnisse der Multiple Case Study mit den theoretischen Grundlagen zusammenführen, um final ein integriertes *Montage-Flexibilitätsmodell* aus Theorie und Praxis zu erarbeiten und so die FF3 beantworten zu können. Auf Basis des konzeptionellen Flexibilitätsmodell, soll das *Montage-Flexibilitätsmodell* aus den Bestandteilen Planungsprozess inkl. Planungshorizonte, Flexibilitätsaspekte und Umsetzungsmöglichkeiten bestehen. Der Abschnitt 6.1 diskutiert dazu den Planungsprozess, um eine Methodik für die Planung und Implementierung flexibler Montageanlagen zu erreichen. Daraufhin betrachtet der Abschnitt 6.2 die Flexibilitätsaspekte bevor der Abschnitt 6.3 die Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität beschreibt. Abschließend fasst der Abschnitt 6.4 die Ergebnisse der Diskussionen zum *Montage-Flexibilitätsmodell* zusammen.

6.1 Fabrikplanungsprozess für flexible Montageanlagen

Dieser Abschnitt soll den ersten Bestandteil des *Montage-Flexibilitätsmodells* herausarbeiten, indem der Planungsprozess inkl. der Planungshorizonte zwischen konzeptionellen Flexibilitätsmodell und praxisorientierten Flexibilitätsmodell analysiert wird.

Die Planungshorizonte aus der Literatur (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 130; Grundig 2021, S. 64; Schenk et al. 2014, S. 295; Wiendahl et al. 2024, S. 30) werden im Folgenden mit den gesammelten Ergebnissen der Multiple Case Study gegenübergestellt. Für den direkten Vergleich wird die Darstellungsform der Boxplots inkl. der Mittelwerte und der Mediane gewählt, um Schwankungen in den Datenquellen darzustellen.

Werden die Planungshorizonte verglichen, ist zu erkennen, dass diese aus der Multiple Case Study mit den Literaturangaben weitestgehend übereinstimmen. Eine Erkenntnis ist jedoch, dass vor allem im *taktischen* und *strategischen* Planungshorizont die Zeiträume in der Automobilindustrie kürzer wahrgenommen werden, als es in der Literatur der Fall ist. Dahingegen wird der *operative* Planungshorizont in der Automobilindustrie länger interpretiert, als es in der Literatur der Fall ist. Dies zeigt die Abbildung 53.

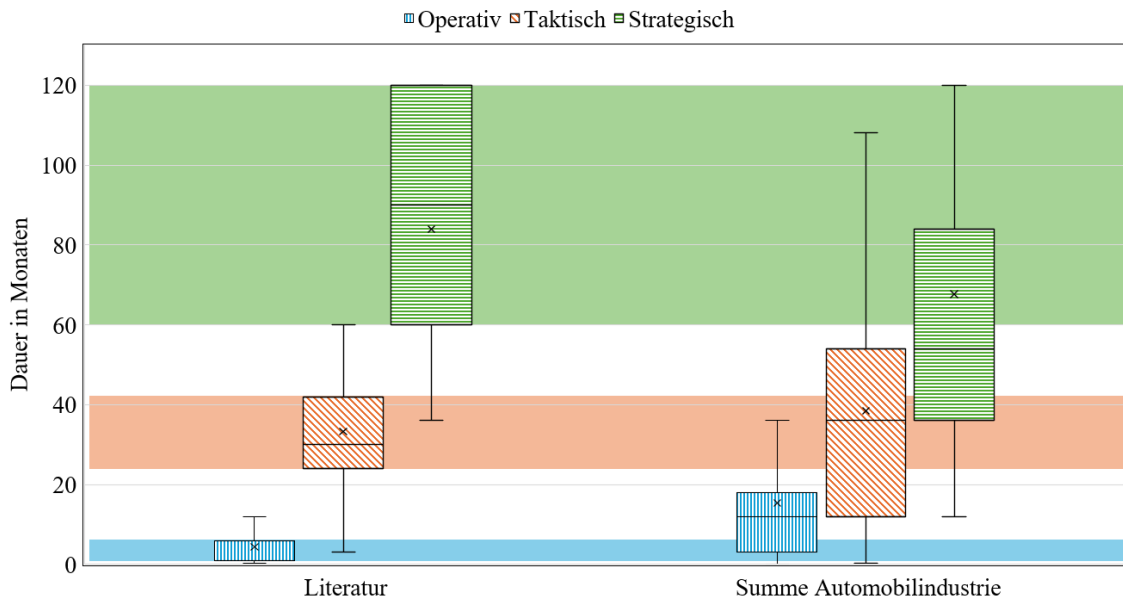


Abbildung 53: Vergleich der Planungshorizonte der Literatur mit der Industrie

Über die Angaben der Zeiträume je Planungshorizont hinaus, können auch die Tätigkeiten je Planungshorizont zwischen Literatur und Praxis verglichen werden.

Im *operativen* Planungshorizont ist eine Übereinstimmung der Planungstätigkeiten zu erkennen. Die Literatur beschreibt die präzise Planung der Produktion (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 130; Grundig 2021, S. 64) wohingegen die Experten die präzise Planung detaillierter auf die Ebene der Montageanlagen beziehen und den derzeitigen Anlagenbestand als operative Aufgabe verstehen.

Der *taktische* Planungshorizont umfasst in der Literatur den Hauptteil der Betriebsmittelplanung – die Dimensionierung (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 130; Grundig 2021, S. 64). In diesem Punkt stimmen die Experten aus der Praxis erneut mit der Literatur überein. Es wird die Planung neuer Montageanlagen im *taktischen* Planungshorizont beschrieben.

Für den dritten und letzten Planungshorizont – *strategisch* – gibt die Literatur unter anderem die Planung für zukünftige Investitionen an (vgl. Burggräf et al. 2021b, S. 130; Grundig 2021, S. 64). Auch dies bestätigen die Experten der Multiple Case Study und beziehen dies auf die Planungstätigkeiten in der Montage der Automobilindustrie. Die strategische Planungsaufgabe aus Perspektive der Experten der Automobilindustrie beschreibt somit übergeordnete Themen für zukünftige Montagesysteme – ohne direkten Fahrzeugbezug.

Die Gegenüberstellung der Planungstätigkeiten je Planungshorizont zeigt die Tabelle 24.

Tabelle 24: Vergleich der Planungstätigkeiten je Planungshorizont

	Literatur	Praxis
Operativ	• Festlegung Produktarten • Präzise Planung der Produktion	• Aktueller Anlagenbestand • Änderungen am aktuellen Anlagenbestand
Taktisch	• Betriebsmittel-dimensionierung	• Planung von neuen Montageanlagen
Strategisch	• Planung von langfristigen Investitionen	• Z. B. übergeordnete Themen ohne Fahrzeugbezug

Zusammenfassend bestätigen die Experten aus der Multiple Case Study die Planungsaufgaben je Planungshorizont aus der Literatur. Auch die Planungshorizonte inkl. der passenden Zeiträume werden im Grundsatz von den Experten bestätigt.

Dennoch scheint der Planungsprozess nicht zu 100% passend auf die Automobilindustrie übertragbar zu sein. Da in der Praxis die Planungshorizonte verschmelzen, sind Überschneidungen der Planungsphasen zu erkennen. Die Planungsphasen müssten somit zeitlich komprimiert durchgeführt werden und es müssten teils auch Aktivitäten zu früheren Zeitpunkten durchgeführt werden. Vor allem im *taktischen* Planungshorizont, welcher die Betriebsmittelplanung umfasst. Das Ziel ist eine kurzfristigere Reaktionsfähigkeit der Montage.

Die kürzere und breiter gestreuten Planungshorizonte in der Automobilindustrie können auf verschiedene Faktoren zurückgeführt werden. In Bezug auf die OEMs werden von den Experten mehrere Projekte zeitgleich bearbeitet, welche dann überlagernde Projektzeitpläne nach den kürzer werdenden Produktlebenszyklen der verschiedenen Projekte haben. Dies lässt die Planungshorizonte in der Industrie häufiger überlagern und lässt auch die klare Trennung der Planungshorizonte verschwimmen. Dies hat dann zusätzlich zur Folge, dass die Planungstätigkeiten, die nach den Prozessen der Fabrikplanung im mittelfristigen Planungshorizont durchgeführt werden, in der Automobilindustrie im kurzfristigen Planungshorizont durchgeführt werden müssen.

Daraus resultiert aber auch der höhere Bedarf an einer Einbindung der Flexibilität in die Betriebsmittelplanung, sodass die vielen, kurzzyklischen Änderungen durch verschiedene Projekte in den Montageanlagen umgesetzt werden können. Verschiedene Themen sollten dafür im Planungsprozess umgesetzt werden – vor allem in den Planungsphasen *Zielfestlegung*, *Konzeptplanung*, *Detailplanung* und *Hochlaufbetreuung*. Durch die Einbindung in die Planungsphasen des Planungsprozesses kann dann die Methodik für die Planung flexibler Montageanlagen beschrieben werden.

Die einzelnen Prozessanpassungen, welche notwendig sind, um flexible Montageanlagen für die Segmente der Automobilindustrie zu planen, werden im Folgenden beschrieben.

Zielfestlegung: Im Zuge der Zielfestlegung sollte die Flexibilität einen direkten Eintrag bekommen, um die Ausrichtung der Betriebsmittel der Montage zu beeinflussen. In Abhängigkeit des jeweiligen Montagesystems kann der Fokus der Flexibilität entsprechend von definierten Anforderungen als Ziel aufgestellt werden. Durch die klare Formulierung des Ziels der Flexibilität wird die folgende Planung beeinflusst. Das Ziel kosteneffizient zu planen, steht dann in einer Konkurrenz mit der Flexibilitätsanforderung. Die Ausrichtung zur Flexibilität über der Kosteneffizienz muss in der *Zielfestlegung* definiert werden.

Konzeptplanung: In der *Konzeptplanung* ist vor allem die Erstellung von Planungsalternativen und die Dimensionierung der Betriebsmittel durchzuführen. Entsprechend der *Zielfestlegung* sollen Konzepte für die Umsetzung der Betriebsmittel erstellt und zur Entscheidung gebracht werden. In Bezug auf die Flexibilität könnten hier die Umsetzungsmöglichkeiten aus dem praxisorientierten Flexibilitätsmodell zum Einsatz kommen. Es können grobe Vorgaben zur Gestaltung der Montageanlage getätigt werden. Durch die *Zielfestlegung* von verschiedenen Aspekten der Flexibilität für die Montageanlagen können Rahmenbedingungen für die Planungsalternativen vorgegeben und durch individuelle Rahmenbedingungen ergänzt werden. Auf Basis der beschriebenen Aspekte der Flexibilität, können nun Planungsalternativen erstellt und entsprechend bewertet werden.

Detailplanung: Nach der *Konzeptplanung*, soll eine Planungsalternative detaillierter ausgeplant und in einem Lastenheft zur Vergabe ausgeschrieben werden. Auch für die *Detailplanung* können die Umsetzungsmöglichkeiten genutzt werden, um für jeden Bestandteil einer Montageanlage entsprechende Konzepte im Lastenheft zu beschreiben, sodass die in der *Zielfestlegung* beschriebenen Flexibilitätsaspekte bestmöglich in der Montageanlage vorhanden sind. Es ist dabei zu prüfen, ob die Flexibilität beispielsweise nur im Endeffektor benötigt wird und die übrigen Bestandteile der Montageanlage konventionell im Lastenheft beschrieben werden. Dadurch können Planungsabteilungen auch den Grad der Flexibilitätserreichung der Montageanlage im Lastenheft umschreiben und mit den restlichen definierten Zielen abgleichen.

Hochlaufbetreuung: Für die Einbringung der Flexibilität in die *Hochlaufbetreuung* müssen während des Aufbaus der Montageanlage, die Anforderungen an die Flexibilität aus dem Lastenheft überprüft werden. Es ist zu bewerten, ob die geforderte Flexibilität aus der *Zielfestlegung* erreicht wurde.

Zusammenfassend kann der Planungsprozess der Literatur durch die empirischen Daten aus der Automobilindustrie, für das *Montage-Flexibilitätsmodell* dargestellt werden. Der Planungsprozess der Fabrikplanung (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011, S. 8), sowie die Planungshorizonte – *operativ, taktisch und strategisch* – werden bestätigt. Die Überlagerung der Planungshorizonte in der Automobilindustrie resultiert dafür in einer Verschiebung der Tätigkeiten je Planungsphase und Planungshorizont. Die Detailplanung im

Zuge der Dimensionierung von Montageanlagen sollte für eine gesteigerte Reaktionsfähigkeit auch im operativen Planungshorizont durchgeführt werden. Dies zeigt die Abbildung 54, in welcher die Planungsphasen und Planungshorizonte für das *Montage-Flexibilitätsmodell* dargestellt werden.

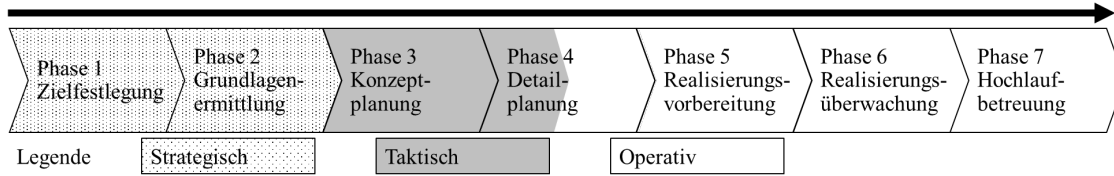


Abbildung 54: Planungshorizonte der Fabrikplanung für das Montage-Flexibilitätsmodell

6.2 Beschreibung der Flexibilität und der Flexibilitätsanforderungen für Montageanlagen

Das konzeptionelle Flexibilitätsmodell mit den Flexibilitätsaspekten wurde mittels der internationalen systematischen Literaturrecherche erarbeitet. Durch die Multiple Case Study wurde eine Praxissicht auf das konzeptionelle Flexibilitätsmodell erstellt. Teil des praxisorientierten Flexibilitätsmodells waren die *Indikationen I* bis *VI*, durch welche z. B. die Flexibilitätsaspekte *Modularität* und *Diagnosefähigkeit* in der Praxissicht als nicht relevant für die Flexibilität in Montageanlagen angesehen wurden. Diese Indikationen werden im Folgenden mit der Theorie diskutiert, um eine Beschreibung der Flexibilität und eine Flexibilitätsanforderung für das *Montage-Flexibilitätsmodell* zu erarbeiten.

Indikation I

Diese Indikation gibt nach den Interviews an, dass die *Modularität* als Flexibilitätsaspekt aus dem Flexibilitätsmodell rausgelöst werden sollte. Dies beruht darauf, dass von den Interviewten die Modularität als Eingangsvoraussetzung für eine Flexibilität angesehen wird.

Die Literatur beschreibt die *Modularität* einerseits in dem Konzept der RMS, wodurch der Aspekt mit in das konzeptionelle Flexibilitätsmodell aufgenommen wurde (vgl. Koren 2020; Koren et al. 1999; Koren und Shpitalni 2010). Auf der anderen Seite wird die *Modularität* auch als Befähiger für z. B. die Wandlungsfähigkeit (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107) oder für die RAS (vgl. Wiendahl et al. 2007, S. 787) angesehen. Die letzteren Ansichten bekräftigen die Aussagen aus den Interviews. Weiter unterstützen auch die genannten Umsetzungsmöglichkeiten der Multiple Case Study die Indikation, dass die *Modularität* vorgelagert gebraucht wird, um eine Flexibilität zu erreichen. In den Umsetzungsmöglichkeiten wird die *Modularität* für die Flexibilitätsaspekte *Anpassbarkeit*, *Konvertierbarkeit*, *Mobilität*, *Wiederverwendbarkeit*, *Integrierbarkeit* und *Skalierbarkeit* aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell genannt.

Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass die *Modularität* für das *Montage-Flexibilitätsmodell* rausgelöst und als Umsetzungsmöglichkeit und Eingangsgröße angesehen wird.

Indikation II

Wie bei der *Modularität* soll nach den Experten auch die *Diagnosefähigkeit* aus den Flexibilitätsaspekten ausgeschlossen werden. Die Experten aus der Multiple Case Study geben an, dass dies kein flexibilitätsspezifischer Aspekt ist, sondern grundsätzlich in Montageanlagen vorliegen sollte.

Die RMS und die RAS beschreiben die *Diagnosefähigkeit* (vgl. Koren 2020; Koren et al. 1999; Koren und Shpitalni 2010; Wiendahl et al. 2007). Jedoch ist die Beschreibung auch grundsätzlich eine Anforderung an eine Montageanlage, z. B. für die Instandhaltung von Montageanlagen (vgl. Lucke et al. 2017). Die *Diagnosefähigkeit* im Zuge der Instandhaltung zu verstehen, ist auch in den Interviews so zu erkennen.

Daraus folgt, dass *Diagnosefähigkeit* aus dem Flexibilitätsmodell herausgelöst wird. Als generelle Funktion für Montageanlagen ist dieser Aspekt in der Planung jedoch weiter von Bedeutung.

Indikation III

Die dritte Indikation aus den Interviews mit den Experten gibt ein Zusammenfassen der Aspekte *Mobilität* und *Wiederverwendbarkeit* an. Die *Mobilität* wird in der Literatur einerseits als ein Versetzen von Modulen oder Stationen innerhalb eines Montagesystems (vgl. Wiendahl et al. 2007) und andererseits als ein Wandlungsbefähiger beschrieben (vgl. Wiendahl et al. 2024). Die *Wiederverwendbarkeit* beschreibt in der Literatur dann eine erneute Nutzung von Modulen oder Bestandteilen von Montageanlagen (vgl. Klein 2014).

Die Interviewten sehen die *Wiederverwendbarkeit* als eine strategische Art der *Mobilität*, in welcher die Module nicht nur umgesetzt, sondern für einen anderen Anwendungsfall erneut genutzt werden. Zusätzlich wird auch angegeben, dass die *Mobilität* und die *Wiederverwendbarkeit* in das gleiche Themengebiet in Bezug auf die Flexibilität einspielen. Darüber hinaus wird auch vorgeschlagen, den Aspekt *Wiederverwendbarkeit* in die *Mobilität* zu integrieren.

In der Beschreibung der Umsetzungsmöglichkeiten für eine Flexibilität werden die beiden Aspekte von den Experten jedoch klar unterschieden. Für die *Mobilität* werden Konzepte wie Schnellkupplungen, Anlagen auf Transportmitteln oder versetzbare Grundplatten angegeben. All diese würden eine Montageanlage kurzfristig umsetzbar machen. Auf der anderen Seite werden für die *Wiederverwendbarkeit* Umsetzungsmöglichkeiten wie Module und Standards angegeben, sodass bspw. Anlagenbestandteile befähigt werden, bei einem anderen Anwendungsfall genutzt werden zu können.

Auch wenn die Interviews Ähnlichkeiten der beiden Aspekte erkennen lassen, werden diese beiden Aspekte in der Praxissicht auf das konzeptionelle Flexibilitätsmodell nicht zusammengefasst. Die Theorie bestätigt dies, sodass die beiden Aspekte *Mobilität* und *Wiederverwendbarkeit* im *Montage-Flexibilitätsmodell* als eigenständige Flexibilitätsaspekte integriert werden.

Indikation IV

Die *Skalierbarkeit* ist in der Theorie einerseits ein Wandlungsbefähiger für Fabriken (vgl. Wiendahl et al. 2024) und andererseits Teil der RMS und RAS (vgl. Koren et al. 1999; Koren und Shpitalni 2010; Wiendahl et al. 2007). Dahingehend geben die Experten aus der Multiple Case Study an, dass die *Skalierbarkeit* ein einzelner Aspekt in der Flexibilität ist, wie es im Konzept der RMS angegeben war. Die *Skalierbarkeit* war der einzige Aspekt aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell, welcher von allen Experten als relevant für die Flexibilität angegeben wurde.

Aufgrund dieser Argumente bleibt die *Skalierbarkeit* als eigenständiger Flexibilitätsaspekt im *Montage-Flexibilitätsmodell* erhalten.

Indikation V

Die fünfte Indikation aus der qualitativen Datenanalyse der Interviews gibt an, dass die *Konvertierbarkeit* als alleinstehender Aspekt im Flexibilitätsmodell verbleiben soll. Dies, obwohl einige Experten auch eine Ähnlichkeit zu den Aspekten *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* angeben. Der Aspekt *Konvertierbarkeit* stammt aus den RMS und beschreibt dort Gestaltungsänderungen für funktionale Änderungen (vgl. Koren und Shpitalni 2010). Die Experten der Multiple Case Study verstehen dies ähnlich, grenzen die *Konvertierbarkeit* jedoch weiter von der *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* ab. Es wird angegeben, dass die *Konvertierbarkeit* einen höheren Flexibilitätsanspruch innehat als es bei der *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* der Fall ist.

In den Angaben der Experten zu den Umsetzungsmöglichkeiten grenzt sich die *Konvertierbarkeit* weiter von der *Anpassbarkeit* und der *Integrierbarkeit* ab. Module, Schnellkupplungen und Standards werden für die *Konvertierbarkeit* am häufigsten genannt. Dahingegen ist bei der *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* auch das Einbringen von Vorhalten von gesteigerter Bedeutung.

Aufgrund der genannten Unterscheidungsmöglichkeiten der *Konvertierbarkeit* zu den anderen beiden Aspekten – *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* – und der theoriebasierten Zustimmung, wird die *Indikation V* mit im *Montage-Flexibilitätsmodell* umgesetzt und die *Konvertierbarkeit* verbleibt als einzelner Aspekt.

Indikation VI

Die letzte Indikation aus den Interviews beschreibt ein Zusammenfassen der beiden Aspekte *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* mit der Begründung, dass die *Integrierbarkeit* bereits umgesetzt wird, sobald eine *Anpassbarkeit* in einer Montageanlage umgesetzt ist. Beide Aspekte wurden als einzelne Aspekte aus den RMS entnommen. Dort beschreiben diese einerseits Möglichkeiten, ähnliche Bauteile schnell in einer automatisierten Anlage bearbeiten zu können und andererseits technisches Equipment, um möglichst schnell ein neues Bauteil in die automatisierte Anlage einbringen zu können, respektive für die *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* (vgl. Koren und Shpitalni 2010).

In den Interviews wurden einige Aussagen zum Zusammenfassen der beiden Aspekte benannt. Es wird bspw. angegeben, dass die *Konvertierbarkeit* und die *Anpassbarkeit* die *Integrierbarkeit* bereits miteinschließen. Da die *Konvertierbarkeit* durch die Indikation V bereits von der *Anpassbarkeit* abgegrenzt wurde, kam die Indikation zustande die *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* zusammenzuführen. Nach den Interviews, geben auch die Umsetzungsmöglichkeiten Anzeichen, ob die beiden Aspekte zusammengefasst werden sollten. Die *Anpassbarkeit* kann laut den Experten über Vorhalte, Universalität und Standards umgesetzt werden. Dahingegen werden für die *Integrierbarkeit* Module und Vorhalte als Umsetzungsmöglichkeiten genannt. Trotz einiger Übereinstimmungen der beiden Aspekte verbleiben die Flexibilitätsaspekte separat im Flexibilitätsmodell, da Unterscheidungen – theoriebasiert und umsetzungsorientiert durch Umsetzungsmöglichkeiten – vorliegen und so ein Zusammenfassen das Flexibilitätsmodell ungenau werden lassen würde.

Nach der Diskussion der Flexibilitätsaspekte über die Indikationen aus dem praxisorientierten Flexibilitätsmodell können die Flexibilitätsaspekte für das *Montage-Flexibilitätsmodell* angegeben werden. Abschließend stellen *Mobilität*, *Wiederverwendbarkeit*, *Skalierbarkeit*, *Konvertierbarkeit*, *Anpassbarkeit* und *Integrierbarkeit* die Flexibilitätsaspekte für das *Montage-Flexibilitätsmodell* dar.

Aus den empirischen Daten können auch spezifische Flexibilitätsanforderungen definiert werden. Je nach Segment liegt der Fokus nach der Multiple Case Study und somit je nach Montagesystem auf anderen Flexibilitätsaspekten. Über alle Fälle hinweg ist vor allem die *Skalierbarkeit* im Fokus der Experten. Dahingegen lassen sich Tendenzen erkennen, dass die *Anpassbarkeit* gemeinsam mit der *Konvertierbarkeit* wichtiger werden, je mehr Varianten im Montagesystem der OEMs verbaut werden. Im Gegensatz ist bei der *Skalierbarkeit* eine Tendenz zu erkennen, dass diese wichtiger wird, je mehr Jahresausbringungsmenge in den Fabriken erbracht wird. Auch für die *Taktzeit* als Beschreibungscharakteristik von Montagesystemen lässt sich eine Tendenz in der Wichtigkeit der Flexibilitätsaspekte erkennen. Die *Mobilität* einer Montageanlage wird unwichtiger, je kürzer die *Taktzeit* in der entsprechenden Montage ist. Unterschiedliche *Automatisierungsgrade*

als weiteren Charakteristik eines Montagesystems zeigen keine Tendenzen in der Bewertung der Flexibilitätsaspekte, was zu einer Schlussfolgerung führen kann, dass der aktuelle *Automatisierungsgrad* wenig, bis keinen Einfluss auf die Flexibilitätsansichten der OEMs hat.

Um aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell durch die Multiple Case Study auf eine finale Beschreibung der Flexibilität für das *Montage-Flexibilitätsmodell* zu kommen, werden die Ergebnisse der Evaluation der Indikationen zusammengefasst. Dazu zeigt die Abbildung 55 die finale Ausarbeitung der Flexibilitätsaspekte und der Flexibilitätsanforderungen für das *Montage-Flexibilitätsmodell*.

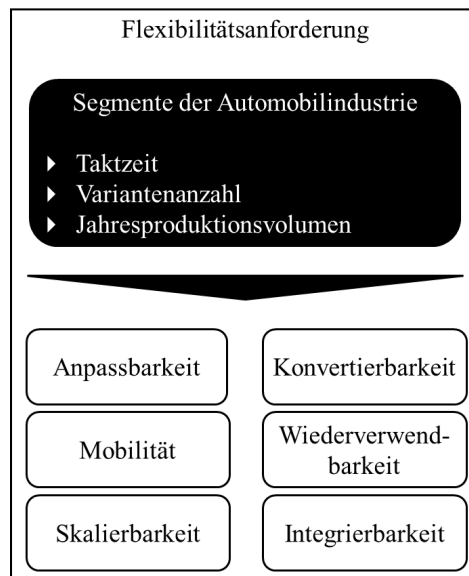


Abbildung 55: Flexibilitätsbeschreibung und -anforderungen des Montage-Flexibilitätsmodells

6.3 Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität für Montageanlagen

Durch die Beschreibung von Umsetzungsmöglichkeiten für die Flexibilitätsaspekte soll die Flexibilität in Montageanlagen eingebracht werden können. Die Ergebnisse aus der Multiple Case Study zu den Umsetzungsmöglichkeiten sollen in diesem Kapitel mit den theoretischen Grundlagen aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell diskutiert werden, um zu einem finalen Planungstool im *Montage-Flexibilitätsmodell* zu kommen.

Das konzeptionelle Flexibilitätsmodell beschreibt folgende Umsetzungsmöglichkeiten: *Transportsysteme, Universalität, Rollen, Vorhalte, Bausteine, Vernetzung* sowie *Hard- und Software*. Im Vergleich dazu gibt das praxisorientierte Flexibilitätsmodell *Transportmittel, Universalität, Schnellkupplungen, Vorhalte, Retrofit, Intelligente Software, Grundplatte* und *Standards* an. Der folgende Abschnitt diskutiert die einzelnen Umsetzungsmöglichkeiten und arbeitet Unterschiede sowie Gemeinsamkeiten heraus.

Als erste Umsetzungsmöglichkeit werden im konzeptionellen Flexibilitätsmodell *Transportsysteme* beschrieben (vgl. Hüttemann et al. 2019; Koren und Shpitalni 2010), um z.

B. Werkstücke in Montagesystemen und zwischen Montageanlagen zu transportieren. Darüber hinaus gibt das konzeptionelle Flexibilitätsmodell Rollen als Umsetzungsmöglichkeit an, um eine Ortsveränderlichkeit zu erreichen (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107). Beide diese Umsetzungsmöglichkeiten haben Überschneidungen zu der Umsetzungsgruppe Transportmittel aus dem praxisorientierten Flexibilitätsmodell. Die Umsetzungsgruppe Transportmittel ergänzt die Transportsysteme und Rollen aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell um weitere Möglichkeiten wie bspw. die transportfähige Gestaltung der Montageanlagen. Für das *Montage-Flexibilitätsmodell* können somit die Transportsysteme als eine erste Umsetzungsmöglichkeit bestimmt werden, da diese Gruppe die beiden Umsetzungsmöglichkeiten Transportsysteme und Rollen aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell mit einschließt.

Die Universalität als Umsetzungsmöglichkeit aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107) findet im praxisorientierten Flexibilitätsmodell eine direkte Übereinstimmung. Die Experten aus der Multiple Case Study beschreiben bei der Universalität vor allem den Einsatz von Universalgreifern. Aufgrund der Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis wird die Universalität als nächste Umsetzungsmöglichkeit für das *Montage-Flexibilitätsmodell* aufgenommen.

Wie auch die Universalität ist auch die Umsetzungsmöglichkeit Vorhalte sowohl in der Theorie (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107) als auch der Praxis relevant. In der Beschreibung stimmen das praxisorientierte und konzeptionelle Flexibilitätsmodell überein, in dem in allen Bestandteilen der Montageanlagen Vorhalte relevant sind.

Die Bausteine als Umsetzungsmöglichkeit aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell beschreiben die Umsetzung für eine Modularität (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107f.). Diese Bausteine stimmen ebenfalls mit den Ergebnissen der Multiple Case Study überein. Dort wurde eine Modularität als Eingangsvoraussetzung und Umsetzungsmöglichkeit angesehen und nicht als Flexibilitätsaspekt. Daraus folgt, dass die modulare Gestaltung für Hard- und Software mit in das *Montage-Flexibilitätsmodell* aufgenommen wird.

Die Vernetzung beschreibt im konzeptionellen Flexibilitätsmodell die einfache Einbindung von Material, Informationen, etc. als auch einheitliche Softwareschnittstellen (vgl. Wiendahl et al. 2024, S. 107). Dies passt zu der Umsetzungsgruppe der Schnelldkupplungen aus der Multiple Case Study. Hier werden vor allem Greiferwechselsysteme und wenige Schnittstellen an den Montageanlagen beschrieben. Aufgrund der spezifischeren Beschreibung der Schnelldkupplungen für die Umsetzung in Montageanlagen wird diese Umsetzungsmöglichkeit in das *Montage-Flexibilitätsmodell* aufgenommen.

Als letzte Umsetzungsmöglichkeit beschreibt das konzeptionelle Flexibilitätsmodell anpassungsfähige Hard- und Software Komponenten (vgl. Koren und Shpitalni 2010). Diese

Umsetzungsmöglichkeit kann mit den Standards aus dem praxisorientierten Flexibilitätsmodell ergänzt werden. Durch Standards in den Bestandteilen der Montageanlagen können auch die anpassungsfähigen Hard- und Software Komponenten erreicht werden. Es werden somit die Standards mit in das *Montage-Flexibilitätsmodell* aufgenommen.

Über die Umsetzungsmöglichkeiten aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell hinaus, geben die Experten aus der Multiple Case Study noch die Grundplatten und den Retrofit als Gruppen für Umsetzungsmöglichkeiten an. Die Grundplatte stellt eine spezifische Lösung für Montageanlagen dar, welche teils Überschneidungen mit anderen Umsetzungsmöglichkeiten hat, jedoch nicht direkt einer Umsetzungsmöglichkeit zugeordnet werden kann. Somit verbleibt die Grundplatte als Umsetzungsmöglichkeit im *Montage-Flexibilitätsmodell*.

Auch das Retrofit bildet eine neue Umsetzungsmöglichkeit außerhalb des konzeptionellen Flexibilitätsmodells. Die Möglichkeit des wieder fit machens wird in den übrigen Umsetzungsmöglichkeiten nicht direkt beschrieben, sodass das Retrofit mit in das *Montage-Flexibilitätsmodell* aufgenommen wird.

Nach der Diskussion der Umsetzungsmöglichkeiten werden *Transportmittel, Universalität, Schnellkupplungen, Vorhalte, Retrofit, Intelligente Software, Grundplatte* und *Standards* als Bestandteile für das *Montage-Flexibilitätsmodell* aufgenommen.

Damit die Umsetzungsmöglichkeiten im Planungsprozess für die Dimensionierung nutzbar werden, kann auf Basis der empirischen Daten ein Baukasten für die Planung von flexiblen Montageanlagen erstellt werden. Dieser Baukasten umfasst die Umsetzungsmöglichkeiten und kombiniert diese mit den Ergebnissen der Multiple Case Study zu den Flexibilitätsaspekten und Bestandteilen von Montageanlagen. Im Ergebnis stellt der Baukasten ein Planungstool dar, welches auf Basis der bisherigen Erkenntnisse dazu genutzt werden kann, flexible Montageanlagen auszulegen. Der Baukasten umfasst drei verschiedene Darstellungen.

Die erste Darstellung (i) fasst die Umsetzungsmöglichkeiten je Flexibilitätsaspekt zusammen und stellt auch die quantitative Betrachtung aus der Cross Case Analyse der Interviews dar. Durch diese Darstellung wird ein Überblick gegeben, welche Umsetzungsmöglichkeiten am vorteilhaftesten für die einzelnen Flexibilitätsaspekte sind. Somit kann im Planungsprozess eine klare Auswahl an Umsetzungsmöglichkeiten auf einen geforderten Flexibilitätsaspekt getroffen werden.

Des Weiteren wird die quantitative Betrachtung der Umsetzungsmöglichkeiten auf die Bestandteile von Montageanlagen bezogen. In dem resultierenden Kreisdiagramm (ii) kann durch den Baukasten ein spezifischer Bestandteil einer Montageanlage – *Bereitstellung, Steuerung, Endeffektor, Gestell, Roboter, Sicherheitstechnik* oder *Peripherie* – geplant werden.

Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität für Montageanlagen

Der dritte Bestandteil (iii) stellt eine aggregierte Darstellung der Umsetzungsmöglichkeiten über alle Flexibilitätsaspekte dar. Durch diese Darstellung können gesammelt Umsetzungsmöglichkeiten betrachtet werden, ohne sich spezifisch auf einen Flexibilitätsaspekt festzulegen.

Nach den drei Darstellungen kann der Baukasten über zwei Filter – nach Flexibilitätsaspekte (a) und Roboterbestandteile (b) – dynamisch angepasst werden, um individuelle Planungsanforderungen darzustellen.

Die Abbildung 56 stellt die Bereiche des Baukastens dar. Zusätzlich ist der Baukasten vollständig im Anhang Abschnitt D6 als statische Darstellung abgebildet.



Abbildung 56: Darstellung des Baukastens zur Planung flexibler Montageanlagen

Die Arbeitsweise mit dem Baukasten ist nach der bisherigen Vorgehensweise wie folgt beschrieben:

1. Auswahl eines oder mehrerer Flexibilitätsaspekte, welche im Fokus der Planung stehen (a)
2. Auswahl eines Bestandteils einer Montageanlage, welcher geplant werden soll (b)
3. Analyse der Darstellung zu den Umsetzungsmöglichkeiten (i – iii)
4. Übertrag der dargestellten Informationen in die Planung

Zusammenfassend, nach der Diskussion der Umsetzungsmöglichkeiten aus dem konzeptionellen und dem praxisorientierten Flexibilitätsmodell, zusammen mit dem Baukasten für die Planung von flexiblen Montageanlagen, kann die Umsetzung zur Einplanung der Flexibilität für das *Montage-Flexibilitätsmodell* dargestellt werden. Diese Ergebnisse für das *Montage-Flexibilitätsmodell* sind in der Abbildung 57 dargestellt. Der Baukasten für

die Planung von flexiblen Montageanlagen kann in Kombination mit definierten Anforderungen an Flexibilitätsaspekten und einem klaren Fokus auf Bestandteile von Montageanlagen dazu genutzt werden, die Umsetzung der Flexibilität zu erreichen.

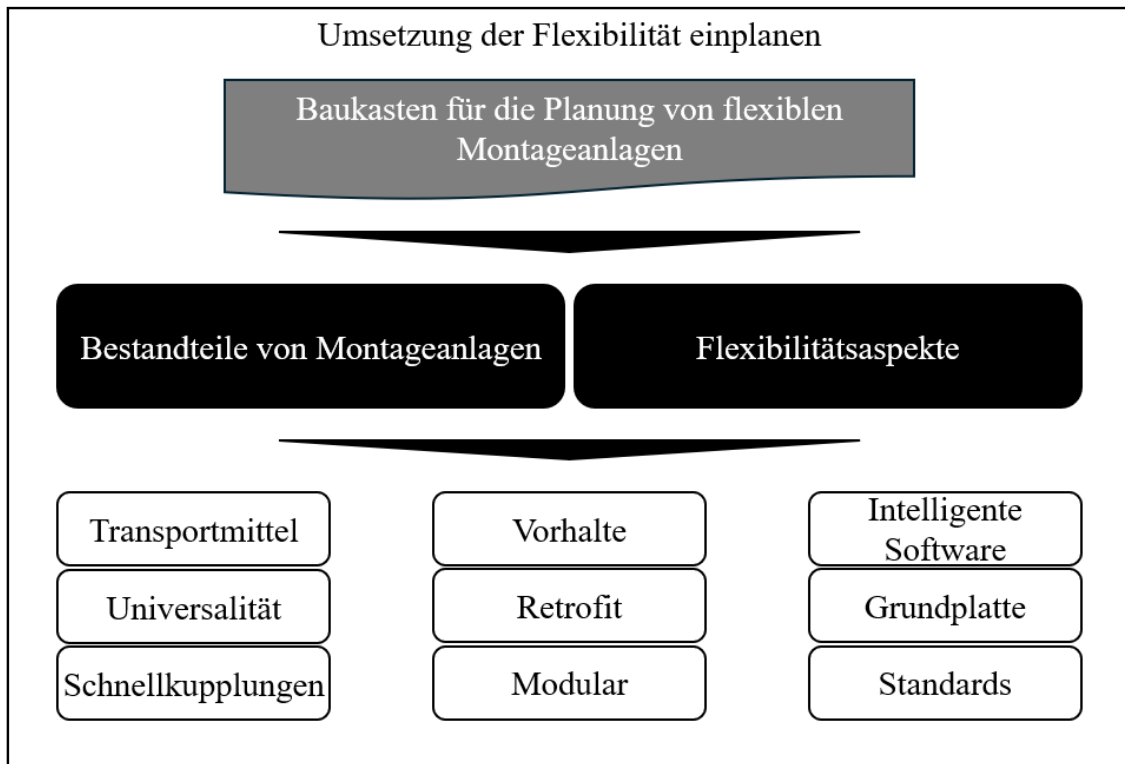


Abbildung 57: Umsetzungsprozess für die Flexibilität im Montage-Flexibilitätsmodell

6.4 Zusammenfassung: Integriertes Montage-Flexibilitätsmodells

Nach den Ausarbeitungen in den Abschnitten 6.1, 6.2 und 6.3 kann das vollständige *Montage-Flexibilitätsmodell* erarbeitet werden. Auf Basis des konzeptionellen Flexibilitätsmodells werden die Bestandteile des Planungsprozesses inkl. Planungshorizonte, die Flexibilitätsaspekte inkl. der Flexibilitätsanforderungen sowie die Umsetzungsmöglichkeiten für die Flexibilität zusammengefasst.

Beginnend mit dem Abschnitt 6.1, wurde der Planungsprozess inkl. der Planungshorizonte für das *Montage-Flexibilitätsmodell* erarbeitet. Für das *Montage-Flexibilitätsmodell* wurde der Planungsprozess aus der Literatur übernommen (vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2011). In Bezug auf die Planungshorizonte wurden die drei Planungshorizonte (vgl. Burggräf und Schuh 2021; Grundig 2021; Schenk et al. 2014) aus der Theorie ebenfalls bestätigt und in das *Montage-Flexibilitätsmodell* aufgenommen. Jedoch ergab die Diskussion, dass die Planungsaufgaben je Planungshorizont aus der Theorie nicht eins zu eins für die Planung von Montageanlagen in der Automobilindustrie übertragbar sind. Durch die Überlagerung von verschiedenen Produktlebenszyklen und kurzzyklischen Änderungen z. B. durch den Markt besteht die Anforderung, kurzfristiger als im taktischen Planungshorizont die Planungstätigkeiten durchzuführen.

Des Weiteren beschreibt der Abschnitt 6.2 die Ausarbeitung zu den Flexibilitätsaspekten sowie -anforderungen für das *Montage-Flexibilitätsmodell*. Auf Basis des konzeptionellen Flexibilitätsmodells wurden sechs Flexibilitätsaspekte – *Anpassbarkeit, Mobilität, Skalierbarkeit, Konvertierbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Integrierbarkeit* – definiert. Dabei wurden zwei Flexibilitätsaspekte aus dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell rausgelöst. *Modularität* wird als Umsetzungsmöglichkeit in das *Montage-Flexibilitätsmodell* aufgenommen und die *Diagnosefähigkeit* wird als allgemeine Funktion einer Montageanlage verstanden, sodass diese nicht Teil der Flexibilitätsaspekte ist. Zusätzlich zu den Flexibilitätsaspekten wurden durch das praxisorientierte Flexibilitätsmodell spezifische Flexibilitätsanforderungen definiert, die den Fokus der Flexibilität in Abhängigkeit der Gestaltung von Montagesystemen beschreiben.

Abschließend erarbeitet der Abschnitt 6.3 die Umsetzung der Flexibilität in Montageanlagen. Durch die Diskussion der Umsetzungsmöglichkeiten aus Theorie und Praxis konnten neun Umsetzungsmöglichkeiten für das *Montage-Flexibilitätsmodell* – *Transportmittel, Vorhalte, intelligente Software, Universalität, Retrofit, Grundplatte, Schnellkupplungen, Modular* und *Standards* – definiert werden. Darüber hinaus wurde der Baukasten für die Planung von flexiblen Montageanlagen erstellt (siehe Anhang D6). Durch dieses Planungstool können anhand der vorher definierten Flexibilitätsaspekte und der Bestandteile von Montageanlagen spezifische Gestaltungsvorschläge gemacht werden. Diese helfen in der Dimensionierung der Montageanlage und können bei entsprechender Anwendung die definierten Flexibilitätsanforderungen darstellen.

Die Abbildung 58 fasst die Ergebnisse der Ausarbeitung für das *Montage-Flexibilitätsmodell* zusammen und stellt das finale *Montage-Flexibilitätsmodell* für die Planung von flexiblen Montageanlagen dar. Durch das Einbinden des *Montage-Flexibilitätsmodells* in den Planungsprozess von Montageanlagen, wird eine Methodik für die Planung und Implementierung flexibler Montageanlagen erreicht.

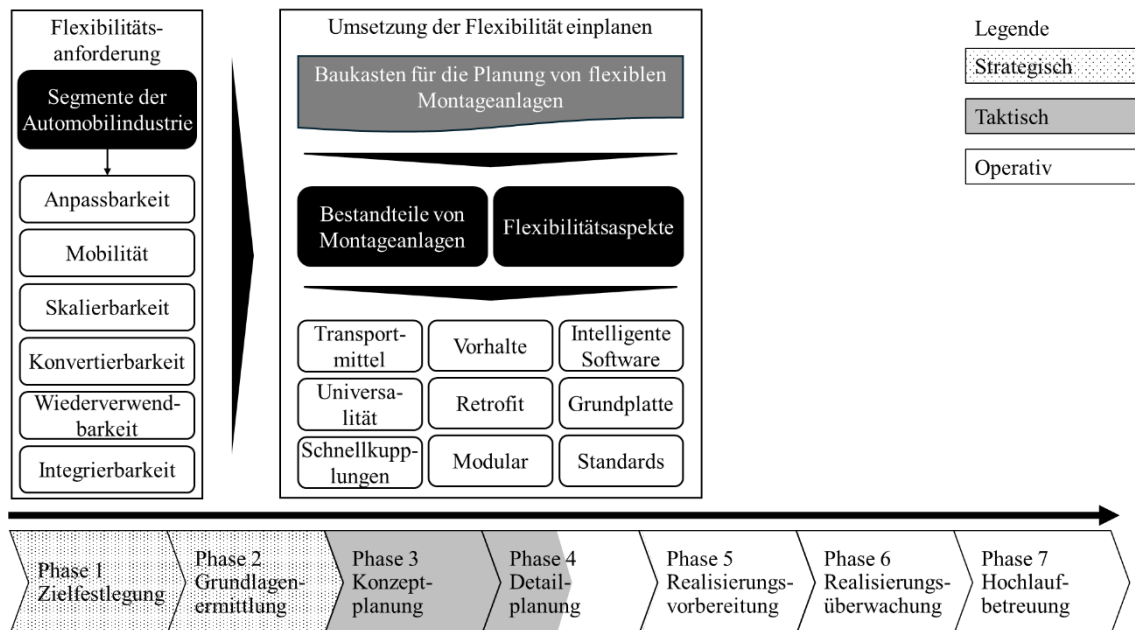


Abbildung 58: Montage-Flexibilitätsmodell für die Planung von flexiblen Montageanlagen

Das *Montage-Flexibilitätsmodell* stellt die Antwort auf die *FF3* dar und erfüllt die definierten Anforderungen aus Kapitel 2 mit dem Ziel, dass eine Verifikation durchgeführt werden kann. Das Kapitel 2 hat vier Anforderungen an ein Flexibilitätsmodell definiert, welche dann zur Planung von flexiblen Montageanlagen genutzt werden kann.

Durch die erste Anforderung sollte ein finales Flexibilitätsmodell die *Integration der Flexibilität als Zielgröße von Montageanlagen in den Planungsprozess* ermöglichen. Durch das *Montage-Flexibilitätsmodell* wird die Flexibilität direkt in die Zielsetzung im Planungsprozess der Fabrikplanung mit dem Fokus auf Montageanlagen eingebettet. So kann Flexibilität zusätzlich zu der Kosteneffizienz und Ausbringungsmenge mit in die Zielsetzung eingebracht werden. Die Flexibilitätsanforderungen für Montageanlagen werden zusätzlich auf verschiedene Montagesysteme bezogen, sodass individuelle Flexibilitätsanforderungen je nach Montagesystem aufgestellt werden können.

Eine weitere Anforderung war die *Einordnung der Planungshorizonte in die Planungstätigkeiten der Betriebsmittelplanung unter Berücksichtigung der aktuellen Flexibilitätsanforderungen*. Die Planungshorizonte konnten durch die empirische Untersuchung in der Automobilindustrie grundsätzlich bestätigt werden. Jedoch wurde die Aufgabenteilung je Planungshorizont abweichend von der Theorie mit in das *Montage-Flexibilitätsmodell* aufgenommen. Durch die aktuellen Trends und Entwicklungen ist es notwendig, dass die Montageanlagen in kürzeren Zeiträumen und Zyklen reagieren können. So wurde ein Teil der Detailplanung – der Planungsphase vier – vom taktischen in den operativen Planungshorizont verschoben.

Die Anforderung drei – *Charakterisierung der Flexibilität von Montageanlagen* – wird durch die Definition der Flexibilitätsaspekte von Montageanlagen erfüllt. Durch die Beschreibung der Flexibilität durch die Anpassbarkeit, Mobilität, Skalierbarkeit, Konvertierbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Integrierbarkeit wird die Anforderung erfüllt.

Die letzte Anforderung – *Spezifikation von Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität in Montageanlagen*. Durch die Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität sowie den *Baukasten zur Planung* von flexiblen Montageanlagen können die Umsetzung der spezifischen Flexibilitätsanforderungen und -aspekte in Planungsprojekten erreicht und die Anforderung erfüllt werden.

7 Validierung der Forschungsergebnisse

Die Forschungsergebnisse sollen in diesem Kapitel validiert werden. Der Abschnitt 7.1 beschreibt dazu die Validierung über eine prototypische Umsetzung. Durch diese praktische Umsetzung kann die Methodik zu Planung flexibler Montageanlagen – unter Zuhilfenahme des *Montage-Flexibilitätsmodells* – eingesetzt, die Anwendbarkeit überprüft und der Nutzen bewertet werden. Darüber hinaus beschreibt der Abschnitt 7.2 die Durchführung von Validierungsworkshops in der Automobilindustrie, sodass die Forschungsergebnisse auf eine weitere Weise validiert werden können. Der Abschnitt 7.3 fasst die Validierung in dieser Arbeit zusammen.

7.1 Prototypische Umsetzung

Für die prototypische Umsetzung wurde bei Volkswagen Nutzfahrzeuge (VWN) – ein Hersteller leichter Nutzfahrzeuge – ein neuer Automatisierungsumfang in einer Machbarkeitsuntersuchung betrachtet. Dieser wird anhand der Methodik zur Planung von flexiblen Montageanlagen, inklusive des *Montage-Flexibilitätsmodells*, geplant. Es sollen Verkleidungsteile im Innenraum von Fahrzeugen automatisiert montiert werden. Diese Montageanlage soll aber eine gesteigerte Flexibilität im Vergleich zu den aktuellen Montageanlagen haben.

Da die derzeitigen Montageanlagen von VWN hauptsächlich den Flexibilitätsaspekt *Skalierbarkeit* umsetzen, wurde in der Zielfestlegung der Fokus auf andere Flexibilitätsaspekte gesetzt. Werden die Gestaltung des Montagesystems und das Prioritätsranking der Flexibilitätsaspekte analog des LNFZ Falls aus der Multiple Case Study betrachtet, ergeben sich die *Mobilität*, *Anpassbarkeit* und auch *Konvertierbarkeit* als nächstwichtige Aspekte, nachdem die *Skalierbarkeit* bereits umgesetzt wurde. Gemeinsam mit Managern aus der Produktionsplanung von VWN wurde der Fokus auf die *Mobilität* und auch *Anpassbarkeit* gesetzt und die *Konvertierbarkeit* wurde somit bei der ersten Validierung nicht betrachtet. Durch diese Fokussierung konnte der erste Abschnitt aus dem *Montage-Flexibilitätsmodell* durchlaufen werden. Im Prozess der Zielfestlegung wurden die Flexibilitätsanforderungen für das spezifische Projekt der prototypischen Umsetzung definiert. Dieser Prozess von der Gestaltung des Montagesystems über den Fokus der Montageanlagen bis zu den Flexibilitätsaspekten wird in der folgenden Darstellung visualisiert (Abbildung 59).

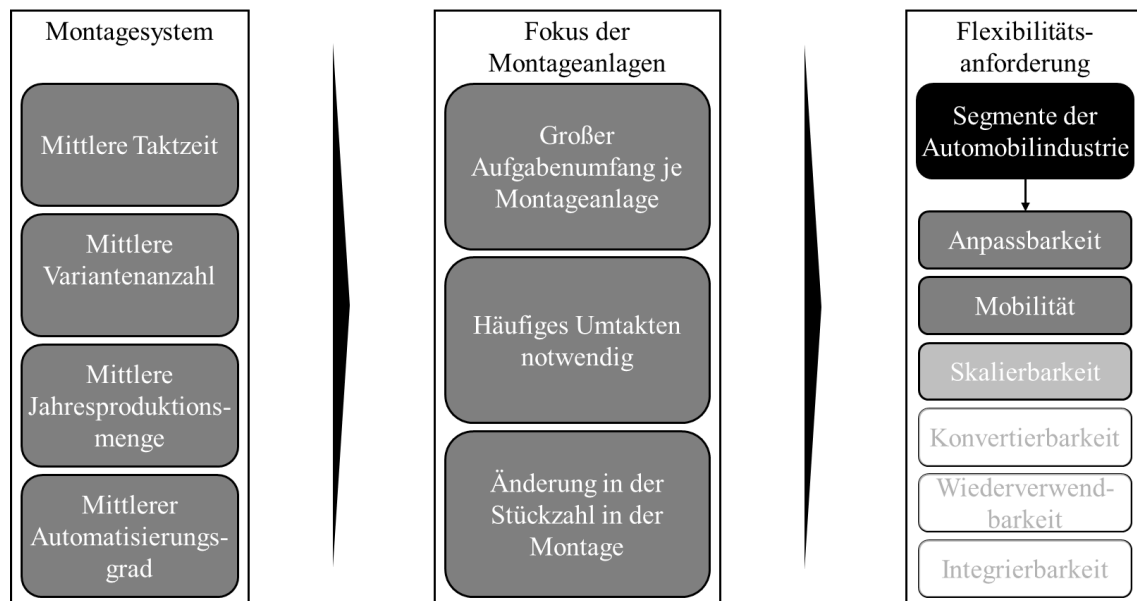


Abbildung 59: Erarbeitung der Flexibilitätsanforderungen der prototypischen Umsetzung

Für die prototypische Umsetzung in einer Montageanlage musste der Vergabeprozess von VWN durchlaufen werden. Dabei wird eine Leistungsbeschreibung in Form eines Lastenheftes formuliert und an den Markt gegeben, sodass externe Firmen den beschriebenen Umfang – koordiniert von VWN – umsetzen. Nachdem die Flexibilitätsanforderungen in der Zielfestlegung abgestimmt wurden, muss in dem nächsten Abschnitt der Methodik für die Planung flexibler Montageanlagen – der Konzeptplanung – das Grobkonzept für die flexible Anlage beschrieben werden, sodass das Lastenheft formuliert werden kann.

Für die Anpassbarkeit ist nach dem *Baukasten zur Planung von flexiblen Montageanlagen* vor allem die Universalität in dem Endeffektor wichtig. Bei der Mobilität können Schnellkupplungen oder auch Transportmittel, wie z. B. ein FTF, von Bedeutung sein. Die Abbildung 60 zeigt diese Umsetzungsmöglichkeiten aus dem *Baukasten zur Planung von flexiblen Montageanlagen*.

Anzahl Nennungen nach Flexibilitätsaspekte und Umsetzungskonzepte

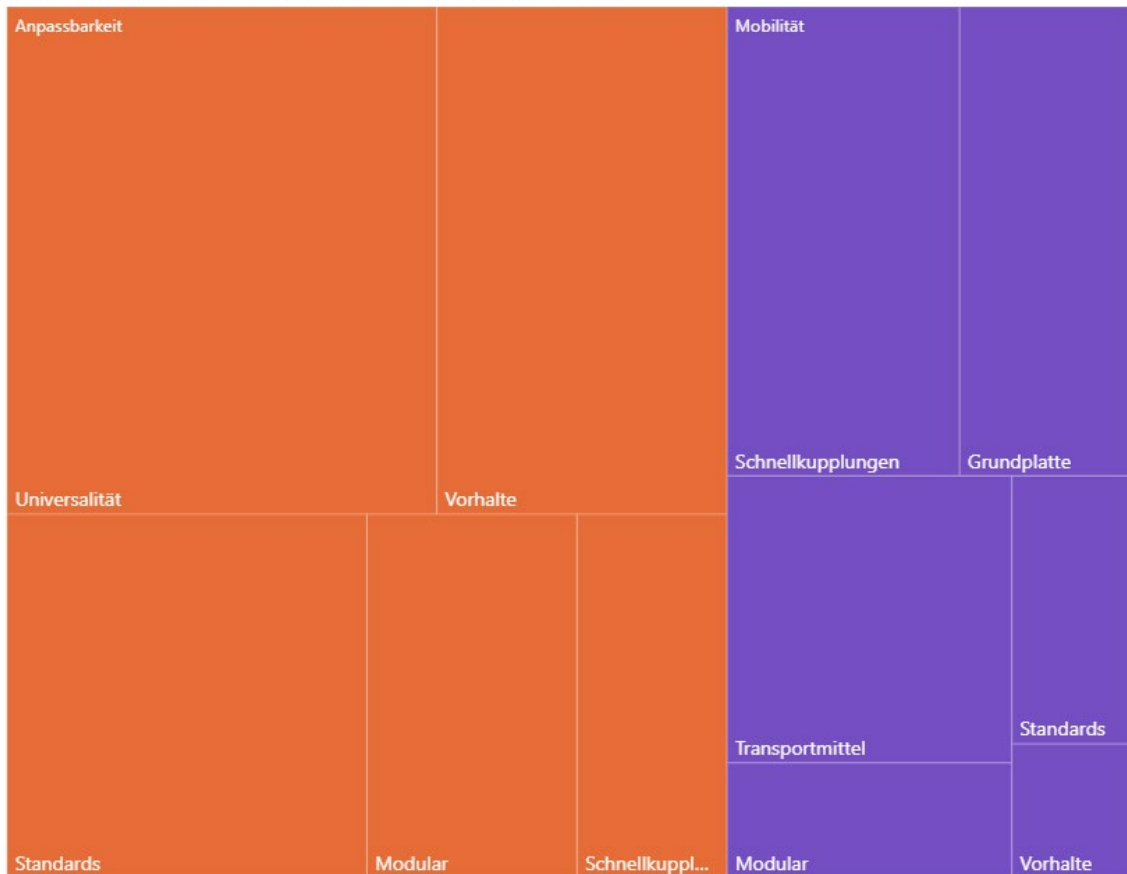


Abbildung 60: Umsetzungsmöglichkeiten der Anpassbarkeit und der Mobilität nach dem Baukasten zur Planung flexibler Montageanlagen

Genau diese Möglichkeiten zur Umsetzung der Anpassbarkeit und der Mobilität werden dann Teil des Konzepts für die flexible Prototypenanlage. Für das Lastenheft wurden die beiden Anforderungen an die Mobilität und die Anpassbarkeit wie folgt formuliert:

Mobilität: „Dieser Roboter soll drahtlos mit der Steuerungstechnik kommunizieren und auf einem fahrbaren Unterbau stehen, um der Mobilitätsanforderung zu genügen.“⁵

Anpassbarkeit: „In dieser Anlage sollen artverwandte Bauteile eines Fügeverfahrens (hier Verkleidungsteile) an verschiedenen Fahrzeugen von einem allgemeingültigen Betriebsmittel verbaut werden.“⁶

Anhand dieser beiden Formulierungen und weiterer Absprachen mit den Auftragnehmern konnte der Fokus auf die Flexibilität weiter verfeinert und auch während der Ausarbeitung verfolgt werden.

Über die geforderten Flexibilitätsaspekte hinaus sollten Bauteile eines Fügeverfahrens Teil der Prototypenanlage sein. Es wurden Bauteile verschiedener Geometrien aus dem

⁵ Formulierung der Mobilitätsanforderung aus dem Lastenheft zur Prototypenanlage

⁶ Formulierung der Anpassbarkeitsanforderung aus dem Lastenheft zur Prototypenanlage

Fahrgastraum eines Fahrzeugs von VWN ausgewählt. Durch die große Varianz an Geometrien kann später die Anpassbarkeit möglichst gut evaluiert werden. Die Abbildung 61 zeigt die Bauteile für die Prototypenanlage. Es wurden die folgenden Verkleidungsteile integriert:

- Verkleidung Säule A-unten
- Verkleidung Säule A-mitte
- Verkleidung Säule A-oben
- Verkleidung Säule B-unten
- Verkleidung Säule D-oben

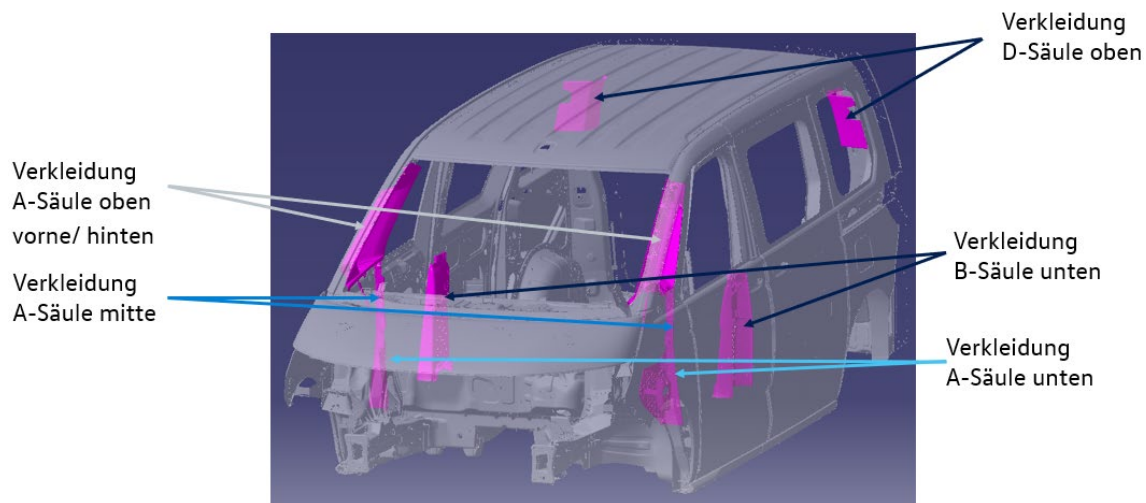


Abbildung 61: Darstellung der Bauteile für die Prototypenanlage ⁷

Gemeinsamkeiten der ausgewählten Bauteile sind die Materialbeschaffenheit und das Fügeverfahren über Clipse. Es sind je nach Bauteil jedoch verschiedene Bewegungspfade notwendig, um die Bauteile in ihre Position zu bringen und zu fügen.

Die Umsetzung der Prototypenanlage wird im nächsten Abschnitt beschrieben. Darüber hinaus werden auch die Effekte der gesteigerten Flexibilität für die Planungsphasen beschrieben.

7.1.1 Umsetzung der Prototypenanlage

Die Umsetzung nach der initialen Planung mittels des Montage-Flexibilitätsmodells wurde in verschiedene Arbeitspakete – *Greiftechnik*, *Kameratechnik*, *Systemaufbau* – gegliedert.

Greiftechnik

Im Zuge des Arbeitspakts *Greiftechnik* soll die Anpassbarkeit der Prototypenanlage erreicht werden. Hierfür wurden verschiedene Greifer mit den unterschiedlichen Bauteilen

⁷ Die Abbildung stammt direkt aus dem Lastenheft zur Prototypenanlage

in eine Untersuchung gebracht, um den universellsten Greifer zu ermitteln. Für die Auswahl der Greifer wurden verschiedene Vakuum- und Fingergreifer ausgewählt, da diese keine bauteilspezifische Form aufweisen. Die Abbildung 62 zeigt Darstellungen der Greifer aus dem Versuch. Von links nach rechts sind es: Greifkissen, Bernoulli-Greifer, 2-Finger Greifer und Saugnapf-Greifer.

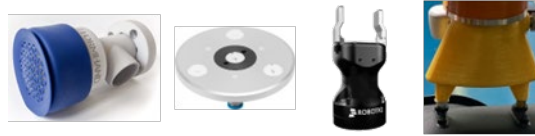


Abbildung 62: Greiferauswahl für den Versuch des universellen Greifens

Mit dieser Greiferauswahl wurden daraufhin Greifversuche mit den ausgewählten Bauteilen durchgeführt. Es wurden die Bauteile mehrfach an verschiedenen Seiten aufgenommen, sodass ein optimaler Greifer ermittelt werden konnte. Der Versuchsaufbau ist dafür in der Abbildung 63 dargestellt.

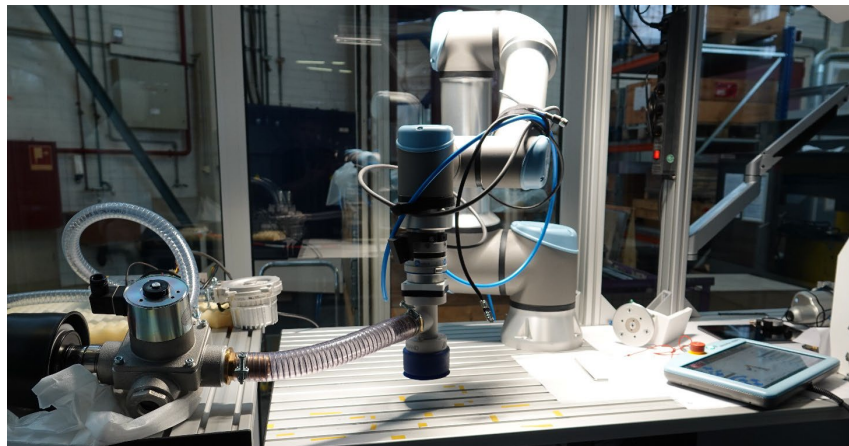


Abbildung 63: Versuchsaufbau zur Greiferauswahl

Die Greifer wurden als Endeffektor an einen Roboter angebracht, wobei die Bauteile unter dem Roboter auf einem Tisch bereitgestellt wurden, sodass die Versuche durchgeführt werden konnten. Das Ergebnis war, dass das Greifkissen der universellste Greifer ist, da die Greifversuche mit diesem Greifer am erfolgreichsten waren. Dieser ist auch in der Abbildung 63 am Roboter zu sehen. Eine Evaluation der Versuchsreihe wurde bereits in *Grambow et al. 2024* veröffentlicht (vgl. Grambow et al. 2024).

Kameratechnik

Die Ausarbeitung der Kameratechnik war das zweite große Arbeitspaket für die Prototypenanlage, welches durch die Forderung der Mobilität entstanden ist. Da die Prototypenanlage mobil ist, gibt es nicht immer eine klare Ausrichtung zum Montageobjekt, welche dann mittels einer Kamera erreicht werden muss. Die Anforderung aus dem Lastenheft, dass der Einsatzort der Prototypenanlage variabel sein und auch das Montageobjekt an

unterschiedlichen Orten sein soll, sind ursächlich für den Einsatz derameratechnik. Somit muss der Prototypenanlage die Produktionsumgebung und das Montageobjekt, in diesem Fall die Fahrzeugkarosse, angelern werden. Auf der Basis von CAD Daten der Produktionsumgebung und der Karosse kann die Erkennung mittels einer 3D-fähigen Kamera umgesetzt werden. Für die Karosse beinhaltet diese Erkennung das manuelle Aufnehmen von Bildern der Karosse und den Abgleich mit den CAD Daten. Zur Visualisierung zeigt die Abbildung 64 einen Zwischenschritt dieses Lernprozesses. Es wird eine Punktwolke der Karosse dargestellt, welche ein Ergebnis der Bildaufnahmen darstellt. Durch Filterungen der Rohdaten kann diese Punktwolke erstellt werden, welche dann im Weiteren mit den CAD Daten verglichen werden kann, um später die Karosse im Raum identifizieren zu können.

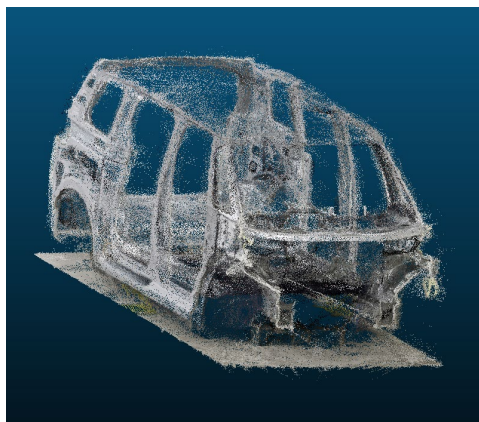


Abbildung 64: Punktwolke der Karosse nach dem Aufnehmen der Bilder

Nachdem die Karosse durch die Kamera im Raum erkannt werden kann, müssen noch die Fügestellen zum Verbau der Bauteile identifiziert werden. Dies wurde in der Prototypenanlage am Beispiel der Verkleidung Säule D-oben durchgeführt. Hierfür muss in der Karosse der Fügepunkt, passend zum Clip in der Verkleidung von der Kamera erkannt werden. Dies wurde wieder auf Basis von CAD Daten angelern. Das Ergebnis zeigt die Abbildung 65. Für den Clips inkl. des nebenstehenden Positionierungsdorns konnte die Kamera den Fügepunkt in der Karosse identifizieren.

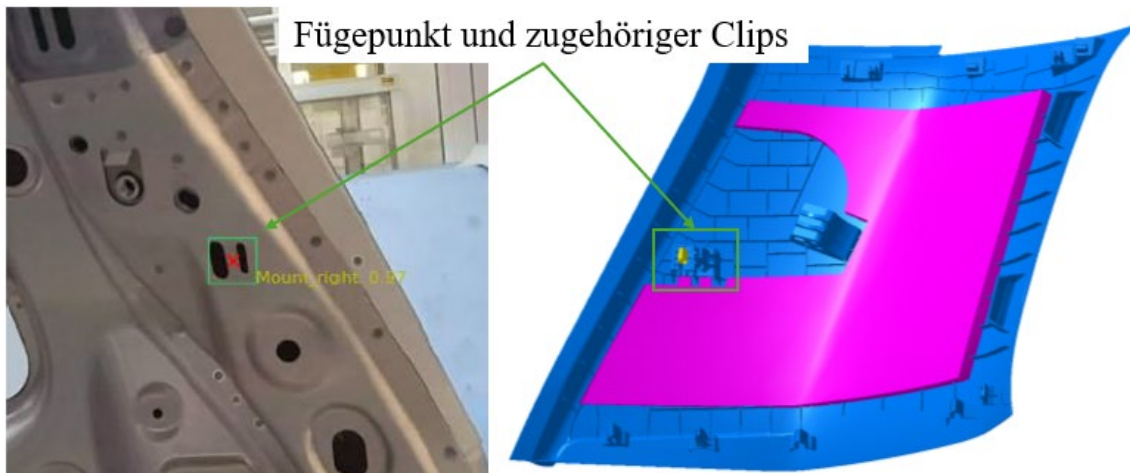


Abbildung 65: Fügepunkt und Verkleidung Säule D-oben

Mit der nun erarbeitetenameratechnik können der finale Systemaufbau und die Durchführung von Verbauversuchen als Validierung starten.

Systemaufbau

Mit dem ermittelten Greifer und der angelernten Kameratechnik konnte der Systemaufbau für die Prototypenanlage umgesetzt werden. Vor allem das Zusammenführen von einem FTF mit dem Roboter inkl. Greifer und Kameratechnik wurde durchgeführt. Der finale Aufbau ist in der Abbildung 66 dargestellt. Es werden ein FTF, ein Roboter, der Greifer, die Kameratechnik und die Bauteile sowie die Karosse abgebildet.



Abbildung 66: Systemaufbau für die Prototypenanlage

Für die Durchführung von Verbauversuchen sollte ein realitätsnahes Szenario erprobt werden, durch welches dann auch die potenziellen Vorteile der gesteigerten Flexibilität untersucht werden können. Folgende Prozessschritte wurden durchgeführt:

1. Fahrt des mobilen Roboters durch die Produktionsumgebung
2. Erkundung der Umgebung bis zur Erkennung der Karosse

3. Anfahren einer festen Position hinter der Karosse, sodass sich der Fügestelle genähert wird
4. Erneute Bilddatenerfassung und –analyse zur genauen Lokalisierung der Karosse
5. Anfahren einer Parkposition nah an der Karosse
6. Positionierung zur Montageposition und Berechnung der Fügestelle
7. Aufnehmen und Fügen des Verkleidungsteils

Durch die Durchführung von 20 Verbauversuchen konnte die Funktionsfähigkeit der Prototypenanlage belegt werden.

Über den Aufbau und die Versuchsdurchführung hinaus wurde die Prototypenanlage bei der Managementkonferenz von VWN vorgestellt, wodurch der Aufbau und die Vorteile durch internationales Management aus der Automobilindustrie bewertet und hinterfragt wurde.

Die Rückmeldung des internationalen Managements war positiv, da eine neu gedachte Automatisierung präsentiert wurde, welche viele Anwendungsfälle in der Montage und auch darüber hinaus aufweise. Jedoch wurde die Umsetzung des Flexibilitätsaspekts Mobilität punktuell hinterfragt. Der Einsatz von FTFs zur Umsetzung der Mobilität sei mit der derzeitigen Gestaltung der automobilen Montage nicht zwangsläufig kompatibel, da durch die Fließmontage mit vielen Menschen im Umkreis das FTF häufig aufgehalten und somit von der Arbeitsaufgabe abgehalten werden würde. Nichtsdestotrotz wurde die Umsetzung der Mobilität als positiv bewertet, da so die Reaktionsfähigkeit der Montage für z. B. Umtaktungen gesteigert werden würde.

In Bezug auf die umgesetzte Anpassbarkeit wurde die erreichte Universalität als positiv bewertet, da so verschiedene geometrische Bauteile mit einem Greifer gehandhabt werden können. Dies kann bei Produktänderungen zu Einsparungen führen.

Über die Darstellung des Projekts in der Managementkonferenz hinaus, wird dies auch mittels eines Artikels in der Zeitschrift des produktionstechnischen Zentrums Berlin beschrieben, welcher die Vorteile der Flexibilität hervorhebt (vgl. Fraunhofer IPK).

7.1.2 Effekte der flexiblen Gestaltung der Montageanlage

Mit der physischen Prototypenanlage können Vorteile oder auch Nachteile bei verschiedenen Projektentscheidungen während eines Produktlebenszyklus im Vergleich zu derzeitigen Montageanlagen untersucht werden. Ein häufiger Fall ist eine Produktaufwertung, welche häufig zu hohen Anpassungskosten bei den Montageanlagen führt. Ein weiterer Anwendungsfall wäre ein Umtakten der Montageanlagen aufgrund eines neuen Projekts, bei welchem derzeitige Montageanlagen als Fixpunkte eine optimale Taktung verhindern, da die Realisierungskosten für das Umsetzen zu hoch wären. Um diese Szenarien

zu untersuchen, wurde im Zuge der flexiblen Prototypenanlage eine Abschätzung der Planungszeiten bei unterschiedlichen Anwendungsfällen bei Produktaufwertungen durchgeführt. Folgendes wurde untersucht:

1. Örtliches Versetzen der Montageanlage
2. Integration eines neuen Bauteils in die Montageanlage
3. Nutzen der Montageanlage für ein neues Fahrzeugprojekt

Durch den Vergleich der Planungszeiten der flexiblen Prototypenanlage mit einer klassischen Montageanlage können Entwicklungen der Planungszeiten durch die Einbringung der Flexibilität untersucht werden. Dies validiert die theoretisch hergeleiteten Vorteile der flexiblen Gestaltung von Montageanlagen. Für jeden Anwendungsfall sollen die Bereiche des Roboters, der Systemtechnik, sowie der künstlichen Intelligenz untersucht werden. Der Roboter umfasst die Programmierung des Roboters und auch Hardwarebestandteile wie den Greifer. Des Weiteren beschreibt die Systemtechnik bspw. Anpassungen in übergeordneten Steuerungen, die Konstruktion von CAD Daten und Hardwareanpassungen die über den Roboter hinweg durchgeführt werden müssen. Der dritte Bereich ist die künstliche Intelligenz, welche für die Kameraerkennung der Umgebung und der Karosserie genutzt wird. Durch Trainings wird der künstlichen Intelligenz Wissen über die Umgebung und die Form der Karosserie weitergegeben. Die Ergebnisse werden im Folgenden in Form von Tabellen dargestellt.

Dazu zeigt die Tabelle 25 die Untersuchungen zum örtlichen Versetzen der flexiblen Prototypenanlage. Der Roboter als betroffener Bereich bleibt bei einem örtlichen Versetzen ohne Einfluss, sodass hier keine Planungszeit anfallen würde.

Dahingegen muss die Systemtechnik durch das Versetzen an einen anderen Ort angepasst werden. Vor allem die Umgebung muss bei einem örtlichen Versetzen neu kartiert werden, sodass die Prototypenanlage die grundsätzlichen Gegebenheiten der neuen Umgebung kennt und Fahrwege gekennzeichnet werden können. Die neue Kartierung muss dann der Steuerung der Prototypenanlage beigebracht werden.

Auch die künstliche Intelligenz wird von den neuen örtlichen Gegebenheiten beeinflusst. Es müssen die neuen Karten dem Roboter durch Trainings mitgegeben werden. Auch hier besteht dann eine Planungszeit von ca. einer Woche.

Tabelle 25: Abschätzung der Planungszeit für flexible Montageanlagen bei örtlichem Versetzen

Bereich	Planungszeit
Roboter	-
Systemtechnik	1 Arbeitswoche
Künstliche Intelligenz	1 Arbeitswoche

Im Weiteren zeigt die Tabelle 26 die Abschätzung der Planungszeit für flexible Montageanlagen bei der Integration eines neuen Bauteils des gleichen Fügeverfahrens im gleichen Fahrzeug in die Montageanlage. Durch das neue Bauteil, welches aufgenommen werden muss, kommt bei diesem Anwendungsfall auch eine Planungszeit für den Roboter auf. Für den Greifer als Teil des Roboters ist in dieser Betrachtung der Umplanungsaufwand aufgrund der universellen Gestaltung gering. In dieser Zeit muss jedoch ein best-möglicher Greifpunkt beim neuen Bauteil ermittelt werden. Zusätzlich muss der Roboter aber eventuell auf die neue Geometrie des Bauteils angepasst werden und Themen wie eine mögliche Kollision mit der Karosse müssen untersucht werden. Sodass sich eine Planungszeit von bis zu drei Monaten ergibt.

Die Systemtechnik muss bei der Änderung des Bauteils auch angepasst werden. Bei eventuellen Greiferänderungen müssen diese im System umgesetzt werden. Auch ist bei einer Greiferänderung die Halterung der Kamera zu überprüfen, welche potentiell auch angepasst werden muss.

Die künstliche Intelligenz muss bei einem neuen Bauteil nicht umgeplant werden, da sich die angelernten Bereiche wie die Karosse und die Umgebung, nicht ändern.

Tabelle 26: Abschätzung der Planungszeit für flexible Montageanlagen bei der Integration eines neuen Bauteils

Bereich	Planungszeit
Roboter	Bis zu 3 Monate
Systemtechnik	2 Arbeitswochen
Künstliche Intelligenz	-

Als drittes Szenario zeigt die Tabelle 27 die Abschätzung der Planungszeit für flexible Montageanlagen bei der Nutzung für ein neues Fahrzeugprojekt. Bei einer Änderung der Fahrzeuggeometrie und auch der Farbe sind vor allem der Roboter und auch die künstliche Intelligenz von einer Umplanung betroffen. Der Roboter hat erneut eine Planungszeit von bis zu drei Monaten, da vor allem eine mögliche Kollision mit der neuen Fahrzeuggeometrie geprüft werden muss. Wie bereits beim Szenario mit dem neuen Bauteil kann es auch hier zu Anpassungen am Greifer kommen, sobald der derzeitige Greifer zu einer Kollision mit der neuen Fahrzeuggeometrie führt.

Die Systemtechnik bleibt von der neuen Fahrzeuggeometrie unberührt. Des Weiteren muss die künstliche Intelligenz auf das neue Fahrzeug angelernt werden, was in der Abschätzung der Planungszeit mit zwei Arbeitswochen bewertet wurde.

Tabelle 27: Abschätzung der Planungszeit für flexible Montageanlagen für die Nutzung für ein neues Fahrzeugprojekt

Bereich	Planungszeit
Roboter	Bis zu 3 Monate
Systemtechnik	-
Künstliche Intelligenz	2 Arbeitswochen

Nach der Bewertung der Umplanungszeiten der flexiblen Prototypenanlage können diese nun mit Umplanungszeiten von klassischen Montageanlagen verglichen werden. Das Ziel ist die Entwicklung der Planungszeit durch die Erhöhung der Flexibilität zu bewerten.

Die Umplanungszeiten für klassische Montageanlagen, wurden in der Ausarbeitung einer Masterarbeit bei VWN unter Anleitung des Forschenden mit Experten untersucht (vgl. Schnell 2025). Die Masterarbeit untersucht die Bewertung des Flexibilitätsaspekts Mobilität in Montageanlagen in der Automobilindustrie. Im Zuge dieser Abschlussarbeit wird vor allem das Szenario des örtlichen Versetzens betrachtet. Das Ergebnis der Expertenbefragung zeigt, dass klassische Montageanlagen zwischen zwölf und 50 Wochen an Umplanungszeit benötigen, sollten diese von einem Ort an einen anderen versetzt werden.

Diese Bewertung im Vergleich zu den Umplanungszeiten für die flexible Prototypenanlage zeigt einen klaren Vorteil in der starken Reduzierung der Umplanungszeiten. Durch die mobile Gestaltung kann die Umplanungszeit um bis zu 98% reduziert werden.

Zusätzlich ist in dieser Betrachtung der Einsatz künstlicher Intelligenz hervorzuheben. Diese ermöglicht in der prototypischen Anlage ein „lernendes“ System, welches die Montageanlage befähigt schneller auf Änderungen der Rahmenbedingungen zu reagieren. Dieser Punkt – Intelligente Software – wurde jedoch in der Multiple Case Study als weniger wichtig für die Umsetzung der Flexibilität gesehen. Eine mögliche Schlussfolgerung ist, dass die künstliche Intelligenz durch Forschungseinrichtungen bereits Einzug in industriellen Produktionsanlagen bekommen hat, jedoch ein Transfer in die Industrie noch offen ist.

7.1.3 Rückschluss zu den Forschungsergebnissen

Durch die Planung, Umsetzung und Betrachtung der Effekte der flexiblen Prototypenanlage kann ein Rückschluss zur Methodik für die Planung flexibler Montageanlagen durchgeführt werden.

Ein erster Punkt betrifft die Anwendbarkeit der Methodik inklusive des *Montage-Flexibilitätsmodells*, die durch die Prototypenanlage nachgewiesen werden konnte. Die Methodik kann in einem Planungsprojekt in der Industrie genutzt werden. Durch die Einbindung des Planungsprozesses inkl. der Planungshorizonte kann entlang der Betriebsmittelplanung mit dem *Montage-Flexibilitätsmodell* gearbeitet werden. Im Zuge der Konzept- und Detailplanung kommt die Gestaltung des *Baukastens für die Planung flexibler*

Montageanlagen als Planungstool zum Einsatz, sodass die Verantwortlichen aus der Industrie entsprechend der Flexibilitätsanforderungen die Bestandteile der Montageanlagen konzipieren können.

Über die Bewertung der Anwendbarkeit hinaus, konnte auch die Vollständigkeit des *Montage-Flexibilitätsmodells* in der Planung der Prototypenanlage überprüft werden. Dies trifft vor allem für den *Baukasten für die Planung flexibler Montageanlagen* zu. Hier konnten in der Konzeptplanung für jegliche Bestandteile von Montageanlagen, Gestaltungshinweise entnommen werden, welche dann in der Detailplanung in ein Lastenheft eingebracht werden können. In der Prototypenanlage lag der Fokus vor allem auf dem Endeffektor und dem Gestell der Montageanlage.

Zusammenfassend gibt die Planung und Umsetzung der Prototypenanlage die Rückmeldung an die Methodik für die Planung flexibler Montageanlagen und das *Montage-Flexibilitätsmodell*, dass diese in einem Industrieprojekt in der Automobilindustrie gut anwendbar sind und dass durch die Anwendung flexible Montageanlagen geplant werden können.

7.2 Validierungsworkshops

Für die Validierung der Forschungsergebnisse sowie der prototypischen Umsetzung für die praktische Anwendung sollen Workshops durchgeführt werden.

Workshops grenzen sich methodisch durch gemeinschaftlich koordinierte Arbeit mit einer definierten Zielstellung und einem klar ausgewählten Thema von anderen Veranstaltungen ab. Die Moderation im Workshop wird von einer Person durchgeführt, welche auch die Vorbereitung der Inhalte übernommen hat (vgl. Nolte 2023, S. 1f.), in diesem Fall übernimmt dies der Forschende. Für diese Workshops werden Experten aus der Automobilindustrie mit einbezogen, um die Forschungsergebnisse auf Plausibilität und Angemessenheit prüfen und bewerten zu lassen (vgl. Flick 2022). Dies ist die Zielgruppe aus der Praxis, welche von den Forschungsergebnissen potenziell profitieren sollte.

Der Workshop ist nach dem Vorgehen aus der Abbildung 67 strukturiert.

WEEK 1

Workshopaufbau für die Validierung meiner Forschungsergebnisse

To validate is to check To validate is to question To validate is to theorize

Zeit	Aktivität	Beschreibung
13:30 – 13:40	Begrüßung und Einführung	Vorstellung des Workshop-Ziels und der Agenda
13:40 – 14:15	Präsentation der Forschungsergebnisse	Detaillierte Vorstellung der Forschungsmethodik und -ergebnisse
14:15 – 15:00	Diskussion der Ergebnisse	Offene Diskussionsrunde
15:00 – 15:15	Validierung der angepassten Ergebnisse	Überprüfung und Validierung Forschungsergebnisse
15:15 – 15:30	Zusammenfassung und Abschluss	Zusammenfassung und Ausblick auf die nächsten Schritte

Seite 2 | Mai 2025 | Validierungsworkshop | KSU-Klasse: 0,2 – 2 Jahre

LFD UNTERNEHMENSLOGISTIK VW Nutzfahrzeuge

Abbildung 67: Darstellung der Agenda der Validierungsworkshops

Während der Workshops werden die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit präsentiert. Darunter sind vor allem das *Montage-Flexibilitätsmodell*, der *Baukasten für die Planung von flexiblen Montageanlagen* sowie auch die Definitionen der Flexibilitätsanforderungen für die Segmente der Automobilindustrie.

Für die Validierung mittels Workshops wurden für diese Forschungsarbeit in Summe vier Workshops mit unterschiedlichen Teilnehmenden aus der Automobilindustrie durchgeführt. Ein erster Workshop wurde in der Montageplanung des LNFZ OEMs aus der Multiple Case Study durchgeführt. Weitere Workshops wurden bei der zentralen Produktionsplanung eines weltweit produzierenden OEMs, bei einem Komponentenhersteller innerhalb der Automobilindustrie sowie bei einem weiteren deutschen Automobil-OEM durchgeführt. Im Weiteren werden die Ergebnisse der einzelnen Workshops beschrieben.

In dem Validierungsworkshop in der Montageplanung des LNFZ OEMs wurden Experten inkludiert, die nicht Teil der ursprünglichen Datenaufnahme während der Multiple Case Study waren. So kann im Zuge der Validierung mit Experten eine neue Perspektive auf die Forschungsergebnisse erreicht werden. Zusätzlich war auch ein Teilnehmer aus der ursprünglichen Datenaufnahme als Beobachter mit eingebunden, damit so auch eine Validierung mit Untersuchungsteilnehmern (vgl. Flick 2022, S. 536) durchgeführt werden konnte. Die Experten aus diesem Validierungsworkshop stellen eine Zielgruppe für die praktische Anwendung der Forschungsergebnisse dar, da diese regelmäßig neue Montageanlagen in der Automobilindustrie planen. Die Experten aus diesem ersten Workshop stimmen den Forschungsergebnissen grundsätzlich zu. Die Erweiterung des Planungsprozesses um die Flexibilitätsaspekte und die Umsetzungsmöglichkeiten wurde von den Ex-

perten akzeptiert und für sinnvoll befunden. Auch wurde die Priorisierung der Flexibilitätsaspekte aus dem Fall „LNFZ“ durch die Experten bestätigt. In Bezug auf die Umsetzungsmöglichkeiten soll der *Baukasten für die Planung flexibler Montageanlagen* in den nächsten Projekten Anwendung finden, nachdem die Handhabbarkeit der derzeitigen Umsetzung für gut bewertet wurde. Vor allem die Relevanz der Umsetzungsmöglichkeit Vorhalte wurde von den Experten betont. Nach den positiven Rückmeldungen haben die Experten jedoch auch Einschränkungen des Modells beschrieben. Vor allem die Implementierung von flexiblen Montageanlagen scheint bei der aktuellen Zielsetzung in der Industrie schwierig, da flexible Montageanlagen voraussichtlich mit höheren Anschaffungskosten einhergehen. Diese Mehrkosten müssten besser motiviert werden, um eine Entscheidung für flexible Montageanlagen erreichen zu können.

Ein nächster Workshop wurde in der zentralen Produktionsplanung eines weltweit produzierenden OEMs durchgeführt. Durch die übergreifende Sichtweise über die verschiedenen Montagen der unterschiedlichen Marken des OEMs konnte in diesem Workshop eine weitere, übergeordnete Perspektive aufgenommen werden. Durch die Experten mit einer übergeordneten Perspektive konnten vor allem die verschiedenen Flexibilitätsanforderungen je Fahrzeugsegment hinterfragt werden. Die Fokussierungen wie sie in der Ausarbeitung des *Montage-Flexibilitätsmodells* erfolgt sind, wurden von den Experten bestätigt. Auch die Inhalte des *Baukastens für die Planung flexibler Montageanlagen* sind auf Zustimmung gestoßen, vor allem in der aggregierten Darstellung, ohne Fokussierung auf einzelne Flexibilitätsaspekte. Jedoch kam durch diese Experten eine weitere Perspektive auf Montageanlagen universeller einzusetzen. Die Fahrzeuge als solches müssten standardisierter aufgebaut werden, sodass die Variantenzahl an Bauteilen in der Montage reduziert werden würde. Dieser Aspekt wurde bereits in der Multiple Case Study von den Experten teils angesprochen, jedoch nicht weiterverfolgt, da dieser nicht direkt die Gestaltung von Montageanlagen beschreibt. Des Weiteren wurde in diesem Workshop erneut eine Implementierungshürde für das *Montage-Flexibilitätsmodell* beschrieben. Die wirtschaftliche Bewertung der Flexibilität würde fehlen, sodass flexiblere – und somit teurere – Montageanlagen in einer Entscheidung den Vorrang zu starren Montageanlagen bekommen würden.

Auch wurde ein Workshop bei einem Komponentenhersteller durchgeführt, welche als Lieferant für die Montagen der OEMs fungiert und Komponenten wie Batterien oder auch Achsen herstellt. Durch diese Perspektive können weitere Sichtweisen aus den Montagen innerhalb der Automobilindustrie aufgenommen werden, da sich die Montagen der Komponente durch die Art der Fügeverfahren und auch durch z. B. die Varianz von den Montagen der OEMs unterscheiden. Bezogen auf die Varianz der Bauteile in der Komponente ergibt sich eine Nähe zum Fall „Volumen“. Jedoch mit unterschiedlichen Fügeverfahren, als sie bei der Montage des OEMs des Falls „Volumen“ vorliegen. Mit einer Nähe zum

Fall „Volumen“ wurden die Flexibilitätsaspekte und Umsetzungsmöglichkeiten dieses Falls von den Experten des Komponentenherstellers betrachtet. Die Rückmeldung war, dass das *Montage-Flexibilitätsmodell* einerseits den Planungsprozess passend auf eine gesteigerte Flexibilität ausrichtet und andererseits ein handhabbares Planungstool darstellt, was im Alltag der Planung sehr gut eingesetzt werden kann. In Bezug auf die Implementierung in den Planungsalltag und der Fokussierung auf die Flexibilität, wurde erneut die schwierige wirtschaftliche Bewertung der Flexibilität beschrieben.

Der letzte Workshop wurde daraufhin bei einem weiteren deutschen OEM aus der Automobilindustrie durchgeführt. So kann die breite Aufstellung der Multiple Case Study noch um eine weitere Perspektive ergänzt werden. Der entsprechende OEM stellt vor allem Fahrzeuge wie die Premium und Sport OEMs aus der Multiple Case Study her. Der Workshop wurde wie auch der Workshop bei dem LNFZ OEM im Hinblick auf die Montageplanung durchgeführt. Nach grundsätzlicher Zustimmung zu den entwickelten Forschungsergebnissen wird die Relevanz der Skalierbarkeit besonders hervorgehoben. Nach dem letzten Workshop ist die Skalierbarkeit der wichtigste Flexibilitätsaspekt, so dass eine wirtschaftliche Montage mit entsprechender Reaktionsfähigkeit geplant werden kann. Laut eines Experten ist der Wechsel von Aufgaben einer Montageanlage kein erstrebenswerter Anwendungsfall, da die Produkte entsprechend standardisiert sein sollten, was in der heutigen Automobilindustrie noch nicht zutrifft. Des Weiteren wird erneut die Implementierungshürde der wirtschaftlichen Bewertung beschrieben.

Nach der Präsentation der Forschungsergebnisse stimmen die Workshopteilnehmenden in ihrer Meinung überein. Die Forschungsergebnisse aus dem *Montage-Flexibilitätsmodell* beschreiben alle Flexibilitätsaspekte von Montageanlagen in der Automobilindustrie. Auch wurde die Beschreibung der Flexibilitätsanforderungen bezogen auf die Charakteristiken der Montagesysteme durch die Experten bestätigt. Zusätzlich wurde der *Baukasten für die Planung von flexiblen Montageanlagen* von den Experten gut aufgenommen, da dieser die Planungstätigkeiten – im Hinblick auf die Flexibilitätsanforderungen – sehr gut unterstützen kann.

Im Zuge der Workshops wurde auch die prototypische Umsetzung der flexiblen Montageanlage präsentiert und diskutiert. Die Anwendung des *Montage-Flexibilitätsmodells* inkl. des *Baukastens für die Planung von flexiblen Montageanlagen* war für die Experten sehr nachvollziehbar und von großem Interesse.

Die Diskussionen auf verschiedenen Unternehmensebenen und über Unternehmensgrenzen hinaus machten potentielle Implementierungshürden der Forschungsergebnisse sichtbar. Die Experten aller Workshops bestätigen die schwierige Integration der Flexibilität in die Zielsetzung von Planungsprojekten aufgrund der initial höheren Anschaffungskosten.

Die Gestaltung der vier Validierungsworkshops bietet folgende Vorteile für die Validierung der Forschungsergebnisse:

- Durch die Auswahl der Experten ergeben sich vielfältige Blickwinkel auf die Forschungsergebnisse, was die Generalisierbarkeit steigert.
- Die Experten können während der Workshops die prototypische Umsetzung bewerten und so die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse einschätzen.
- Die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse kann darüber hinaus durch die diverse Auswahl an Experten gezielt untersucht werden – auch hinsichtlich der nutzerseitigen Akzeptanz.
- Da die Experten der Workshops nicht Teil der Multiple Case Study waren und aus verschiedenen Unternehmensbereichen und anderen Unternehmen stammen, kann eine Validität erreicht werden.

7.3 Zusammenfassung: Validierung der Forschungsergebnisse und prototypische Umsetzung

Dieses Kapitel validiert die Forschungsergebnisse in Form des *Montage-Flexibilitätsmodells* für die Planung von flexiblen Montageanlagen – am Beispiel der Automobilindustrie.

Die Methodik zur Planung flexibler Montageanlagen inklusive des *Montage-Flexibilitätsmodells* stellt die Basis für die Validierung dar. Ein erstes Validierungsergebnis ist die prototypische Umsetzung einer flexiblen Montageanlage, welche anhand des angepassten Planungsprozesses für flexible Montageanlagen geplant wurde. Darüber hinaus wurde die Bewertung der Vollständigkeit und der Richtigkeit des *Montage-Flexibilitätsmodells* durch Experten aus der Automobilindustrie durchgeführt. Durch Workshops bei einem OEM aus der Multiple Case Study sowie der zentralen Produktionsplanung eines weltweit produzierenden OEMs, einem Komponentenhersteller und einem weiteren deutschen OEM der Automobilindustrie wurde zusätzlich zu der Vollständigkeit und Richtigkeit eine externe Validität erreicht. Durch die Darstellung der prototypischen Umsetzung in den Workshops konnte zusätzlich auch die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse von den Experten bewertet werden.

Durch die prototypische Umsetzung konnte eine flexible Montageanlage mit den derzeitigen Montageanlagen aus der Automobilindustrie verglichen werden. Aus methodischen Untersuchungen ergab sich eine signifikante Zeitersparnis in der Umplanung von Montageanlagen, wenn diese mit gesteigerter, spezifischer Flexibilität nach dem *Montage-Flexibilitätsmodell* geplant wurden. Im Hinblick auf die erforderlichen – kürzeren Planungszeiten in der Automobilindustrie – durch die derzeitige Marktsituation helfen die flexiblen Montageanlagen dieser Situation. Darüber hinaus stellt das *Montage-Flexibili-*

tätsmodell eine Lösungsmöglichkeit für das Problem dieser Arbeit dar. Die Anforderungen die aus den aktuellen Herausforderungen (siehe Kapitel 2.3) formuliert wurden, werden erfüllt.

8 Zusammenfassung, weiterer Forschungsbedarf und Limitationen

Dieses Kapitel soll den Forschungsprozess und die Ergebnisse dieser Arbeit zusammenfassend darstellen. Darüber hinaus soll das Forschungsvorgehen kritisch gewürdigt, und ein Ausblick für weiteren Forschungsbedarf gegeben werden.

8.1 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

In der heutigen Zeit ist Flexibilität ein wichtiges Kriterium in Fabrikplanungsprojekten – insbesondere bei der Planung von Montageanlagen als Betriebsmittel. Gerade in der Automobilindustrie sind aktuelle Trends wie der Mass-Customization-Effekt, verkürzte Produktlebenszyklen und volatile Marktsituationen deutlich spürbar. Daraus ergibt sich die *LFF* dieser Arbeit: „*Wie lässt sich die Flexibilität in Montageanlagen systematisch planen, gestalten und konzeptionell implementieren?*“ Zur Untersuchung der mit der *LFF* verbundenen Forschungslücke wurde ein exploratives Forschungsdesign entwickelt, welches qualitative und quantitative Analysemethoden kombiniert und den Fokus auf die Automobilindustrie legt. Grundlage hierfür bildet eine internationale systematische Literaturrecherche.

Diese Literaturrecherche analysiert den Stand der Forschung anhand internationaler Veröffentlichungen aus den Datenbanken Springer Professional, Science Direct und IEEE Xplore. Die Veröffentlichungen adressieren die Begriffe Flexibilität, Montage und Automatisierung im Kontext der *LFF*. Durch die Analyse von 34 internationalen Veröffentlichungen konnte die erste *FF* „*Wie wird Flexibilität im Planungsprozess in Montageanlagen theoretisch konzipiert und umgesetzt?*“ beantwortet werden.

Das konzeptionelle Flexibilitätsmodell – als Ergebnis der internationalen Literaturrecherche – umfasst den Planungsprozess in der Fabrikplanung, spezifische Flexibilitätsaspekte für Montageanlagen sowie Umsetzungsmöglichkeiten für Flexibilitätsaspekte in Montageanlagen. Auf dieser Grundlage wurde ein theoretischer Ausgangspunkt geschaffen, um im nächsten Schritt eine empirische Datenaufnahme in Form einer explorativen Multiple Case Study durchzuführen.

Die Multiple Case Study wurde durchgeführt, um die zweite *FF* „*Wie operationalisiert die industrielle Praxis Flexibilität in der Planung von Montageanlagen und welche Abweichungen bestehen zu theoretischen Modellen?*“ zu beantworten.

In Summe wurden fünf internationale OEMs aus der Automobilindustrie in die Multiple Case Study aufgenommen. Diese decken die verschiedenen Segmente der Automobilindustrie ab, sodass eine gewisse Generalisierbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden konnte. Insgesamt 17 Experten aus drei Ländern mit dem Schwerpunkt auf die Montage-

und Automatisierungsplanung wurden im Rahmen von Experteninterviews und teilnehmender Beobachtungen eingebunden. Die erhobenen Daten wurden anhand Interviewtranskripten und Datenaufnahmeprotokollen dokumentiert. Bei der Analyse wurden die Fälle einzeln und übergeordnet betrachtet.

Ergänzt durch eine Kombination aus qualitativen und quantitativen Analysemethoden sowie einer Triangulation der Datenquellen konnte das Ergebnis der Multiple Case Study erarbeitet werden. Ein praxisorientiertes Flexibilitätsmodell aus der Automobilindustrie wurde auf Basis des konzeptionellen Flexibilitätsmodells erstellt. Dieses praxisorientierte Flexibilitätsmodell stellt das Ergebnis der FF2 dar.

Zur Beantwortung der FF3 „*Wie lässt sich ein integriertes Modell zur Planung flexibler Montageanlagen in der Automobilindustrie entwickeln?*“ wurden das konzeptionelle Flexibilitätsmodell und das praxisorientierte Flexibilitätsmodell systematisch miteinander verglichen. Durch diesen Abgleich konnten sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede aufgezeigt werden. Die folgende Diskussion führte zur Entwicklung eines integrierten Modells – dem *Montage-Flexibilitätsmodell* – und damit zur Beantwortung der FF3. Das Montage-Flexibilitätsmodell erfüllt die aus dem Stand der Forschung definierten Anforderungen an ein Flexibilitätsmodell für die Flexibilität in Montageanlagen, sodass dieses Flexibilitätsmodell theoretisch validiert werden konnte.

Der beschriebene Ablauf bildet einen vollständigen Forschungszyklus ab – beginnend bei einer ersten Theorie über deduktive und empirische Phasen bis hin zur induktiven Ableitung einer neuen Theorie. Diese neue Theorie – das *Montage-Flexibilitätsmodell* – wurde darüber hinaus durch eine prototypische Umsetzung in einer Montageanlage der Automobilindustrie sowie durch Validierungsworkshops mit Experten aus der Automobilindustrie validiert. Auf diese Weise konnten die externe Validität nachgewiesen und die praktische Anwendbarkeit des *Montage-Flexibilitätsmodells* bestätigt werden. Durch die Anwendung des *Montage-Flexibilitätsmodells* wird somit erwartet, dass die Planung und Implementierung von flexiblen Montageanlagen – vor allem in der Automobilindustrie – unterstützt und systematisiert wird.

8.2 Kritische Betrachtung und weiterer Forschungsbedarf

Dieser Abschnitt beinhaltet die abschließende kritische Betrachtung des Forschungsprojekts. Die Forschungsmotivation, die Forschungsmethodik sowie die Forschungsergebnisse werden reflektiert. Zudem wird abschließend der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

Forschungsmotivation

Die Motivation für dieses Forschungsprojekt ergibt sich aus einer Kombination aus einer theoretischen Forschungslücke und einem industriellen, praktischen Problem. Auf Basis

der DSR Methode konnte so eine theoretisch fundierte und zugleich anwendungsorientierte Forschung durchgeführt werden. Das praktische Problem stammt aus der Montageplanung in der Automobilindustrie, mit besonderem Fokus auf Montageanlagen für die Fahrzeugmontage bei automobilen OEMs. Vor diesem Hintergrund wurde der theoretische Rahmen definiert und die Forschungslücke systematisch herausgearbeitet. Es ergibt sich das Themenfeld der Planung flexibler Montageanlagen, welches durch die zweigeteilte Perspektive aus Theorie und Praxis motiviert ist. Die Forschungsmotivation für diese Arbeit wird somit klar beschrieben, was auch die Relevanz der Forschungsergebnisse stärkt.

Forschungsmethodik und -Ergebnisse

Ausgehend von der Forschungsmotivation wurde eine internationale systematische Literaturrecherche durchgeführt. Ziel war es, den Stand der Forschung im Bereich der Planung flexibler Montageanlagen zu erfassen und darauf die *FF* dieser Arbeit abzuleiten. Die Fragen umfassen entlang der DSR Methode:

1. die theoretische Perspektive auf die Problemstellung,
2. die praktische Sichtweise der industriellen Umsetzung auf Basis der Theorie,
3. sowie die Entwicklung eines integrierten Modells zur Lösung des identifizierten Problems.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden systematisch aufbereitet, um relevante Veröffentlichungen zu identifizieren und so den Stand der Forschung zu erarbeiten.

Aufbauend auf dem Stand der Forschung wurde ein konzeptionelles Flexibilitätsmodell als theoretische Fundierung entwickelt. Bestandteil dieses Flexibilitätsmodells ist der Planungsprozess für Montageanlagen als Betriebsmittel im Rahmen der Fabrikplanung. Ergänzt wird dieser durch aktuelle Flexibilitätsaspekte, welche sich aus gegenwärtigen Marktsituationen und Trends ergeben. Zudem wird beschrieben, wie die Flexibilität in Betriebsmitteln konkret umgesetzt werden könnte. Die *FF1 – Wie wird Flexibilität im Planungsprozess in Montageanlagen theoretisch konzipiert und umgesetzt?* – wird durch dieses konzeptionelle Flexibilitätsmodell beantwortet. Gleichzeitig motiviert das theoretische konzeptionelle Flexibilitätsmodell die empirische Untersuchung im Rahmen einer Multiple Case Study, um eine Praxissicht auf das Thema zu erlangen und die *FF2* zu beantworten.

Vor dem Hintergrund der praktischen Relevanz wurde eine explorative Multiple Case Study in der Automobilindustrie geplant und durchgeführt. Die Auswahl von fünf internationalen OEMs ermöglichte eine Abdeckung aller Fahrzeugsegmente, um eine Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu unterstützen. Die Datenaufnahme erfolgte durch Experteninterviews sowie teilnehmende Beobachtungen in europäischen Fabriken der OEMs, die somit unter vergleichbaren regulatorischen und technischen Grundlagen operieren. In

Summe wurden 17 Experten der fünf OEMs aus den Bereichen Montageplanung und Automatisierungsplanung für Montageanlagen einbezogen.

Nach Erreichen der theoretischen Sättigung in den Interviewergebnissen begann die systematische Analyse der empirischen Daten. Durch einen Methodenmix aus qualitativer und quantitativer Auswertung – insbesondere mittels Inhaltsanalyse der Transkripte und Datenaufnahmeprotokolle – konnte eine praktische Sicht auf das konzeptionelle Flexibilitätsmodell erarbeitet werden. Zur Sicherstellung der Reliabilität wurde der Prozess der Kategorienbildung im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse nachvollziehbar dokumentiert. Zusätzlich wurden zentrale Aussagen anhand kodierter Zitate aus den Interviewtranskripten belegt.

Zur Gewährleistung der Konstruktvalidität wurden die Datenquellen – Experteninterviews und teilnehmende Beobachtungen – trianguliert. Auf dieser Grundlage konnte ein praxisorientiertes Flexibilitätsmodell entwickelt werden, welches auf dem konzeptionellen Flexibilitätsmodell basiert. Dieses Flexibilitätsmodell beantwortet die *FF2 – Wie operationalisiert die industrielle Praxis Flexibilität in der Planung von Montageanlagen und welche Abweichungen bestehen zu theoretischen Modellen?*

Im Weiteren wurden das konzeptionelle und das praxisorientierte Flexibilitätsmodell miteinander abgeglichen, um die *FF3 – Wie lässt sich ein integriertes Modell zur Planung flexibler Montageanlagen in der Automobilindustrie entwickeln?* – zu beantworten. Durch die Gegenüberstellung wissenschaftlicher und praktischer Perspektiven konnte das integrierte *Montage-Flexibilitätsmodell* erstellt werden. Im Rückschluss zur Forschungsmotivation, werden durch dieses Ergebnis sowohl die theoretische Forschungslücke als auch das industrielle Problem adressiert.

Zur Validierung der Forschungsergebnisse und Bewertung der Anwendbarkeit in der industriellen Praxis wurden eine prototypische Umsetzung sowie Validierungsworkshops durchgeführt. Das *Montage-Flexibilitätsmodell* wurde in einem realen Planungsprozess für eine flexible Montageanlage angewendet. Im Ergebnis konnte bspw. eine signifikante Reduktion der Reaktionszeit der Montageanlage bei der Integration eines neuen Fahrzeugs nachgewiesen werden. Die Forschungsergebnisse sowie die prototypische Umsetzung wurden anschließend im Rahmen von vier Validierungsworkshops mit Experten aus der Automobilindustrie kritisch geprüft, hinterfragt und letztendlich validiert. Diese bestätigen sowohl die Gültigkeit der Forschungsergebnisse als auch die praktische Anwendbarkeit des *Montage-Flexibilitätsmodells*. Somit konnte eine externe Validität erreicht werden.

Weiterer Forschungsbedarf und Limitationen

Nach dem erfolgreichen Abschluss des Forschungszyklus zur Entwicklung des *Montage-Flexibilitätsmodells* zur Planung flexibler Montageanlagen am Beispiel der Automobilindustrie lässt sich weiterer Forschungsbedarf identifizieren. Dieser wurde sowohl in den Experteninterviews als auch im Rahmen der Validierung von Experten angegeben.

Ein wesentlicher Punkt, welcher auch eine Implementierungshürde für das *Montage-Flexibilitätsmodell* darstellt, betrifft die wirtschaftliche Bewertung der Flexibilität. Eine höhere Flexibilität ist in der Regel mit erhöhten Anfangsinvestitionen verbunden. So wird in einem Entscheidungsgremium in der Industrie häufig die starre, kostengünstigere Variante bevorzugt – insbesondere, da potenzielle Anpassungskosten in der Regel nicht in die initiale Investitionsbewertung einfließen. Aus diesem Umstand ergibt sich ein konkreter Forschungsbedarf: Eine quantitative Bewertung der Flexibilität in Montageanlagen könnte dazu beitragen, die Entscheidungsgrundlagen zu verbessern. Ein entsprechendes Bewertungsmodell würde es ermöglichen, die langfristigen Vorteile flexibler Montageanlagen – durch geringere Anpassungskosten und verkürzte Reaktionszeiten in der Planung – transparent darzustellen. Somit ließen sich höhere Anfangsinvestitionen begründen, da sich flexible Montageanlagen über ihren Lebenszyklus als wirtschaftlicher erweisen könnten als starre, wenn es zu häufigen Änderungen an den Planungsgrundlagen kommen würde.

Über die Implementierungshürden hinweg lassen sich auch Limitationen der Forschungsergebnisse aufzeigen. Ein erster Punkt ist der Fokus auf Montagen von OEMs in der Automobilindustrie, wodurch die Forschungsergebnisse dieser Arbeit potenziell nicht für die Gesamtheit der Montagen in der Automobilindustrie gelten können. Durch die Validierung bei einem Komponentenhersteller – als Zulieferer von OEMs – konnte eine erste Überprüfung der Generalisierbarkeit der Ergebnisse für die Automobilindustrie erreicht werden. Für eine klare generelle Gültigkeit der Forschungsergebnisse für die gesamte Automobilindustrie wären jedoch weitere Prüfungen in der Zuliefererbranche notwendig.

Eine weitere Limitation betrifft die Umsetzungsmöglichkeiten der Flexibilität in Montageanlagen der OEMs. Wie die prototypische Umsetzung bei einem Forschungsinstitut gezeigt hat, ist vor allem auch die künstliche Intelligenz eine Umsetzungsmöglichkeit für die Flexibilität in Montageanlagen. Dieser gezeigte Einsatz der künstlichen Intelligenz im Zusammenspiel mit den aktuellen Entwicklungen und Berichten zur künstlichen Intelligenz zeigen ein weiteres Potenzial zur Steigerung der Flexibilität in Montageanlagen der Automobilindustrie auf, welches noch keinen flächendeckenden Einzug in die industrielle Praxis erhalten hat. Dies müsste in einem weiteren Forschungsvorhaben tiefergehend betrachtet werden, sodass die Potentiale der künstlichen Intelligenz für die Flexibilität von Montageanlagen klar untersucht werden könnten.

9 Literaturverzeichnis

Abadi, C.; Manssouri, I.; Abadi, A. (2021): Reconfiguration of Flexible Manufacturing Systems Considering Product Morpho-Dimensional Characteristics and Modular Design. In: Abdelmjid Saka, Jean-Yves Choley, Jamel Louati, Zakaria Chalh, Maher Barkallah, Mohammed Alfidi et al. (Hg.): *Advances in Integrated Design and Production*. Cham: Springer International Publishing, S. 559–565.

Ahmadzadeh, H.; Masehian, E. (2015): Modular robotic systems: Methods and algorithms for abstraction, planning, control, and synchronization. In: *Artificial Intelligence* 223, S. 27–64. DOI: 10.1016/j.artint.2015.02.004.

Altinisik, A.; Yildirim, U.; Topcu, Y. I. (2022): Evaluation of failure risks for manual tightening operations in automotive assembly lines. In: *AA* 42 (5), S. 653–676. DOI: 10.1108/AA-05-2022-0120.

Andresen, K.; Gronau, N.; Schmid, S. (2005): Ableitung von IT-Strategien durch Bestimmung der notwendigen Wandlungsfähigkeit von Informationssystemarchitekturen. In: Otto K. Ferstl, Elmar J. Sinz, Sven Eckert und Tilman Isselhorst (Hg.): *Wirtschaftsinformatik 2005*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, S. 63–82.

Azab, A.; ElMaraghy, H.; Nyhuis, P.; Pachow-Frauenhofer, J.; Schmidt, M. (2013): Mechanics of change: A framework to reconfigure manufacturing systems. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2), S. 110–119. DOI: 10.1016/j.cirpj.2012.12.002.

Bauernhansl, T.; Fechter, M.; Dietz, T. (Hg.) (2020): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (ARENA2036).

Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (2014): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Baur, N.; Blasius, J. (2014): Methoden der empirischen Sozialforschung. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 41–62.

Bebersdorf, P.; Huchzermeier, A. (Hg.) (2021): *Variabler Takt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bergholz, M. (2005): *Objektorientierte Fabrikplanung*. Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2005. Online verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/59650>, zuletzt geprüft am 06.03.2024.

Literaturverzeichnis

Bochmann, L. S. (2018): Entwicklung und Bewertung eines flexiblen und dezentral gesteuerten Fertigungssystems für variantenreiche Produkte. ETH Zurich.

Boothroyd, G. (2005): Assembly automation and product design. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis (Manufacturing engineering and materials processing, 66).

Braun, J.; Künnemann, S.; Rich, B. M.; Mißler-Behr, M.; Woll, R. (2022): Kundenanforderungen in der Automobilindustrie – Eine empirische Untersuchung zu deren zeitlichen Veränderungen mittels Kano-Modell. In: Ralf Woll und Christine Goldmann (Hg.): Trends und Entwicklungstendenzen im Qualitätsmanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 41–59.

Breuer, F. (2010): Wissenschaftstheoretische Grundlagen qualitativer Methodik in der Psychologie. In: Günter Mey und Katja Mruck (Hg.): Handbuch qualitative Forschung in der Psychologie. 1. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 35–49.

Brinkmann, S.; Kvale, S. (2018): Doing interviews. 2nd edition. Los Angeles, London, New Dehli, Singapore, Washington DC, Melbourne: SAGE (The SAGE qualitative research kit / edited by Uwe Flick, 2).

Brusaferri, A.; Ballarino, A.; Cavadini, F. A.; Manzocchi, D.; Mazzolini, M. (2014): CPS-based hierarchical and self-similar automation architecture for the control and verification of reconfigurable manufacturing systems. In: Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA). 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA). Barcelona, Spain, 16.09.2014 - 19.09.2014: IEEE, S. 1–8.

Buck, R. (2015): Entwurfsmuster für den Aufbau von Baukästen für das Funktionale Engineering. Design patterns for the creation of libraries for functional engineering. Hg. v. Alexander Verl. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Band 41).

Burggräf, P.; Dannapfel, M.; Ebade Esfahani, M.; Pulz, C.; Attig, P. (2021a): Fertigungsmittel- und Personaleinsatzplanung. In: Peter Burggräf und Günther Schuh (Hg.): Fabrikplanung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 273–364.

Burggräf, P.; Nowacki, C.; Kamp, S.; Bachmann, F. (2021b): Dimensionierung und Strukturierung der Produktion. In: Peter Burggräf und Günther Schuh (Hg.): Fabrikplanung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 123–163.

Burggräf, P.; Schuh, G. (Hg.) (2021): Fabrikplanung. Handbuch Produktion und Management 4. 2nd ed. 2021. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Springer Vieweg.

- Burggräf, P.; Schuh, G.; Ebade Esfahani, M.; Dannapfel, M.; Nöcker, J.; Wesch-Potente, C. (2021c): Einführung in die Fabrikplanung. In: Peter Burggräf und Günther Schuh (Hg.): Fabrikplanung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–62.
- Chatti, S.; Laperrière, L.; Reinhart, G.; Tolio, T. (2019): CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- ConferenceInc (2025): Top 10 Research paper publishers. Online verfügbar unter <https://conferenceinc.net/post/top-10-research-paper-publishers/>, zuletzt geprüft am 06.08.2025.
- Derłęga, G.; Helman, J.; Burduk, A. (2024): Method of Risk Analysis in the New Product Development Process. In: Anna Burduk, Andre D. L. Batako, José Machado, Ryszard Wyczółkowski, Ewa Dostatni und Izabela Rojek (Hg.): Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance III. Cham: Springer Nature Switzerland (Lecture Notes in Mechanical Engineering), S. 475–487.
- Deuse, J.; Roßmann, J.; Kuhlenkötter, B.; Hengstebeck, A.; Stern, O.; Klöckner, M. (2014): A Methodology for the Planning and Implementation of Service Robotics in Industrial Work Processes. In: *Procedia CIRP* 23, S. 41–46. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.066.
- Dictionary of Production Engineering IV (2020). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2003): DIN 8593-0:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin, zuletzt geprüft am 21.03.2024.
- Dreher, S. (2024): Koordination des Produktionsanlaufs in globalen Produktionsnetzwerken. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Duden (2023a): Empirie. Hg. v. Cornelsen Verlag GmbH. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Empirie>, zuletzt geprüft am 26.11.2023.
- Duden (2023b): Induktion. Hg. v. Cornelsen Verlag GmbH. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Induktion>, zuletzt geprüft am 26.11.2023.
- Duden (2023c): Theorie. Hg. v. Cornelsen Verlag GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Theorie>, zuletzt geprüft am 23.11.2023.
- Duden (2024a): Betriebsmittel. Hg. v. Cornelsen Verlag GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Betriebsmittel>, zuletzt geprüft am 18.09.2024.

Literaturverzeichnis

Duden (2024b): Reliabilität. Hg. v. Cornelsen Verlag GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Reliabilitaet>, zuletzt geprüft am 28.05.2024.

Duden (2024c): Validieren. Hg. v. Cornelsen Verlag GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/validieren>, zuletzt geprüft am 19.09.2024.

Duden (2024d): Validität. Hg. v. Cornelsen Verlag GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Validitaet>, zuletzt geprüft am 28.05.2024.

Duden (2024e): Workshop. Hg. v. Cornelsen Verlag GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/suchen/dudenonline/workshop>, zuletzt geprüft am 19.09.2024.

ElMaraghy, H. A. (2005): Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. In: *Int J Flex Manuf Syst* 17 (4), S. 261–276. DOI: 10.1007/s10696-006-9028-7.

Erlach, K. (2020): Die schlanke und wandlungsfähige Fabrik. In: Klaus Erlach (Hg.): Wertstromdesign. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch), S. 291–328.

Eskilander, S. (2001): Design for Automatic Assembly - A Method for Product Design: DFA2. Dissertation. Royal Institute of Technology, Stockholm. Department of Production Engineering. Online verfügbar unter <http://rolflovgren.se/RL-MDH/Eskilander%20Doc%20thesis%20DFA2.pdf>, zuletzt geprüft am 12.02.2023.

Europäische Kommission (1999): Regulation (EEC) No 4064/89. Merger Procedure. Hg. v. Europäische Kommission. Brüssel. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m1406_en.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2025.

Europäische Kommission (2025): EU classification of vehicle types. Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/general-information/vehicle-types>, zuletzt geprüft am 21.02.2025.

Europäisches Parlament und Rat (2020): VERORDNUNG (EU) 2019/631 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011, vom 25.04.2019. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631&from=DE>, zuletzt geprüft am 14.03.2023.

European Automobile Manufacturers' Association (2024): The Automobile Industry. Pocket Guide 2024/2025.

- Fechter, M. (2020): Wandlungsfähige Roboter für die Automobilproduktion. In: Thomas Bauernhansl, Manuel Fechter und Thomas Dietz (Hg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (ARENA2036), S. 55–68.
- Fechter, M.; Dietz, T. (2020): Bewertung der Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems. In: Thomas Bauernhansl, Manuel Fechter und Thomas Dietz (Hg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (ARENA2036), S. 11–17.
- Fisel, J. (2019): Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme. Dissertation, Karlsruhe.
- Flick, U. (2020): Gütekriterien qualitativer Forschung. In: Günter Mey und Katja Mruck (Hg.): Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 247–263.
- Flick, U. (2022): Gütekriterien qualitativer Sozialforschung. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 533–547.
- Foith-Förster, P.; Bauernhansl, T. (2015): Changeable and reconfigurable assembly systems – A structure planning approach in automotive manufacturing. In: Michael Barge, Hans-Christian Reuss und Jochen Wiedemann (Hg.): 15. Internationales Stuttgarter Symposium. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Proceedings), S. 1173–1192.
- Fortune (2025): Ranking der größten Unternehmen weltweit nach Umsatz im Geschäftsjahr 2023/2024.
- Fraunhofer IPK: Auf eigene Faust. In: Futur, 1/2025, S. 44-45. Online verfügbar unter <https://www.ipk.fraunhofer.de/de/medien/futur/futur-2025-1/auf-eigene-faust.html>, zuletzt geprüft am 07.08.2025.
- Fries, C.; Fechter, M.; Ranke, D.; Trierweiler, M.; Assadi, A. A.; Foith-Förster, P. et al. (2021): Fluid Manufacturing Systems (FLMS). In: Philipp Weißgraeber, Frieder Heieck und Clemens Ackermann (Hg.): Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (ARENA2036), S. 37–44.
- Fries, C.; Wiendahl, H.-H.; Foith-Förster, P. (2020): Planung zukünftiger Automobilproduktionen. In: Thomas Bauernhansl, Manuel Fechter und Thomas Dietz (Hg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (ARENA2036), S. 19–43.

Literaturverzeichnis

- Garrel, J. von; Schenk, M.; Seidel, H. (2014): Flexibilisierung der Produktion – Maßnahmen und Status-Quo. In: Christopher Marc Schlick, Klaus Moser und Michael Schenk (Hg.): Flexible Produktionskapazität innovativ managen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 81–126.
- Gisi, P. J. (2024): The Dark Factory and the Future of Manufacturing. New York: Productivity Press.
- Golz, J. (2013): Materialbereitstellung bei Variantenfließlinien in der Automobilendmontage. Online-Ausg. Dordrecht: Springer (EBL-Schweitzer). Online verfügbar unter <http://swb.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1593237>.
- Grambow, N.; Vick, A.; Schulz, B. (2024): Evaluating Form-flexible Gripper in Robotic Manipulation Tasks. In: 2024 IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2024 IEEE 33rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Ulsan, Korea, Republic of, 18.06.2024 - 21.06.2024: IEEE, S. 1–4.
- Grundig, C.-G. (2021): Fabrikplanung. Planungssystematik – Methoden – Anwendungen. 7., aktualisierte Auflage. München: Hanser (Hanser eLibrary). Online verfügbar unter <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446470064>.
- Häcker, J. (2012): Automobilmanagement. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Hg. v. Christiane Engel-Haas. Munich, Germany: Oldenbourg Verlag München. Online verfügbar unter <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=758942>.
- Helfferrich, C. (2022): Leitfaden- und Experteninterviews. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 875–892.
- Hesse, S. (2012a): Automatische Montagemaschinen. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 195–272.
- Hesse, S. (2012b): Montagegerechte Produktgestaltung. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 9–48.
- Hesse, S.; Malisa, V. (Hg.) (2016): Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung. 2., neu bearbeitete Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. Online verfügbar unter <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446443655>.
- Holtewert, P.; Wiendahl, H.-H. (2020): Fertigungs- und Montagesysteme. In: Thomas Bauernhansl (Hg.): Fabrikbetriebslehre 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 129–164.

- Hottenrott, A.; Schiffer, M.; Grunow, M. (2023): Flexible assembly layouts in smart manufacturing: An impact assessment for the automotive industry. In: *IISE Transactions* 55 (11), S. 1144–1159. DOI: 10.1080/24725854.2022.2124470.
- Hüttemann, G.; Buckhorst, A. F.; Schmitt, R. H. (2019): Modelling and Assessing Lineless Mobile Assembly Systems. In: *Procedia CIRP* 81, S. 724–729. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.184.
- Internationale Organisation für Standardisierung (2011): ISO 10218-1: Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots -. Part 1: Robots. Hg. v. Internationale Organisation für Standardisierung. Genf.
- Ivanov, D.; Tsipoulanidis, A.; Schönberger, J. (2021): Global Supply Chain and Operations Management. Cham: Springer International Publishing.
- Kampker, A.; Kawollek, S.; Fluchs, S.; Marquardt, F. (2019): Einfluss der Variantenvielfalt auf die automobile Endmontage. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (7-8), S. 474–479. DOI: 10.3139/104.112097.
- Katz, R. (2007): Design principles of reconfigurable machines. In: *Int J Adv Manuf Technol* 34 (5-6), S. 430–439. DOI: 10.1007/s00170-006-0615-2.
- Kaucher, C.; Erlach, K.; Bauernhansl, T. (2023): Planning Method for Future-Proof Factory Buildings. In: *Procedia CIRP* 120, S. 15–20. DOI: 10.1016/j.procir.2023.08.004.
- Kellner, F.; Lienland, B.; Lukesch, M. (2020): Produktionswirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kern, W. (2021): Modulare Produktion. Methodik zur Gestaltung eines modularen Montagesystems für die variantenreiche Serienmontage im Automobilbau. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Kern, W.; Rusitschka, F.; Kopytynski, W.; Keckl, S.; Bauernhansl, T. (Hg.) (2015): Alternatives to assembly line production in the automotive industry.
- Klein, P. W. (2014): Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen. Universität Siegen; Institut für Produktionstechnik. Online verfügbar unter <https://dspace.ub.uni-siegen.de/handle/ubsi/909>.
- Koren, Y. (2020): The Emergence of Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs). In: Lyes Benyoucef (Hg.): Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation. Cham: Springer International Publishing (Springer Series in Advanced Manufacturing), S. 1–9.

Literaturverzeichnis

- Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; van Brussel, H. (1999): Reconfigurable Manufacturing Systems. In: *CIRP Annals* 48 (2), S. 527–540. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63232-6.
- Koren, Y.; Shpitalni, M. (2010): Design of reconfigurable manufacturing systems. In: *Journal of Manufacturing Systems* 29 (4), S. 130–141. DOI: 10.1016/j.jmsy.2011.01.001.
- Kraftfahrt-Bundesamt (2024): Glossar - Segment. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg. Online verfügbar unter <https://www.kba.de/DE/Service/Glossar1/Functions/glossar.html?nn=3503676&lv2=3503762>, zuletzt geprüft am 05.09.2024.
- Kropik, M. (2021): Produktionsleitsysteme für die Automobilindustrie. Digitalisierung des Shop-Floors in der Automobilproduktion. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Springer eBook Collection).
- Küber, C. (2017): Methode zur Planung modularer, produktflexibler Montagekonfigurationen in der variantenreichen Serienmontage. Dissertation, Stuttgart.
- Kuckartz, U.; Rädiker, S. (2014): Datenaufbereitung und Datenbereinigung in der qualitativen Sozialforschung. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 383–396.
- Kuckartz, U.; Rädiker, S. (2022): Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung. Grundlagentexte Methoden. 5. Auflage. Weinheim, Basel: Beltz Juventa (Grundlagentexte Methoden). Online verfügbar unter http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783779955337.
- Laperrière, L.; Reinhart, G. (2014): CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lotter, B. (2012a): Einführung. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–8.
- Lotter, B. (2012b): Flexible Montage mit Robotereinsatz. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 273–283.
- Lotter, B. (2012c): Manuelle Montage von Großgeräten. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 147–165.

- Lotter, B. (2012d): Manuelle Montage von Kleingeräten. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 109–146.
- Lotter, B.; Deuse, J.; Lotter, E. (Hg.) (2016): Die Primäre Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lotter, E. (2012e): Hybride Montagesysteme. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 167–193.
- Lucke, D.; Defranceski, M.; Adolf, T. (2017): Cyberphysische Systeme für die prädiktive Instandhaltung. In: Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl und Michael ten Hompel (Hg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 75–91.
- Madappilly, P. J.; Mork, O. J. (2021): Review and modification of DFA2 methodology to support design for automatic assembly (DFAA) in the maritime industry. In: *Procedia CIRP* 100, S. 744–749. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.050.
- Marks, P.; Yu, Q.; Weyrich, M. (2018): Survey on Flexibility and Changeability Indicators of automated Manufacturing Systems. In: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Turin, 04.09.2018 - 07.09.2018: IEEE, S. 516–523.
- Matt, D. T.; Rauch, E.; Dallasega, P.; Vidoni, R.; Spena, P. R. (2015): Synchronisierung von ETO-Fertigung und Baustellenmontage. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (1-2), S. 9–13. DOI: 10.3139/104.111276.
- Mayring, P. (2007): Designs in qualitativ orientierter Forschung. In: *Journal für Psychologie* 15 (2). Online verfügbar unter <https://journal-fuer-psychologie.de/article/view/127>, zuletzt geprüft am 26.11.2023.
- Mayring, P. (2010): Design. In: Günter Mey und Katja Mruck (Hg.): Handbuch qualitative Forschung in der Psychologie. 1. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 225–237.
- Mayring, P. (2020): Qualitative Forschungsdesigns. In: Günter Mey und Katja Mruck (Hg.): Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 3–17.
- Mayring, P. (2022): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 13., überarbeitete Auflage. Weinheim, Basel: Beltz. Online verfügbar unter https://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783407258991.

Literaturverzeichnis

- Mayring, P. (2023): Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken. 7., überarbeitete Auflage. Weinheim, Basel: Beltz.
- Mayring, P.; Fenzl, T. (2022): Qualitative Inhaltsanalyse. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 691–706.
- Mey, G.; Mruck, K. (2007): Qualitative Interviews. In: Gabriele Naderer und Eva Balzer (Hg.): Qualitative Marktforschung in Theorie und Praxis: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Wiesbaden: Gabler, S. 247–278.
- Mey, G.; Mruck, K. (Hg.) (2010): Handbuch qualitative Forschung in der Psychologie. 1. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/christianalbrechts/detail.action?docID=750313>.
- Mey, G.; Mruck, K. (2020): Qualitative Interviews. In: Günter Mey und Katja Mruck (Hg.): Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 315–335.
- Mey, G.; Ruppel, P. S. (2018): Qualitative Forschung. In: Oliver Decker (Hg.): Sozialpsychologie und Sozialtheorie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 205–244.
- Mohr, J.; Schmidtke, N.; Behrendt, F. (2024): Design of Matrix Production Systems: New Demands on Factory Planning Methods. In: *Procedia Computer Science* 232, S. 1972–1981. DOI: 10.1016/j.procs.2024.02.019.
- Nieuwenhuis, P.; Wells, P. (Hg.) (2015): Global automotive industry. Chichester: Wiley.
- Nolte, M. (2023): Workshops. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.; Wagner, C. (2012): Materialbereitstellung in der Montage. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 285–313.
- Nyimbili, F.; Nyimbili, L. (2024): Types of Purposive Sampling Techniques with Their Examples and Application in Qualitative Research Studies. In: *BJMAS* 5 (1), S. 90–99. DOI: 10.37745/bjmas.2022.0419.
- Olschewsky, C. (2015): Demographischer Wandel – Wandel der Autowelt. Dissertation. Technische Universität Dortmund, Dortmund.
- Prasad, D.; Jayswal, S. C. (2019): A Review on Flexibility and Reconfigurability in Manufacturing System. In: Jayeeta Chattopadhyay, Rahul Singh und Om Prakash (Hg.): Innovation in Materials Science and Engineering. Singapore: Springer Singapore, S. 187–200.

- Reichertz, J. (2014): Empirische Sozialforschung und soziologische Theorie. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 65–80.
- Rese, C.; Krzoska, S.; Klapic, E.; West, N.; Schlunder, P.; Klinkenberg, R. et al. (2024): Datengetriebene Arbeitsplangestaltung in der Automobilfertigung. In: Jochen Deuse, Ralf Klinkenberg und Nikolai West (Hg.): Industrielle Datenanalyse. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 103–112.
- Ross, P. (2002): Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung. München: Utz Verlag (ForschungsberichteIWB : Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, Bd. 170).
- Rost, J. (2002): Zeitgeist und Moden empirischer Analysemethoden Bd. 8.
- Rost, J. (2005): Differentielle Indikation und gemeinsame Qualitätskriterien als Probleme der Integration von qualitativen und quantitativen Methoden (1. Berliner Methodentreffen Qualitative Forschung). Online verfügbar unter https://berliner-methodentreffen.de/wp-content/uploads/2020/07/rost_2005.pdf, zuletzt geprüft am 22.11.2023.
- Rupp, S.; Müller, R. (2020): Worker assistance systems and assembly process maturity in the prototype and pre-series production. In: *Procedia Manufacturing* 51, S. 1431–1438. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.199.
- Schachtschabel, M. (2021): Analyse des digitalen Informationsmanagements am Beispiel der innerbetrieblichen Logistik in der Automobilindustrie. Dissertation. Technische Universität Dortmund; Praxiswissen Service UG.
- Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E. (2014): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schlick, J.; Stephan, P.; Loskyll, M.; Lappe, D. (2014): Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. In: Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser (Hg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 57–84.
- Schmidt, C. (2021): Planning of Eco-efficient Process Chains for Automotive Component Manufacturing. Cham: Springer International Publishing.
- Schnell, L. (2025): Erarbeitung eines Modells zur quantitativen Bewertung des Wandlungsbefähigers Mobilität für Planungsaufgaben in der industriellen Montage – Am Beispiel der Endmontage bei Volkswagen Nutzfahrzeuge. Masterarbeit. Leibniz Universität Hannover - Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Hannover.

Literaturverzeichnis

Scholer, M. (2018): Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Automobilmontage mittels durchgängigem modularem Engineering -Am Beispiel der Mensch-Roboter-Kooperation in der Unterbodenmontage-. Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik.

Schreier, M. (2020): Fallauswahl. In: Günter Mey und Katja Mruck (Hg.): Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 19–39.

Schreier, M.; Echterhoff, G.; Bauer, J. F.; Weydmann, N.; Hussy, W. (2023): Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Schreier, M.; Odağ, Ö. (2020): Mixed Methods. In: Günter Mey und Katja Mruck (Hg.): Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 159–184.

Schulz, B. (2024a): Flexibilisierung von Montageanlagen. Fall „LNFZ“. In: Bennet Schulz (Hg.): Flexibilisierung von Montageanlagen. Transkript zur Multiple Case Study in der Automobilindustrie. Hannover, S. 1–89.

Schulz, B. (2024b): Flexibilisierung von Montageanlagen. Fall „Luxus“. In: Bennet Schulz (Hg.): Flexibilisierung von Montageanlagen. Transkript zur Multiple Case Study in der Automobilindustrie. Hannover, S. 388–473.

Schulz, B. (2024c): Flexibilisierung von Montageanlagen. Fall „Premium“. In: Bennet Schulz (Hg.): Flexibilisierung von Montageanlagen. Transkript zur Multiple Case Study in der Automobilindustrie. Hannover, S. 197–355.

Schulz, B. (2024d): Flexibilisierung von Montageanlagen. Fall „Sport“. In: Bennet Schulz (Hg.): Flexibilisierung von Montageanlagen. Transkript zur Multiple Case Study in der Automobilindustrie. Hannover, S. 356–387.

Schulz, B. (2024e): Flexibilisierung von Montageanlagen. Fall „Volumen“. In: Bennet Schulz (Hg.): Flexibilisierung von Montageanlagen. Transkript zur Multiple Case Study in der Automobilindustrie. Hannover, S. 90–196.

Schulz, B. (Hg.) (2024f): Flexibilisierung von Montageanlagen. Transkript zur Multiple Case Study in der Automobilindustrie. Hannover.

Schulz, B.; Klingebiel, K.; Reh, D. (2023): A Systematic Literature Review on the Developments in the Field of Flexible and Fully Automated Assembly Stations Within the Automotive Sector. In: Erlend Alfnes, Anita Romsdal, Jan Ola Strandhagen, Gregor von Cieminski und David Romero (Hg.): Advances in Production Management Systems.

- Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures, Bd. 692. Cham: Springer Nature Switzerland (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 441–459.
- Sethi, A.; Sethi, S. (1990): Flexibility in manufacturing: A survey. In: *Int J Flex Manuf Syst* 2 (4). DOI: 10.1007/BF00186471.
- Stadler, W.; Dittmann, J.; Maskos, G.; Auers, U.; Richter, T.; Guhr, R. et al. (2008): Karosseriebau und Produktionsprozesse. In: *ATZ Extra* 13 (8), S. 146–151. DOI: 10.1365/s35778-008-0181-3.
- Stark, T.; Klos, A.; Müller, M. (2020): Wandlungsfähige Montagetechnik. In: Thomas Bauernhansl, Manuel Fechter und Thomas Dietz (Hg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (ARENA2036), S. 119–130.
- Statistisches Bundesamt (2025a): Anzahl der Beschäftigten in der Automobilindustrie in Deutschland in den Jahren 2005 bis 2024. Hg. v. Statista.
- Statistisches Bundesamt (2025b): Verteilung der Erwerbstätigen in Deutschland nach Wirtschaftsbereichen im Jahr 2024. Hg. v. Statista.
- Svensson Harari, N.; Fundin, A. (2023): An early-phase design process to enable long-term flexibility in assembly systems. In: *Res Eng Design* 34 (2), S. 257–283. DOI: 10.1007/s00163-022-00404-0.
- Verband der Automobilindustrie (2025): Automobilproduktion. Zahlen zur Automobilproduktion im In- und Ausland. Online verfügbar unter <https://www.vda.de/de/aktuelles/zahlen-und-daten/jahreszahlen/automobilproduktion>, zuletzt aktualisiert am 01.04.2025, zuletzt geprüft am 22.05.2025.
- Verein Deutscher Ingenieure (2001): VDI-Richtlinie 2519, Blatt 1: Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/ Pflichtenheften. Hg. v. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, zuletzt aktualisiert am 2001, zuletzt geprüft am 26.09.2024.
- Verein Deutscher Ingenieure (2011): VDI-Richtlinie 5200, Fabrikplanung - Blatt 1: Planungsvorgehen. Hg. v. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin, zuletzt aktualisiert am 2011, zuletzt geprüft am 11.03.2024.
- Volkswagen Aktiengesellschaft (2024): Geschäftsbericht 2023. Online verfügbar unter <https://geschaeftsbericht2023.volkswagen-group.com/services/downloads.html>, zuletzt geprüft am 25.07.2025.
- vom Brocke, J.; Hevner, A.; Maedche, A. (2020): Design Science Research. Cases. Cham: Springer International Publishing.

Literaturverzeichnis

vom Brocke, J.; Simons, A.; Niehaves, B.; Riemer, K.; Plattfaut, R.; Cleven, A. (2009): Reconstructing the giant: On the importance of rigour in documenting the literature search process. In: *17th European Conference on Information Systems, ECIS 2009*, S. 1–14. Online verfügbar unter <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84870674396&partnerID=40&md5=5f06978c3ade42b46878f13e0cabf415>.

Webster, J.; Watson, R. T. (2002): Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. In: *MIS Quarterly* 26 (2), S. xiii–xxiii. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/4132319>.

Weichbold, M. (2014): Pretest. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 299–304.

Westkämper, E. (2006): Einführung in die Organisation der Produktion. [Online-ausg.]. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).

Westkämper, E. (2007): Digital Manufacturing In The Global Era. In: Pedro Filipe Cunha und Paul G. Maropoulos (Hg.): *Digital Enterprise Technology*. Boston, MA: Springer US, S. 3–14.

Wiendahl, H.-H.; Reichardt, J.; Nyhuis, P. (2024): *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. 3., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser.

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M. (2007): Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. In: *CIRP Annals* 56 (2), S. 783–809. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.003.

Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H. (2019): *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 9., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser (Hanser eLibrary).

Yilmazlar, I. O.; Kurz, M. E.; Rahimian, H. (2024): Mixed-model sequencing with stochastic failures: A case study for automobile industry. In: *European Journal of Operational Research* 319 (1), S. 206–221. DOI: 10.1016/j.ejor.2024.06.019.

Yin, R. K. (2018): *Case study research and applications. Design and methods*. Sixth edition. Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington DC, Melbourne: SAGE.

Anhang

Abschnitt D1

Segment 1: Zeithorizonte
 Segment 2: Flexibilitätsaspekte
 Segment 3: Umsetzungsmöglichkeiten

		Interviewfragen		Quelle innerhalb des Forschungskontextes	Begründung für die Verwendung
Kategorie	#				
1	1	Gibt es weitere Zeithorizonte die von Relevanz sein können?		Quelle zur Produktionsprogrammplanung. Für die Montage gibt es evtl. weitere/ abweichende Zeiträume	Prüfung auf Vollständigkeit
1	2	Sind weniger Zeithorizonte eventuell schon ausreichend?		Keine Beschreibung in der Literatur. Prüfung ob Zeithorizonte der Produktionsprogrammplanung übertragbar sind	Validierung der Annahme der drei Zeithorizonte
1	3	Wie definieren sie einen operativen Zeithorizont in der automobilen Montage		Zeiträume für die Montage nicht klar definiert. Nur für die Produktionsprogrammplanung	Zeithorizonte definieren lassen
1	4	Wie definieren sie einen taktischen Zeithorizont in der automobilen Montage		Zeiträume für die Montage nicht klar definiert. Nur für die Produktionsprogrammplanung	Zeithorizonte definieren lassen
1	5	Wie definieren sie einen strategischen Zeithorizont in der automobilen Montage		Zeiträume für die Montage nicht klar definiert. Nur für die Produktionsprogrammplanung	Zeithorizonte definieren lassen
1	6	Welcher der Zeithorizont hat für automatische Montageanlagen die größte Wichtigkeit?		So kann bewertet werden, ob die derzeitige Gestaltung wirklich uneffizient ist. In der Literatur wird dazu nichts beschrieben.	Zeithorizonte priorisieren lassen
2	7	Gibt es weitere Flexibilitätsaspekte die von Relevanz sein können?		Reconfigurable Manufacturing Systems. Erweiterung um Mobilität -> Zusammenführen mit Wandlungsbefähigern	Prüfung auf Vollständigkeit
2	8	Sind weniger Flexibilitätsaspekte eventuell schon ausreichend?		Beschreibung von Kriterien für Reconfigurable Manufacturing Systems. Übertragbar für automatische Montageanlage (abweichend zu reconfigurable assembly systems)	Validierung der Annahme
2	9	Welche der Flexibilitätsaspekte haben für automatische Montageanlagen die größte Wichtigkeit?		In der Literatur gibt es keine klare Rangfolge. Lediglich die definition von Wandlungsbefähigern	Flexibilitätsaspekte priorisieren lassen
3	10	Wie können die Flexibilitätsaspekte gestalterisch erreicht werden?		Reconfigurable Manufacturing Systems als Basis. -> Keine Gestaltungsrichtlinie für alle Aspekte und kein Montagefokus	Beschreibung der Flexibilitätsaspekte
3	11	Was sind Ausprägungen der Flexibilitätsaspekten von Automatischen Montageanlagen		Beschreibung von verschiedenen Ausprägungen fehlt in der Literatur. Häufig: Flexibilität -> Einsatz Mensch	Ausprägungen definieren lassen -> Vorbereitung auf den Baukasten



Nutzfahrzeuge

Einverständniserklärung Interview – insbesondere: Tonbandaufzeichnung

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass das mit mir am _____ von *Bennet Schulz* geführte Gespräch aufgenommen sowie transkribiert wird und für die Auswertung im Rahmen des Befragungsvorhabens „*Flexibilisierung von automatischen Montageanlagen*“ verwendet werden darf.

Ich bin damit einverstanden, dass einzelne Sätze, die aus dem Zusammenhang genommen werden und damit nicht mit meiner Person in Verbindung gebracht werden können, als Material für wissenschaftliche Zwecke und die Weiterentwicklung der Forschung genutzt werden können.

Mir wurde zugesichert, dass dabei alle personenbezogenen Daten, die Rückschlüsse auf meine Person zulassen, gelöscht oder anonymisiert werden und dass die Interviewaufnahme nach Vollendung der Forschungsarbeiten gelöscht wird.

Ich wurde darüber informiert, dass ich diese Einwilligung mit Wirkung für die Zukunft, ohne persönliche Folgen bei dem Befragenden widerrufen werden kann.

Ich wurde darüber informiert, dass dieses Befragungsvorhaben mit dem Betriebsrat, der Kommission Datenschutz und dem Team Mitarbeiterbefragungen abgestimmt worden ist. Eine Nichtteilnahme hat für meine Person keine nachteiligen Folgen.

Unter diesen Bedingungen erkläre ich mich bereit, das Interview zu geben und bin damit einverstanden, dass es auf Band aufgenommen, abgetippt, anonymisiert und ausgewertet wird.

Name, Datum

Unterschrift

Abschnitt D3

Erika Mustermann
Abteilung x
E-mail

Ort

Bennet Schulz
NP-PM
Bennet.schulz2@volkswagen.de
Tel. Nummer
tt.mm.jjjj

Interview zur Flexibilität von automatischen Montageanlagen

Hallo _____,

Im Rahmen meines Promotionsprojektes möchte ich Interviews durchführen, um zeitliche und gestalterische Aspekte der Flexibilität von automatischen Montageanlagen zu erforschen. Das übergeordnete Ziel ist hierbei die automatischen Montageanlagen so zu gestalten, dass diese den erforderlichen und individuellen Flexibilitätsanforderungen genügen können. Das ange-dachte Interview umfasst 11 Fragen und eine teilnehmende Beobachtung.

Die Promotion wird in der Abteilung Planung Lackiererei und Montage von Volkswagen Nutzfahrzeuge durchgeführt.

Hinweise auf Rahmenbedingungen der Befragung:

Dieses Interview ist mit dem zuständigen Betriebsrat, der Kommission Datenschutz und dem Team Mitarbeiterbefragungen abgestimmt.

Die Teilnahme an dem Interview, sowie die Beantwortung einzelner Fragen ist freiwillig und erfolgt anonym, sodass ein Rückschluss auf Einzelpersonen nicht möglich ist.

Das Interview würde ich gerne zeitnah terminieren. Dies wird voraussichtlich 1-1,5h Zeit in Anspruch nehmen

Die Ergebnisse der Befragung werden zusammengefasst in einem wissenschaftlichen Beitrag und später in einer Monographie veröffentlicht.

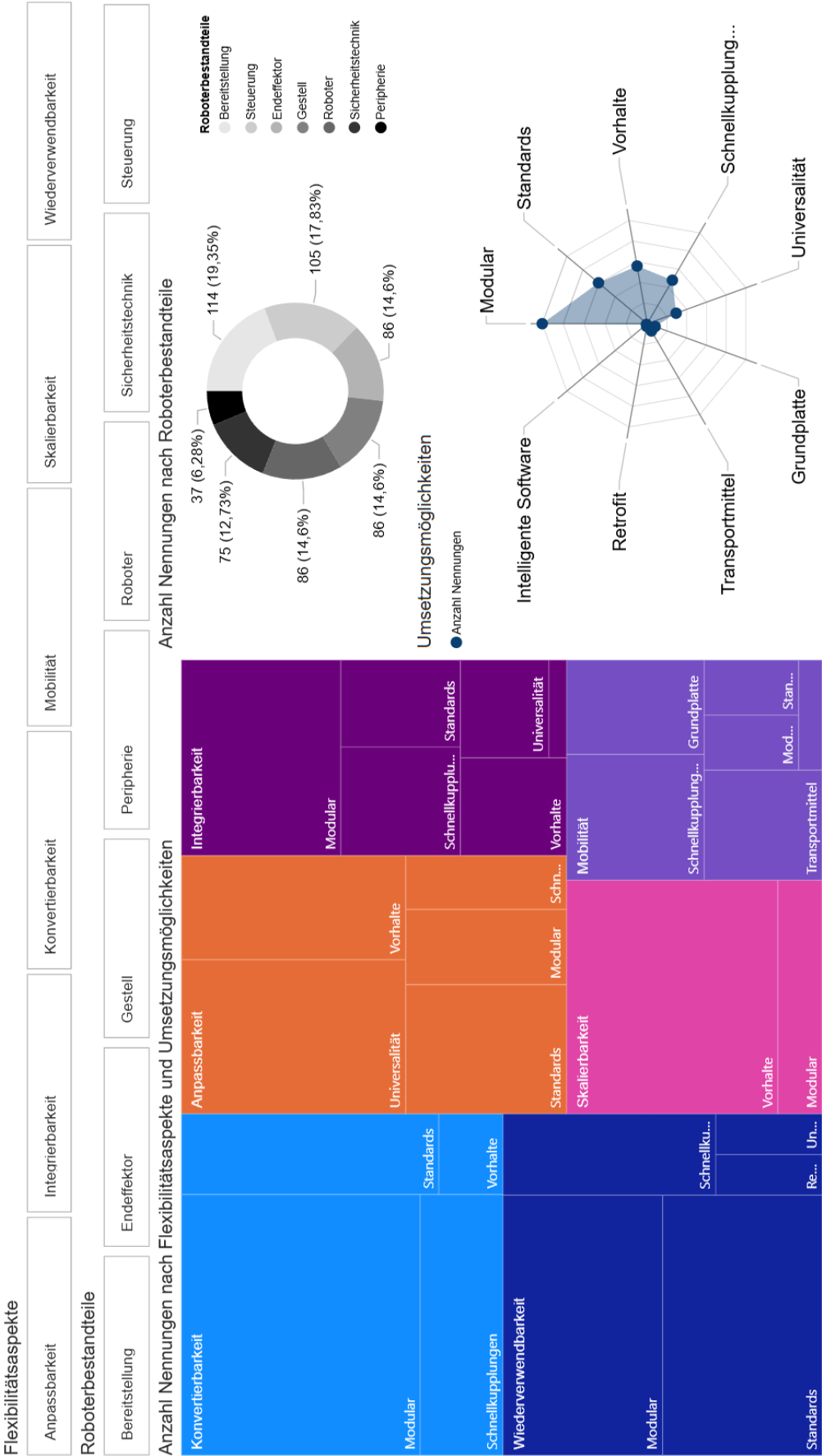
Für die Bearbeitung des Interviews soll dieses mittels einer Tonaufnahme aufgenommen werden

Bitte um kurze Rückmeldung mit Bestätigung der Teilnahme

Mit freundlichen Grüßen

Bennet Schulz
Doktorand
Planung Lackiererei und Montage
NP-PM

Volkswagen AG
Brieffach 23560
Postfach 21 05 80
30405 Hannover



Anzahl Nennungen nach Roboterbestandteilen

Roboterbestandteile

- Bereitstellung
- Steuerung
- Endeffektor
- Gestell
- Roboter
- Sicherheitstechnik
- Peripherie

Umsetzungsmöglichkeiten

- Anzahl Nennungen

Standards

Modular

Intelligente Software

Retrofit

Transportmittel

Grundplatte

Universalität

Schnellkupplung...

Vorhalte

Standards