

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Die Automobilindustrie vollzieht seit geraumer Zeit einen Wandel vom Verkäufermarkt zum Käufermarkt. Dabei sind sich Branchenkenner einig, dass der Großteil der Veränderungen noch bevorsteht. Als Treiber dessen gelten neben politischen Vorschriften hinsichtlich des Schadstoffausstoßes vor allem volatile Marktbedingungen sowie veränderte Forderungen aus dem sozialen Umfeld. Während sich die Automobilhersteller im Laufe der vergangenen Jahrzehnte durch ansteigende Individualisierungsmöglichkeiten in Form diverser Sonderausstattungsumfänge und Entwicklung attraktiver Nischenprodukten, wie z. B. SUVs und viertürigen Coupés, entscheidende Marktanteile sicherten, arbeiten diese derzeit an alternativen Antriebs- und Mobilitätskonzepten. So rief der Vorstandsvorsitzende der BMW Group, Oliver Zipse, im September 2019 die Initiative „*power of choice*“ ins Leben, mit welcher der international agierende Automobilkonzern seinen Kunden die Entscheidungsfreiheit hinsichtlich des Antriebskonzepts überlassen wolle.¹ Infolge dessen ergeben sich weitere Produktvarianten, mit welchen die einzelnen Produktionsabschnitte konfrontiert werden. Um dennoch den Fertigungsablauf nicht zu gefährden, empfiehlt es sich, die Varianten möglichst spät im Produktionsablauf zu bilden. Folglich erscheint die Montage als geeigneter Rahmen zur Variantenbildung.² Diese folgt im Produktionsablauf auf die Teilefertigung und umfasst die *„Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen.“*³ Entgegen den vorgelagerten Fertigungsabschnitten, welche von einem hohen Automatisierungsgrad geprägt sind, zeichnet sich die Montage durch einen vergleichsweise hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten aus. Dieser beläuft sich innerhalb der Automobilmontage auf über 95 % und liegt vorwiegend in den motorischen und kognitiven Anpassungsfähigkeiten des Menschen begründet.⁴ Jedoch geht mit der zunehmenden Anzahl an Varianten eine erhebliche Zunahme der Produkt- und Prozesskomplexität einher.⁵

Jene genannte Produktkomplexität spiegelt sich in der Anzahl der ausstattungsabhängigen Produktvarianten wider. Die Vielfalt der Produktvarianz in der Automobilmontage wird nachfolgend (vgl. Abbildung 1) exemplarisch an einem Fahrzeugwerk aufgezeigt. Aus folgender Abbildung ist die Anzahl der gefertigten Varianten je Fahrzeugderivat

¹ Vgl. Zipse (2019), S. 5.

² Vgl. Wiegand (2018), S. 151.

³ Lotter (2012b), S. 2.

⁴ Vgl. Brauer et al. (2014), S. 220.

⁵ Vgl. Große-Heitmeyer/Wiendahl (2004), S. 6.

und Sonderausstattungs umfänge für das Jahr 2019 zu entnehmen, wobei die verfügbaren Sonderausstattungs umfänge zu Clustern zusammengetragen und die möglichen Kombinationen der einzelnen Ausstattungscluster sowie Abhängigkeiten mit Motor- und Antriebskonfigurationen nicht berücksichtigt wurden.

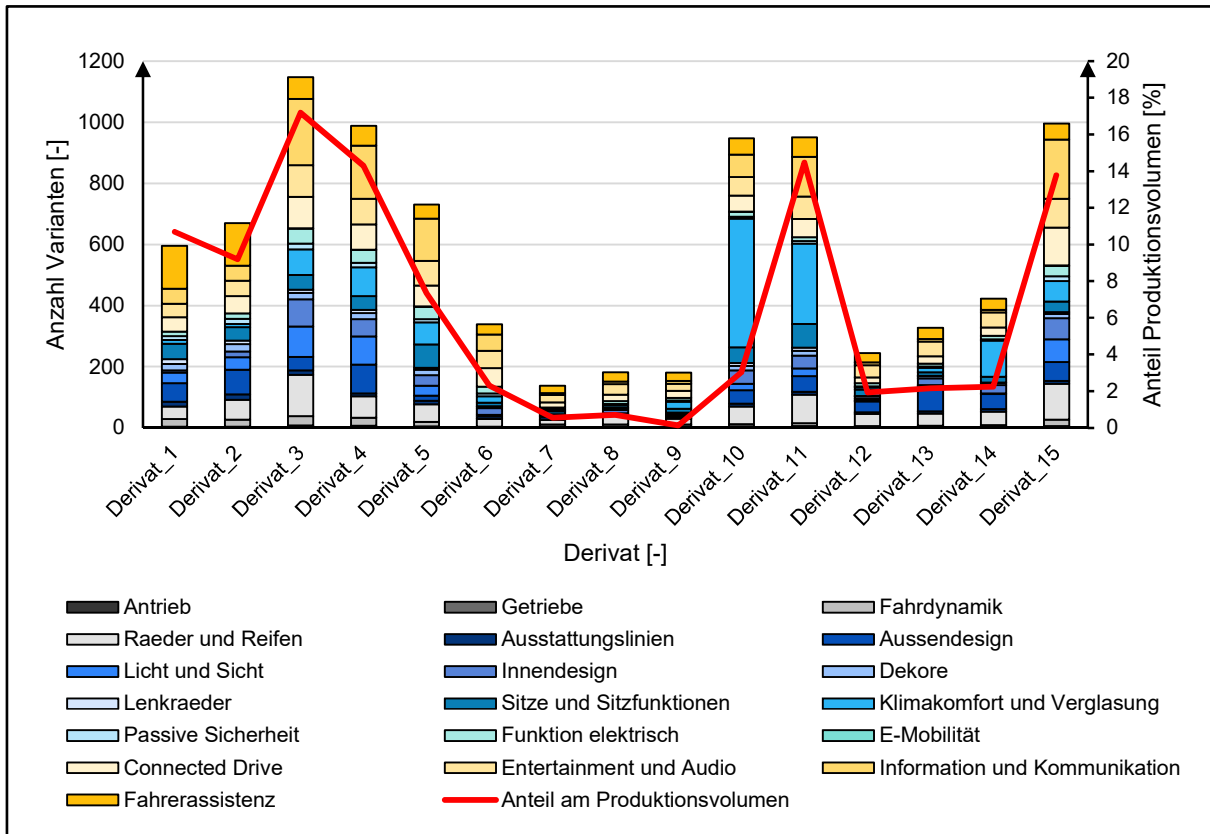


Abbildung 1: Anzahl an montierten Produktvarianten (je Derivat) für ein Fahrzeugwerk im Jahr 2019⁶

Resultierend aus der breitgefächerten Produktvarianz folgen fahrzeugspezifische Montageumfänge und somit Prozessinstabilitäten bei den erforderlichen Montageschritten. Jenes Verhalten wird nachfolgend anhand der derivatsbezogenen Stationsauslastung am Beispiel dreier beispielhafter Montagestationen dargestellt (vgl. Abbildung 2). Dabei wird sich primär auf die Unregelmäßigkeiten bei der Auslastung eines Monteurs je Fahrzeug fokussiert. Während die erste Montagestation durch eine hohe Streuung zwischen den zehn Derivaten und einer geringen Standardabweichung innerhalb eines Derivates charakterisiert wird, weist die zweite Station eine vergleichsweise moderate Streuung zwischen den verschiedenen Derivaten auf. Dementgegen

⁶ Quelle: BMW Group (Datenbasis); Verfasser (Darstellung).

wird das Montagepersonal an jener Station mit einer erhöhten Streuung bei den jeweiligen Fahrzeugvarianten eines Derivates konfrontiert. Die dritte Station vereint sowohl die Streuung zwischen den zehn Derivaten mit den Auslastungsunregelmäßigkeiten bei einem spezifischen Derivat. So erstreckt sich die Range der Stationsauslastung in der gesamten Station 3 von rund 40 % der verfügbaren Bearbeitungszeit bis zu nahezu 200 % (vgl. Abbildung 2).

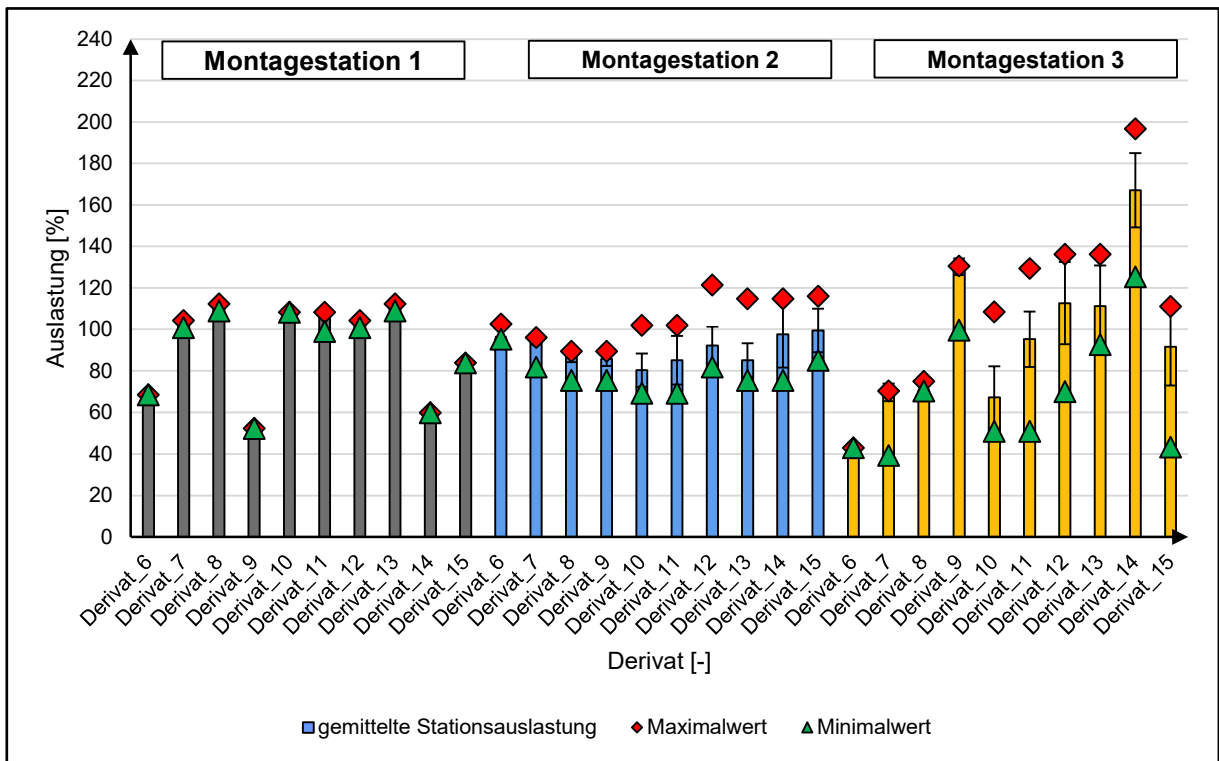


Abbildung 2: Taktinstabilität als Folge des Variantenreichtums in der Automobilmontage⁷

Sowohl mit der aufgezeigten Prozessinstabilität als auch mit dem Faktor Mensch ist das Risiko von Fehlern verbunden, sodass die Montage vielfach als „*Sammelbecken aller organisatorischen, terminlichen und qualitativen Fehler der Produktionskette*“⁸ betitelt wird. Diese erfordern teils zeitintensive Nacharbeiten, welche gemäß den Ansätzen der Lean Production, woran sich die Produktionsphilosophien der meisten Automobilhersteller orientieren, als nicht wertschöpfende Tätigkeiten und somit als Verschwendung angesehen werden. Als oberste Maxime dieser schlanken Produktionsleitsätze wird die konsequente Vermeidung von Verschwendung jeglicher Art verfolgt.⁹

⁷ Quelle: BMW Group (Datenbasis); Verfasser (Darstellung).

⁸ März/Langsdorff (2001), S. 3 (mit Verweis auf Reinhart/Schneider (1996)); Reinhart/Schneider (1996).

⁹ Vgl. Bertagnolli (2020), S. 26 f.

Daher wurden zahlreiche präventive Maßnahmen aus dem Bereich des Qualitätsmanagements in den Planungs- und Fertigungsprozess implementiert, um somit Montagefehler zu vermeiden und dem Kunden termingerecht ein sowohl optisch als auch funktional fehlerfreies Produkt übergeben zu können. Dennoch sind derzeit zusätzliche Kontrollen durch unterwiesenes Fachpersonal fester Bestandteil der Qualitätssicherung. Diese sind bereits seit Einführung der Fließbandfertigung durch den Amerikaner Henry Ford und der Umsetzung des Scientific Managements nach Vorbild von Winslow Taylor fester Bestandteil des Montagesystems.¹⁰ In Folge anwachsender Produktionsvolumina und gewandelter Marktverhältnisse erwiesen sich vollumfängliche Qualitätskontrollen sukzessiv als unwirtschaftlich, wodurch in den folgenden Jahrzehnten stichprobenbasierte Qualitätskontrollen in den Produktionsstätten Einzug erhielten. Bedingt durch die zunehmende Variantenvielfalt reduziert sich bei konstantem Produktionsvolumen die Losgröße jeder einzelnen Variante, wodurch eine kleinere Grundgesamtheit zur Stichprobenentnahme vorliegt. Diese fordert entweder umfangreichere Stichprobenumfänge oder belastet die Aussagekraft der jeweiligen Entnahme.

Trotz dieser Herausforderungen könnte die zunehmende Digitalisierung im Zuge der vierten industriellen Revolution zum einen die Effizienz in der Automobilmontage wahren und zum anderen dem Kunden die Freude am Fahren gewähren. Daher verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel einer

„Untersuchung von Methoden des maschinellen Lernens zur Fehlerprognose und -vermeidung in der Automobilmontage“.

Mit Hilfe einer treffsicheren und verlässlichen Fehlerprognose könnten geeignete Fehlervermeidungs- und Abstellmaßnahmen initiiert und die qualitätsbezogenen Kosten, insbesondere die Prüf- und Nacharbeitskosten, gesenkt werden. Um das Potenzial einer fahrzeug- und stationsbezogenen Fehlervorhersage bei der Ausführung manueller Montagetätigkeiten zu validieren, werden folgende Fragestellungen näher betrachtet:

- (1) Welche produkt- und prozessspezifischen Parameter können zur virtuellen Nachbildung einer fehlerverursachenden Montagesituation herangezogen werden?
- (2) Welche Anforderungen werden an die in der Automobilmontage auftretenden Fehlerbilder gestellt, um diese für eine fahrzeug- und stationsbezogene Fehlerprognose nutzen zu können und welcher Anteil an Montagefehlern lässt sich der prognoserelevanten Gruppe zuordnen?
- (3) Wie hoch ist der Anteil an Fehlern, welcher sich durch maschinelle Lernmodelle vorhersagen lässt?

¹⁰ Vgl. Zollondz (2011), S. 41 ff.

- (4) Inwieweit trägt eine praktische Anwendung der Fehlerprognose zur Qualitäts- und Effizienzsteigerung in der Automobilmontage bei?

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigt sich mit einer fahrzeug- und stationsbezogenen Fehlervorhersage in der von manuellen Tätigkeiten geprägten Automobilmontage und dem damit verbundenen Potenzial einer Qualitäts- und Effizienzsteigerung durch eine reduzierte Anzahl an Fehlern, welche während des Montageprozesses entstehen und gegebenenfalls zum Endkunden gelangen könnten. Um das Potenzial zur Reduzierung der qualitätsbezogenen Kosten – insbesondere der Prüf- und Nacharbeitskosten – auszuweisen, ist die vorliegende Arbeit in fünf Teile untergliedert.

Dabei thematisiert der **erste Teil** die Motivation und Problemstellung der Arbeit, indem er den Wandel der Marktverhältnisse im Automobilssektor während der vergangenen Dekaden auffasst und die resultierende Variantenvielfalt infolge der ansteigenden Individualisierungsmöglichkeiten am Beispiel eines Automobilwerkes aufzeigt. Ebenso wird die Prozessinstabilität, welche neben der Vielfalt an Produktvarianten als potenzielle Fehlerquelle angesehen wird, anhand dreier Montagestationen symbolisiert. Die Möglichkeiten der zunehmenden Digitalisierung im Rahmen der vierten industriellen Revolution motivieren dazu, das Potenzial eines fahrzeug- und stationsbezogenen Fehlerforecasts zu untersuchen und somit die Produktqualität und Prozesseffizienz zu optimieren. Weiterhin wird der Aufbau der Arbeit vergegenwärtigt.

Nachfolgend wird im **zweiten Teil** auf die grundlegenden Punkte des Qualitätsmanagements und des maschinellen Lernens eingegangen. Dazu wird eingangs der Qualitäts- und Fehlerbegriff erläutert und verschiedene Ansichtsweisen bezüglich der beiden Begrifflichkeiten aufgezeigt, bevor im weiteren Verlauf auf die Bestandteile und einige relevante Normen des Qualitätsmanagements eingegangen wird. Ebenso umfasst dieser Teil gängige Werkzeuge und Methoden des Qualitätsmanagements, um Fehler möglichst früh zu erkennen und zu vermeiden. Aufgrund der Tatsache, dass sowohl Fehlerentdeckungs- und Fehlervermeidungsmaßnahmen als auch Fehlerabstell- und Fehlerbehebungstätigkeiten mit zusätzlichen Aufwänden einhergehen, werden jene Kosten zu den qualitätsbezogenen Kosten zusammengefasst. Im weiteren Verlauf wird ein grundlegender Überblick über das maschinelle Lernen geschaffen, indem vorerst die Arten des maschinellen Lernens erläutert und nachfolgend zwei in der Literatur genannte Prozesse zur Bearbeitung von Data-Mining-Projekten aufgezeigt werden. Anschließend wird auf Methoden und Verfahren zur Datenvorbereitung und Modellbewertung eingegangen, ehe verschiedene Lernverfahren näher beleuch-

tet werden. Eine strukturierte Literaturanalyse hinsichtlich bereits bestehender Ansätze zur Prognose von Qualitätscharakteristiken zu Zeiten der vierten industriellen Revolution vervollständigt den zweiten Teil der Arbeit.

Nachdem im zweiten Teil sowohl qualitätsbezogene Thematiken erläutert wurden als auch ein erstes Verständnis für Vorgehensweisen und Techniken des maschinellen Lernens geschaffen wurde, wird im **dritten Teil** die methodische Vorgehensweise zur Bildung einer fahrzeug- und stationsbezogenen Fehlervorhersage konkretisiert. Dazu werden zunächst potenzielle Eingangsgrößen für eine solche Prognose vorgestellt, wobei neben produktbezogenen Eingangsgrößen auch Variationen im Montageprozess und menschliche, leistungsbeeinflussende Faktoren berücksichtigt werden. Das Angebot diverser Individualisierungsoptionen nimmt unmittelbaren Einfluss auf die Prozessstabilität in der Automobilmontage, woraus diverse physische und psychische Belastungen für die Monteure folgen, welche aufgrund der persönlichen Konstitution zu abweichenden Beanspruchungen führen. Außerdem werden im selbigen Teil potenzielle Fehlerbilder in der Automobilmontage aufgegriffen und über deren Eignung zur Fehlervorhersage diskutiert. Des Weiteren wird basierend auf den dargelegten Instrumenten des zweiten Teils der Arbeit ein Klassifikationsschema gestaltet, welches eine binäre Fehlervorhersage erlaubt. Um diese zu präzisieren, werden die möglichen Fehlerbilder durch eine Risikoanalyse fahrzeugspezifisch konkretisiert. Abschließend werden drei mögliche Anwendungsszenarien zur Fehlerreduzierung und Effizienzsteigerung vorgestellt.

Im **vierten Teil** erfolgt eine Potenzialanalyse, welche an einem Bandabschnitt einer Montagelinie der BMW Group durchgeführt wird. Dazu werden zunächst die Montage- und Prüfprozesse am Betrachtungsgegenstand näher erläutert, um somit ein detailliertes Geschäftsverständnis zu vermitteln. Darüber hinaus erfolgt die Auswahl der beschreibenden Merkmale für das Klassifikationsmodell sowie die Unterteilung der Fehlerbilder. Dabei wird zwischen „prognoserelevanten Fehlerbildern“ und „prognoseirrelevanten Fehlerbildern“ differenziert. Ebenso erfolgt in jenem Teil die Vorstellung eines Stationsclusterings, um die Anzahl von Datensätzen fehlerbehafteter Fahrzeuge in den Trainingsdaten zu erhöhen. Weiterhin wird die Fehlerprognose um ein Ergebnisvoting erweitert, sodass aus den Vorhersagen der einzelnen Klassifikatoren eine finale Klassenzuordnung abgeleitet werden kann. Nachdem die Modifikation der Vorgehensweise zur Fehlerprognose erläutert wurde, wird ein adäquater Anwendungsfall ausgewählt und das Potenzial zur Reduzierung der Nacharbeitsaufwände für einen dreimonatigen Testzeitraum analysiert.

Der **fünfte Teil** schließt die vorliegende Arbeit, indem er eingangs den Verlauf der Arbeit zusammenfasst und anschließend die Resultate zur Qualitäts- und Effizienzstei-

gerung durch eine stations- und fahrzeugbezogene Fehlerprognose nochmals aufgreift. Abschließend werden noch Potenziale zur Steigerung der Prognosegenauigkeit und der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

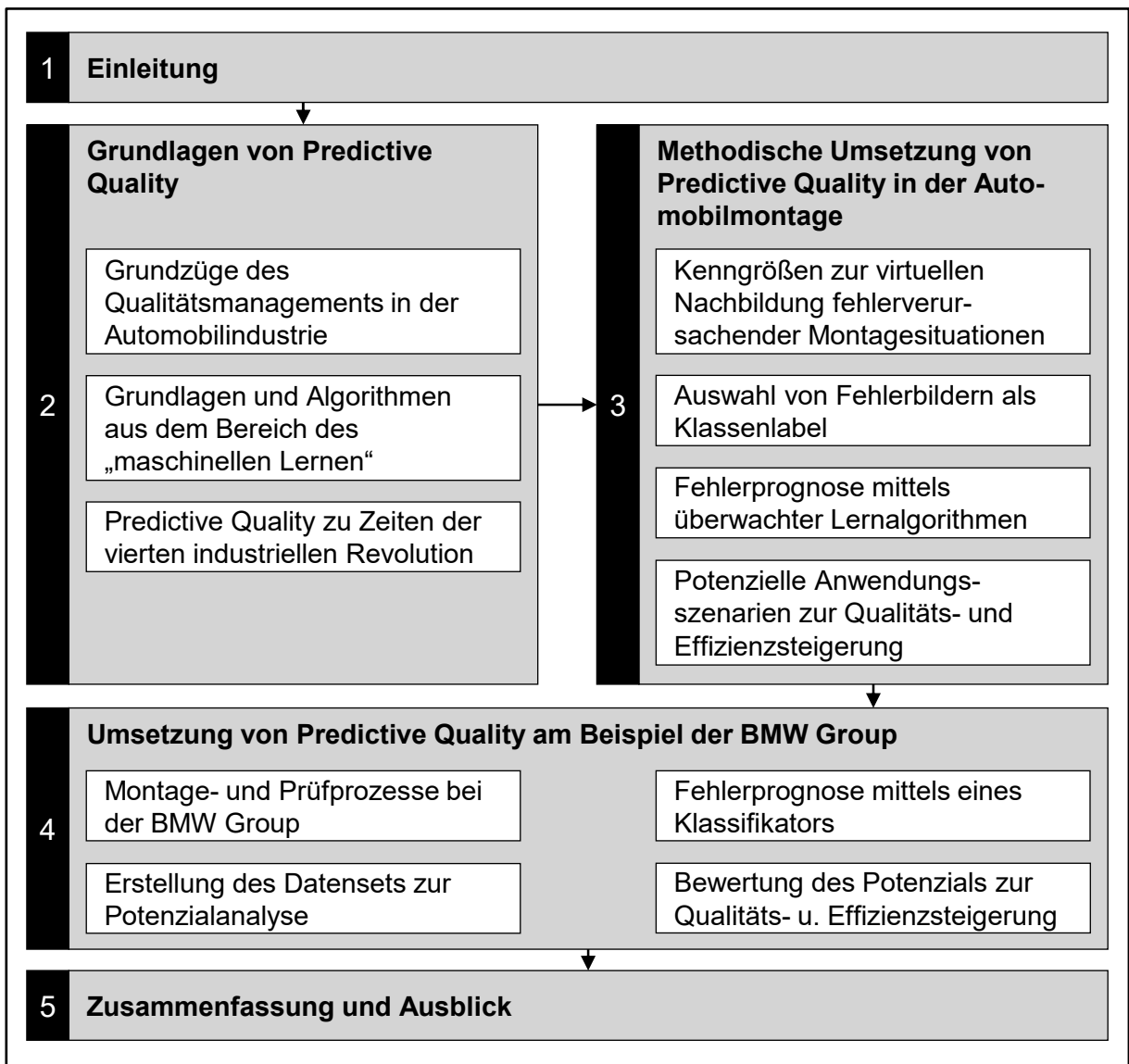


Abbildung 3: Aufbau der Arbeit¹¹

¹¹ Quelle: Verfasser.

2 Grundlagen von Predictive Quality

2.1 Grundzüge des Qualitätsmanagements

2.1.1 Definition des Qualitäts- und Fehlerbegriffs

Der Ursprung des Qualitätsbegriffs lässt sich auf das lateinische Nomen „qualitas“ zurückführen, welches sich mit „Beschaffenheit“ oder „Eigenschaft“ in die deutsche Sprache übersetzen lässt. In diesem Zusammenhang wird jener auch im alltäglichen Sprachgebrauch verwendet, um beispielweise die Güte von Erzeugnissen oder Dienstleistungen aufzuzeigen. Hierbei wird dieser zumeist mit den Adjektiven „gut“ oder „schlecht“ kombiniert, um der Bewertung eine positive oder negative Ausrichtung zu verleihen.

In der Fachliteratur charakterisiert das Deutsche Institut für Normung „Qualität“ als *„Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale [...] eines Objekts [...] Anforderungen [...] erfüllt.“*¹² Dabei ist das Adjektiv „inhärent“ mit *„einem Objekt innewohnend“* gleichzusetzen und unterscheidet sich von *„[einem Objekt] zugeordnet“*.¹³ Des Weiteren wird eine Anforderung als ein *„Erfordernis oder [eine] Erwartung, das oder die festlegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist“* angesehen, welche sowohl durch verschiedene interessierte Parteien als auch durch die Organisation aufgestellt werden kann.¹⁴ Weiterhin umschreibt die deutsche Gesellschaft für Qualität jenen Begriff als *„[...] realisierte Beschaffenheit einer Einheit bezüglich der Qualitätsforderung“*,¹⁵ wobei sowohl Tätigkeiten und Prozesse als auch Produkte, Organisationen, Personen oder Systeme als Einheit interpretiert werden.¹⁶ Nach DIN 55350-11:2008-05 lässt sich Qualität als *„[...] die an der geforderten Beschaffenheit gemessene realisierte Beschaffenheit“* umschreiben.¹⁷

Ergänzend zu diesen Definitionen werden in der Literatur verschiedene Denkweisen hinsichtlich des Qualitätsbegriffs aufgeführt. So demonstriert Schmitt/Pfeifer (2015) anhand eines Zitats von Frederick Henry Royce das klassische Qualitätsverständnis. Dieses umfasst die individuelle Assoziation mit einem Produkt, welches sich bezüglich der Wertigkeit, Funktionalität, Ästhetik und Langlebigkeit von Produkten der Wettbe-

¹² DIN EN ISO 9000 (2015), S. 39.

¹³ Vgl. DIN EN ISO 9000 (2015), S. 39.

¹⁴ Vgl. DIN EN ISO 9000 (2015), S. 39.

¹⁵ Brüggemann/Bremer (2020), S. 3.

¹⁶ Vgl. Brüggemann/Bremer (2020), S. 4.

¹⁷ DIN 55350-11 (2008), S. 10.