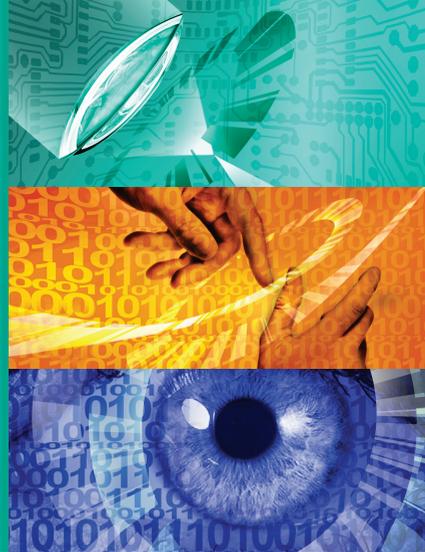


Karlsruher Schriften
zur Anthropomatik

Band 41



Marco Thomas Gewohn

**Ein methodischer Beitrag zur hybriden Regelung
der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage**



Scientific
Publishing

Marco Thomas Gewohn

**Ein methodischer Beitrag zur hybriden Regelung
der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage**

Karlsruher Schriften zur Anthropomatik

Band 41

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe
erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Ein methodischer Beitrag zur hybriden Regelung der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage

von
Marco Thomas Gewohn

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Anthropomatik und Robotik

Ein methodischer Beitrag zur hybriden Regelung der
Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
von der KIT-Fakultät für Informatik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation
von M.Sc. M.Eng. Marco Thomas Gewohn geboren in Wilhelmshaven

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Dezember 2018

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer

Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Linß

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.

Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1863-6489

ISBN 978-3-7315-0893-9

DOI 10.5445/KSP/1000090358

Meinem Vater

Thomas Josef Gewohn
(1958 – 2012)

gewidmet.

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Promotionszeit von Oktober 2015 bis September 2018 in Kooperation mit dem Mercedes-Benz Werk in Bremen und dem Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) in Karlsruhe. Während dieser Zeit wurde ein relevanter Forschungsbedarf im Hinblick auf Methoden und Techniken zur hybriden Qualitätsregelung im Bereich der Fahrzeugmontage identifiziert. Die resultierenden wissenschaftlich-technischen Beiträge sind Gegenstand dieser Arbeit.

Die Erstellung der Arbeit erfolgte im Rahmen einer eigenständigen Forschung zum Gebiet der hybriden Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage. Jedoch haben weitere Personen einen indirekten Beitrag bei der Erstellung dieser Arbeit geleistet. Dafür möchte ich nachfolgend meinen Dank aussprechen.

Zum einen möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Mercedes-Benz Werkes in Bremen bedanken, welche mich fachlich und organisatorisch unterstützt haben. Insbesondere gilt mein Dank meinem Abteilungsleiter Herrn Dr.-Ing. Holger Degen für die Übernahme der Betreuung meiner Forschung sowie für die übertragene Verantwortung innerhalb der Innovationsprojekte und Entscheidungsgremien. Weiterhin bedanke ich mich bei meinem Teamleiter Herrn Detlef Denker für die Bereitstellung der erforderlichen Forschungsmittel und die vollumfängliche Förderung meiner Arbeit. An dieser Stelle gebührt ebenfalls dem gesamten Team IPP ein besonderer Dank. Die gemeinsame Zeit im Team habe ich sehr genossen und werde auf diese positiv zurückblicken.

Zum anderen danke ich dem Fraunhofer IOSB für die exzellente Unterstützung. Ich bedanke mich vor allem bei Herrn Dr.-Ing. Thomas Usländer und Herrn Gerhard Sutschet für den fachlichen Austausch und die konstruktiven Rückmeldungen zu den Ergebnissen sowie für das Lektorat dieser Arbeit. Ein weiterer Dank richtet sich an Herrn Dr.-Ing. Michael Voit für die hilfreichen Tipps und vielen Gespräche auf Augenhöhe. Außerdem bedanke mich bei Frau Simone Srb für die angenehme Kommunikation sowie perfekte Organisation und Koordination der Termine im Fraunhofer IOSB.

Ebenso danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer für die ausgezeichnete Betreuung und Förderung während meiner Promotionszeit. Ihre wertvollen Anmerkungen zu den Zwischenberichten haben mir bei der Bearbeitung sehr geholfen und wichtige Impulse für neue Denksätze geliefert. Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt von der RWTH Aachen und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Linß von der TU Ilmenau danke ich für die Übernahme des Korreferats dieser Arbeit.

Zudem bedanke ich mich bei meinen studentischen Mitarbeitern, Herrn Maximilian Ohligs und Herrn Sebastian Kraft sowie Herrn Philipp Warneke und Herrn Johannes Schwalbach, für die anregenden Diskussionen – sowohl zu meinen Forschungsinhalten als auch zu tagesaktuellen Themen. Meinem Doktorandenkollegen Herrn Nils Piero danke ich für den fachlichen Austausch und für die angenehme Zusammenarbeit bei den Veröffentlichungen. Ich wünsche euch viel Erfolg auf eurem Lebensweg.

Meine größte Dankbarkeit spreche ich meinen Eltern, Thomas und Birgit Gewohn, und meiner gesamten Familie aus. Ich danke euch allen für die liebevolle und bedingungslose Unterstützung sowie euer Vertrauen in mich und meine Zukunftspläne. Ohne euch gäbe es diese Arbeit nicht.

Einen besonderen Dank richte ich abschließend an meine liebe Partnerin Corinna, die mir jederzeit mit maximaler Toleranz den notwendigen Freiraum zur Erstellung dieser Arbeit gegeben hat. Ich freue mich sehr auf die bevorstehende Zeit mit dir.

Bremen, September 2018

Marco Thomas Gewohn

Zusammenfassung

Steigende Variantenvielfalt der Produkte und hohe Flexibilitätsanforderungen der Produktionsprozesse resultieren in zunehmender Komplexität der Automobilproduktion. Anforderungen dieser Art beeinflussen maßgeblich sowohl die kundenrelevante Produktqualität als auch die unternehmensrelevante Produktionsqualität. Zwar haben informationstechnische Methoden und Konzepte bereits einen wichtigen Beitrag zur Beherrschbarkeit dieser Herausforderungen geleistet, dennoch existiert trotz des intensivierten Qualitätsbewusstseins und des technologischen Fortschritts weiterhin ein hoher Anteil an Qualitätsmängeln und Ausschüssen innerhalb der Produktion. Mangelhaftes Management und fehlende Transparenz qualitätsbezogener Informationen sowie rudimentäre Einbindung aller Mitarbeiter in die Qualitätsregelung stellen nur einige Ursachen dar. Die Symptome umfassen eine verlangsamte Reaktionsfähigkeit, hohe Nacharbeitszeiten und außergewöhnliche Qualitätskosten mit negativen Auswirkungen auf die Erreichung der unternehmerischen Ziele. Reaktive Maßnahmen umfassen oftmals unstrukturierte Investitionen zur Steigerung der Produktionsqualität mit mäßiger Effizienz.

Eine effiziente Qualitätsregelung erfordert jedoch zunächst die vollständige Erfassung und zielgerichtete Aufbereitung qualitätsbezogener Informationen. Weiterhin sind schnelle bidirektionale Informationsflüsse in der Wertschöpfungskette erforderlich, um anschließend ein strukturiertes Informationsmanagement mit dem Ziel hoher Transparenz der bestehenden Qualitätssituation durchführen zu können. Damit eine Nutzung der qualitätsbezogenen Informationen und Rückkopplung innerhalb der Qualitätsregelung erfolgen kann, sind abschließend eindeutig ableitbare

Handlungsoptionen erforderlich. Zur entsprechenden Umsetzung sind informationstechnische Methoden und Werkzeuge notwendig, welche durch bestehende Konzepte nicht oder nur in Ansätzen erfüllt werden können.

Die vorliegende Arbeit liefert folglich methodisch-technische Beiträge zur Regelung der Produktionsqualität auf Basis fünf zusammenhängender Abschnitte. Grundlegend wird im ersten Abschnitt ein merkmalsbezogenes Qualitätskonzept (Characteristic-based Quality Design, CQD) zur binären und zusätzlich quantitativen Qualitätsbewertung eines Betrachtungsobjektes entwickelt. Mit diesem Qualitätskonzept lässt sich Qualität binär evaluieren sowie quantitativ messen und liefert das Fundament zur Qualitätsregelung. Im zweiten Abschnitt erfolgt eine für die Praxis sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität (Assembly-specific Production Quality, APQ) auf Basis eines produktionsorientierten Kennzahlensystems. Dadurch wird der Betrachtungsraum eindeutig von weiteren Produktionsbereichen abgegrenzt. Zusätzlich wird im dritten Abschnitt ein informationstechnisches Referenzmodell einer hybriden Qualitätsregelung (Quality Control Structure, QCS) zum bidirektionalen Management von Qualitätsinformationen entwickelt. Über das Referenzmodell wird die informationstechnische Struktur und Logik für eine adäquate Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage definiert. Darauf aufbauend wird im vierten Abschnitt ein anwenderorientiertes Modell einer grafischen Benutzungsoberfläche (Worker Interaction Interface, WII) zur Ein- und Ausgabe von qualitäts- und montagebezogenen Informationen entwickelt. Durch das Modell werden relevante Informationen in rollen-, sach- und zeitgerechter Form innerhalb der Montagelinie bereitgestellt. Abschließend wird im fünften Abschnitt ein generisches Qualitätswerkzeug (Quality Visualization Model, QVM) entwickelt. Damit lässt sich die Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes anforderungsgerecht visualisieren, überwachen und evaluieren.

Abstract

Increasing variety of products and high flexibility requirements of production processes result in increasing complexity of automobile production. Requirements of this kind have a significant influence on both customer-relevant product quality and company-relevant production quality. Although information technology methods and concepts have already made an important contribution to manage these challenges, despite intensified quality awareness and technological progress, a high proportion of quality defects and rejects continues to exist within production. Insufficient management and lack of transparency of quality-related information as well as rudimentary integration of all employees into quality control are only a few reasons. Symptoms include slower responsiveness, high rework times and exceptional quality costs with a negative impact on the achievement of business goals. Reactive measures often include unstructured investments to increase production quality with moderate efficiency.

However, efficient quality control initially requires the complete collection and targeted processing of quality-related information. Furthermore, fast bidirectional information flows within the value chain are necessary in order to subsequently be able to carry out structured information management with the goal of high transparency of the existing quality situation. In order for the quality-related information and feedback to be used within the quality control system, clearly derivable options for action are required. Information technology methods and tools are necessary for the corresponding implementation, which cannot or only to some extent can be fulfilled by existing concepts.

The present dissertation therefore provides methodological and technical contributions to control production quality on the basis of five interrelated sections. In the first section, a Characteristic-based Quality Design (CQD) for the binary and additional quantitative quality evaluation of an observation object is developed. With this quality concept, quality can be evaluated binary and measured quantitatively and provides the basis for quality control. In the second section, the Assembly-specific Production Quality (APQ) is defined appropriately for practical use on the basis of a production-oriented performance indicator system. This clearly separates the observation area from other production areas. Furthermore, in the third section, an information technology reference model of a hybrid Quality Control Structure (QCS) for bidirectional management of quality information is developed. The reference model is used to define the information technology structure and logic for adequate quality control in vehicle assembly. Based on this, the fourth section develops a user-oriented model of a graphical Worker Interaction Interface (WII) for the input and output of quality- and assembly-related information. The model provides relevant information within the assembly line in a user-, task- and time-oriented form. Finally, in the fifth section, a generic Quality Visualization Model (QVM) is developed. This allows the quality situation of an observation object to be visualized, monitored and evaluated according to requirements.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Vorwort und Danksagung | i |
| Zusammenfassung | iii |
| Abstract | v |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung | 1 |
| 1.2 Zielsetzung und Beiträge der Arbeit | 4 |
| 1.3 Forschungsstrategie und Aufbau der Arbeit | 6 |
| 2 Wissenschaftliche Grundlagen | 11 |
| 2.1 Qualitätsbezogene Grundlagen | 11 |
| 2.1.1 Qualitätsbegriff | 11 |
| 2.1.2 Qualitätsmerkmale | 12 |
| 2.1.3 Qualitätskreis | 16 |
| 2.1.4 Qualitätskosten | 17 |
| 2.1.5 Qualitätskennzahlen | 21 |
| 2.1.6 Qualitätsmanagement | 23 |
| 2.2 Regelungsbezogene Grundlagen | 24 |
| 2.2.1 Steuerung und Regelung | 24 |
| 2.2.2 Qualitätsregelung | 27 |
| 2.3 Informationstechnische Grundlagen | 31 |
| 2.3.1 Information und Wissen | 31 |
| 2.3.2 Informationssysteme und Informationslogistik | 32 |
| 2.3.3 Informationsmodelle und Referenzmodelle | 33 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.3.4 | Architekturmuster nach MVC | 35 |
| 2.3.5 | IT und Produktion | 36 |
| 2.4 | Zwischenfazit: Wissenschaftliche Grundlagen | 38 |
| 3 | Stand der Forschung und Industrie | 41 |
| 3.1 | Eingrenzung des Betrachtungsbereiches | 41 |
| 3.2 | Status Quo der Fahrzeugmontage | 42 |
| 3.2.1 | Hierarchie der Automobilproduktion | 43 |
| 3.2.2 | Struktur des Montagesystems | 43 |
| 3.2.3 | Rollen des Montagesystems | 48 |
| 3.2.4 | Informationssysteme des Montagesystems | 51 |
| 3.2.5 | Prozesse des Montagesystems | 56 |
| 3.2.6 | Informationstechnische Defizite zur Regelung | 60 |
| 3.3 | Bestehende Definitions- und Lösungsansätze | 69 |
| 3.3.1 | Definitionen zur Produktionsqualität | 69 |
| 3.3.2 | Ansätze zur Qualitätsregelung | 71 |
| 3.3.3 | Ansätze zur Informationsvisualisierung | 72 |
| 3.3.4 | Ansätze zur Qualitätsüberwachung | 74 |
| 3.4 | Zwischenfazit: Stand der Forschung und Industrie | 75 |
| 4 | Struktur des Konzeptes | 77 |
| 4.1 | Definition der erforderlichen Anforderungen | 77 |
| 4.2 | Aufbaustruktur des Konzeptes | 82 |
| 4.3 | Ablaufstruktur des Konzeptes | 86 |
| 4.4 | Auswahl der Modellierungswerkzeuge | 89 |
| 4.5 | Zwischenfazit: Struktur des Konzeptes | 92 |
| 5 | Definition des Qualitätskonzeptes | 93 |
| 5.1 | Strukturmodell der Qualität | 93 |
| 5.2 | Binäre Qualitätsbewertung | 97 |
| 5.3 | Quantitative Qualitätsbewertung | 99 |
| 5.4 | Zwischenfazit: Definition des Qualitätskonzeptes | 102 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | Definition der Produktionsqualität | 103 |
| 6.1 | Analyse der allgemeinen Produktionsqualität | 103 |
| 6.2 | Empirische Erhebung qualitätsrelevanter Merkmale | 107 |
| 6.2.1 | Wahl der Erhebungsmethode | 107 |
| 6.2.2 | Auswahl der Experten | 107 |
| 6.2.3 | Vorbereitung des Gesprächsleitfadens | 108 |
| 6.2.4 | Durchführung des Experteninterviews | 109 |
| 6.2.5 | Auswertung der Ergebnisse | 109 |
| 6.3 | Betrachtungsobjekt und Qualitätsmerkmale | 110 |
| 6.4 | Qualitative Definition der APQ | 115 |
| 6.4.1 | Einordnung in den Qualitätskreis | 115 |
| 6.4.2 | Einbeziehung der Qualitätskosten | 116 |
| 6.4.3 | Berücksichtigung der Produktqualität | 117 |
| 6.4.4 | Zusammenfassende Definition | 118 |
| 6.5 | Binäre Bewertung der APQ | 119 |
| 6.6 | Quantitative Bewertung der APQ | 120 |
| 6.7 | Abgrenzung zu ähnlichen Leistungskennzahlen | 121 |
| 6.8 | Zwischenfazit: Definition der Produktionsqualität | 124 |
| 7 | Regelung der Produktionsqualität | 127 |
| 7.1 | Allgemeiner Aufbau | 127 |
| 7.2 | Rückwärtsgerichteter Informationsstrom | 128 |
| 7.2.1 | Erster Stream der Qualitätsrückmeldung | 130 |
| 7.2.2 | Zweiter Stream der Qualitätsrückmeldung | 130 |
| 7.2.3 | Dritter Stream der Qualitätsrückmeldung | 131 |
| 7.2.4 | Vierter Stream der Qualitätsrückmeldung | 132 |
| 7.3 | Vorwärtsgerichteter Informationsstrom | 133 |
| 7.3.1 | Erster Stream der Nacharbeitsmeldung | 134 |
| 7.3.2 | Zweiter Stream der Nacharbeitsmeldung | 135 |
| 7.3.3 | Dritter Stream der Nacharbeitsmeldung | 140 |
| 7.3.4 | Vierter Stream der Nacharbeitsmeldung | 142 |
| 7.4 | Automatisiertes Informationsmanagement | 142 |
| 7.5 | Integration von Qualitätsprüfsystemen | 143 |
| 7.6 | Einordnung der Rollen | 146 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.7 | Regelungstechnische Merkmale | 149 |
| 7.7.1 | Aufbau der technischen Qualitätsregelung | 149 |
| 7.7.2 | Einflussgrößen im Qualitätsregelsystem | 150 |
| 7.7.3 | Eigenschaften des hybriden Systems | 152 |
| 7.8 | Zielsetzungen des Systems | 154 |
| 7.9 | Zwischenfazit: Regelung der Produktionsqualität | 156 |
| 8 | Visualisierung der Informationen | 159 |
| 8.1 | Allgemeiner Aufbau | 160 |
| 8.2 | Technische Basis | 161 |
| 8.3 | Montagebezogene Bausteine | 163 |
| 8.3.1 | Darstellung von Montageinformationen | 163 |
| 8.3.2 | Exotenalarm und Sonderausstattungshinweis | 165 |
| 8.3.3 | Bereitstellung einer Montageanleitung | 165 |
| 8.3.4 | Tätigkeitsdokumentation | 166 |
| 8.4 | Qualitätsbezogene Bausteine | 167 |
| 8.4.1 | Rückmeldung von Qualitätsinformationen | 168 |
| 8.4.2 | Meldung von Nacharbeiten | 170 |
| 8.5 | Nacharbeitsbezogene Bausteine | 172 |
| 8.5.1 | Priorisierung von Nacharbeitsmeldungen | 172 |
| 8.5.2 | Prädiktion von Nacharbeitslösungen | 173 |
| 8.6 | Zielsetzungen des Systems | 174 |
| 8.7 | Zwischenfazit: Visualisierung der Informationen | 175 |
| 9 | Überwachung der Produktionsqualität | 177 |
| 9.1 | Allgemeiner Aufbau | 178 |
| 9.1.1 | Konzeptuelle Modellstruktur | 178 |
| 9.1.2 | Mathematische Modellstruktur | 179 |
| 9.1.3 | Visualisierung des Modells | 183 |
| 9.1.4 | Implementierung der Toleranzbänder | 188 |
| 9.1.5 | Gewichtung der Qualitätsmerkmale | 192 |
| 9.2 | Analysefähigkeit des Modells | 193 |
| 9.2.1 | Clusteranalyse der Merkmalswerte | 194 |
| 9.2.2 | Benchmark mit anderen Objekten | 198 |
| 9.3 | Eigenschaften des Modells | 201 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9.4 | Anwendungspotenzial in der Fahrzeugmontage | 203 |
| 9.4.1 | Visualisierung der APQ | 203 |
| 9.4.2 | Visualisierung der Produktqualität | 206 |
| 9.4.3 | Rückkopplung in die hybride Regelung | 213 |
| 9.5 | Zielsetzungen des Modells | 215 |
| 9.6 | Zwischenfazit: Überwachung der Produktionsqualität | 216 |
| 10 | Evaluation des Konzeptes | 219 |
| 10.1 | Evaluation des QBS-1 und QBS-2 | 219 |
| 10.1.1 | Darstellung der Ausgangssituation | 220 |
| 10.1.2 | Anwendung der Methode | 220 |
| 10.1.3 | Ergebnisse der Evaluation | 221 |
| 10.2 | Evaluation des QFS-2c | 224 |
| 10.2.1 | Darstellung der Ausgangssituation | 224 |
| 10.2.2 | Anwendung der Methode | 225 |
| 10.2.3 | Ergebnisse der Evaluation | 227 |
| 10.3 | Evaluation des WII | 229 |
| 10.3.1 | Methodischer Ansatz | 229 |
| 10.3.2 | Auswahl der Experten | 231 |
| 10.3.3 | Vorbereitung des Gesprächsleitfadens | 232 |
| 10.3.4 | Ergebnisse der Experteninterviews | 232 |
| 10.4 | Evaluation des QVM | 236 |
| 10.4.1 | Visualisierung der APQ | 236 |
| 10.4.2 | Visualisierung der Produktqualität | 240 |
| 10.4.3 | Ergebnisse der Evaluation | 248 |
| 10.5 | Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Konzeptes | 250 |
| 10.6 | Zwischenfazit: Evaluation des Konzeptes | 251 |
| 11 | Schlussbetrachtung | 253 |
| 11.1 | Zusammenfassung | 253 |
| 11.2 | Anwendungsbezogene Einordnung | 257 |
| 11.2.1 | Referenzarchitekturmodell der Industrie 4.0 | 257 |
| 11.2.2 | Infrastruktur der intelligenten Fabrik | 260 |
| 11.2.3 | Serviceorientierte Architektur des IoT | 262 |
| 11.3 | Kritische Würdigung und weiterer Ausblick | 263 |

| | |
|--|------------|
| Verzeichnisse | 267 |
| Literaturverzeichnis | 269 |
| Eigene Publikationen | 299 |
| Abkürzungsverzeichnis | 301 |
| Symbolverzeichnis | 307 |
| Glossar | 309 |
| | |
| Anhang | 313 |
| A Beispiele für Qualitätsmerkmale | 315 |
| B Zeitmodell für Produktionseinheiten nach VDMA | 317 |
| C Technischer Regelkreis nach DIN IEC 60050-351 | 319 |
| D Erläuterungen zur Industrie 4.0 | 321 |
| E Analoge Informationsträger in der Montagelinie | 325 |
| F Beschreibung der Ansätze aus Abschnitt 3.3 | 329 |
| G Beschreibung der Anforderungen aus Abschnitt 4.1 | 349 |
| H Gesprächsleitfaden der Experteninterviews zur APQ | 359 |
| I Anwendungsfalldiagramm zum Konzept | 361 |
| J Klassendiagramm zum Konzept | 363 |
| K Pseudocode zur QCS | 365 |
| L EPK der hybriden Qualitätsregelung | 369 |
| M Entscheidungslogik der QCS | 387 |
| N Blockschaltbild zum Konzept | 389 |
| O Technische Ausstattung zum WII | 391 |
| P Anwendungsbeispiele des QVM | 395 |
| Q Datenbasis zur Evaluation des QBS | 401 |
| R Datenbasis zur Evaluation des QFS-2c | 403 |
| S Thesen und Auswertung zur Evaluation des WII | 405 |
| T Evaluation des QVM über die APQ | 409 |
| U Evaluation des QVM über die Produktqualität | 415 |

1 Einleitung

„Wenn es einen Weg gibt, etwas besser zu machen: Finde ihn!“

THOMAS ALVA EDISON (1847 – 1931)

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Automobilindustrie verzeichnet seit Jahren weltweit enorme wirtschaftliche Erfolge [ROL16] und bietet aufgrund der prognostizierten Wachstumsraten von 60,7% in China, 12,9% in der Europäischen Union und 10,3% in Nordamerika bis 2020 [PRI14] ein großes wirtschaftliches Potenzial [STA17]. Zur Sicherung des Erfolges müssen jedoch unterschiedliche Herausforderungen beherrschbar gemacht werden. Zum einen muss sich ein Automobilhersteller grundlegend der Vereinbarkeit des magischen Dreiecks der perfekten Produktion stellen [KLE14; CHR06], welche aufgrund diverser Zielkonflikte unter den einzelnen Faktoren sowie der dynamischen und krisenanfälligen Umwelt erschwert wird [GEW16]. Abbildung 1.1 zeigt das magische Dreieck der perfekten Produktion nach KLETTI UND SCHUMACHER [KLE14].

Zum anderen ist eine Anpassung an die steigenden Kundenbedürfnisse erforderlich. Der Wandel von Massenproduktion zu Massenindividualisierung

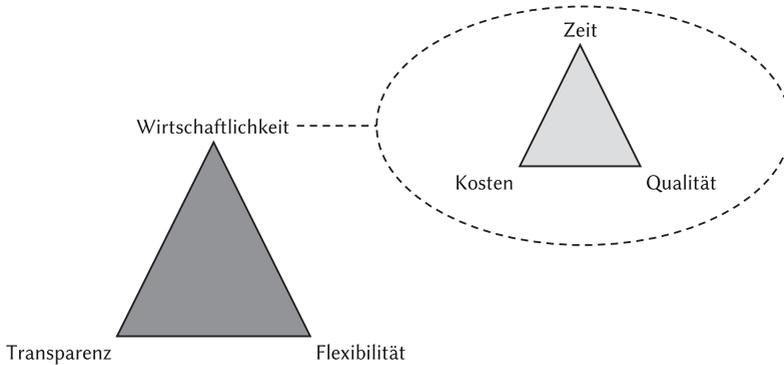


Abbildung 1.1: Magisches Dreieck der perfekten Produktion

(Losgröße 1) führt zu hoher Variantenvielfalt der Produkte sowie steigenden Herausforderungen innerhalb der Produktionsprozesse [ELM13; MIC10; ALG10; HUB16]. Der Einfluss gesteigerter Produktvarianz auf die Produktion ist zudem durch den Einzug von „Mixed Model Assembly Lines“¹ begründet. Die resultierende Komplexität der Automobilproduktion hat dabei einen maßgeblichen Einfluss auf die Einhaltung der definierten Qualitätsziele [WAR96].

Das Bestreben eines Automobilherstellers ist sowohl die Gewährleistung der Produktqualität gegenüber den Kunden als auch die Sicherstellung der Produktionsqualität bzw. Prozessqualität der Produktion. Für das Optimum müssen dazu die Fahrzeuge² von Anbeginn der Wertschöpfung unter den gegebenen Bedingungen frei von Qualitätsmängeln produziert werden (First-Time-Quality)³ [HUB16; ECK13]. Eine Nichterfüllung der Qualitätsanforderungen resultiert letztendlich in Nacharbeitsaufwänden und

¹ Dies bezeichnet die Montage mehrerer Baureihen und Fahrzeugtypen auf einer Montagelinie.

² Im weiteren Verlauf wird der Begriff „Fahrzeug“ synonym für den Begriff „Automobil“ verwendet.

³ Eine „First-Time-Quality“ bzw. Nullfehler-Qualität wird zwar angestrebt, kann jedoch im realen Produktionsbetrieb nicht immer gewährleistet werden.

entsprechenden Nacharbeitskosten, welche die Gewinnmarge des Automobilherstellers reduzieren. Zur Gewährleistung eines hohen Qualitätsniveaus ist folglich eine effiziente Qualitätsregelung des Produktes und der Produktion erforderlich.

Derzeit leisten die bestehenden Methoden und Techniken zur Qualitätsregelung zwar funktionierende Lösungen, können aber den wachsenden und künftigen Herausforderungen bzgl. Transparenz, Flexibilität und Komplexitätsbeherrschung nicht mehr in adäquater Form gerecht werden [FEL05; LUŠ16]. Ein besonderer Fokus muss dabei auf den Fertigungsbereich der Fahrzeugmontage gelegt werden. Dieser charakterisiert sich vor allem durch einen hohen Anteil manueller Tätigkeiten durch Produktionsmitarbeiter [FRA09; MIC10]. Ein Großteil der entstehenden Fehler im Montageprozess und der resultierenden Nacharbeitsaufwände sind dabei auf den Menschen zurückzuführen [BÄC09]. Folglich stellt der Mensch einen entscheidenden Faktor im Wertschöpfungsprozess der Qualitätsherstellung dar. Dieser muss intensiv in die Qualitätsregelung eingebunden werden. Es bedarf somit einer „hybriden Qualitätsregelung“ auf Basis einer Mensch-System-Kollaboration.

Der Begriff „hybrid“ kennzeichnet im Kontext dieser Arbeit die effektive und effiziente Kollaboration zwischen den Faktoren Mensch und System. Als System werden primär informationstechnische Elemente, prozessuale Zusammenhänge und organisatorische Funktionseinheiten betrachtet [VON84; HAB15].

Einen entscheidenden Beitrag zur hybriden Qualitätsregelung liefern Konzepte der Industrie 4.0 [BAU14]. Innovative Methoden und Techniken ermöglichen eine Beherrschbarkeit der genannten Anforderungen, müssen jedoch zielgerichtet ausgewählt, entwickelt und implementiert werden. Zur Gewährleistung des angestrebten Qualitätsniveaus bei gleichzeitiger Erfüllung der gesetzten Kostenziele steht folglich nur ein begrenztes Budget zur effizienten Qualitätsregelung zur Verfügung. Somit stellen die Auswahl, Entwicklung und Implementierung geeigneter Lösungsansätze unter Berücksichtigung des vorhandenen Budgets weitere Herausforderungen dar.

1.2 Zielsetzung und Beiträge der Arbeit

Im Hinblick auf die genannten Problemstellungen bieten moderne Technologien zur Digitalisierung unterschiedliche Möglichkeiten. Der Bereitstellung von Informationen und Wissen kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Der Mensch innerhalb des Produktionsumfeldes muss bestmöglich mit relevanten Informationen versorgt werden. Dafür sind adäquate Methoden und Konzepte erforderlich. Für die Qualitätsregelung müssen nicht nur aussagekräftige Kennzahlen zur Analyse der Qualitätssituation bereitgestellt werden, sondern ebenfalls Konzepte zur anwenderorientierten Visualisierung und zum effizienten Management von Qualitätsinformationen entwickelt werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit umfasst folglich die effiziente und zugleich hybride Regelung der Produktionsqualität im Bereich der Fahrzeugmontage. Dazu sollen wissenschaftlich-technische Beiträge eindeutige Inhalte zur Beantwortung der nachfolgenden übergeordneten Forschungsfrage liefern. Diese ist direkt mit der Herausforderung einer hybriden Qualitätsregelung verbunden.

Übergeordnete Forschungsfrage:

Wie muss ein gegebenes Budget investiert werden, um damit die Produktionsqualität maximal zu steigern?

Diese Forschungsfrage kann jedoch aufgrund der Komplexität nicht mittels einer Arbeit vollständig gelöst werden. Die vorliegende Arbeit beantwortet daher spezifischere Leitfragen, welche zur Lösung der Forschungsfrage beitragen.

Weitere Leitfragen:

1. Wie muss ein Qualitätskonzept für eine adäquate Qualitätsbewertung und Qualitätsregelung gestaltet sein?
2. Wie lautet eine für die Praxis sachgerechte Definition der Produktionsqualität für die Fahrzeugmontage?

3. Wie muss die informationstechnische Struktur und Logik für eine Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage aufgebaut sein?
4. Wie und mit welchen Hilfsmitteln müssen die Nutzer mit relevanten qualitätsbezogenen Informationen rollen-, sach- und zeitgerecht versorgt werden?
5. Wie müssen qualitätsbezogene Informationen in Form von Kennzahlen und durch Visualisierung rollengerecht bereitgestellt werden?
6. Wie kann die Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes anforderungsgerecht visualisiert werden?

Zur Beantwortung der Leitfragen werden in den einzelnen Kapiteln konkrete wissenschaftlich-technische Beiträge zur Informatik und Ingenieurwissenschaft entwickelt. Diese wurden mittels eigener Forschungsprojekte in der industriellen Automobilproduktion erarbeitet. In Summe bilden die Ergebnisse dieser Arbeit ein Konzept zur effizienten hybriden Qualitätsregelung.

Wissenschaftlich-technische Beiträge und Ergebnisse:

1. Ein merkmalsbezogenes Qualitätskonzept mit binärer und zusätzlich quantitativer Bewertung der Qualität eines Betrachtungsobjektes.
2. Eine sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität auf Basis eines produktionsorientierten Kennzahlensystems.
3. Ein informationstechnisches Referenzmodell einer hybriden Qualitätsregelung zum bidirektionalen Management von Qualitätsinformationen.
4. Ein anwenderorientiertes Modell einer grafischen Benutzungsoberfläche zur Ein- und Ausgabe von qualitäts- und montagebezogenen Informationen innerhalb der Montagelinie.
5. Ein generisches Qualitätswerkzeug zur kontinuierlichen Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualität eines Betrachtungsobjektes.

1.3 Forschungsstrategie und Aufbau der Arbeit

Der wissenschaftliche Fokus dieser Arbeit erfolgt anhand der Einordnung in das System der Wissenschaft nach ULRICH UND HILL. Durch die wissenschaftliche Einordnung dieser Arbeit folgen Konsequenzen im Hinblick auf die Wahl der Forschungskonzeption und der zu verwendenden Methodiken. Abbildung 1.2 zeigt das System der Wissenschaften nach ULRICH UND HILL [ULR76] sowie die Einordnung der Arbeit durch farbliche Markierung.

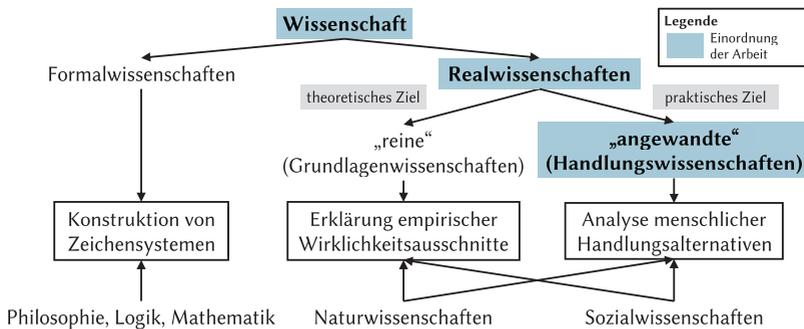


Abbildung 1.2: System der Wissenschaften

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die effiziente hybride Regelung der Produktionsqualität im Bereich der Fahrzeugmontage. Mit dieser soll ein relevanter Beitrag zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage geleistet werden. Als grundlegende Betrachtungsobjekte stehen dabei Menschen, Objekte und Informationen im Fokus. Folglich muss diese Arbeit den Realwissenschaften bzw. angewandten Handlungswissenschaften zugeordnet werden. Dadurch bildet sich ein zugeschnittener konzeptioneller Forschungsansatz. Der grundlegende Aufbau der Arbeit und die Vorgehensweise zur Beantwortung der Leitfragen orientiert sich an der Forschungskonzeption nach ULRICH. Diese beginnt und endet mit der Praxis.

Abbildung 1.3 zeigt die Forschungsstrategie der vorliegenden Arbeit nach ULRICH [ULR84].



Abbildung 1.3: Forschungsstrategie der vorliegenden Arbeit

Das *Kapitel 1* umfasste bislang eine terminologisch-deskriptive Beschreibung der Ausgangssituation und Problematik sowie eine Vorstellung der Zielsetzung und der wissenschaftlich-technischen Beiträge.

Der Forschungsstrategie folgend werden in *Kapitel 2* die wissenschaftlichen Grundlagen zu den Inhalten dieser Arbeit terminologisch-deskriptiv beschrieben. Dabei werden die Grundlagen tiefergehend zwischen den Themen Qualität, Regelung und Informationstechnik gegliedert. Die Grundlagenbeschreibung dient zur Bereitstellung der notwendigen theoretischen Basis.

In *Kapitel 3* erfolgt eine Kennzeichnung der bestehenden Situation in terminologisch-deskriptiver und empirisch-induktiver Form. Zur Spezifikation des Untersuchungsgegenstandes wird eine Eingrenzung des Betrachtungsbereiches nach den drei Kriterien Prozess, Objekt und Subjekt durchgeführt.

Auf Basis dessen werden der Status Quo der Fahrzeugmontage und die bestehenden Defizite zur effizienten Qualitätsregelung in kompakter Form dargestellt. Zudem werden bestehende Ansätze der Forschung und Industrie zur Lösung der Defizite analysiert und anhand individueller Kriterien bewertet.

Auf Basis der Erkenntnisse findet in *Kapitel 4* die Strukturierung der zu entwickelnden Module dieser Arbeit im analytisch-deduktiven Kontext statt. Zunächst werden die relevanten Anforderungen für einen adäquaten Lösungsansatz ermittelt. Anschließend werden die Aufbaustruktur und die Ablaufstruktur des Konzeptes dargestellt. Ebenso erfolgt eine Beschreibung der verwendeten Modellierungswerkzeuge.

In *Kapitel 5* wird das grundlegende Qualitätskonzept der Arbeit terminologisch-deskriptiv und analytisch-deduktiv entwickelt. Das Ergebnis umfasst ein anforderungsgerechtes Qualitätskonzept mit binärer und zusätzlich quantitativer Bewertung der Qualität eines Betrachtungsobjektes. Dieses Qualitätskonzept wird als „Characteristic-based Quality Design“ (CQD) bezeichnet und legt das Fundament für die weiteren Module dieser Arbeit. Das CQD repräsentiert Ergebnis 1 und beantwortet Leitfrage 1.

Das *Kapitel 6* entwickelt eine sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität. Dazu werden die Inhalte terminologisch-deskriptiv, analytisch-deduktiv und empirisch-induktiv erarbeitet. Die sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität wird als „Assembly-specific Production Quality“ (APQ) bezeichnet. Die APQ repräsentiert Ergebnis 2 und beantwortet Leitfrage 2.

Als erstes technisches Modul liefert *Kapitel 7* in analytisch-deduktiver Form ein Referenzmodell zur hybriden Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage. Es soll eine informationstechnische Struktur und Logik zur effizienten hybriden Qualitätsregelung in der Montagelinie definiert werden, welche alle Nutzer mit relevanten Qualitätsinformationen zur Qualitätsregelung in rollen-, sach- und zeitgerechter Form versorgt. Das informationstechnische Referenzmodell wird als „Quality Control Structure“ (QCS) deklariert. Die QCS repräsentiert Ergebnis 3 und beantwortet Leitfrage 3.

In *Kapitel 8* erfolgt eine analytisch-deduktive Beschreibung eines anwenderorientierten Modells einer grafischen Benutzungsoberfläche zur Ein- und Ausgabe von qualitäts- und montagebezogenen Informationen in der Montagelinie als zweites technisches Modul. Dadurch wird ein Zielbild zur rollen-, sach- und zeitgerechter Visualisierung über ein informationstechnisches Kollaborationskonzept zwischen Mensch und System definiert. Das anwenderorientierte Modell wird als „Worker Interaction Interface“ (WII) bezeichnet. Das WII repräsentiert Ergebnis 4 und beantwortet Leitfragen 4 und 5.

Weiterhin wird in *Kapitel 9* ein generisches Qualitätsmodell zur kontinuierlichen Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualität eines Betrachtungsobjektes als drittes technisches Modul analytisch-deduktiv dargestellt. Das generische Qualitätsmodell wird als „Quality Visualization Model“ (QVM) benannt. Das QVM repräsentiert Ergebnis 5 und beantwortet Leitfrage 6.

Eine Anwendung und Evaluation der einzelnen Module erfolgt in *Kapitel 10* in empirisch-induktiver Form. Dabei werden die Module mittels Experteninterviews, Simulationen und Teilimplementierungen im Produktionsbetrieb über Pilotprojekte bewertet. Des Weiteren werden zur Darstellung der Mannigfaltigkeit des Konzepts weitere potenzielle Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt.

Eine Schlussbetrachtung der vorliegenden Arbeit liefert *Kapitel 11* durch eine empirisch-induktive Vorgehensweise. Dort erfolgt zunächst die Zusammenfassung der Inhalte und Erkenntnisse mit Bezug zu den wissenschaftlich-technischen Beiträgen dieser Arbeit. Zusätzlich wird die Arbeit in einem anwendungsbezogenen Kontext eingeordnet. Weiterhin wird die Arbeit im Rahmen einer Selbstreflexion kritisch betrachtet. Mit einem Ausblick über offene Fragestellungen und möglichem Forschungsbedarf schließen dieses Kapitel und die Arbeit ab.

2 Wissenschaftliche Grundlagen

„Höchste Weisheiten sind belanglose Daten, wenn man sie nicht zur Grundlage von Handlungen und Verhaltensweisen macht.“

PETER FERDINAND DRUCKER (1909 – 2005)

Zur Erarbeitung des Themas müssen zunächst die relevanten wissenschaftlichen Grundlagen dargestellt werden. Diese kategorisieren sich in qualitäts- und regelungsbezogene sowie informationstechnische Grundlagen.

2.1 Qualitätsbezogene Grundlagen

2.1.1 Qualitätsbegriff

Der Qualitätsbegriff wird im industriellen Kontext zur Beschreibung der Anforderungserfüllung und Zielerreichung verwendet. SCHMITT UND PFEIFER geben dazu eine kompakte Zusammenfassung zur Entstehung des Begriffes [SCH15]. Relevante Fragmente werden nachfolgend zur Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses mit Hinweis zu den Primärquellen entnommen.

Der Begriff *Qualität* in seiner heutigen Bedeutung entstand im 16. Jahrhundert aus dem lateinischen „qualitas“ (Beschaffenheit, Eigenschaft), welches

sich wiederum von „qualis“ (wie beschaffen) ableitet [DUD13]. Die Definition über Qualitätsmerkmale fand erstmals durch MEYER statt [MEY60], dessen Ansatz auch von KLATT und RIEGER verfolgt wurde [KLA61; RIE62]. International ist Qualität seit 1972 genormt [EOQ72]. Dort fand eine Fokussierung des Begriffs auf die Einhaltung von technischen Spezifikationen statt. Die aktuelle Definition der ISO beschreibt Qualität als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ [NOR15a]. Damit bezeichnet Qualität die Übereinstimmung des vorliegenden Ist-Zustandes (Beschaffenheit) mit dem gewünschten Soll-Zustand (Anforderungen) bzw. die Relation zwischen realisierter und geforderter Beschaffenheit [GEI08].

Parallel dazu versuchte GARVIN im Jahr 1984 nicht eine universale Definition zu finden, sondern begründete fünf individuelle Ansätze [GAR84; SCH15]:

1. Transzendenter Ansatz
2. Produktbasierter Ansatz
3. Kundenbasierter Ansatz
4. Produktionsbasierter Ansatz
5. Wertbasierter Ansatz

Aus diesen Ansätzen leitete GARVIN acht Dimensionen zur Beschreibung grundlegender Qualitätselemente ab [GAR87]. Insbesondere der *produktionsbasierte Ansatz* benennt eine relevante Schnittmenge zur Thematik der vorliegenden Arbeit.

2.1.2 Qualitätsmerkmale

Nach Definition der ISO wird Qualität über inhärente Merkmale repräsentiert [NOR15a]. Dabei beschreibt ein Merkmal eine Eigenschaft zum Erkennen oder Unterscheiden von Einheiten und kann, sofern es sich auf eine Forderung bezieht, als Qualitätsmerkmal betrachtet werden [NOR15a]. Bei der Qualitätsbetrachtung ist somit die Beschaffenheit aller Merkmale und Merkmalswerte relevant [BIN96]. Qualitätsmerkmale lassen sich in qualitative und quantitative Merkmale aufteilen [NOR15a] und weiter in nominale und ordinale sowie kontinuierlich und diskrete Merkmale konkretisieren

[GEI98]. Später unterschieden GEIGER UND KOTTE hingegen zwischen quantitativen und nichtquantitativen Merkmalen [GEI08]. Abbildung 2.1 zeigt die Arten von Qualitätsmerkmalen.

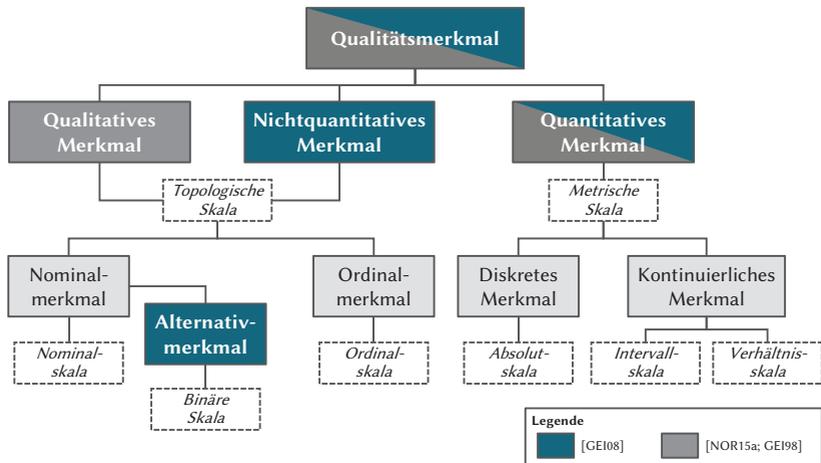


Abbildung 2.1: Arten von Qualitätsmerkmalen

Die vorliegende Arbeit übernimmt den standardisierten Ansatz der ISO und unterscheidet zwischen qualitativen und quantitativen Merkmalen. Dennoch besitzen Alternativmerkmale¹ nach GEIGER UND KOTTE bzw. die Qualitätsbewertung über zwei Merkmalswerte hier eine hohe Relevanz.

Qualitative Merkmale sind einer Skala ohne definierte Abstände zugeordnet und immer diskret, da sie nur eine abzählbare Menge möglicher Merkmalswerte (Kategorien) haben [MEI04]. Diese lassen sich weiter in nominale und ordinale Merkmale unterscheiden. *Nominale Merkmale* besitzen keine ordnungsbildende Eigenschaft (z. B. Geschlecht oder Farben), während *ordinale*

¹ Nach GEIGER UND KOTTE besitzt ein „Alternativmerkmal“ lediglich zwei mögliche Merkmalswerte. Dies wird u. a. auch als „Binärmerkmal“ bezeichnet. [GEI08]

Merkmale eine Ordnungsbeziehung besitzen und gegenseitig bewertbar gemacht werden können (z. B. Zufriedenheit oder Dienstgrade). [BIN96]

Quantitative Merkmale sind durch mess- bzw. zählbare Werte gekennzeichnet, die einer Skala mit definierten Abständen zugeordnet sind. Eine weitere Unterteilung erfolgt in diskrete und kontinuierliche Merkmale [TOU09]. *Diskrete Merkmale* besitzen einen Wertebereich der endlich oder abzählbar unendlich ist [MEI04] und werden auch als diskontinuierliche Merkmale bezeichnet (z. B. Augenzahlen eines Würfels oder Weltbevölkerung) [GEH04]. *Kontinuierliche Merkmale* besitzen einen unendlichen oder überabzählbaren Wertebereich in einem Zahlenintervall (z. B. Zeit, Länge, Gewicht oder Volumen) [MEI04]. Quantitative Merkmale zeichnen sich durch ihre Vielfalt der Größen und Dimensionen (z. B. Länge, Masse oder Strom- bzw. Lichtstärke) sowie Einheiten (z. B. Meter, Kilogramm, Ampere oder Candela) aus.

Jedoch existiert derzeit kein akzeptierter Standard bzgl. allgemeingültiger Qualitätsmerkmale oder deren Klassifizierung. Dies ist aufgrund der Individualität der Betrachtungsobjekte und der dynamischen Veränderung der Qualitätsanforderungen auch nicht möglich. Dennoch liefern wissenschaftliche und industrielle Ansätze verschiedene produkt- und produktionsbezogene Qualitätsmerkmale und Merkmalsgruppen. Anhang A zeigt einen Auszug verschiedener Ansätze zur Definition von allgemeingültigen produktbezogenen und relevanten produktionsbezogenen Qualitätsmerkmalen.

Zusätzlich stellt die „Arbeitsgemeinschaft für Wirtschaftliche Fertigung“ (AWF) nach ENGROFF [ENG14] relevante Indikatoren zu den einzelnen Qualitätsmerkmalen auf und versucht über eine repräsentative Auswahl an Kennzahlen die Produktion ganzheitlich abzubilden. Es wird eine Struktur bzw. ein hierarchisches System an Qualitätsmerkmalen der Produktion aufgestellt. Diese sind jedoch für ein allgemeines Produktionssystem zusammengestellt und nicht auf den Bereich der Fahrzeugmontage spezifiziert.

In industrieller Anwendung ist ein Qualitätsmerkmal eine binäre Größe und kann als „erfüllt“ oder „nicht erfüllt“ bewertet werden. Eine detailliertere Betrachtung des Qualitätsmerkmals über eine Vielzahl an Messpunkten ermittelt den Grad der Zielwerterreichung und somit die Qualitätserreichung

des Qualitätsmerkmals. Damit das Qualitätsmerkmal erfüllt ist, müssen alle Messpunkte innerhalb ihrer individuellen Toleranzfelder liegen. Liegt bereits ein Messpunkt außerhalb seines Toleranzfeldes, ist das Qualitätsmerkmal nicht erfüllt und es liegt keine Qualität beim Betrachtungsobjekt vor.

Beispiel: Die Spaltmaße sind Qualitätsmerkmale eines Fahrzeugs.

Erkenntnis: Qualität wird durch individuelle Qualitätsmerkmale des Betrachtungsobjektes definiert.

In einer industriellen Produktion wird somit zur Feststellung der Qualität zwischen Qualitätsmerkmalen und Prüfmerkmalen unterschieden. *Prüfmerkmale* sind kontinuierliche oder diskrete Messpunkte eines Qualitätsmerkmals, die zur Qualitätsprüfung herangezogen werden. Durch Messung und Bewertung der Prüfmerkmale kann die Qualität des zugehörigen Qualitätsmerkmals sowie im Folgeschritt die Qualität des Betrachtungsobjektes festgelegt werden. Ein Betrachtungsobjekt besitzt somit 1 bis n Qualitätsmerkmale, ein Qualitätsmerkmal wiederum 1 bis m Prüfmerkmale. Abbildung 2.2 zeigt die Unterteilung eines Objektes in Merkmale.

Beispiel: Zum Qualitätsmerkmal Spaltmaße eines Fahrzeugs existieren vier Messpunkte, welche die Qualität des Qualitätsmerkmals repräsentieren.

Erkenntnis: Ein Qualitätsmerkmal wird durch Messung seiner spezifischen Prüfmerkmale repräsentiert.

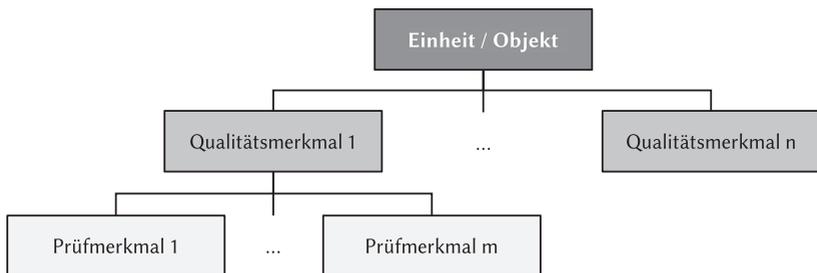


Abbildung 2.2: Unterteilung von Qualitätsmerkmalen in Prüfmerkmale

2.1.3 Qualitätskreis

Der *Qualitätskreis* ist ein theoretisches Modell nach MASING zur Darstellung der Vermaschung tätigkeitsbezogener Qualitätslemente (QE) entlang des Produktlebenszyklus [MAS70]. Ein Produkt durchläuft insgesamt folgende drei Qualitätsphasen [WAL93]:

1. Planungsphase → 2. Realisierungsphase → 3. Nutzungsphase

In vereinfachter Definition bezeichnet der Qualitätskreis ein „Modell für das Ineinandergreifen der Qualitätselemente eines Produkts aus den Planungs-, Realisierungs- und Nutzungsphasen“ [GEI08]. Abbildung 2.3 zeigt das Modell des Qualitätskreises [WAL93; MAS14].

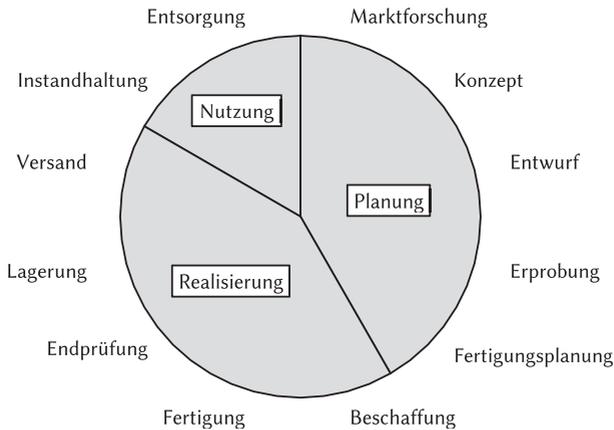


Abbildung 2.3: Modell des Qualitätskreises

Ob eine Qualitätsphase seinen Anforderungen gerecht wird, entscheidet die Qualitätsfähigkeit dieser Phase. Jede Phase beinhaltet QE (z. B. Fertigung),

welche wiederum Prozesse beinhalten. Das Ergebnis ist entweder ein materielles bzw. immaterielles Produkt oder eine Kombination, welche einen Beitrag zur Qualität der betrachteten Einheit liefern. Das Produkt entsteht durch das Zusammenwirken der Qualitätsphasen bzw. aller QE. [GEI08; MAS14]

Kritisch betrachtet wird der Qualitätskreis hingegen von DANZER, da die einzelnen QE eine sequenzielle Abfolge im Sinne des Wasserfallmodells erfahren, jedoch im Hinblick des moderneren Ansatzes des Simultaneous Engineering parallel verlaufen sollte [DAN95].

2.1.4 Qualitätskosten

Die *Qualitätskosten* bzw. *qualitätsbezogenen Kosten*² [NOR08a] umfassen sämtliche Ausgaben des Qualitätsmanagements [BRÜ15]. Traditionell werden diese in vier Kategorien eingeordnet [NOR08a]:

- **Fehlerverhütungskosten:** Kosten für vorbeugende Maßnahmen des Qualitätsmanagements zur Fehlervermeidung und -reproduktion.
- **Prüfkosten:** Kosten zur Planung, Beauftragung, Durchführung und Auswertung von Prüfungen.
- **Interne Fehlerkosten:** Kosten durch mangelhafte Einheiten, deren Mangel noch vor dem Verkauf bzw. der Auslieferung identifiziert wurde.
- **Externe Fehlerkosten:** Kosten durch mangelhafte Einheiten, deren Mangel nach dem Verkauf bzw. der Auslieferung identifiziert wurde.

Eine moderne Sicht stellt das zweigeteilte Modell der Qualitätskosten dar. Es unterteilt die Qualitätskosten in Übereinstimmungskosten und Abweichungskosten bzw. Konformitätskosten und Nichtkonformitätskosten

² Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird der etablierte Begriff „Qualitätskosten“ verwendet.

[LIN11]. *Übereinstimmungskosten* umfassen alle Aufwendungen zur Erfüllung der Kundenanforderungen bzw. der geforderten Qualität. Sie sind grundsätzlich bekannt, planbar und nicht vermeidbar. *Abweichungskosten* enthalten alle Kosten durch Fehler, deren Korrekturmaßnahmen und Prüfungen. Sie sind ungeplant und entstehen im Zusammenhang mit fehlerhafter Produktqualität sowie ineffizienten Produktions- oder Unternehmensprozessen. Abbildung 2.4 zeigt eine Gegenüberstellung des modernen zweigeteilten Kostenmodells mit der traditionellen Kostengliederung nach BRÜGGEMANN UND BREMER. [LIN11; BRÜ15]

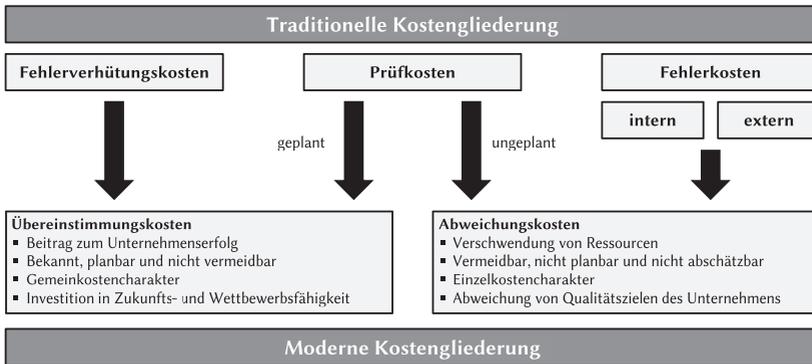


Abbildung 2.4: Traditionelle und moderne Gliederung der Qualitätskosten

Späte Fehlerbehebung führt z. T. zu erheblich höheren Fehlerkosten im Vergleich zu denen der direkten Fehlerbeseitigung [LIN11]. Dieser Sachverhalt wird in der Zehnerregel deutlich [CZA09]. Abweichungskosten erhöhen sich mit jeder Phase des Produktlebenszyklus um den Faktor 10. So ergibt sich im Rahmen des präventiven Qualitätsmanagements das Ziel der frühzeitigen Fehlerentdeckung und -behebung.³ Abbildung 2.5 zeigt die Zehnerregel der Fehlerkosten [SCH15; BEN14].

³ Ca. 70 bis 80% aller Fehler resultieren aus unzureichender Planung und Entwicklung vor Fertigungsbeginn [EHR17; SCH15].

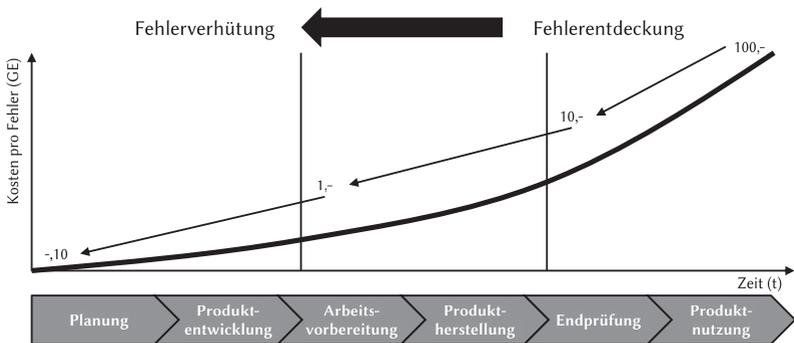


Abbildung 2.5: Zehnerregel der Fehlerkosten

Die allgemeine Qualitätsdarstellung ist toleranzbasiert, bei der ein Objekt als fehlerfrei bewertet wird, sofern alle Qualitätsmerkmale innerhalb ihrer Toleranzbereiche⁴ liegen – ein Erreichen des Sollwertes ist aus Qualitäts- und Kostengründen nicht notwendig. Abweichungskosten entstehen nur außerhalb der Toleranzfelder. Die Verlustfunktion nach TAGUCHI basiert hingegen auf dem Ansatz, dass jede Abweichung vom Sollwert auch innerhalb der Toleranzgrenzen eine Qualitätsverschlechterung hervorruft und somit Abweichungskosten generiert. Dies wird über die Verlustfunktion in Abbildung 2.6 abgebildet. [BRÜ15]

Weiterhin basiert das Qualitätskostenmodell auf der Annahme, dass bei einem geringen Qualitätsniveau durch hohe Fehlerkosten auch die Gesamtkosten sehr hoch sind. Eine geringe Erhöhung der Prüf- und Fehlerverhütungskosten bewirkt eine überproportionale Abnahme der Fehlerkosten, sodass die Gesamtkosten sinken. Dieser Zusammenhang gilt bis zu einem bestimmten Punkt, ab dem die Fehlerkosten nur noch unterproportional abnehmen und somit weitere Erhöhungen der Prüf- und Fehlerverhütungskosten nicht mehr kompensieren – die Gesamtkosten steigen. Somit sind nach diesem Modell eine kostenminimale und optimale Qualität nicht gleichzeitig zu erreichen. Abbildung 2.7 zeigt das Optimierungsmodell der

⁴ Z. T. auch als „Toleranzband“ bzw. „-bänder“ oder „Toleranzmenge“ bezeichnet.

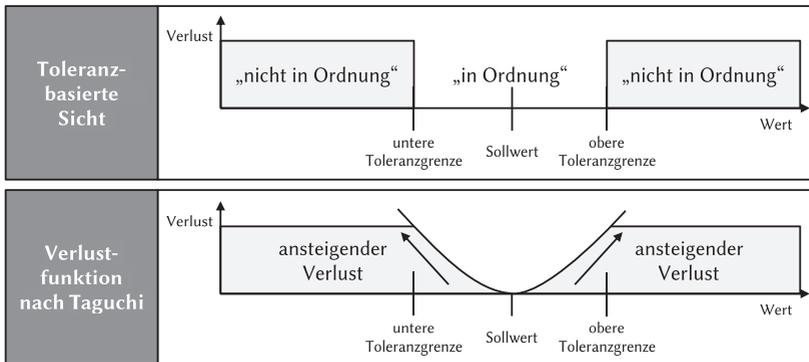


Abbildung 2.6: Taguchi-Verlustfunktion

Qualitätskosten in traditioneller und moderner Sicht nach BRÜGGEMANN UND BREMER [BRÜ15; LUN74]. Weiterhin werden im Rahmen des TQM unterschiedliche Erweiterungen vorgeschlagen. Aufgrund der ausreichenden Betrachtung werden diese jedoch nicht näher beschrieben. [BIE97; BRÜ15; WAL93]

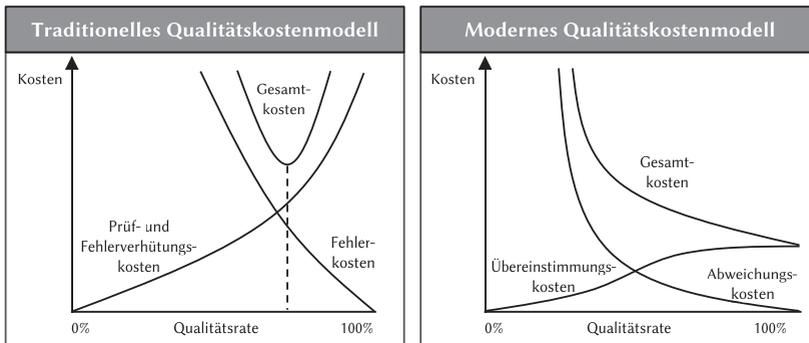


Abbildung 2.7: Traditionelles und modernes Qualitätskostenmodell

2.1.5 Qualitätskennzahlen

Nach BURKERT wird als Kennzahl⁵ jede Art von quantitativer Information bezeichnet, die über Sachverhalte Auskunft gibt. Kennzahlen können als absolute oder relative Zahlen vorliegen (z. B. Umsatz und Umsatzrendite) und zu einem Kennzahlensystem verbunden werden. [BUR08]

Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) veröffentlicht im VDMA-Einheitsblatt 66412-1 eine Gesamtheit von 22 Kennzahlen für ein Produktionssystem mit dem Ziel der Standardisierung von Leistungskennzahlen von Produktionssystemen. Zudem ist im VDMA-Einheitsblatt 66412-2 ein Wirkungsmodell für diese Kennzahlen definiert. Die in Anhang A vorgestellten produktionsbezogenen Qualitätsmerkmale stellen aus Sicht der AWF relevante Qualitätskennzahlen dar. Einige Kennzahlen basieren auf dem Zeitmodell des VDMA-Einheitsblattes 66412-1. Eine kompakte Beschreibung des Zeitmodells inkl. Anpassung auf den Bereich der Fahrzeugmontage ist in Anhang B beigefügt. Nachfolgend werden relevante Kennzahlen kurz erläutert.

Mitarbeiterproduktivität

Die *Mitarbeiterproduktivität* stellt das Verhältnis der auftragsbezogenen Arbeitszeit zur Gesamtanwesenheitszeit der Mitarbeiter dar. Sie gibt einen Hinweis auf den Grad des effektiven Einsatzes von Arbeitskräften. [NOR09]

Durchsatz und Taktzeit

Der *Durchsatz* repräsentiert das Verhältnis der produzierten Menge zur Durchlaufzeit und gibt Aufschluss über den Grad der Effizienz der Produktion. Die Durchlaufzeit hingegen ist die Zeitspanne, welche von Beginn der Bearbeitung bis zur Fertigstellung eines Erzeugnisses benötigt wird. [NOR09] Der Kehrwert des Durchsatzes repräsentiert die *Taktzeit* und gibt die Zeitspanne zwischen Fertigstellung des letzten und des darauffolgenden Produktes wieder.

⁵ Englisch als „Performance Indicator“ oder „Key Performance Indicator“ (KPI) bezeichnet.

Nutzungsgrad

Der *Nutzungsgrad* ergibt sich aus dem Verhältnis der Hauptnutzungszeit zur Belegungszeit und gibt die Produktivität der Produktionseinheit wieder. Nur die Hauptnutzungszeit ist wertschöpfend und besitzt eine hohe Relevanz. [NOR09]

Overall Equipment Effectiveness

Die *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) ist das Maß für den Wirkungsgrad einer bzw. mehrerer Produktionseinheiten und umfasst die Verfügbarkeit, Effektivität und Qualitätsrate der Produktionseinheit in einer Kennzahl. [NOR09]

Verfügbarkeit

Die *Verfügbarkeit* repräsentiert den Grad zu dem das Betrachtungsobjekt für eine Nutzung zur Verfügung steht. Diese wird über den Quotienten aus der Hauptnutzungszeit und der Planbelegungszeit ermittelt. [NOR09]

Effektivität und Qualitätsrate

Die *Effektivität* ist eine Maßzahl für die Leistung eines Prozesses und stellt das Verhältnis des Istwertes zum Sollwert dar. Diese zeigt, wie anforderungsgerecht innerhalb der Hauptnutzungszeit produziert wird. [NOR09] Eine qualitätsbezogene Betrachtung der Effektivität erfolgt durch die *Qualitätsrate*. Diese gibt das Verhältnis der Gutmenge zur produzierten Gesamtmenge wieder [NOR09]. In der Automobilproduktion wird auch vom „Geradeauslauf“ gesprochen.

Zusätzlich stellt der VDMA im Einheitsblatt 66412-1 weitere Kennzahlen bereit, welche z. T. in dieser Arbeit durch andere Kennzahlen abgedeckt sind [NOR09]. Dies sind u. a. die Ausschuss- und Nacharbeitsquote.

2.1.6 Qualitätsmanagement

Zur Erreichung der gesetzten Effizienz- und Effektivitätsziele umfasst das Qualitätsmanagement (QM) ein weites Spektrum von Aktivitäten. Das QM hat die Aufgabe, Ziele zu definieren, Fortschritte mess- und bewertbar zu machen, lösungskonforme Methoden situationsgerecht bereitzustellen und gewonnene Erkenntnisse zurückzukoppeln. Diese dienen als Ausgangspunkt für Verbesserungen im Unternehmen. In diesem ganzheitlichen Ansatz ist das QM Treiber der Integrationstätigkeiten verschiedenartiger Managementsysteme. [SCH15]

Nach GEIGER lässt sich das QM in fünf Disziplinen aufteilen [GEI08]:

- | | |
|---|--------------------------|
| 1. Qualitäts- bzw. Forderungsplanung | 3. Qualitätssicherung |
| 2. Qualitätslenkung | 4. Qualitätsprüfung |
| | 5. Qualitätsverbesserung |

Im Rahmen des QM existieren zudem Qualitätswerkzeuge auf Basis grafischer Methoden. Diese sollen qualitätsbezogene Probleme aufzeigen, zum besseren Verständnis beitragen und Hinweise zu Verbesserungsmaßnahmen liefern. Sie werden daher zur Qualitätsverbesserung eingesetzt. Eine Teilmenge wird in der Literatur als „die sieben⁶ elementaren Qualitätswerkzeuge“ (Q7) bezeichnet, welche unterschiedlich selektiert werden. Eine Standardauswahl an sieben Qualitätswerkzeugen wurde um 1960 von einer Arbeitsgruppe des japanischen Wissenschaftlers ISHIKAWA getroffen. Diese Auswahl umfasst folgende Qualitätswerkzeuge [LIN11]:

- | | |
|----------------------|------------------------|
| 1. Fehlersammelkarte | 5. Flussdiagramm |
| 2. Histogramm | 6. Qualitätsregelkarte |
| 3. Pareto-Diagramm | 7. Streudiagramm |
| 4. Ishikawa-Diagramm | |

⁶ Die Festlegung von sieben Werkzeugen entspringt der japanischen Tradition. Die Zahl 7 gilt in Japan als Glückszahl. [BRÜ15]

Weiterhin wird auch das Netzdiagramm als grafisches Qualitätswerkzeug verwendet. Einige Anwender wählen zudem das Brainstorming als elementares Werkzeug des QM. Diese ist jedoch eine Methode zur Ideengewinnung und nicht äquivalent mit den oben erwähnten Werkzeugen zu sehen [LIN11].

2.2 Regelungsbezogene Grundlagen

2.2.1 Steuerung und Regelung

Die Steuerungs- und die Regelungstechnik sind Gebiete der Automatisierungstechnik. Diese zielt darauf ab, technische Prozesse optimal zu managen. Dabei sollen die Tätigkeiten von Automaten übernommen werden, ohne dass der Mensch regelmäßig eingreifen muss. [TRÖ15]

Eine *Steuerung* bezeichnet die zielgerichtete Beeinflussung eines dynamischen Systems ohne Rückkopplung. Dabei ist ein dynamisches System eine Funktionseinheit, von deren Kenngrößen einige eine Funktion der Zeit sind. Die klassische Form der schematischen Darstellung ist das Blockschaltbild. Die Grundstruktur eines Blockschaltbildes ist in der Literatur einheitlich, jedoch können die Symbole der einzelnen Parameter variieren. Abbildung 2.8 zeigt das Blockschaltbild einer einfachen Steuerung nach LUNZE [LUN16].

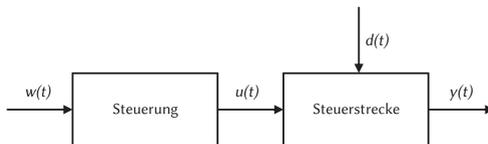


Abbildung 2.8: Blockschaltbild einer Steuerung

Das Steuerungsziel ist eine Angleichung der Steuergröße $y(t)$ an den Wert der Führungsgröße $w(t)$. Dazu wirkt eine Stellgröße $u(t)$ auf die Steuerstrecke ein. Eine konstante Führungsgröße wird auch als Sollwert bezeichnet. [LUN16]

Damit das Steuerungsziel ohne Rückführung erreicht werden kann, müssen nach LUNZE zwei Bedingungen erfüllt werden:

1. Die dynamischen Eigenschaften der Steuerstrecke müssen im Vorfeld bekannt sein.
2. Die Steuerstrecke darf nicht von Störgrößen beeinflusst werden, da auf diese nicht reagiert werden kann.

Falls die Bedingungen nicht erfüllt werden können, ist eine Steuerung ungeeignet – es Bedarf einer *Regelung*. Die wesentliche Unterscheidung ist das vorhandene Rückkopplungsprinzip [TRÖ15]. Eine Regelung hat die Möglichkeit, auf unerwartete Reaktionen des dynamischen Systems, die auf Störgrößen oder eine ungenaue Kenntnis der dynamischen Eigenschaften zurückzuführen sind, reagieren zu können. Abbildung 2.9 zeigt das Blockschaltbild der Grundstruktur eines Regelkreises (RK) nach LUNZE [LUN16].

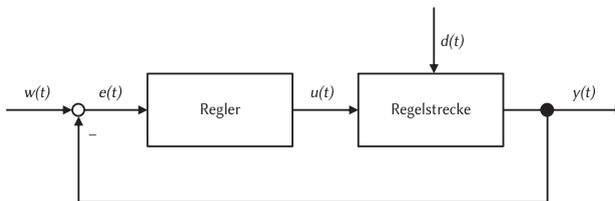


Abbildung 2.9: Blockschaltbild einer Regelung

Auch bei der Regelung besteht das Ziel darin, die Regelgröße $y(t)$ der Führungsgröße $w(t)$ anzugleichen. Die Regelabweichung $e(t)$ soll folglich minimiert werden. Die Aufgabe des Reglers ist es, die Stellgröße $u(t)$ so

einzustellen, dass sie der Regelabweichung $e(t)$ entgegenwirkt. Die Regelgröße $y(t)$ ist abhängig von der Stellgröße $u(t)$ und von Störgrößen $d(t)$, die auf die Regelstrecke einwirken. [LUN16] Anhang C zeigt ein vollständiges Abbild des technischen RK nach DIN IEC 60050-351 [NOR14a].

Die prinzipielle Wirkungsweise eines RK lässt sich in drei Schritte einteilen:

1. **Messen:** Die Regelgröße wird direkt gemessen oder aus anderen Messgrößen berechnet.
2. **Vergleichen:** Der Wert der Regelgröße wird mit dem Wert der Führungsgröße verglichen. Die Differenz ist die Regelabweichung.
3. **Stellen:** Aus der Regelabweichung wird unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke die Stellgröße bestimmt.

Darüber hinaus sind in der Wissenschaft vier Güteanforderungen einer Regelung definiert [LUN16; TRÖ15; SCH15]:

1. Genauigkeit 2. Schnelligkeit 3. Stabilität 4. Robustheit

Die *Genauigkeit* beschreibt die stationäre Regelgüte. Die Regelgröße $y(t)$ soll der Führungsgröße $w(t)$ asymptotisch ohne bleibende Regeldifferenz folgen. Die Forderung wird durch Formel 2.1 deutlich [TRÖ15].

$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} (e(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} (w(t) - y(t)) = 0 \quad (2.1)$$

Die *Schnelligkeit* bezeichnet die dynamische Regelgüte. Sie beschreibt das Übergangsverhalten, wenn sich die Regelgröße $y(t)$ der Führungsgröße $w(t)$ annähert. Idealerweise folgt die Regelgröße der Führungsgröße ohne Verzögerung und Überschwingung. Daher wird eine Schnelligkeitsforderung definiert, die als Differenzfläche zwischen den Kurven der Führungs- und Regelgröße in einem Sprungsignal verstanden werden kann. [LUN16; TRÖ15]

Eine weitere Güteforderung ist die *Stabilität*. Ein RK muss asymptotisch stabil sein. Ist dies erfüllt, so reagiert der RK auf endliche Führungs- und Störsignale mit einem endlichen Ausgangssignal. Instabilität tritt auf, wenn z. B. bei der Rückkopplung Verzögerungen auftreten und der Regler nicht entsprechend auf die Regelabweichung $e(t)$ reagieren kann. Bei technischen RK kann dies zu sich immer weiter verstärkenden Überschwingungen führen. [LUN16; TRÖ15]

Als vierte der Güteforderungen schließt sich die *Robustheit* an. Ein RK ist robust, wenn die drei zuvor beschriebenen Forderungen auch dann erfüllt sind, sofern das Modell Abweichungen zur realen Regelstrecke im Verhalten zeigt [LUN16; TRÖ15]. Dies tritt auf, wenn die Regelstrecke nur unvollständig bekannt ist oder Modellvereinfachungen gemacht wurden.

2.2.2 Qualitätsregelung

Die Regelungstechnik ist eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft, da dynamische Systeme und deren Regelung in vielen Bereichen Anwendung finden [LUN16]. Daher ist die grundlegende Struktur von RK auch für das QM in Form von Qualitätsregelkreisen (QRK) adaptierbar. QRK bestehen grundsätzlich „aus der Ausführung einer Tätigkeit, der anschließenden Feststellung der Qualität durch die Erfassung der Merkmalswerte der produzierten Einheit und der Auslösung von Korrekturmaßnahmen bezüglich der Tätigkeit und dem Umfeld“ [BRÜ15]. Auch wenn grundlegende Prinzipien der Regelungstechnik in QRK wiederzufinden sind, ist die Analogie zur klassischen Regelungstechnik eher oberflächlich [BET04]. QRK bilden dennoch die Basis wirksamer Prozesse zur Fehlerabstellung und -vermeidung [SCH11a].

In der Fahrzeugmontage, die durch einen hohen Anteil an manueller Arbeit gekennzeichnet ist [ELM16], sind sozio-technische QRK von großer Bedeutung. Charakteristisch für sozio-technische QRK ist das Vorhandensein von Menschen, welche die Funktionen der RK-Elemente ausführen [CAR98]. Bei der Anwendung des RK im QM wird ein reibungsloser Ablauf sämtlicher qualitätsrelevanter Prozesse bezweckt. Dabei werden modellhaft die

Wirkungszusammenhänge und Informationsbeziehungen zwischen den Prozessen beschrieben [WIL06]. Ein QRK dient somit der Weitergabe von qualitätsrelevanten Informationen im Unternehmen, auf deren Basis Entscheidungen und Maßnahmen getroffen werden [LIN11; SCH96]. Abbildung 2.10 zeigt das sozio-technische QRK-Modell nach WILHELM in Anlehnung an PFEIFER [WIL06; PFE01].

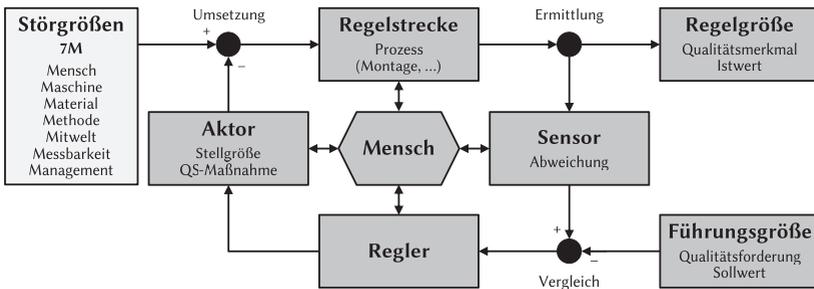


Abbildung 2.10: Sozio-technisches Qualitätsregelkreismodell

Entsprechend dem wichtigsten Grundprinzip der Regelungstechnik, wird durch die Rückkopplung von Informationen Auskunft über die Erfüllung von Qualitätsanforderungen gegeben [LUN16; WIL06]. Die Begrifflichkeiten des QRK sind analog zu denen des technischen RK wie folgt definiert [SCH11a; SCH15]:

- **Regelstrecke:** Die Regelstrecke stellt den Fertigungsprozess dar. Jedoch werden hier nicht nur rein physikalische und technische Abläufe, sondern sämtliche qualitätsrelevante Tätigkeiten beschrieben.
- **Führungsgröße / Sollwert:** Die Führungsgröße entspricht dem vom QM definierten Sollwert des zu produzierenden Qualitätsmerkmals.

- **Regelgröße / Istwert:** Die Regelgröße bezeichnet den Istwert des Qualitätsmerkmals und kann am Produkt gemessen oder geprüft werden.
- **Messglied / Sensor:** Der Sensor ist für die Überwachung der Qualität sowie für die Erstellung und Filterung qualitätsrelevanter Informationen aus den Ausgangsdaten der Regelstrecke zuständig.
- **Regler:** Der Regler ist für die Bewertung und Interpretation der vom Sensor entdeckten Abweichungen zuständig. Auf dieser Basis werden Entscheidungen und Maßnahmen zur Abweichungskorrektur getroffen.
- **Stellglied / Aktor:** Der Aktor bzw. das Stellglied soll Maßnahmen zur Korrektur an den richtigen Stellen einsteuern und umsetzen.

QRK können verschiedene Funktionen und Ebenen haben. Es lassen sich nach SCHMITT UND PFEIFER vier Typen von RK unterscheiden [SCH15]:

1. **Maschineninterne RK:** Die Informationen zur Regelung werden direkt an der Maschine abgegriffen. Diese RK sind i. d. R. automatisiert.
2. **Maschinennahe RK:** Die zur Regelung erforderlichen Informationen werden ermittelt, nachdem das Produkt den Prozess verlassen hat. Das kann bspw. durch Prüfungen am Ende des Prozesses erfolgen.
3. **Ebeneninterne RK:** Die Regelung erfolgt innerhalb einer Organisationseinheit. Die maschineninternen und -nahen RK sind Teil dieser Ebene.
4. **Ebenenübergreifende bzw. vermaschte RK:** Verschiedene RK werden übergreifend miteinander kombiniert (Vermaschung). Größere RK kontrollieren dabei die Funktionalität kleinerer RK.

Nach LINß ergeben sich zwei weitere Typen von QRK. Der erste Typ unterscheidet zwischen Produkt- und Prozessregelkreis. Der *Produktregelkreis*

ist auf die Qualitätsmerkmale des Produktes gerichtet, während der *Prozessqualitätsregelkreis* auf die Qualitätsmerkmale des Prozesses gerichtet ist. Für eine qualitätsgerechte Leistung ist folglich eine Kombination notwendig. [LIN11]

Der zweite Typ unterscheidet zwischen kleinen (direkten) und großen (indirekten) QRK. *Kleine QRK* können direkt die Qualitätserzeugung im Herstellungsprozess steuern und haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Fertigungsschritte. *Große QRK* überprüfen und bestätigen die Qualität im Herstellungsprozess. Sie haben einen indirekten bzw. zeitverzögerten Einfluss auf die Qualitätserzeugung. Rückkopplungen haben Einfluss auf zukünftige Qualitätsergebnisse. Zu den großen QRK gehören die nachträglichen Korrekturmaßnahmen, wie die Aussortierung von gefertigten Produkten. [LIN11]

WECKENMANN und BETTIN unterscheiden zudem zwischen vorwärts- und rückwärtsverketteten QRK. Ein *vorwärtsverketteter QRK* gibt Informationen an nachfolgende Prozessschritte weiter. Alle vorgenommenen Prozessänderungen betreffen das aktuelle Produkt. Ein *rückwärtsverketteter QRK* umfasst die Rückmeldung zur Qualitätsregelung. Hier werden Prozessabweichungen erst in späteren Prozessstufen erkannt. Nachregelungen betreffen nicht mehr das aktuell produzierte Teil, sondern künftige Teile. Bei Auftreten eines Problems gibt der rückwärtsverkettete QRK die Fehlermeldung an vorgelagerte Prozessstufen zurück. Bei Empfang einer Meldung kann die Regelung Maßnahmen initiieren, um den Prozess wieder auf die Sollwerte einzustellen. [BET04; LIN11]

Weiterhin unterscheiden HERING ET AL. nach dem Betrachtungsobjekt der Qualitätsregelung. Dabei differenzieren sie zwischen dem *Prozess-QRK*, *Teile-QRK* und *Produkt-QRK*. [HER03]

Eine praktische Anwendung vermaschter QRK in der Industrie zeigt die Arbeit von SCHUKRAFT am Beispiel der Audi AG [SCH02b]. Diese vermaschten QRK sind stark an die etablierten vier Typen von QRK angelehnt und auf die Fertigung der Automobilindustrie adaptiert.

2.3 Informationstechnische Grundlagen

2.3.1 Information und Wissen

Zur Verknüpfung der Begriffe *Information* und *Wissen* existiert ein wissenschaftlich-etablierter Konsens. Dieser wird in der Wissenstreppe dargestellt. Abbildung 2.11 zeigt die Wissenstreppe [LEH08; BEA11; NOR16].

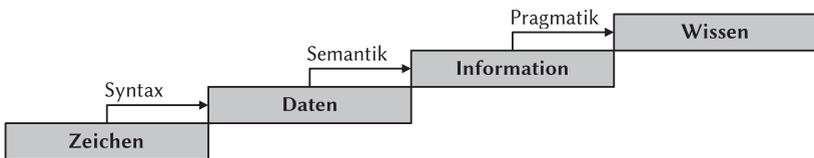


Abbildung 2.11: Wissenstreppe

Zeichen werden mithilfe von Regeln zu Daten. Daten können Zeichenfolgen oder Symbole sein, die noch nicht interpretiert sind (z. B. „93“). Über einen Bedeutungskontext werden Daten zu Informationen (z. B. „93%“). Wissen entsteht, wenn Informationen verknüpft und in einen Kontext gebracht werden (z. B. „93% der produzierten Fahrzeuge sind fehlerfrei“). Informationen sind der Rohstoff, aus dem Wissen generiert wird, und die Form, in der Wissen kommuniziert und gespeichert wird. [NOR16]

Die klassische Wissenstreppe kann um die Begriffe „Handeln“, „Kompetenz“ und „Wettbewerbsfähigkeit“ erweitert und in einen unternehmerischen Kontext eingebettet werden. Handeln bedarf der Anwendung von Wissen und Motivation. Richtiges Handeln erzeugt Kompetenz, die eine Grundlage für Wettbewerbsfähigkeit sein kann. [NOR16]

2.3.2 Informationssysteme und Informationslogistik

Ein System stellt eine aus mehreren Elementen und Beziehungen bestehende Einheit dar, die sich mit einer Systemgrenze von der Systemumwelt abgrenzt. Die einzelnen Elemente können grundsätzlich Materie, Energie oder Informationen miteinander oder mit der Systemumwelt zweckmäßig austauschen. Ein System kann in Subsysteme untergliedert werden, welche über Schnittstellen miteinander verbunden sind. [HAB15] Abbildung 2.12 zeigt den Aufbau des Systemdenkens nach HABERFELLNER [HAB15].

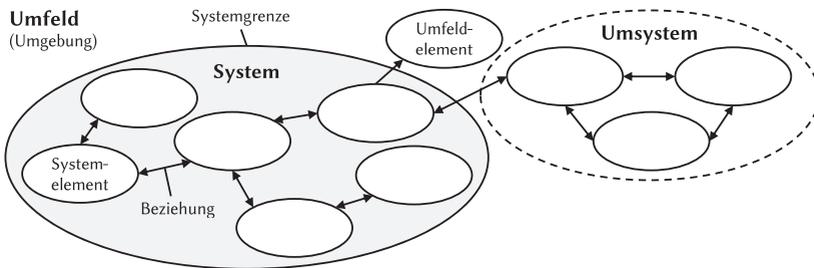


Abbildung 2.12: Aufbau des Systemdenkens

Ein *Informationssystem* (IS) repräsentiert ein sozio-technisches System zur Versorgung der Nutzer mit Informationen. Sozio-technische Systeme werden durch ein emergentes⁷, nicht deterministisches Verhalten und durch einen komplexen Aufbau charakterisiert. Sie enthalten sowohl maschinelle als auch natürliche Komponenten. Ein IS besteht aus Hardware und Software sowie Benutzern und wird als Bestandteil einer Informationsinfrastruktur betrachtet. [LEH08; HAN15]

⁷ „Emergentes“ Verhalten bezeichnet das sinnvolle Zusammenwirken von Komponenten, so dass die Fähigkeiten des Systems über die Fähigkeiten der Komponenten hinausgehen [QUA00].

Eine prozessuale Sicht auf Informationen und Informationsflüsse der IS ermöglicht die *Informationslogistik*. Nach dem St. Galler Konzept wird darunter die Planung, Steuerung, Durchführung und Kontrolle der Gesamtheit der Datenflüsse verstanden, die über eine Betrachtungseinheit hinausgehen, sowie die Speicherung und Aufbereitung der Daten [SEG13]. Das Ziel ist die anwendergerechte Bereitstellung von relevanten Informationen in geeigneter Qualität zur Befriedigung der Informationsbedarfe. [DIN08]

2.3.3 Informationsmodelle und Referenzmodelle

Ein Modell beschreibt ein System, das einen Sachverhalt vereinfachend, abstrakt und zweckorientiert abbildet. Da Systeme komplexe Gebilde darstellen, ist ein Modell ein Hilfsmittel zur Erfassung und Analyse dieser Sachverhalte. [HAN15; KRA13] Das methodische Vorgehen zur Modellierung wird durch Abbildung 2.13 nach KRALLMANN ET AL. beschrieben [KRA13].

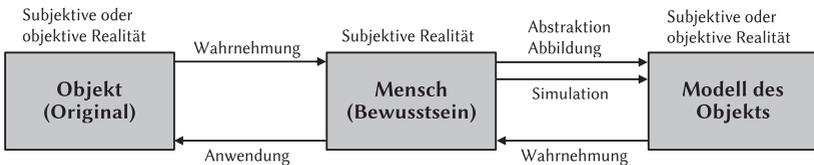


Abbildung 2.13: Prinzip der Modellierung

Bei der Modellbildung werden die relevanten Merkmale des Originals auf das Modell übertragen und dabei die irrelevanten Merkmale abstrahiert. Ein Modellexperiment beschreibt eine Manipulation des Modells, die Erkenntnisse über das Modell und damit über das Original generieren soll. Aus diesen Erkenntnissen leiten sich Analogieschlüsse ab. In einem letzten Schritt werden die gewonnenen Erkenntnisse auf das Original angewendet. [HAN15; KRA13]

Insbesondere findet die allgemeine Modelltheorie nach STACHOWIAK breite Akzeptanz [VOM15; SCH98]. In seiner Theorie sind drei wesentliche

Merkmale von Modellen von Bedeutung: Modelle sind Abbildungen und repräsentieren Originale (Abbildungsmerkmal). Jedoch sind Modelle auch Abstraktionen und verkürzen das Original auf die für den Nutzer relevanten Attribute (Verkürzungsmerkmal). Außerdem werden die durch das Modell abzubildenden Attribute pragmatisch nach den Teilaspekten der Zeitlichkeit, Intentionalität und Subjektivität ausgewählt (pragmatisches Merkmal). [STA73]

Zur Modellierung von IS werden *Informationsmodelle* bzw. *Informationssystemmodelle* verwendet. Ein Informationsmodell ist ein immaterielles Abbild des betrieblichen Objektsystems aus Sicht der verarbeiteten Informationen zum Zweck der Organisations- und Anwendungssystemgestaltung [BEC04; MAI99] und der Beschreibung relevanter Informationen eines Systems [SCH98]. In der Regel sind Informationsmodelle reine Beschreibungsmodelle [WÖH16; BAS04], die keinen Entscheidungscharakter aufweisen, sondern sich auf die reine Darstellung von Strukturen, Zusammenhängen und Prozessen beschränken [NKO06].

KRALLMANN ET AL. definieren drei Arten von Informationsmodellen [KRA13]. Ein *Idealmodell* umfasst Verbesserungsvorschläge, die sich aus dem Istmodell ableiten. Ein *Unternehmensmodell* ist durch seinen individuellen Charakter auf ein Unternehmen zugeschnitten. Ein *Metamodell* ist unabhängig von der Problemstellung und dient zur Erstellung anderer Modelle. Dadurch sind sie grundsätzlich abstrakter als die durch sie beschriebenen Modelle.

Ähnlich unterscheiden HANSEN ET AL. folgende drei Modellarten. Ein *Istmodell* dient zur Abbildung des gegenwärtigen Zustands und hat einen dokumentierenden Charakter. Im Gegensatz liefert ein *Sollmodell* ein entsprechendes Zielbild zu einem Sachverhalt und besitzt einen entwerfenden Charakter. Weiterhin dient ein *Referenzmodell* zur Abstraktion eines Sachverhalts zwecks Lösung einer allgemeinen Problemstellung, wodurch das Modell als Vergleichsbasis dienen kann. Dabei besitzt es einen inspirierenden Charakter. [HAN15].

Der Begriff „Referenz“ beschreibt eine Empfehlung bzw. Person oder Stelle zwecks Auskunft über etwas bzw. jemanden [DUD17] und ist somit ein Verweis auf einen Bezugspunkt [NKO06]. Der Begriff des Referenzmodells beinhaltet folglich den Empfehlungscharakter [DAN04]. Auch SCHEER ET AL. betonen den Sollcharakter von Referenzmodellen [SCH94a]. Im Zusammenhang mit dem Modellverständnis können Referenzmodelle als Ausprägungsform von Informationsmodellen verstanden und als Referenz-Informationsmodelle definiert werden [VOM15; SCH98].

In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen des Referenzmodellbegriffs [HAR94; SCH98; REI99; REM01]. Dabei ist die Definition nach SCHÜTTE die am weitesten verbreitete. Demnach ist ein Referenzmodell das Ergebnis einer Konstruktion eines Modellierers, der für Anwendungssystem und Organisationsgestalter Informationen über allgemeingültig zu modellierende Elemente eines Systems zu einer Zeit als Empfehlungen mit einer Sprache deklariert, sodass ein Bezugspunkt für ein IS geschaffen wird [SCH98].

2.3.4 Architekturmuster nach MVC

Architektur- und Entwurfsmuster sowie Referenzarchitekturen repräsentieren Schablonen für unterschiedliche Softwarearchitekturen. *Entwurfsmuster* verkörpern erweiterbare Klassen eines Systems in bestimmten Rollen, die durch ihr Zusammenwirken eine bestimmte Problemstellung lösen. *Architekturmuster* sind gröbere Einheiten als Entwurfsmuster und können mehrere verschiedene Entwurfsmuster beinhalten. *Referenzarchitekturen* sind wiederum gröbere Muster als Architekturmuster, da sie verschiedene Architekturmuster enthalten können und zusätzlich individuell zu entwickelnde Teile umfassen. Im Gegensatz zu Referenzarchitekturen enthalten Architektur- und Entwurfsmuster keine individuellen Anteile, die sich auf das fachliche Problem beziehen. [GOL14]

Ein informationstechnisches Architekturmuster ist *Model-View-Controller* (MVC). Es dient zur Trennung der Darstellung und der interaktiven Eingabe der Mensch-System-Schnittstelle von dem Daten haltenden und

verarbeitenden Model [GOL14]. Der Grundgedanke ist die Zerlegung einer interaktiven Anwendung in drei Komponenten als getrennte Präsentation⁸ und Beobachter-Muster zur Synchronisation von Model und View⁹ [VIE15]. Die Aufgaben dieser Komponenten sind dabei nach GOL [GOL14]:

- **Model:** Das Model umfasst die Kernfunktionalität und kapselt die Verarbeitung sowie die Daten des Systems.
- **View:** Eine View stellt die Daten für den Benutzer dar. Sie erhält die darzustellenden Daten vom Model.
- **Controller:** Ein Controller ist für die Entgegennahme der Eingaben des Benutzers und ihre Interpretation verantwortlich.

Die verschiedenen Funktionen eines Programms in unterschiedlichen Teilen einer Lösung zu realisieren, ist ein generelles Bestreben in der Programmentwicklung¹⁰. Daher sollten die Datenhaltung und Verarbeitung, die Präsentationslogik sowie die Interpretation der Benutzereingaben in eigenen Komponenten isoliert programmiert und nicht vermischt werden. Dies verbessert die Struktur und die Wartbarkeit der Anwendung. Da Model, View und Controller getrennte Komponenten darstellen, können identische Daten über verschiedene Views dargestellt werden. [GOL14; BAL11; GAM03; LAH18]

2.3.5 IT und Produktion

Die Digitalisierung der Produktionsprozesse wird sowohl in der Literatur als auch in der Industrie unpräzise und vielschichtig beschrieben. Diverse Begriffe zur Umschreibung und Definition der digitalen Transformation sowie die Vermischung unterschiedlicher Konzepte erschweren eine strukturierte Darstellung des aktuellen Wandlungsprozesses. Eine relevante Schnittmenge zur vorliegenden Arbeit bilden die nachfolgenden Themen.

⁸ Vgl. „Separated Presentation“ nach FOWLER [FOW06].

⁹ Vgl. „Observer Synchronization“ nach FOWLER [FOW06].

¹⁰ Vgl. Trennung der Belange bzw. „separation of concerns“.

Das *Internet der Dinge* bzw. *Internet of Things* (IoT) beschreibt die Verbindung eindeutig identifizierbarer Objekte mit einer dem Internet äquivalenten Struktur zur Unterstützung oder Substitution des Menschen [ASH09]. Die Industrie hat eine speziell auf ihr Umfeld zugeschnittene Variante des IoT geprägt, die als „Industrial Internet of Things“ (IIoT) bezeichnet wird. [SOL17; BOR17] Konkrete Beiträge zum IIoT innerhalb der Fabrikautomatisierung sind in einem „Special Issue“ von 2016 zusammengetragen [BEY16].

Zum Begriff *Industrie 4.0* finden sich in der Literatur unterschiedliche Definitionsansätze. Die Definition nach BITKOM UND FRAUNHOFER IAO kann für den Begriff repräsentativ verwendet werden. Nach dieser steht im Mittelpunkt von Industrie 4.0 die echtzeitfähige, intelligente, horizontale und vertikale Vernetzung von Menschen, Maschinen, Objekten und IKT-Systemen¹¹ zum dynamischen Management von komplexen Systemen [BAU14]. Eine Zusammenführung von relevanten Beiträgen zur Industrie 4.0 findet sich u. a. in einem „Special Issue“ von 2015 [BEY15b]. Zusätzliche Ausführungen und grafische Darstellungen zur Industrie 4.0 sind in Anhang D zu finden.

Die *intelligente Fabrik* bzw. *Smart Factory* kennzeichnet sich durch einen hohen Grad der Vernetzung ihrer Komponenten in Verbindung mit künstlicher Intelligenz zur Optimierung aller horizontalen und vertikalen Produktionsprozesse. Sowohl Maschinen als auch Produkte bzw. deren Bestandteile sollen über Datennetzwerke selbständig miteinander kommunizieren. [TSC14] Zudem soll der Mehrwert aus Produktionsdaten, -informationen und -wissen für Mitarbeiter bestmöglich zur Verfügung gestellt werden, um deren individuelle Fähigkeiten optimal zu verstärken [STO14]. Weiterhin befasst sich die intelligente Fabrik mit der Fehlerbehebung durch den Menschen bzw. durch die Systeme selbst. [KIE16; REI17]

Einen besonderen Stellenwert in der Produktion besitzt die *computergestützte Qualitätssicherung* bzw. *Computer Aided Quality Assurance* (CAQ) [JAC12]. Industrie 4.0 ermöglicht die Entwicklung neuer Ansätze und Lösungen bzgl. CAQ zur langfristigen Gewährleistung der Qualitätsziele [REI17]. Durch IoT nimmt die Menge an generierten Daten kontinuierlich

¹¹ Das Akronym „IKT“ bezeichnet die Informations- und Kommunikationstechnologie.

zu, die mittels Data Analytics Methoden ausgewertet werden können. Dies ermöglicht es, die Entstehung der Prozess- und Produktionsqualität zu begründen, vorauszusagen sowie aktiv über CAQ-Systeme zu regeln. [REI17; SCH15]

2.4 Zwischenfazit: Wissenschaftliche Grundlagen

Die qualitätsbezogenen Grundlagen liefern das notwendige Fundament zur Entwicklung des merkmalsbezogenen Qualitätskonzeptes in Kapitel 5 (Ergebnis 1) und zur Ableitung einer sachgerechten Definition der montage-spezifischen Produktionsqualität in Kapitel 6 (Ergebnis 2). Die bestehende Qualitätsdefinition nach ISO ist für die Qualitätsbetrachtung zunächst ausreichend, ebenso die Verwendung von Qualitäts- und Prüfmerkmalen zur Beschreibung der Qualität eines Betrachtungsobjektes. Der Qualitätskreis wird zur späteren Eingrenzung des Betrachtungsbereiches benötigt. Weiterhin bieten Qualitätskosten im traditionellen dreigeteilten Kostenmodell eine relevante Basis. Qualitätsbezogene Kennzahlen liefern ebenso wichtige Instrumente zur Bewertung und Regelung der Produktionsqualität. Des Weiteren repräsentieren die genannten Qualitätswerkzeuge relevante Ansätze zum Aufbau eines generischen Qualitätswerkzeugs in Kapitel 9 (Ergebnis 5).

Die regelungstechnischen Grundlagen tragen zur Entwicklung des informationstechnischen Referenzmodells einer hybriden Qualitätsregelung in Kapitel 7 (Ergebnis 3) bei. Zum einen dienen technische RK zur konzeptuellen Modellierung des Regelungssystems, bei der die Elemente des technischen RK adaptiert werden. Zum anderen ermöglicht die konkrete Anwendung der QRK eine technische Implementierung einer Qualitätsregelung.

Die informationstechnischen Grundlagen zeigen bestehende Standards im Kontext dieser Arbeit und unterstützen bei der Entwicklung beider Modelle (Ergebnis 3 und 4). Informations- und Referenzmodelle stellen die theoretische Grundlage zur Konzeptionierung dar. Informationen und Wissen nehmen zentrale Rollen in der Qualitätsregelung und dieser Arbeit ein.

Insbesondere die Visualisierung von Informationen in Kapitel 8 und das Management von Informationen in Kapitel 7 werden sachgerecht konzeptioniert. Zur Qualitätsregelung der Produktionsqualität sind zudem geeignete IS sowie eine zugehörige Informationslogistik erforderlich und verkörpern entscheidende Bausteine innerhalb dieser Arbeit. Die Strukturierung des IS verfolgt das Architekturmuster MVC für eine adäquate Struktur des Konzeptes. Zudem kann die Ausrichtung dieser Arbeit der IT-gestützten Qualitätssicherung zugeordnet werden.

3 Stand der Forschung und Industrie

„Das Problem zu erkennen ist wichtiger als die Lösung zu erkennen, denn die genaue Darstellung des Problems führt zur Lösung.“

ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955)

Zur Detaillierung der Ausgangssituation und Kennzeichnung bestehender Lösungsansätze ist eine Darstellung zum Stand der Forschung und Industrie erforderlich. Nach Eingrenzung des Betrachtungsbereiches erfolgt dazu eine Analyse sowohl zum Status Quo der Fahrzeugmontage und der relevanten Defizite als auch zu bestehenden Lösungsansätzen.

3.1 Eingrenzung des Betrachtungsbereiches

In dieser Arbeit repräsentiert die Fahrzeugmontage den relevanten Ausgangspunkt der Betrachtung. Dennoch ist zur Spezifikation des Untersuchungsgegenstandes und zur Reduzierung der Komplexität des Gesamtsystems eine weitere Eingrenzung des Betrachtungsbereiches erforderlich. Diese erfolgt nach den drei Kriterien Prozess, Objekt und Subjekt.

Die *prozessbezogene Eingrenzung* dient zur Fokussierung der relevanten Prozesse zur hybriden Regelung der Produktionsqualität. Diese umfassen

den *Montageprozess* zum *Verbau*¹ von Bauteilen und zur Umsetzung qualitätsrelevanter Montageschritte. Ebenso betrachtet diese Arbeit den *Qualitätsprüfprozess* zur Prüfung von Montageumfängen auf Einhaltung der Toleranzbereiche. Weiterhin im Fokus sind sowohl der *Unterstützungsprozess* als auch der *Nacharbeitsprozess*, welche bei Nichteinhaltung der Toleranzbereiche angestoßen werden und eine Korrektur mittels Nacharbeit zur Erfüllung der definierten Qualitätsanforderungen umsetzen. Eine Beschreibung dieser Prozesse erfolgt in Unterabschnitt 3.2.5.

Die *objektbezogene Eingrenzung* des Betrachtungsbereiches filtert relevante Objekte des Montagesystems zur hybriden Regelung der Produktionsqualität. Relevante Objekte dieser Arbeit stellen das *Fahrzeug* und das *Bauteil* mit Bezug zum Produkt sowie die analogen und digitalen *IS* mit Bezug zur Produktion dar. Ebenso werden primär die *Produktionsqualität* und sekundär die *Produktqualität* als immaterielle Objekte betrachtet. Die Objekte werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit an geeigneter Stelle kontextbezogen erläutert.

Die *subjektbezogene Eingrenzung* spezifiziert jene Rollen im Montagesystem, welche die Prozesse an den Objekten durchführen. Dies sind der *Monteur*, *Unterstützer* und *Nacharbeiter* als wertschöpfende Ressourcen sowie der *Qualitätsprüfer* als prüfender Akteur. Ebenso werden zur Überwachung und prozessualen Regelung der *Qualitätsmanager* und der *Qualitätsingenieur* in die Betrachtung einbezogen, da diese in die hybride Qualitätsregelung eingebunden sind. Weitere Rollen des Montagesystems bleiben unberücksichtigt. Eine Beschreibung der Rollen erfolgt in Unterabschnitt 3.2.3.

3.2 Status Quo der Fahrzeugmontage

Die Erfassung des Status Quo der Fahrzeugmontage ist zur Identifikation bestehender Defizite und zur Ableitung von Anforderungen für eine effiziente hybride Qualitätsregelung erforderlich. Der nachfolgende Status Quo

¹ „Verbau“ steht synonym für die Montagetätigkeiten innerhalb des Montageprozesses.

begründet sich zum einen auf wissenschaftliche Literaturrecherchen zu diesem Thema. Zum anderen wurden Beobachtungen und Analysen in einem Produktionswerk eines deutschen Automobilherstellers durchgeführt.

3.2.1 Hierarchie der Automobilproduktion

Im Entstehungsprozess eines Fahrzeugs erfolgt die Produktion nach der Entwicklung der Baureihe, dem positiven Qualitätstest erster Prototypen und ggf. der Anpassung des bestehenden Produktionsprozesses. Der Produktionsprozess eines Fahrzeugs ist in vier Fertigungsbereiche² unterteilt [ASK08]:

1. Presswerk → 2. Rohbau → 3. Lackierung → 4. Montage

Im Presswerk werden die Karosseriebauteile gepresst und im Rohbau durch automatisierte Fertigungsinseln zu Karosserien verschweißt. In der ebenfalls automatisierten Lackierung erfolgt die Oberflächenbehandlung der Karosserien, welche anschließend im Produktionsbereich der Montage zu Fahrzeugen montiert werden. Abschließend erfolgt nach erfolgreicher Montage der Versand des Fahrzeugs, der jedoch nicht mehr zur Fertigung gehört. Die Montage ist somit der finale Produktionsschritt der Automobilproduktion. Abbildung 3.1 zeigt den allgemeinen Prozess der Automobilproduktion nach IHME [IHM06].

3.2.2 Struktur des Montagesystems

Die Montage unterteilt sich in das Teilefertigungssystem (Vormontage) und Montagesystem (Karosserie- und Endmontage).³ Im *Teilefertigungssystem* werden Bauteile als Einzelteile hergestellt und zu Baugruppen montiert, während im *Montagesystem* die Bauteile und Baugruppen zu Fahrzeugen montiert werden. [WIL00] Die traditionelle Struktur des Montagesystems wird in Abbildung 3.2 schematisch nach IMGRUND dargestellt [IMG14].

² Die Fertigungsbereiche werden auch als „Gewerke“ bezeichnet.

³ Im weiteren Verlauf dieser Arbeit vereinfachend als „Montage“ bezeichnet.

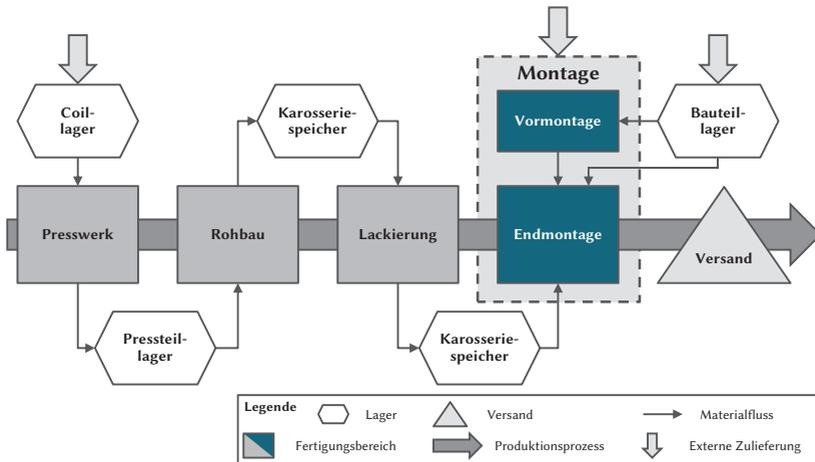


Abbildung 3.1: Allgemeiner Prozess der Automobilproduktion

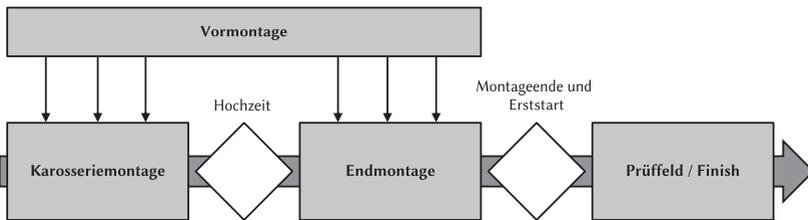


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Montagesystems

Die Separation zwischen Vor- und Endmontage ist die Konsequenz steigender Ausstattungsumfänge und Variantenvielfalt [HER12]. Insbesondere komplexe, kostenintensive oder variantenreiche Baugruppen werden in Vormontagen gefertigt (z. B. Cockpit, Türen oder Kabelbaum). Neben internen Vormontagen werden diverse Baugruppen bei externen Zulieferern montiert.

Mit Hilfe einer strukturierten Gliederung des Montagesystems in einzelne Subsysteme kann eine Reduzierung der Komplexität des Montagesystems erreicht werden. Abbildung 3.3 zeigt den organisatorischen Aufbau eines Montagesystems in Anlehnung an KOETHER und WILLNECKER [KOE86; WIL00].

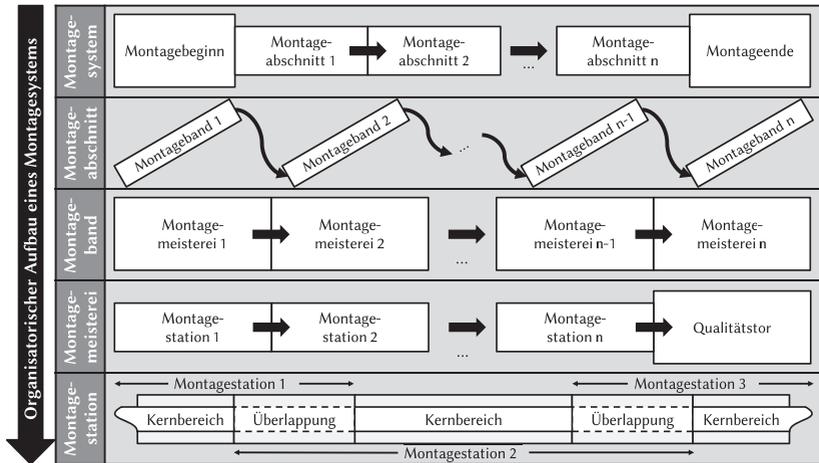


Abbildung 3.3: Hierarchische Beschreibung des Montagesystems

Ein *Montagesystem* bzw. eine *Montagelinie* umfasst mehrere Montageabschnitte zwischen Montagebeginn und Montageende. Grundsätzlich bildet eine Montagehalle ein Montagesystem ab. Auf der Hauptlinie wird das Fahrzeug als Endprodukt montiert. Die Vormontagen laufen zeitlich parallel zu den Hauptlinien. Die Umfänge der Vormontagen (Baugruppen) werden anschließend zu den einzelnen Verknüpfungspunkten der Hauptlinie in richtiger Sequenz⁴ angesteuert. Eine Montagelinie ist kein langes Montageband, sondern setzt sich aus mehreren, parallel angeordneten Montagebändern zusammen. Abbildung 3.4 zeigt eine exemplarische Montagelinie nach ROSCHER [ROS08].

⁴ Die Produktionslogistik erfolgt nach dem Prinzip „Just-In-Sequence“ (JIS).

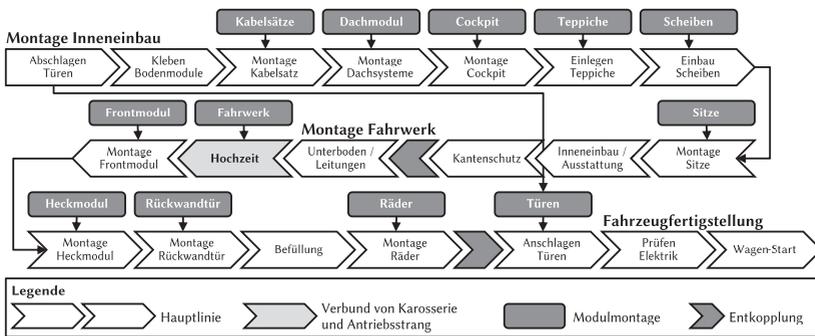


Abbildung 3.4: Exemplarische Montagelinie der Fahrzeugmontage

Ein *Montageabschnitt* besitzt einen individuellen Kernumfang und ist durch die Bereiche „Inneneinbau“, „Fahrwerk“ und „End of Line“ (EOL) kategorisiert. Im Inneneinbau wird das Interieur verbaut. Im Fahrwerk wird der Antriebsstrang montiert und mit der Karosserie verheiratet. Im EOL werden letzte Montageumfänge verbaut und Qualitätsmaßnahmen durchgeführt.

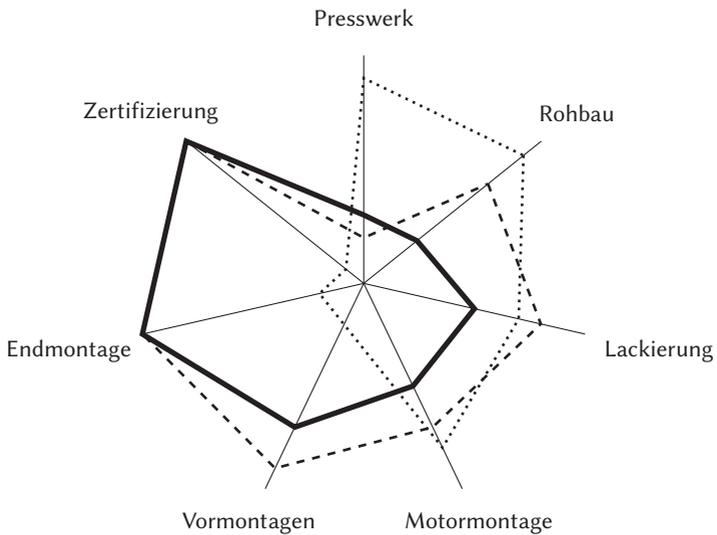
Ein *Montageband* ist das physische Teilabbild der Montagelinie und transportiert die Fahrzeuge durch das Montagesystem vom Montagebeginn bis zum Montageende. Es teilt sich in organisatorische Montageemeistereien auf, wobei ein Montageband mindestens eine Montageemeisterie umfasst. Die Bandgeschwindigkeit gibt den Montagetakt an, wobei durch die Berücksichtigung von Karosseriepuffern unterschiedliche Bandgeschwindigkeiten zwischen den einzelnen Montagebändern existieren können.

Eine *Montageemeisterie* bezeichnet eine Organisationseinheit im Montagesystem und umfasst mehrere Montagestationen, in denen Montagetätigkeiten ausgeführt werden [KOE86]. Für eine Montageemeisterie und deren Qualität sind Montageemeister verantwortlich. Zusätzlich schließt eine Meisterie i. d. R. mit einem prüfenden Qualitätstor (Q-Tor) ab.

Eine *Montagestation* ist der kleinste Wertschöpfungsbereich des Montagesystems. Diese besteht aus einem Kernbereich und einem Überlappungsbereich. Der Monteur hat im Kernbereich seinen primären Arbeitsbereich,

während der Überlappungsbereich für Montagetätigkeiten der vor- und nachgelagerten Montagestation verfügbar ist.

Während Presswerk, Rohbau und Lackierung sich durch automatisierte Produktionsprozesse auszeichnen, besteht in der Montage ein geringer Automatisierungsgrad [HUB16]. In Abbildung 3.5 nach KROPIK weist die Fahrzeugendmontage den höchsten manuellen Arbeitsanteil [KRO09; MIC10; LUŠ13] bzw. mit unter 5% einen geringen Automatisierungsgrad auf [ROS08].



Legende

..... Automatisierungsgrad - - - Sequenzfolgerichtigkeit — Variantenvielfalt

Abbildung 3.5: Charakteristika der Automobilproduktion

3.2.3 Rollen des Montagesystems

Abbildung 3.5 zeigt den besonders hohen Anteil manueller Tätigkeiten in der Fahrzeugmontage [FRA09; MIC10; ELM16]. Dieser ist insbesondere durch die hohe Variantenvielfalt und der damit verbundenen Komplexität in der Produktion begründet [MIC10; MIC15; JOH16]. So führen die wachsende Individualisierung der produzierten Fahrzeuge und die steigende Mixfertigung unterschiedlicher Varianten eines Grundtyps auf derselben Montagelinie zu einer deutlichen Steigerung der Komplexität in der Montage [DÖR13].

Durch manuelle Montage kann eine hohe Flexibilität bei der Ausführung der Montageoperationen erreicht und dadurch der steigenden Varianz effizient begegnet werden [AEH14; DÖR13; KRO09]. Die Erkenntnis, dass der Mitarbeiter mit seinen kognitiven Fähigkeiten zur Problemlösung der flexibelste Einsatzfaktor in einem produzierenden Unternehmen ist, fördert so die Höherbewertung von manuellen bzw. hybriden Montagestrukturen und damit des Produktionsfaktors Mensch [WAN17; WAN13].

Die Produktionsmitarbeiter verkörpern somit die Kernelemente der Fahrzeugmontage. Es existieren unterschiedliche Rollen zur Montage, Sicherung und Nacharbeit sowie zum Management der Qualität. Insbesondere der prüfende Quality Sensor, der regelnde Quality Controller und der wertschöpfende Quality Actuator stehen dabei im Fokus [SCH11b]. Somit kann das Montageumfeld als sozio-technische Qualitätsregelung kategorisiert werden. Abbildung 3.6 zeigt die relevanten Rollen des Montagesystems.

Monteur

Der *Monteur* arbeitet stationsbezogen und muss innerhalb der Taktzeit die geplanten Montageumfänge verbauen (Montageprozess). Neben der Montage ist der Monteur zur Selbstprüfung des Montageergebnisses verpflichtet. Somit umfasst der Aufgabenumfang des Monteurs die Koordination, Umsetzung und Selbstkontrolle der qualitätsherstellenden Maßnahmen. Zusätzlich hat der Monteur im Fehlerfall den Qualitätsmangel unter Berücksichtigung seiner Möglichkeiten nachzuarbeiten oder einen Unterstützer zu informieren.

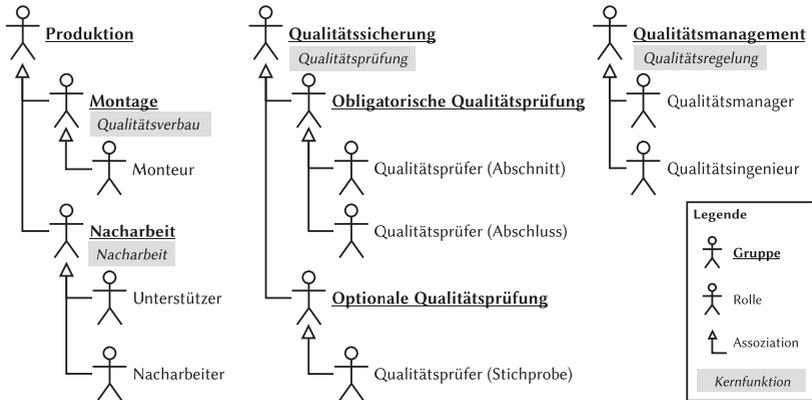


Abbildung 3.6: Rollen innerhalb eines Montagesystems

Unterstützer

Der *Unterstützer* ist als Wertschöpfungskraft bei Qualitätsstopps und Nacharbeiten in der Montagelinie für einen definierten Bereich (i. d. R. eine Montagemeisterei) unterstützend tätig (Unterstützungsprozess). Dieser kommt zum Einsatz, sobald ein Monteur ein Qualitätsproblem meldet, welche der Monteur selbst aus zeitlichen oder technischen Gründen nicht beheben kann [KRO09]. Ein Unterstützer besitzt erweiterte Montagekenntnisse, um bei Qualitätsproblemen über einen größeren Bandabschnitt agieren zu können. Zudem ist er aufgrund seiner Funktion von der Taktzeit entkoppelt.⁵

Qualitätsprüfer

Der *Qualitätsprüfer* wird zur Qualitätsprüfung von Prüfmerkmalen am Produkt eingesetzt (Qualitätsprüfprozess). Am Ende eines Montageabschnittes werden Q-Tore als Sonderstation mit reiner Prüfaufgabe platziert. In einem Q-Tor prüft ein Qualitätsprüfer die Qualität sowohl anhand bestehender Prüflisten als auch durch individuelle Sichtprüfungen eines Bauteils, einer

⁵ Der Unterstützer ist lediglich an seinen Bereich örtlich gebunden.

Baugruppe oder eines Fahrzeugs. Die Kernaufgabe ist somit der systematische Vergleich von Istgrößen mit den Sollvorgaben. Der Qualitätsprüfer soll Abweichungen am Fahrzeug und seiner Bauteile identifizieren, als Qualitätsmangel dokumentieren und systemseitig zurückmelden. Die Rolle des Qualitätsprüfers findet sich sowohl innerhalb eines Q-Tors zur Abschnittsprüfung als auch am Montageende zur Abschluss- oder Stichprobenprüfung.

Nacharbeiter

Der *Nacharbeiter* kommt als letzte Instanz bei Qualitätsproblemen zum Einsatz. Sofern eine Qualitätsabweichung nicht durch den Monteur oder den Unterstützer in der vorgegebenen Zeit unter den möglichen Mitteln behoben werden kann, wird die Nacharbeit an den Nacharbeiter weitergegeben. Je nach Aufwand setzt dieser die Nacharbeit durch Ausschleusen des Fahrzeugs oder nach Montageende in taktunabhängigen Nacharbeitsstationen der zentralen Nacharbeit (ZNA) um (Nacharbeitsprozess).

Qualitätsmanager

Der *Qualitätsmanager* analysiert bestehende systematische Qualitätsmängel und identifiziert mögliche Ursachen (Fehlerabstellprozess). Er ist die erste Führungsinstanz mit entsprechenden Weisungsbefugnissen, welche auf Basis der Qualitätsinformationen Entscheidungen über Maßnahmen trifft. In der Montage verkörpert die Rolle des Qualitätsmanagers ein Montagemeister. Dieser ist für eine Montagemeisterei zuständig. Zusätzlich berichtet er über Qualitätsprobleme im Rahmen der täglichen Shopfloor-Runde⁶.

Qualitätsingenieur

Der *Qualitätsingenieur* ist der methodische Experte zur Gewährleistung einer qualitativen Wertschöpfung. Er analysiert die Produkte und Prozesse seines zuständigen Bereiches und identifiziert systematische Qualitätsabweichung über bestehende Qualitätstechniken. Ebenso pflegt er die Prüflisten der Qualitätsprüfer. Der Qualitätsingenieur ist sowohl theoretisch durch

⁶ „Shopfloor-Runden“ dienen zum direkten Informationsaustausch zwischen Führungskräften.

Analysen und Methoden als auch praktisch am Montageband durch Kommunikation und Umsetzung seiner Maßnahmen tätig. Gemeinsam mit dem Qualitätsmanager erarbeitet der Qualitätsingenieur geeignete Maßnahmen und Kontrollen zur Sicherstellung der Qualität (Fehlerabstellprozess).

3.2.4 Informationssysteme des Montagesystems

Je nach Ausprägung der Komplexität und Varianz des Montageprozesses sowie der Qualifikation des Monteurs müssen ihm Informationen zu den Montageinhalten und -schritten bereitgestellt werden [FEL05; TAN08]. Dies erfolgt traditionell in Form von papierbasierten Medien [ROL92]. Mit dem Einzug der Informationstechnologie in das Montagesystem wurden Teile der analogen Informationen unter dem Begriff *Worker Information System* (WIS) digitalisiert, die dem Monteur Informationen bereitstellen und ggf. Informationen vom Monteur weiterleiten [LUŠ13; LUŠ16; LAN07; KRO09; FIS14].

Durch den Einsatz rudimentärer WIS wurden die Probleme der analogen Informationsbereitstellung und fehlenden Kommunikationsmöglichkeit mit den Produktionssystemen zwar abgeschwächt, jedoch nicht beseitigt [FRA09]. Aktuell besteht eine Dualität aus analogen und digitalen Informationsträgern zur Qualitätsregelung in der Montagelinie. Nachfolgend werden die relevanten Informationssysteme und Dokumente beschrieben.

Montageplakat

Das *Montageplakat* ist ein fahrzeugbegleitendes DIN A1-Papier, welches an der Karosserie des Fahrzeugs (z. B. der Innenseite der geöffneten Motorhaube) befestigt ist. Das Montageplakat ist fahrzeuggebunden und beinhaltet alle relevanten Fahrzeug- und Montageinformationen in codierter Form. Auf dieser Basis informieren sich alle Rollen zu den Montageumfängen. Abbildung 3.7 zeigt einen Ausschnitt einer Montagestation eines deutschen Automobilherstellers. Zu erkennen sind hier an beiden Fahrzeugen die befestigten Montageplakate als Informationsquelle in weiß bzw. gelb.



Abbildung 3.7: Montageplakat als produktbezogene Informationsquelle

Wagenbegleitkarte

Die *Wagenbegleitkarte* bzw. *Baukarte* ist ein relevanter Informationsträger in Form einer DIN A4-Papiermappe mit acht Doppelseiten, folglich 16 Dokumentationskarten. Diese sind fahrzeuggebunden und während des gesamten Montageprozesses im Fahrzeug hinterlegt. Die Wagenbegleitkarte umfasst Dokumentationsfelder über alle sicherheits-, auditierungs- bzw. zertifizierungsrelevanten Montageumfänge bzw. Arbeitsgänge (z. B. Airbags oder Sicherheitsverschraubungen). Im Rahmen der Selbstprüfung sind dokumentationspflichtige Montageumfänge bei Qualitätserfüllung auf der Wagenbegleitkarte zu dokumentieren. Darüber hinaus sind Freitextfelder enthalten, welche zur Dokumentation von Qualitätsproblemen nicht stempelpflichtiger Montageumfänge verwendet werden. Jede Karte besitzt unterschiedliche Stempel-, Klebe- oder Freitextfelder zur Dokumentation. Der Aufbau der Wagenbegleitkarte orientiert sich am definierten Montageprozess. Anhang E zeigt einen Ausschnitt von drei ausgefüllten Dokumentationskarten.

Montageanleitung und Hitlisten

Zu jeder Montagestation existiert eine standardisierte *Montageanleitung*. Diese beinhaltet eine schrittweise textuell aufgebaute Vorgehensbeschreibung. Dabei wird die Varianz der zu verbauenden Inhalte berücksichtigt und über Baumuster in codierter Form beschrieben. Eine Montageanleitung umfasst mehrere DIN A4-Seiten, je nach Inhalt einer Montagestation. Anhang E zeigt einen Ausschnitt einer Montageanleitung. Zusätzlich existieren an jeder Montagestation sogenannte *Hitlisten*, welche die Inhalte in verkürzter Form textuell auf einer Seite pro Baureihe darstellen. Diese sind insbesondere für neue Mitarbeiter sehr hilfreich, um auf ein schnelles Nachschlagewerk in der Montagestation zurückgreifen zu können. Abbildung 3.8 zeigt zwei Hitlisten einer Montagestation, welche am Montagewagen befestigt sind.

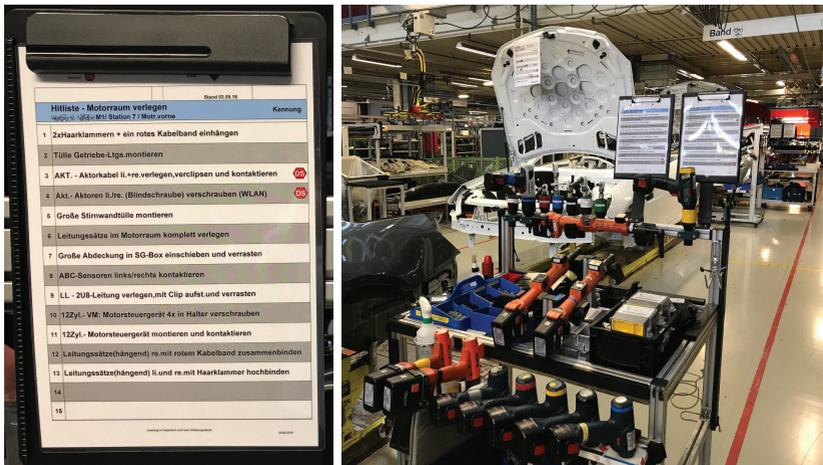


Abbildung 3.8: Hitlisten als prozessbezogene Informationsquelle

Qualitätsberichte und Arbeitsanweisungen

An unterschiedlichen Bereichen des Montagebands lassen sich *Qualitätsberichte* in Papierform finden. Diese sollen den Mitarbeitern eine *Qualitätsrückmeldung* mit dem Ziel der Sensibilisierung und *Qualitätsverbesserung* liefern. Diese sind i. d. R. am Q-Tor oder nahe Montagestationen mit Schwerpunktthemen an Informationswänden angebracht. Dabei ist in der Praxis kein standardisiertes Format zu finden und kann in Abhängigkeit des aufbereitenden Mitarbeiters, des Fehlerbildes⁷ und des Empfängerkreises stark variieren. Eine *Arbeitsanweisung* ist das Ergebnis eines Fehlerabstellprozesses. Sofern ein systematischer Fehler identifiziert wurde, wird ein Fehlerabstellprozess gestartet, welcher in Maßnahmen resultiert. Diese werden den betreffenden Mitarbeitern in Form von Arbeitsanweisungen, analog zu den *Qualitätsberichten*, zugänglich gemacht. Abbildung 3.9 zeigt Beispiele diverser *Qualitätsberichte* und *Arbeitsanweisungen* am Montageband.



Abbildung 3.9: Berichte und Anweisungen als Qualitätsrückmeldung

⁷ Ein „Fehlerbild“ beschreibt die Ausprägung einer Qualitätsabweichung und umfasst die drei Attribute „Baureihe“, „Fehlerort“ und „Fehlerart“.

Andon-System

Ein *Andon-System* wird in der Fahrzeugmontage zur Meldung von Störungen innerhalb der Montagelinie eingesetzt. Das japanische Wort „Andon“⁸ ist ein fester Begriff im Visual Management und im „Toyota Production System“ (TPS). Visuelle oder akustische Signale melden eine Störung, die durch eine unterstützende Arbeitskraft gelöst werden muss. Die Meldung erfolgt dabei von einem Monteur (Sender) zu einem Unterstützer (Empfänger). Ein Andon-System umfasst Andon-Cords und Andon-Boards. Bei *Andon-Cords* handelt es sich um elektronische Qualitätsreißleinen, welche einer Störungsmeldung dienen und einer Montagestation bzw. einem Montagebereich zugeordnet werden können. *Andon-Boards* sind Anzeigetafeln zur Fehlermeldung. Diese sind hauptsächlich über dem Montageband sichtbar angebracht und zeigen allen Mitarbeitern die entsprechenden Informationen an. [BRE15; LIN11; GOR16; FIE14] Abbildung 3.10 zeigt ein Andon-System einer Montagelinie.



Abbildung 3.10: Andon-System zur Nacharbeitsmeldung

⁸ Japanisch für „Lampe“.

IT-System

Das digitale *IT-System* ermöglicht einen automatisierten Informationsaustausch zwischen den Mitarbeitern in der Montagelinie. Dieses IS kann als WIS kategorisiert werden. Insbesondere im Q-Tor findet das IS, spezieller jedoch das Modul zur Eingabe und Ausgabe von Qualitätsinformationen, und an ausgesuchten Montagestationen (z. B. bei Stationen mit Schraubvorgängen) seinen konkreten Einsatz. [FIE14]

3.2.5 Prozesse des Montagesystems

Montageprozess

Nachdem das Fahrzeug oder die Baugruppe in der Montagestation eingetroffen ist, kommissioniert der Monteur die relevanten Bauteile und notwendigen Werkzeuge. Die Montageinformationen entnimmt der Monteur vom Montageplakat. Nach der Montage kontrolliert dieser mittels Selbstprüfung die Qualität seines Montageergebnisses. Der Monteur überprüft dabei die Einhaltung der Toleranzbereiche relevanter Messpunkte mittels Sichtprüfung, ggf. können auch Handwerkzeuge bzw. Prüflinien eingesetzt werden. Wird eine Verletzung der Toleranzbereiche und folglich der Qualitätsanforderung erkannt, versucht der Monteur durch eigene Nacharbeit das Ergebnis zu verbessern und die Qualitätsanforderungen zu erfüllen. Abschließend dokumentiert der Monteur qualitäts- und sicherheitsrelevante Montageschritte auf der Wagenbegleitkarte.

Unterstützungsprozess

Sofern der Monteur innerhalb der Selbstprüfung ein Problem feststellt, das er selbst nicht in angemessener Zeit mit angemessenen Mitteln beheben kann, informiert er den Unterstützer über das Andon-System. Der Monteur verlässt seinen Arbeitsbereich, betätigt das Andon-Cord, wodurch der Unterstützer über das Andon-Board über ein Problem an dem entsprechenden Montagebereich verständigt wird. Sollte auch der Unterstützer das Problem nicht lösen können, dokumentiert dieser den

Qualitätsmangel auf der Wagenbegleitkarte. Der Qualitätsmangel wird dann im Nacharbeitsprozess behoben.

Qualitätsprüfprozess

Der Qualitätssicherung kommt in der Montage eine besonders hohe Bedeutung zu, da die Montage als letzte Wertschöpfungsstufe durch direkte Marktnähe am stärksten von einem dynamischen Umfeld beeinflusst wird [BRE11]. Das Ziel der Qualitätsprüfung ist die sofortige Identifikation und schnellstmögliche Fehlerbehebung, um die Qualitätsrate so hoch wie möglich zu halten. In der Fahrzeugmontage erfolgt der Qualitätsprüfprozess durch drei Prüfungen.

Die erste Qualitätsprüfung erfolgt durch den Monteur im Rahmen der Selbstprüfung. Am Ende einer Montagemeisterei bzw. nach einem Montageabschnitt durchläuft jedes Fahrzeug eine obligatorische Abschnittsprüfung – das Qualitätstor (Q-Tor). Neben einer allgemeinen Qualitätsprüfung überprüfen Qualitätsprüfer innerhalb des Q-Tors sicherheitsrelevante Bauteile bzw. Montageschritte (z. B. Verbau des Airbags) und qualitätskritische Fehler der Vergangenheit. Am Q-Tor werden die auf der Wagenbegleitkarte dokumentierten Qualitätsmängel, sofern diese nicht vom Unterstützer bereits behoben wurden, erstmalig in das digitale IT-System bzw. IS eingetragen.

Am Ende des Montageprozesses erfolgt eine Abschlussprüfung im EOL. Dieser Bereich ist physisch von der Montagelinie und der Perlenkette⁹ der Produktion abgekoppelt, sodass ein Einschleusen von anderen Fahrzeugen möglich ist. Dies ist für Nacharbeitsfahrzeuge relevant, die zur Abschlussprüfung wieder eingeschleust werden müssen. Zum einen erfolgt eine allgemeine Qualitätsprüfung, zum anderen spezifische Prüfungen (z. B. Rollenprüfstand, Regenprobe und Oberflächenprüfung). Darüber hinaus

⁹ Die Reihenfolge der zu produzierenden Fahrzeuge ist ab Montagebeginn festgeschrieben. Änderungen sind bis zum Montageende nur durch manuelles Ausschleusen an definierten Punkten der Montagelinie möglich. Diese Reihenfolge wird als „Perlenkette“ bezeichnet.

können nach der Abschlussprüfung weitere optionale Stichprobenprüfungen durchgeführt werden. Fünf Prozent der produzierten Fahrzeuge werden in der Gesamtfahrzeugprüfung (GFP) intensiv überprüft.

Alle Qualitätsprüfungen durch Qualitätsprüfer erfolgen mittels „Personal Digital Assistant“ (PDA). Nach dem Scannen der Produktionsnummer auf der Wagenbegleitkarte öffnet sich ein digitaler Prüfkatalog auf dem PDA. Dieser Prüfkatalog muss innerhalb der Taktzeit vom Prüfer abgearbeitet werden. Aufgrund des hohen Aufwands und der Taktzeit wird lediglich mittels Sichtprüfung festgestellt, ob Bauteile korrekt verbaut wurden und ob diese Beschädigungen aufweisen. Folglich existieren keine quantitative Messergebnisse, sondern binäre¹⁰ Prüfergebnisse (z. B. „i. O.“, „n. i. O.“, „fehlt“ etc.)¹¹. Bei der Prüfung von Spaltmaßen werden z. T. Prüflehren eingesetzt, welche jedoch auch nur binäre Ergebnisse offenlegen.

Nach Abschluss der Prüfung über den PDA ist das Prüfergebnis im IS dokumentiert. Zudem wird ein Ausdruck gefundener Fehler auf die Wagenbegleitkarte geklebt. Sollte ein Prüfer Qualitätsmängel finden, die außerhalb seines Prüfbereichs liegen, nimmt er einen handschriftlichen Eintrag auf der Wagenbegleitkarte vor. Am Ende der Abschlussprüfung werden offene Qualitätsmängel, die analog auf der Wagenbegleitkarte und nicht im IS dokumentiert wurden, in das IS zur synchronen Datenhaltung übertragen.

Bei den Prüfungen finden sich größtenteils manuelle Prozesse. Die Zuverlässigkeit ist vom Prüfer abhängig und kann durch die Taktzeit negativ beeinträchtigt werden. Prüfungen im Anschluss an den Montagevorgang sind besonders wichtig, da der Aufwand einer Nacharbeit und damit die Nacharbeitskosten mit dem Grad der Fertigstellung des Fahrzeugs steigen (vgl. Zehnerregel der Fehlerkosten in Abbildung 2.5).

¹⁰ Der Begriff „binär“ bezeichnet in diesem Kontext eine Bewertung auf Basis von zwei Merkmalen (vgl. Unterabschnitt 2.1.2).

¹¹ „i. O.“ = in Ordnung, „n. i. O.“ = nicht in Ordnung.

Nacharbeitsprozess

Sofern ein Qualitätsmangel im Rahmen des Unterstützungsprozesses nicht behoben oder im Qualitätsprozess identifiziert wird, muss dieser über den Nacharbeitsprozess korrigiert werden. Zur Nacharbeit existieren innerhalb des Montagesystems entsprechende zentrale Nacharbeitsbereiche (ZNA). Diese sind vom Montageband und der Taktzeit entkoppelt und ermöglichen eine intensive Nacharbeit, welche je nach Qualitätsmangel bis zu mehreren Stunden dauern kann. Ggf. müssen aufgrund einer fehlenden Komponente im Fahrzeug ganze Baugruppen demontiert werden.¹²

Zur Nacharbeit gelangt jedes Fahrzeug mit offenen dokumentierten Qualitätsmängeln. Diese Fahrzeuge werden, sofern diese fahrbereit sind, zunächst auf einen zentralen Abstellplatz gefahren und zur Nacharbeit von den Nacharbeitern in die ZNA gebracht. Dort erfolgt dann die Nacharbeit zur Qualitätsherstellung. Nach erfolgreicher Nacharbeit wird der offene Qualitätsmangel im IS geschlossen und analog auf der Wagenbegleitkarte dokumentiert.

Fehlerabstellprozess

Der Fehlerabstellprozess zeigt eine Qualitätsregelung in der Montage in klassischer Form. Im Montageprozess unterliegt die Produktqualität unterschiedlichen Abweichungen, die entweder stochastische oder systematische Ursachen haben können. Stochastische Abweichungen lassen sich i. d. R. nicht verhindern, allerdings müssen im Rahmen der Qualitätssicherung systematische Qualitätsmängel erkannt und behoben werden [PUE11].

Sofern systematische Qualitätsmängel im Rahmen der Prüfprozesse identifiziert werden, ist die Aktivierung eines Fehlerabstellprozesses notwendig. Ein systematischer Qualitätsmangel ist nicht einheitlich definiert und wird nach individuellem Ermessen des Qualitätsprüfers festgelegt. In der Praxis

¹² Ein fehlendes Lautsprecher-Membran einer Sonderausstattung im Unterboden verursacht eine zeitintensive Demontage des Inneneinbaus. Sofern der Qualitätsmangel in der Werkschlussabnahme identifiziert wird, verursacht dies eine Nacharbeitszeit von ca. acht Stunden.

hat sich die „3er-Regel“¹³ etabliert. Im Fall eines systematischen Qualitätsmangels wird der Qualitätsmanager durch den Qualitätsprüfer per Telefon benachrichtigt. Der Qualitätsmanager analysiert am Q-Tor das Fehlerbild und legt Handlungsmaßnahmen fest. Ggf. erfolgt eine direkte Rückmeldung an den Monteur.

Im Rahmen des Fehlerabstellprozesses werden Vorortbegehungen zur Ursachenanalyse durchgeführt und Methoden (z. B. Ishikawa-Diagramme) zur schnellstmöglichen Fehlerabstellung angewendet. Die Maßnahmen werden über Qualitätsberichte und Arbeitsanweisungen in Papierform an der jeweiligen Montagestation ausgehängt. Der Fehlerabstellprozess umfasst somit die Qualitätsregelung auf Basis der zurückgekoppelten Informationen.

Folglich charakterisiert sich die Kommunikationsstruktur eines Montagesystems durch einen hohen Einsatz analoger bzw. papierbasierter Informationsmedien und mündlicher Kommunikation sowie eine geringe Anwendung digitaler IS. Diese Kommunikation zur Qualitätsregelung hat zwar über Jahrzehnte in der Automobilproduktion funktioniert, trägt jedoch nur in geringem Maße zur effizienten Qualitätsregelung bei. Entsprechende Defizite sind in der Praxis spürbar. Abbildung 3.11 skizziert zusammenfassend die Kommunikationsstruktur innerhalb eines Montagesystems.

3.2.6 Informationstechnische Defizite zur Qualitätsregelung

Nach intensiver Analyse des Status Quo der Fahrzeugmontage lässt sich eine Vielzahl an Defiziten bzgl. der Qualitätsregelung erkennen. Die Struktur und Prozesse sowie die Rollen des Montagesystems liegen dabei weniger im Fokus einer kritischen Betrachtung. Vielmehr zeigen sich informationstechnische Probleme aufgrund der analogen Informationsquellen. Diese werden nachfolgend kritisch bewertet.

¹³Die „3er-Regel“ besagt, dass ein identisches Fehlerbild drei Mal in einem kurzen Zeitraum (i. d. R. eine Schicht) aufgetreten ist.

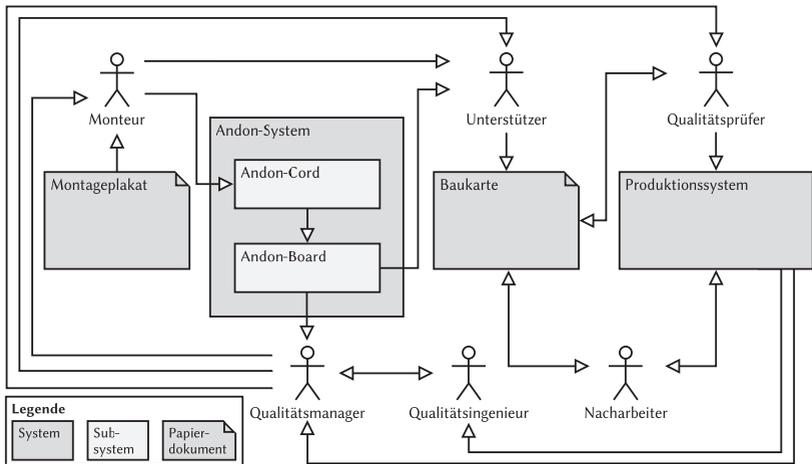


Abbildung 3.11: Kommunikationsstruktur eines Montagesystems

Montageplakat

Das Montageplakat zeigt auf Papierbasis die erforderlichen Montageumfänge zum Fahrzeug an. Dazu lassen sich Probleme identifizieren, welche einen maßgeblich negativen Einfluss auf den Transfer montage- und qualitätsbezogener Informationen zum Monteur besitzen:

- Bedingte Sichtbarkeit
- Fehlende stationsspezifische Informationseingrenzung
- Mangelhafte anwenderorientierte Informationsaufbereitung

Montageplakate sind aufgrund ihres fixen Befestigungspunktes (z. B. Innenseite der Motorhaube) nicht von allen Bereichen der Montagestation einsehbar. Insbesondere im Heckbereich und Fahrzeuginneren sowie am Rand der Montagelinie ist das Montageplakat kaum lesbar. Dies fördert das Risiko falscher Informationsaufnahme und führt ggf. zu Qualitätsmängel. Zudem sind auf einem Montageplakat alle Informationen für einen bestimmten Montageabschnitt zu finden. Der Anwender muss vor seiner Tätigkeit seine relevanten Informationen herausfiltern. Einem einzelnen Monteur werden folglich über Montageplakate zu viele Informationen zur

Verfügung gestellt, von denen für ihn lediglich nur ein geringer Teil sinnvoll genutzt wird. Weiterhin ist die Informationsaufbereitung für die Nutzer kritisch zu bewerten. Der Hauptanteil der relevanten Montageinformationen ist über Abkürzungen und Codes hinterlegt, sodass ein Monteur die Codes zu konkreten Handlungsanweisungen übersetzen muss. Dies kann zu Verwechslungen, Fehlinterpretationen oder gar einer allgemeinen Ablehnung bzw. Nichtbeachtung der Montageanweisungen führen. Anhang E zeigt ein Montageplakat eines Fahrzeugs.

Wagenbegleitkarte

Die Wagenbegleitkarte stellt das Kerndokument zur Tätigkeits- und Qualitätsdokumentation zu einem Fahrzeug dar. Jedoch führt die papierbasierte Form ebenso zu relevanten Defiziten:

- Risiko einer fehlenden Dokumentation
- Risiko einer unlesbaren Dokumentation
- Risiko des Verlustes der Wagenbegleitkarte
- Zusätzlicher Archivierungsaufwand
- Fehlende Echtzeitinformationen

Die Wagenbegleitkarte besitzt vor allem die Risiken einer fehlenden oder unlesbaren Dokumentation. Eine vollständige Prozesssicherheit kann die Wagenbegleitkarte daher nicht gewährleisten. Dem prüfenden Mitarbeiter sind bei Durchsicht der Wagenbegleitkarte ggf. folgende Sachverhalte unklar:

- (a) Wurde der Montageschritt durchgeführt?
- (b) Ist der Montageschritt erfolgreich oder fehlerhaft?
- (c) Welches Problem liegt vor?
- (d) Welcher Monteur (Stempel) hat die Montage durchgeführt?

Aufgrund gesetzlicher Bestimmungen müssen Wagenbegleitkarten vollständig dokumentiert sein. Eine analoge Wagenbegleitkarte gewährleistet dies nicht. Zudem besteht ein Verlustrisiko der Wagenbegleitkarte, sodass eine vollständige Neudokumentation durchgeführt werden muss. Weiterhin muss die Wagenbegleitkarte zehn Jahre nach Auslauf der Baureihe nachweisbar vorliegen. Somit erfordert die Papierform eine zusätzliche digitale

Archivierung. Ebenfalls sind durch den Einsatz analoger Medien keine Echtzeitinformationen vorhanden. Erst durch eine spätere digitale Erfassung sind diese für weitere Verarbeitungen verfügbar. Dies führt zu einer informationstechnischen Totzeit und verlangsamten Reaktionsfähigkeit. Anhang E zeigt u. a. eine Wagenbegleitkarte mit kritischer Dokumentation.

Montageanleitung und Hitlisten

Ebenso sind auch bei der Montageanleitung als stationsspezifisches Nachschlagewerk zum Montageprozess Defizite erkennbar:

- Fehlende Verfügbarkeit in der Montagestation
- Mangelhafte anwenderorientierte Informationsaufbereitung
- Geringe Flexibilität
- Hoher Pflegeaufwand

Montageanleitungen sind i. d. R. nicht in der Montagestation abrufbar, sondern in einem Ordner beim zuständigen Montagemeister abgeheftet. Dadurch leidet die Informationstransparenz. Falls doch ein schneller Zugriff möglich ist, liefern die codierten Montageinformationen für taktgebundene Mitarbeiter keinen Mehrwert. Anhang E zeigt einen Auszug einer Montageanleitung. Lediglich die Hitlisten geben eine schnelle Hilfestellung, sind jedoch ebenfalls nicht optimal in rollen- und sachgerechter Form aufbereitet. Beide Dokumente müssen zudem kontinuierlich aktuell gehalten werden. Insbesondere bei Prozessänderungen und dem Anlauf neuer Baureihen stellt die Aktualisierung der Dokumente einen erheblichen Pflegeaufwand dar.

Qualitätsberichte und Arbeitsanweisungen

Sowohl der Qualitätsbericht als auch die Arbeitsanweisung in entsprechend analoger bzw. papierbasierter Form führen zugleich zu weiteren Defiziten:

- Fehlende stationsspezifische Qualitätsrückmeldung
- Mangelhafte anwenderorientierte Informationsaufbereitung
- Fehlende Echtzeitinformationen
- Hoher Pflegeaufwand

Qualitätsberichte werden für einen bestimmten Montagebereich herausgegeben. Es werden an definierten Informationswänden relevante Qualitätsinformationen für alle Mitarbeiter des Bereiches ausgehängt. Die Mitarbeiter müssen ihre relevanten Qualitätsinformationen finden bzw. filtern, sodass die Akzeptanz und Beachtung der Qualitätsberichte unter diesem Zusatzaufwand leidet. Kritisch anzumerken ist somit die bedingte Transparenz der qualitätsbezogenen Informationen, welche nicht unmittelbar von allen Mitarbeitern eingesehen werden können.

Zudem ist aufgrund der analogen Form eine manuelle Aufbereitung der Qualitätsinformationen zu Qualitätsberichten erforderlich. Zwischen Sammlung und Aufbereitung von Qualitätsinformationen und dem Aushang der Qualitätsberichte entsteht eine Totzeit bzw. ein Zeitverzug in der Qualitätsrückmeldung. Dies fördert das Risiko der Reproduktion identischer Fehlerbilder. Sofern die Qualitätsberichte ausgehängt wurden, sind deren Qualitätsinformationen möglicherweise nicht mehr aktuell, da das Fehlerbild bereits abgestellt wurde und mittlerweile neue kritische Fehlerbilder entstanden sind. Die Qualitätsberichte können folglich nicht vollständig synchron mit der Datenwelt gehalten werden. Ein hoher Pflegeaufwand ist somit durch diese Form der Informationsbereitstellung unvermeidbar.

Maßgeblich für eine Qualitätsregelung ist jedoch die Rückkopplung von Qualitätsinformationen an vorgelagerte Bereiche. Insbesondere Qualitätsmängel mit systematischem Charakter müssen sofort nach Identifikation in die Montagestation zur schnellstmöglichen Fehlerabstellung zurückgemeldet werden. Bei analogen Medien kann die steigende Änderungsdynamik nicht mehr zufriedenstellend abgebildet werden, sodass speziell bei der Qualitätsdokumentation aufgrund der prozess- und medienbedingten Zeiten von der Fehlererfassung bis zur Qualitätsrückmeldung kritische Totzeiten sowie entsprechend lange QRK existieren. Diese erschweren eine schnelle Problemreaktion. Durch die fehlende, zeitnahe Verfügbarkeit der Qualitätsdaten in der Montagestation werden notwendige Fehlerabstellmaßnahmen verzögert bzw. erschwert und identische Fehlerbilder bei Folgefahrzeugen reproduziert.

Andon-System

Das Andon-System zur Nacharbeitsmeldung stellt grundlegend eine effektive Methode dar, jedoch sind hier diverse Kritikpunkte zu erkennen:

- Fehlende Detailinformationen
- Fehlende Priorisierung der Nacharbeitsmeldungen
- Fehlende Dokumentation

Andon-Systeme liefern zwar schnelle effektive Qualitätsmeldungen, jedoch werden keine detaillierten Qualitätsinformationen mitgegeben. Erhält ein Unterstützer eine Qualitätsmeldung über das Andon-System, wird dieser über eine Information zur meldenden Montagestation informiert. Das konkrete Fahrzeug und ein erstes Fehlerbild erhält der Unterstützer erst nach einem verbalen Austausch mit dem meldenden Monteur. Dadurch wird der Monteur in seinem Arbeitsgang unterbrochen und es ergeben sich ggf. sprachliche Unklarheiten über das Fahrzeug oder Fehlerbild. Ebenso können zusätzliche Laufwege durch ein anschließendes Rüsten von Werkzeugen (z. B. spezielle Schraubwerkzeuge) entstehen und die Effizienz reduzieren. Qualitätsmeldungen in der Produktion sind hingegen weitreichender als eine rudimentäre Nacharbeitsmeldung und sollten für eine effiziente Nacharbeit und eine vollständige Fehlerdokumentation durch zusätzliche Qualitätsinformationen angereichert werden.

Ein weiterer kritischer Faktor liegt in der fehlenden Priorisierung der Nacharbeitsmeldungen. Der Monteur meldet eine Nacharbeit über das Andon-Cord und das Andon-Board signalisiert dem Unterstützer die Nacharbeitsmeldung durch Angabe der meldenden Montagestation. Bei mehreren Nacharbeitsmeldungen besteht jedoch keine Rangfolge bzgl. der Relevanz der Nacharbeiten, sodass der Unterstützer nach eigener Systematik die Nacharbeiten behebt. Dies führt ggf. dazu, dass Nacharbeiten mit niedriger Priorität sofort und Nacharbeiten mit hoher Priorität erst zum Schluss durchgeführt werden.

Eine besondere Problematik stellt zudem die fehlende Dokumentation der Qualitätsmeldung dar. Zwar speichern moderne Andon-Systeme die Anzahl der Qualitätsmeldung und die zugehörige Dauer bis zum Erscheinen

des Unterstüترز, jedoch werden keine zusätzlichen Qualitätsinformationen (z. B. Baureihe, Produktionsnummer, Fehlerort, Fehlerart) dokumentiert. Diese sind jedoch für eine vollständige Transparenz, situative Schwachstellenanalyse und angemessene Qualitätsregelung unter Berücksichtigung einer minimalen Totzeit erforderlich. Sofern der Unterstüترز einen Qualitätsmangel behoben und nicht auf der Wagenbegleitkarte dokumentiert hat, existiert folglich auch keine Dokumentation. Somit wird der Qualitätsmangel im Berichtswesen nicht geführt und kann keine Informationen zur Qualitätsregelung liefern.

IT-System

Das IT-System bzw. IS repräsentiert das erforderliche System zur Mensch-System-Kollaboration. Jedoch sind folgende Defizite zu erkennen:

- Rudimentärer Einsatz
- Geringe 360°-Vernetzung¹⁴
- Mangelhafte Mensch-System-Kollaboration
- Geringer Automatisierungsgrad
- Geringer Einsatz technischer Systeme
- Ungenaue Qualitätsdokumentation
- Mangelhaftes Wissensmanagement
- Zeitverzug des Informationsmanagements

Digitale IS in der Montagelinie sind nur rudimentär im Einsatz [WES13; LAN14]. Das bestehende Produktionssteuerungssystem stellt lediglich die Ausgangsbasis zur Qualitätsregelung dar. Durch den hohen Anteil analoger Medien sowie manueller Tätigkeiten ist ein intensiver Bedarf bzgl. effizienter Qualitätsregelung zu erkennen [FEL05]. Bestehende IS sind überwiegend ohne Schnittstellen zu anderen Systemen aufgebaut, sodass eine geringe Vernetzung vorliegt. Insbesondere die Vernetzung im Kontext IIoT sowie die Kollaboration mit den Mitarbeitern fehlt in großen Teilen, weshalb eine Echtzeit-Rückkopplung von Informationen ausgehend vom Mitarbeiter nur bedingt bis gar nicht realisierbar ist. Diese Schwachstellen

¹⁴ „360°“ meint die ganzheitliche Vernetzung mit allen produktions- und qualitätsrelevanten IS.

führen in Verbindung mit der hohen Komplexität und Varianz der Montage zu einem erhöhten Fehlerrisiko sowie einer verringerten Produktions- und Produktqualität, die dann über Nacharbeitsaufwände und -kosten regeneriert werden müssen.

Weiterhin kann ein geringer Automatisierungsgrad des Montagesystems festgestellt werden (vgl. Abbildung 3.5). Der Montage mangelt es folglich am Einsatz technischer Systeme zur informationstechnischen Unterstützung der Prozesse. Dies fördert insbesondere eine ungenaue Qualitätsdokumentation. Qualitätsprüfer dokumentieren lediglich binäre bzw. diskrete und keine kontinuierlichen Werte eines Qualitätsmangels (z. B. „Spalt zu klein“). Dadurch lassen sich keine Informationen über systematische Abweichungen und Toleranzen gewinnen, welche für die Fehlerabstellung maßgeblich sein können. Außerdem besteht die Gefahr, dass Qualitätsprüfer die Fehler direkt nacharbeiten und nicht dokumentieren. Eine vollständige Dokumentation und ein Beitrag zur Erfassung des realen Abbildes der Fehlersituation in der Montage (Bruttofehler¹⁵, digitaler Zwilling der Qualitätssituation) kann somit nicht gewährleistet werden. Des Weiteren besteht aufgrund diverser Störfaktoren und der Individualität des Menschen die Gefahr des Fehlerschlupfes¹⁶ im Qualitätsprüfprozess. Diese unentdeckten Fehler führen ggf. zu hohen Nacharbeitskosten (vgl. Zehnerregel der Fehlerkosten), in nachgelagerten Prozessen zu kritischen Prozessstörungen (z. B. Zusammenführung von Karosserie und Antriebsstrang) durch fehlende Verbauumfänge oder zu Schäden an den Anlagen.

Ebenso kann ein mangelhaftes Wissensmanagement, vor allem im Bereich der Nacharbeit, kritisch benannt werden. Eine Nacharbeit erfolgt auf Basis des beschriebenen Fehlerbildes und der Erfahrung des Nacharbeiters. Nacharbeiter besitzen ein intensives Erfahrungswissen und können Ursachen zu Symptomen schnell zuordnen. Dennoch können Nacharbeitsfälle eintreten, dessen Nacharbeitszeit aufgrund einer intensiven Ursachenfindung und Lösungsgenerierung verhältnismäßig lang sind. Insbesondere bei

¹⁵ Die „Bruttofehler“ repräsentieren die Gesamtheit aller vorhandenen Qualitätsmängel, während die „Nettofehler“ lediglich die entdeckten bzw. dokumentierten Fehler widerspiegeln.

¹⁶ Ein „Fehlerschlupf“ bezeichnet eine Menge von unentdeckten Fehlern.

seltenen Fehlerbildern, deren Lösungsweg nicht mehr bekannt ist, und neuen Mitarbeitern in der Nacharbeit, welche noch nicht über das notwendige Erfahrungswissen verfügen, ergeben sich oftmals mehrere Lösungsideen, mehrere Nacharbeitsversuche und folglich lange Nacharbeitszeiten.

Zudem ist ein hoher Zeitverzug im Informationsmanagement in der Montagelinie spürbar. Problematisch zeigt sich dies u. a. im Q-Tor. Zum einen bei der Identifikation von Fehlerschwerpunkten, da eine Rückmeldung der Prüfergebnisse an die Qualitätsprüfer lediglich papierbasiert oder mündlich mit hohem Zeitverzug (i. d. R. ein bis zwei Tage) auf Basis alter Informationen stattfindet. Zum anderen schlupft ein variabler Anteil der Qualitätsmängel am Q-Tor durch, wird im ungünstigsten Fall nicht mehr erkannt und erreicht den Kunden. Zur Vermeidung muss der Qualitätsprüfer über diesen Fehlerschlupf informiert werden. Durch die fehlende Echtzeitorientierung kann jedoch nicht zeitgerecht verhindert werden, dass weitere Fahrzeuge mit identischen Fehlerbildern im selben Montageabschnitt durchschlupfen. Beide Punkte können als zeitlicher Verzug zwischen der Fehleridentifikation, der Dokumentation und der anschließenden Fehlermeldung an die verantwortliche Person verallgemeinert werden. Dies führt zur Intransparenz bzgl. der aktuellen Qualitätssituation und zu ineffizienter Nacharbeit sowie zu identischen Fehlerbildern bei Folgefahrzeugen und schlussendlich höheren Qualitätskosten.

Einige Defizite ziehen sich z. T. wiederholend durch die Informationsquellen eines Montagesystems. Zur Abstraktion können die Defizite durch eine Optimierung der folgenden fünf Kategorien repräsentiert werden:

1. Visualisierung von montage- und qualitätsbezogenen Informationen
2. Rückwärtsgerichtete Qualitätsinformationen (Qualitätsrückmeldung)
3. Vorwärtsgerichtete Qualitätsinformationen (Nacharbeitssteuerung)
4. Dokumentation der Qualitätssituation
5. Administration der Datenbasis

Die beschriebenen Defizite liefern die Ausgangsbasis dieser Arbeit. Nachfolgend soll analysiert werden, welche bestehenden Methoden adäquate Lösungsansätze anbieten.

3.3 Bestehende Definitions- und Lösungsansätze

Mit Bezug zu den Leitfragen in Abschnitt 1.2 und den Defiziten aus Unterabschnitt 3.2.6 werden im Folgenden bestehende Lösungsansätze der Forschung und Industrie in kompakter Form analysiert und anhand individueller Kriterien bewertet. Zugleich werden auch die Ergebnisse dieser Arbeit innerhalb der Kriterien eingeordnet, sodass der konkrete Beitrag und eine Abgrenzung zu den bestehenden Ansätzen sichtbar wird. Nachfolgend werden die Bewertungskriterien genannt, die Ansätze bewertet und eine Analyse abgeleitet. Eine detaillierte Zusammenfassung der Ansätze ist in Anhang F hinterlegt.

3.3.1 Definitionen zur Produktionsqualität

Das primäre Betrachtungsobjekt ist die Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage. Für eine effiziente Qualitätsregelung ist jedoch zunächst eine sachgerechte Definition erforderlich (vgl. Leitfrage 2).

Zur Bewertung der bestehenden Definitionen werden drei Kategorien mit subjektiv gewählten Kriterien aufgestellt. Zunächst ist die Art der *Beschreibung* der Produktionsqualität ein wichtiges Kriterium. Weiterhin sind die *Betrachtung* verschiedener produktions- und qualitätsspezifischer Aspekte sowie die *Ableitung* diverser Ergebnisse zur Qualitätsbewertung relevant. Auf Basis der Informationen zu den Definitionen findet nachfolgend eine Bewertung zur sachgerechten Anwendbarkeit im Kontext dieser Arbeit anhand der Kriterien statt. Tabelle 3.1 zeigt die Bewertung der Definitionen zur Produktionsqualität.

Tabelle 3.1: Definitionen zur Produktionsqualität

| Legende | Beschreibung | | | Betrachtung | | | | | Ableitung | | |
|--|--------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | qualitativ | binär | quantitativ | Produktqualität | Prozessqualität | Qualitätskosten | Qualitätskreis | Montageprozess | Qualitätsregelung | Qualitätsmerkmale | Kennzahlensystem |
| <ul style="list-style-type: none"> ● Schwerpunkt ◐ behandelt ◑ teilweise behandelt ○ nicht behandelt | | | | | | | | | | | |
| Wissenschaftliche Ansätze | | | | | | | | | | | |
| Johansson et al. [JOH16] | ◐ | ○ | ○ | ◐ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ |
| Schmitt et al. [SCH16] | ◐ | ○ | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ◐ | ○ | ○ |
| Colledani et al. [COL15] | ◐ | ○ | ○ | ◐ | ◐ | ○ | ○ | ○ | ◐ | ○ | ○ |
| Colledani et al. [COL14] | ● | ○ | ○ | ◐ | ● | ○ | ○ | ◐ | ◐ | ○ | ○ |
| Cramer et al. [CRA10] | ◐ | ○ | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ◐ | ○ | ○ |
| Takeda [TAK09] | ◐ | ○ | ○ | ◐ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Sellig [SEL01] | ◐ | ○ | ○ | ◐ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Komorek [KOM98] | ● | ○ | ○ | ◐ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ◐ | ○ |
| Hannen et al. [HAN97] | ● | ○ | ○ | ◐ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ◐ | ○ |
| Kromidas [KRO95] | ◐ | ○ | ○ | ◐ | ◐ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Walther [WAL93] | ● | ○ | ○ | ◐ | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Garvin [GAR84] | ● | ○ | ○ | ◐ | ● | ○ | ○ | ○ | ◐ | ○ | ○ |
| Berens [BER80] | ● | ○ | ○ | ◐ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Industrielle Ansätze | | | | | | | | | | | |
| Siemens [SIE17] | ◐ | ○ | ○ | ◐ | ◐ | ○ | ○ | ○ | ◐ | ○ | ○ |
| Vorliegende Arbeit (APQ) | ◐ | ● | ● | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ● | ● | ● | ● |

Die Definitionen zur Produktionsqualität verdeutlichen die bestehende Unklarheit über den Begriff (Leitfrage 2). Eine inhaltliche Analyse der Definitionen führte zu keiner ausreichenden Verwendbarkeit im Rahmen dieser Arbeit. Die Definitionen versuchen den Begriff in grober Form auf qualitativer Ebene zu erschließen, jedoch fehlt eine notwendige Beschreibung auf binärer und quantitativer Ebene. Die Voraussetzung für eine Regelung der Produktionsqualität ist ebenso eine Beschreibung anhand von Qualitätsmerkmalen. Weiterhin ist die mangelhafte Berücksichtigung der Qualitätskosten festzustellen. Somit bedarf es einer sachgerechten Definition der montagespezifischen Produktionsqualität. Kapitel 6 liefert dazu einen entsprechenden Beitrag (Ergebnis 2).

3.3.2 Ansätze zur Qualitätsregelung

Zur adäquaten Regelung der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage ist eine informationstechnische Struktur und Logik erforderlich (vgl. Leitfrage 3). Bestehende Ansätze müssen folglich analysiert werden, ob diese ausreichend fähig und adaptierbar sind.

Für die Einordnung werden drei Kategorien mit Kriterien festgelegt. Die subjektiv gewählten *Eigenschaften* umfassen notwendige Charakteristika, welche für eine hybride Qualitätsregelung im Umfeld der Fahrzeugmontage erforderlich sind. Anhand der *Ebenen*, welche an die Kategorisierung von QRK angelehnt sind (vgl. Unterabschnitt 2.2.2), soll der organisatorische Betrachtungsbereich der verschiedenen Ansätze festgestellt werden. Die *Art* bzw. der Umfang beschreibt den Detailgrad der Konzeptbeschreibung und die Intensität der Implementierung in der Praxis. Tabelle 3.2 zeigt die Abgrenzung der Ansätze zur Qualitätsregelung anhand der beschriebenen Kriterien.

Tabelle 3.2: Ansätze zur Qualitätsregelung

| Legende | Eigenschaft | | | | | | | | Ebene | | | Art | | | | |
|--|--------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------|------------|--------------|--------------------|---------------------|-----------------|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ● Schwerpunkt ◐ behandelt ◑ teilweise behandelt ○ nicht behandelt | Montagefokus | Messtechnikankwendung | Hybride Qualitätsregelung | Kaskadierte Qualitätsregelung | Objektunabhängigkeit | Präzisierbarkeit von Qualität | Informationstransparenz | Digitalisierung | Automatisierung | Prozessintern | Prozessnah | Ebenenintern | Ebenenübergreifend | Konzeptbeschreibung | Implementierung | |
| Dissertationen und Konzepte | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schmitt et al. [SCH15] | ○ | ○ | ◐ | ● | ◐ | ○ | ◐ | ○ | ◐ | ○ | ○ | ○ | ○ | ● | ● | ○ |
| Beaujean [BEA11] | ○ | ○ | ◐ | ● | ◐ | ○ | ◐ | ○ | ◐ | ○ | ○ | ○ | ○ | ● | ● | ○ |
| Dörmann Osuna [DÖR09] | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Oetzmann [OET05] | ○ | ◐ | ● | ● | ○ | ○ | ● | ● | ◐ | ○ | ○ | ● | ● | ● | ● | ● |
| Bettin [BET04] | ○ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ○ | ● | ● | ○ | ● | ● |
| Fachartikel | | | | | | | | | | | | | | | | |
| von Nitzsch et al. [VON10] | ○ | ● | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ◐ | ○ | ○ | ● | ○ | ○ | ◐ | ◐ |
| Schick et al. [SCH09a] | ● | ○ | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ament et al. [AME01] | ○ | ○ | ○ | ● | ● | ◐ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Haese et al. [HAE00] | ○ | ○ | ○ | ○ | ● | ● | ○ | ○ | ● | ◐ | ● | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Vorliegende Arbeit (QCS) | ● | ◐ | ● | ● | ◐ | ◐ | ● | ● | ◐ | ● | ● | ● | ○ | ○ | ● | ◐ |

Die Arbeiten beschäftigen sich mit der Qualitätsregelung im industriellen Umfeld und enthalten grundsätzlich den Aufbau eines Konzeptes. Eine Implementierung über Fallbeispiele findet in vielen Ansätzen statt, jedoch gibt es Unterschiede in der Ausführlichkeit. Daneben sind die Ansätze überwiegend objektunabhängig. Die vorliegende Arbeit ist ebenfalls objektunabhängig, jedoch ist sie an die Bedingungen der „manuellen“ Fahrzeugmontage geknüpft.

Einige Arbeiten betrachten eine bidirektionale Qualitätsregelung, jedoch werden die Bedingungen der Fahrzeugmontage mit Ausnahme der Arbeit von SCHICK ET AL. nicht betrachtet. Insbesondere eine hybride Qualitätsregelung unter Einsatz effizienter Informationstechnologie zur Automatisierung und Transparenz montage- und qualitätsrelevanter Informationen liegt nicht vor. Ungeklärt bleibt weiterhin der Aufbau der informationstechnischen Struktur und Logik für eine Qualitätsregelung (Leitfrage 3). Es erfordert somit ein informationstechnisches Referenzmodell einer hybriden Qualitätsregelung zum bidirektionalen Management von Qualitätsinformationen. Kapitel 7 liefert ein entsprechendes Konzept (Ergebnis 3).

3.3.3 Ansätze zur Informationsvisualisierung

Ein weiterer Fokus stellt die Visualisierung von montage- und qualitätsrelevanten Informationen in rollen-, sach- und zeitgerechter Form in der Montagelinie dar (vgl. Leitfragen 4 und 5). Dazu müssen bestehende Ansätze auf Adaptierbarkeit überprüft und bewertet werden. Zur Visualisierung stehen verschiedene Technologien zur Verfügung (vgl. [LUŠ16]). Aufgrund der Eingrenzung wird die Informationsvisualisierung über einen Bildschirm ausgewählt, sodass andere Technologien nicht berücksichtigt werden.

Die Bewertungskriterien werden in zwei Kategorien eingeordnet. Dies sind die Norm *ISO/IEC 25030* und die Normenreihe *DIN EN ISO 9241* mit ihren individuellen Forderungen. Somit ergibt sich über objektive Kriterien eine subjektive Einordnung der bestehenden Ansätze. Tabelle 3.3 zeigt die Bewertung der Ansätze zur Informationsvisualisierung anhand der Kriterien.

Tabelle 3.3: Ansätze zur Informationsvisualisierung

| Legende | ISO/IEC 25030 | | | | | DIN EN ISO 9241 | | | | | | | | |
|--|----------------|---------------|-----------------|-----------|--|-------------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------|----------------|------------------------|-----------------|
| <ul style="list-style-type: none"> ● Schwerpunkt ◐ erfüllt ◑ bedingt erfüllt ○ nicht erfüllt ⊗ keine zuverlässige Aussage möglich <p><i>Die Bewertung erfolgt aus Sicht des Einsatzes in der Fahrzeugmontage.</i></p> | Funktionalität | Benutzbarkeit | Zuverlässigkeit | Effizienz | Änderbarkeit / Wartbarkeit ¹⁷ | Übertragbarkeit ¹⁷ | Aufgabenangemessenheit | Selbstbeschreibungsfähigkeit | Erwartungskonformität | Lernförderlichkeit | Steuerbarkeit | Fehlertoleranz | Individualisierbarkeit | Benutzerführung |
| Dissertationen | | | | | | | | | | | | | | |
| Landherr [LAN14] | ◐ | ◐ | ⊗ | ◐ | ⊗ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ⊗ | ○ | ◐ |
| Lang [LAN07] | ◐ | ◐ | ⊗ | ◐ | ⊗ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ⊗ | ○ | ◐ |
| Fachartikel | | | | | | | | | | | | | | |
| Fischer et al. [FIS16] | ◐ | ◐ | ⊗ | ◐ | ⊗ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ⊗ | ○ | ◐ |
| Fischer et al. [FIS15] | ◐ | ◐ | ⊗ | ◐ | ⊗ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ⊗ | ○ | ◐ |
| Bächler et al. [BAC14] | ◐ | ◐ | ⊗ | ◐ | ⊗ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ⊗ | ○ | ◐ |
| Aehnelt et al. [AEH14] | ◐ | ◐ | ⊗ | ◐ | ⊗ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ⊗ | ○ | ◐ |
| Paelke [PAE14] | ◐ | ◐ | ⊗ | ◐ | ⊗ | ◐ | ○ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ⊗ | ○ | ◐ |
| Tan et al. [TAN08] | ◐ | ◐ | ⊗ | ◐ | ⊗ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ⊗ | ○ | ◐ |
| Feldmann et al. [FEL05] | ◐ | ◐ | ⊗ | ◐ | ⊗ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ⊗ | ○ | ◐ |
| Vorliegende Arbeit (WII) | ● | ● | ● | ● | ◐ | ● | ● | ● | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ○ | ◐ |

Die Bewertung zeigt, dass die Anforderungen an ein rollen-, sach- und zeitgerechtes Konzept für einen Einsatz innerhalb der Montagelinie durch diese Ansätze nicht vollständig erfüllt werden. Es zeigt sich außerdem die fehlende Eindeutigkeit, wie und mit welchen Hilfsmitteln die Nutzer mit relevanten qualitätsbezogenen Informationen rollen-, sach- und zeitgerecht versorgt werden müssen (Leitfrage 4). Zudem bleibt offen, wie qualitätsbezogene Informationen in Form von Kennzahlen und durch Visualisierung bereitgestellt werden müssen (Leitfrage 5). Folglich besteht hier ein entsprechender Forschungs- und Entwicklungsbedarf für eine montagespezifische Methode zur Visualisierung von montage- und qualitätsrelevanten Informationen. Ein adäquates Konzept wird in Kapitel 8 vorgestellt (Ergebnis 4).

¹⁷ Übertragbarkeit auf andere Montagestationen bzw. Montagetätigkeiten.

3.3.4 Ansätze zur Qualitätsüberwachung

Weiterhin fokussiert sich diese Arbeit auf die anforderungsgerechte Visualisierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes (vgl. Leitfrage 6). Damit qualitätsbezogene Tätigkeiten effizient durchführbar sind und einen Beitrag zu den Qualitätszielen leisten, müssen verschiedene Methoden zur Aufbereitung und Visualisierung von Daten und Informationen genutzt werden. Somit sind zusätzlich zur Informationsvisualisierung in der Montagelinie weitere grafische Analysemethoden zur Qualitätsüberwachung erforderlich. Diese liefern einen wesentlichen Beitrag zur effizienten Qualitätsregelung.

Eine Bewertung bestehender grafischer Methoden zur Qualitätsüberwachung erfolgt anhand subjektiv gewählter *Eigenschaften*, welche für einen Einsatz in der Fahrzeugmontage erforderlich sind. Die Wahl der Eigenschaften erfolgt auf Basis durchgeführter Anforderungsanalysen in unterschiedlichen Montagesystemen einer Automobilproduktion.

Die relevanten Ansätze liefern die sieben elementaren Qualitätswerkzeuge (vgl. Unterabschnitt 2.1.6) sowie die Visualisierungsmethode des Boxplots. Tabelle 3.4 zeigt die Abgrenzung der Ansätze zur Qualitätsüberwachung anhand diverser Kriterien bzw. Eigenschaften, welche für eine Anwendung in der Fahrzeugmontage relevant sind.

Anhand der Bewertungskriterien lässt sich erkennen, dass die etablierten Qualitätswerkzeuge keine adäquaten Methoden zur Visualisierung der Produktionsqualität im Kontext der Fahrzeugmontage repräsentieren (Leitfrage 6). Jedoch liefern einige das Fundament zur Entwicklung einer grafischen Methode zur kontinuierlichen Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes. Kapitel 9 liefert ein entsprechendes Konzept (Ergebnis 5).

Tabelle 3.4: Ansätze zur Qualitätsüberwachung

| Legend | Eigenschaft | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|--------------|-----------------|-----------|-------------------------|------------------|---------------|--------------|----------|------------|-----------------|--------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> ● Schwerpunkt ◐ Fähigkeit ◑ Einschränkung ○ keine Fähigkeit | merkmalsbasiert | asymmetrisch | toleranzbasiert | generisch | homomorph ¹⁸ | objektunabhängig | multiobjektiv | hierarchisch | grafisch | analytisch | quantifizierbar | anwenderunabhängig |
| Grundlegende Qualitätswerkzeuge | | | | | | | | | | | | |
| Fehlersammelliste | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ○ | ◐ | ● |
| Histogramm | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ |
| Pareto-Diagramm | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ |
| Ishikawa-Diagramm | ◐ | ◐ | ○ | ● | ○ | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ● | ○ | ◐ |
| Korrelationsdiagramm | ◐ | ◐ | ○ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ● | ◐ | ◐ |
| Qualitätsregelkarte | ◐ | ◐ | ● | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ○ | ● | ● | ◐ | ◐ |
| Netzdiagramm | ● | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ |
| Weitere Qualitätswerkzeuge | | | | | | | | | | | | |
| Boxplot | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ○ | ● | ● | ◐ | ◐ |
| Vorliegende Arbeit (QVM) | | | | | | | | | | | | |
| | ● | ● | ● | ● | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ |

3.4 Zwischenfazit: Stand der Forschung und Industrie

Dieses Kapitel hat gezeigt, dass die Erfassung und Dokumentation sowie Weitergabe und Ausgabe von montage- und qualitätsrelevanten Informationen überwiegend manuell und in analoger Form durch die Mitarbeiter erfolgt. Jedoch führt dies zu Medienbrüchen mit der Notwendigkeit bzgl. adäquater Kommunikationsschnittstellen. Eine analoge Kommunikation in Verbindung mit verspäteter Digitalisierung wichtiger Qualitätsdaten führt zu mangelhafter Automatisierung der Kommunikation sowie im Ergebnis zu fehlender Echtzeitbereitstellung von Qualitätsinformationen. Diese Situation wird durch die regelungstechnische Totzeit beschrieben und führt zu verzögerter Handlungsfähigkeit im Produktionsprozess. Somit stellen die

¹⁸ „Homomorphismus“ bezeichnet die „Gleichheit der Strukturen“ [ARE15]. Alle betrachteten Objekte innerhalb des Qualitätswerkzeugs sind bzgl. ihrer Größen unabhängig von ihren Einheiten und Dimensionen zueinander normiert und folglich miteinander vergleichbar.

Digitalisierung und Automatisierung der Informationsflüsse die grundlegenden Basiselemente für eine adäquate Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage im hybriden Kontext dar.

Die analysierten Lösungsansätze haben im Hinblick auf die Leitfragen und informationstechnischen Defizite ebenso relevante Forschungsbedarfe verschiedener Bereiche aufgezeigt. Der Stand der Forschung und Industrie kann somit über den Bedarf von vier Kernpunkten zusammengefasst werden:

1. Sachgerechte Definition des Begriffs „Produktionsqualität“
2. Effiziente Struktur und Logik zur hybriden Qualitätsregelung
3. Adäquate Benutzungsoberfläche zur Ein- und Ausgabe von montage- und qualitätsbezogenen Informationen
4. Grafische Methode zur Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualitätssituation

4 Struktur des Konzeptes

„Suche nicht nach Fehlern, suche nach Lösungen.“

HENRY FORD (1863 – 1947)

Dieses Kapitel zeigt die Konzeptstruktur der vorliegenden Arbeit. Neben den Anforderungen werden die Aufbaustruktur und Ablaufstruktur vorgestellt. Zudem werden die verwendeten Modellierungswerkzeuge beschrieben.

4.1 Definition der erforderlichen Anforderungen

Die Erkenntnisse zum Stand der Forschung und Industrie führen zu Anforderungen im Hinblick auf eine effiziente und hybride Qualitätsregelung innerhalb des Montagesystems. Diese lassen sich in Kategorien unterteilen, welche nachfolgend in tabellarischer Form vorgestellt werden. Eine ausführliche Beschreibung der Anforderungen ist in Anhang G hinterlegt.

Anforderungen an die Definition der Produktionsqualität

In Unterabschnitt 3.3.1 wurde aufgezeigt, dass keine sachgerechte Definition zur Produktionsqualität vorliegt. Für eine adäquate Qualitätsregelung im Bereich der Fahrzeugmontage ist jedoch zunächst eine Beschreibung der

Produktionsqualität erforderlich. Die konkreten Anforderungen für eine sachgerechte Definition im Kontext der Fahrzeugmontage sind in Tabelle 4.1 aufgelistet und umfassen eine Teilmenge der Kriterien aus Tabelle 3.1.

Tabelle 4.1: Anforderungen an die Definition der Produktionsqualität

| Allgemeine Anforderungen | |
|---------------------------------|--|
| ■ Bezug zum Montageprozess | ■ Berücksichtigung von Qualitätskosten |
| ■ Binäre Beschreibung | ■ Ableitung von Qualitätsmerkmalen |
| ■ Quantitative Beschreibung | ■ Ableitung eines Kennzahlensystems |

Anforderungen an die hybride Qualitätsregelung

Trotz der unterschiedlichen Strukturen technischer und hybrider RK (vgl. Abschnitt 2.2) existieren Gemeinsamkeiten bei den Anforderungen. Zusätzlich wurde in Unterabschnitt 3.3.2 gezeigt, dass kein geeignetes informationstechnisches Referenzmodell existiert. Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht der Anforderungen an die Qualitätsregelung. Diese ergeben sich aus wissenschaftlichen RK- und Güteanforderungen sowie spezifischen Anforderungen der Fahrzeugmontage.

Tabelle 4.2: Anforderungen an die Qualitätsregelung

| Regelkrisanforderungen | |
|---|------------------------------------|
| ■ Messen | ■ Stellen |
| ■ Vergleichen | |
| Güteanforderungen | |
| ■ Stationäre Genauigkeit | ■ Minimierung der Totzeit |
| ■ Dämpfung von Überschwingungen | ■ Stabilität des Montagesystems |
| ■ Schnelligkeit der Maßnahmen | ■ Robustheit der Qualitätsregelung |
| Spezifische Anforderungen | |
| ■ Rollen-, sach- und zeitgerechte Qualitätsinformation | |
| ■ Rückwärtsgerichtete Qualitätsinformationen durch Qualitätsrückmeldung | |
| ■ Vorwärtsgerichtete Qualitätsinformationen zur Nacharbeitssteuerung | |
| ■ Entscheidungslogik zur Weiterleitung von Qualitätsinformationen | |
| ■ Beobachtbarkeit des Montagesystems | |
| ■ Zeitliche Dynamik des Montagesystems | |
| ■ Regelbarkeit des Montagesystems | |

Anforderungen an die Informationsvisualisierung

Die grafische Benutzungsoberfläche (GUI) repräsentiert das entscheidende Element der Mensch-System-Kollaboration in der Fahrzeugmontage. Es verkörpert die Schnittstelle zwischen den Nutzern und dem IS. Jedoch zeigt Unterabschnitt 3.3.3, dass eine montage- und qualitätsorientierte Informationsvisualisierung mit spezifischem Fokus auf eine taktgebundene Montagelinie durch bestehende Ansätze nicht sachgerecht bereitgestellt werden kann. Eine adäquate Visualisierung von montage- und qualitätsbezogenen Informationen innerhalb der Montagelinie muss folglich spezifische Anforderungen erfüllen. Tabelle 4.3 zeigt die relevanten Anforderungen bestehend aus Kriterien der Fahrzeugmontage und den Normen ISO/IEC 25030 und DIN EN ISO 9241.

Tabelle 4.3: Anforderungen an die Informationsvisualisierung

| Allgemeine Anforderungen |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Informationstransparenz ■ Bereitstellung von Echtzeitinformationen ■ Rollen-, sach- und zeitgerechte Darstellung ■ Stations- und fahrzeugspezifische Darstellung ■ Außerordentliche Montage- und Qualitätshinweise ■ Hohe Flexibilität der Visualisierungsinhalte ■ Gewährleistung der Prozessfähigkeit ■ Umsetzung der ISO/IEC 25030 ■ Umsetzung der DIN EN ISO 9241 |

Anforderungen an das Qualitätsmodell

Die Analyse bestehender grafischer Qualitätsmodelle zur Visualisierung und Überwachung der Qualitätssituation in Unterabschnitt 3.3.4 hat einen Bedarf nach einem adäquaten Werkzeug für den Bereich der Fahrzeugmontage gezeigt. Das erforderliche Qualitätsmodell muss für eine sachgerechte Anwendung unterschiedliche Kriterien erfüllen, welche anwendungsorientiert auf den Bereich der Fahrzeugmontage spezifiziert sind. Tabelle 4.4 zeigt die erforderlichen Anforderungen an das Qualitätsmodell. Diese sind identisch

mit den Kriterien zur Abgrenzung der bestehenden Qualitätsmodelle aus Tabelle 3.4.

Tabelle 4.4: Anforderungen an das Qualitätsmodell

| Notwendige Eigenschaften | | |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| ■ merkmalsbasiert | ■ homomorph | ■ grafisch |
| ■ asymmetrisch | ■ objektunabhängig | ■ analytisch |
| ■ toleranzbasiert | ■ multiobjektiv | ■ quantifizierbar |
| ■ generisch | ■ hierarchisch | ■ anwenderunabhängig |

Anforderungen an die Prozesse des Montagesystems

Zudem bestehen Anforderungen an die Prozesse. Eine reine Implementierung der informationstechnischen Konzepte reicht für einen effizienten Einsatz nicht aus. Vielmehr müssen die relevanten Prozesse in Unterabschnitt 3.2.5 für eine informationstechnische Unterstützung vorbereitet und ggf. angepasst werden. Tabelle 4.5 zeigt die allgemeinen Anforderungen an die Prozesse.

Tabelle 4.5: Anforderungen an die Prozesse des Montagesystems

| Allgemeine Anforderungen |
|---|
| ■ Vollständige Einbindung des Informationssystems |
| ■ Gewährleistung der Funktionsfähigkeit |
| ■ Vermeidung von analogen Dokumenten |
| ■ Reaktion auf die bereitgestellten Informationen |

Anforderungen an das Informationssystem

Während des Prozessablaufes müssen die Mitarbeiter informationstechnisch unterstützt werden. Unterabschnitt 3.2.6 hat gezeigt, dass eine analoge Informationsbereitstellung kritische Defizite mit potenziell negativen Auswirkungen auf die Produktionsqualität aufweist. Folglich wird ein IS benötigt, welches positiv zu den Faktoren des magischen Dreiecks der perfekten

Produktion (vgl. Abbildung 1.1) in der Montagelinie beiträgt. Das IS muss unterstützend zur Qualitätsherstellung beitragen, sodass ein lückenloser Qualitätsverbau gewährleistet ist. Tabelle 4.6 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen Anforderungen kategorisiert nach Netzwerk, Daten und Prozess.

Tabelle 4.6: Anforderungen an das Informationssystem

| Netzwerkspezifische Anforderungen |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Vollständige Digitalisierung des analogen Informationsaustauschs ■ Ganzheitliche Einbettung in die Systemlandschaft ■ Einheitliche Schnittstellen und Protokolle (Plug&Work) ■ Echtzeitsynchronisation mit anderen Systemen ■ Aufbau eines Wissensmanagementsystems |
| Datenspezifische Anforderungen |
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Identifikation und Extraktion montage- und qualitätsbezogener Daten ■ Speicherung und Aggregation relevanter Daten ■ Vollständige und einheitliche Dokumentation ■ Aufbereitung bzw. Transformation zu relevanten Informationen ■ Übertragung und Visualisierung notwendiger Informationen ■ Sicherung und Sicherheit der Daten und Informationen |
| Prozessspezifische Anforderungen |
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Möglichkeit der Informationseingabe und -ausgabe ■ Ergonomie und intuitive Bedienbarkeit des Informationssystems ■ Automatisierung und Vermeidung manueller Tätigkeiten ■ Schnelligkeit der Informationsverarbeitung ■ Geringer Pflegeaufwand der Daten und des Informationssystems |

Anforderungen an die Nutzer

Abschließend müssen ebenfalls Anforderungen durch die Nutzer erfüllt werden. Der Mensch besitzt in der hybriden Qualitätsregelung einen entscheidenden Stellenwert. Folglich sind auch diverse Anforderungen an die Nutzer adressiert, um eine hybride Regelung der Produktionsqualität effizient umsetzen zu können. Tabelle 4.7 zeigt die Anforderungen an die Nutzer.

Tabelle 4.7: Anforderungen an die Nutzer

| Allgemeine Anforderungen |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Motivation zur hybriden Qualitätsregelung ■ Umsetzung der Informationen ■ Bereitschaft zur Akzeptanz des IS ■ Kritischer Umgang mit den Informationen ■ Konsequente Nutzung der Funktionen ■ Konstruktives Feedback der Nutzer |

4.2 Aufbaustruktur des Konzeptes

Die vorliegende Arbeit stellt ein Konzept auf Basis von fünf Modulen zur effizienten Qualitätsregelung bereit. Mit diesem Konzept sollen die Anforderungen aus Abschnitt 4.1 erfüllt und daraus folgend die informationstechnischen Defizite aus Unterabschnitt 3.2.6 vermieden werden. Abbildung 4.1 zeigt die Aufbaustruktur des Konzeptes.

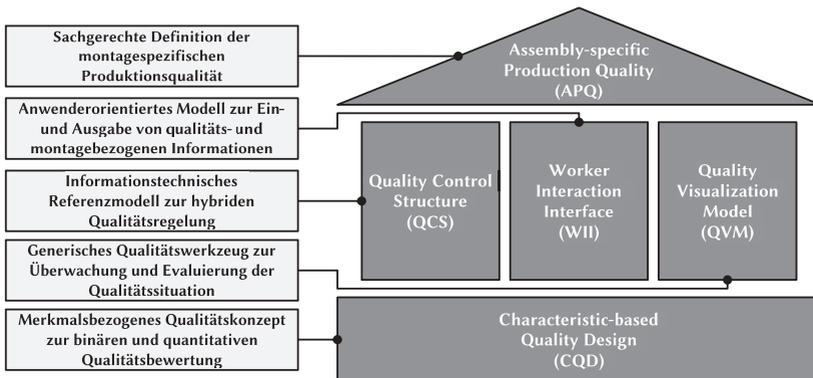


Abbildung 4.1: Aufbaustruktur des Konzeptes

Das konzeptuell-grundlegende Fundament der Arbeit legt das *Characteristic-based Quality Design* (CQD). Dieses Modul repräsentiert ein merkmalsbezogenes Qualitätskonzept zur binären und zusätzlich quantitativen Bewertung der Qualität eines Betrachtungsobjektes oder einer Kombination mehrerer typunabhängiger Betrachtungsobjekte (Ergebnis 1) und zeigt auf, wie ein Qualitätskonzept für eine adäquate Qualitätsbewertung und Qualitätsregelung gestaltet sein muss (Leitfrage 1). Die Beschreibung des CQD erfolgt in Kapitel 5.

Der thematische Kern dieser Arbeit wird durch den Begriff der Produktionsqualität festgelegt. Jedoch erfordert eine Qualitätsregelung eine sachgerechte Definition im Kontext der Fahrzeugmontage (Leitfrage 2). Die geforderte Bereitstellung einer montagespezifischen Definition auf Basis eines produktionsorientierten Kennzahlensystems (Ergebnis 2) liefert die *Assembly-specific Production Quality* (APQ). Die APQ kann somit als theoretisch-übergreifendes Dach dieser Arbeit betrachtet werden. Kapitel 6 definiert den Begriff der APQ in qualitativer, binärer und zusätzlich quantitativer Form.

Weiterhin besteht das Konzept aus drei technischen Modulen bzw. Säulen. Die erste Säule wird durch die *Quality Control Structure* (QCS) gebildet. Innerhalb der Anforderungen wird eine informationstechnische Struktur und Logik für eine Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage gefordert (Leitfrage 3). Die QCS stellt dazu ein informationstechnisches Referenzmodell einer hybriden Qualitätsregelung zum bidirektionalen Management von Qualitätsinformationen bereit (Ergebnis 3). Die QCS wird in Kapitel 7 beschrieben.

Die zweite Säule repräsentiert das *Worker Interaction Interface* (WII). Aufgrund der informationstechnischen Defizite und der sich daraus generierenden Anforderungen ist unklar, wie und mit welchen Hilfsmitteln die Nutzer mit relevanten qualitätsbezogenen Informationen rollen-, sach- und zeitgerecht versorgt werden müssen (Leitfrage 4). Ebenso muss beantwortet werden, wie qualitätsbezogene Informationen in Form von Kennzahlen und

durch Visualisierung rollengerecht bereitgestellt werden können (Leitfrage 5). Dazu liefert das WII ein Lösungskonzept in Form eines anwenderorientierten Modells einer grafischen Benutzungsoberfläche zur Ein- und Ausgabe von qualitäts- und montagebezogenen Informationen innerhalb der Montagelinie (Ergebnis 4). Die Beschreibung des WII erfolgt in Kapitel 8.

Die dritte Säule liefert das *Quality Visualization Model (QVM)*. Neben einer sachgerechten Informationsvisualisierung innerhalb der Montagelinie ist eine grafische Darstellung und Analyse der Qualitätssituation zur Qualitätsüberwachung erforderlich. Die Herausforderung ist folglich die anforderungsgerechte Visualisierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes (Leitfrage 6). Das QVM ermöglicht in diesem Zusammenhang eine kontinuierliche Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes (Ergebnis 5). Das QVM wird in Kapitel 9 vorgestellt.

Der Aufbau der technischen Module basiert auf dem Architekturmuster nach MVC (vgl. Unterabschnitt 2.3.4). Diese Dreiteilung des Konzeptes ermöglicht eine „schwache Kopplung zwischen“ und „starke Kohäsion in“ den Modulen¹. Abbildung 4.2 zeigt die Konzeptarchitektur in Anlehnung an GOLL [GOL14].

Die Architektur zeigt, dass die QCS als Controller zum zielgerichteten Management von qualitätsbezogenen Daten und Informationen agiert. Dadurch erhöht die QCS die Synchronität zwischen realer und digital abgebildeter Qualitätssituation. Da Qualitätsinformationen an die jeweiligen Rollen in Echtzeit weitergeleitet werden, ermöglicht die QCS eine flexible Qualitätsregelung innerhalb des Montagesystems. Folglich liefert die QCS einen direkten Beitrag zur Vernetzung zwischen Mitarbeitern und IS in der Produktion.

Weiterhin repräsentieren das WII und das QVM jeweils eine View. Abbildung 4.2 zeigt, dass die Rollen der Gruppen „Produktion“ und „Qualitätssicherung“ (vgl. Abbildung 3.6) mit dem WII als View interagieren, die Rollen der Gruppe „Qualitätsmanagement“ hingegen mit dem QVM als View. Dies

¹ Vgl. die noch heute gültigen Prinzipien der Softwaretechnik nach SIMON [SIM62].

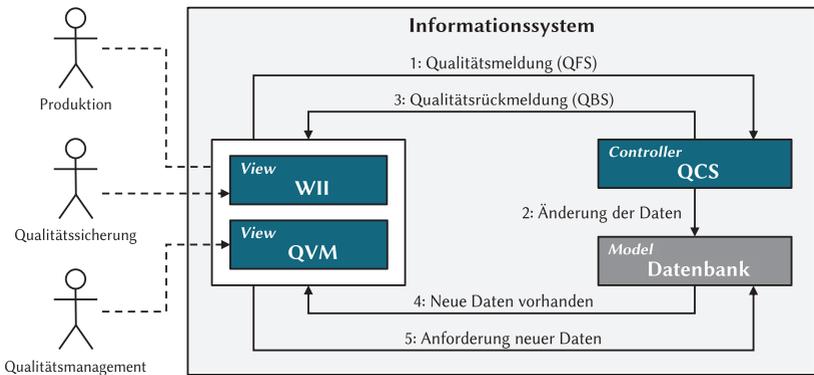


Abbildung 4.2: Architektur des Konzeptes nach MVC

ist dadurch begründet, da die entsprechenden Rollen aufgrund ihrer individuellen Prozesse unterschiedliche Inhalte und somit verschiedene Visualisierungsmethoden mit anderen Funktionen benötigen.

Ebenso deutlich wird die Verallgemeinerung der Komponente Model als Datenbank. Das Konzept fokussiert sich auf die Komponenten View und Controller, welches auf jegliche Datenbanken zugreifen und relevante Daten und Informationen verarbeiten soll. Dabei ist irrelevant, woher die Daten zum Management und zur Visualisierung kommen. Für eine Interaktion mit der Komponente Model sind jedoch Schnittstellen und Protokolle zu den drei technischen Modulen erforderlich (vgl. netzwerkspezifische Anforderungen in Tabelle 4.6).

Mit dieser Architektur ist eine Portierung des Konzeptes auf andere Produktionsbereiche möglich. Die datentechnische Umsetzung unterscheidet sich von der verwendeten Komponente Model. Die Komponenten View und Controller bleiben i. d. R. unberührt. Lediglich im Fall anderer Informationsbedarfe oder Meldestrukturen müssen diese modifiziert werden. Dies sichert eine hohe Übertragbarkeit (vgl. Anforderung nach ISO/IEC 25030 in Tabelle 4.3).

Die technischen Module werden innerhalb der Produktionssysteme als IS kategorisiert. Auf horizontaler Ebene existieren weitere IS, welche im Rahmen der Qualitätsregelung mit dem Konzept interagieren. Abbildung 4.3 zeigt die abstrahierte Systemlandschaft eines Montagesystems im Konzept.

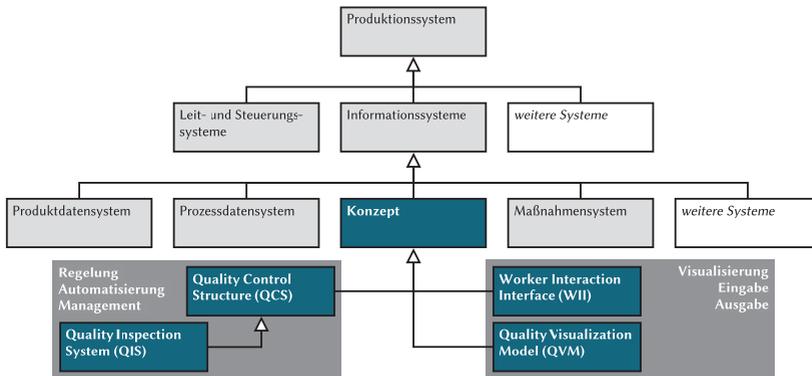


Abbildung 4.3: Systemlandschaft des Konzeptes im Montagesystem

Anhang J zeigt ein exemplarisches Klassendiagramm als Strukturdiagramm der „Unified Modeling Language“ (vgl. Tabelle 4.8). Es stellt im Sinne der Aufbaustruktur die zugehörigen Klassen, Schnittstellen und Beziehungen des IS grafisch dar. Im Rahmen einer Entwicklung der technischen Module muss das Diagramm jedoch ergänzt bzw. bereinigt werden.

4.3 Ablaufstruktur des Konzeptes

Nach der Festlegung der Aufbaustruktur ist die Definition der Ablaufstruktur erforderlich. Der Ablauf des Konzeptes strukturiert sich über seine fünf Module. Zusätzlich ist ein Modul zur Speicherung der Daten und Informationen erforderlich, welches nachfolgend in verallgemeinerter Form als *Datenbank* bezeichnet wird. Abbildung 4.4 zeigt die Ablaufstruktur des Konzeptes.

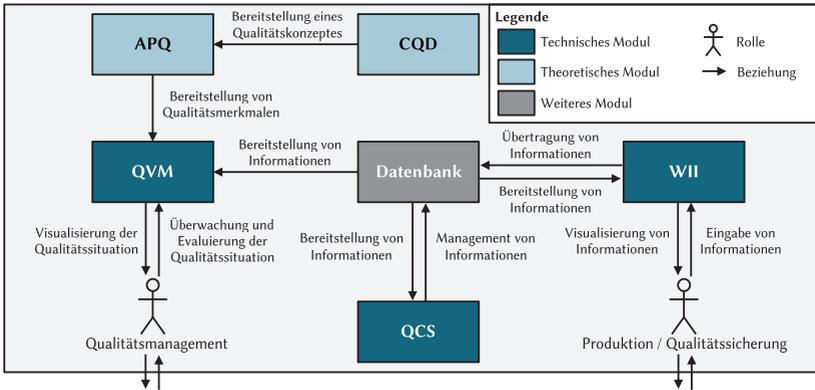


Abbildung 4.4: Ablaufstruktur des Konzeptes

Eine Regelung der Produktionsqualität über die QCS (Säule 1, Kapitel 7) kann erst erfolgen, wenn zuvor das erforderliche Qualitätskonzept CQD (Fundament, Kapitel 5) und die montagespezifische Produktionsqualität APQ (Dach, Kapitel 6) definiert wurden. Die Schnittstelle zwischen den Daten der Regelung und den Mitarbeitern in der Montagelinie stellt die Visualisierung der Montageinformationen über das WII (Säule 2, Kapitel 8) dar. Um Qualitätsinformationen in der Montagelinie sach-, zeit- und rollengerecht visualisieren zu können, ist jedoch ein entsprechendes Managementkonzept notwendig. Eine adäquate Visualisierung von Qualitätsinformationen über das WII kann folglich nicht ohne ein Management dieser Informationen durch die QCS erfolgen – das WII erfordert die QCS. Den methodischen Abschluss des Ablaufes bildet die Qualitätsüberwachung über das QVM (Säule 3, Kapitel 9). Jedoch kann die dritte Säule des Konzeptes unabhängig und isoliert von den beiden vorherigen Säulen angewendet werden. Die Basis aller Säulen repräsentiert jedoch das CQD als Fundament des Konzeptes und ist somit obligatorisch. Zwischen den Modulen besteht ein hoher Interaktionsgrad sowie eine direkte Interaktion mit den Rollen im Montagesystem. Folglich kommunizieren die Mitarbeiter über die technischen Module miteinander. Die Kommunikationsstruktur des Konzeptes wird in Abbildung 4.5 deutlich.

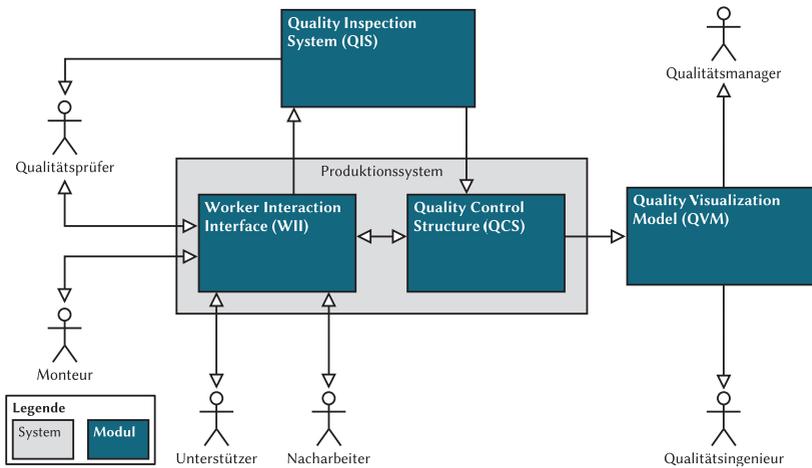


Abbildung 4.5: Kommunikationsstruktur des Konzeptes

Innerhalb der Kommunikationsstruktur sind zwei wesentliche Punkte erkennbar. Zum einen wurde die Datenbank in der Kommunikationsstruktur ausgeklammert, damit der Fokus auf die wesentlichen Module des Konzeptes gelegt werden kann. Dennoch sind Datenbanken zur Speicherung unverzichtbare Komponenten der Qualitätsregelung. Zum anderen wurde das *Quality Inspection System (QIS)* im Konzept hinterlegt. Es handelt sich dabei um ein technisches Qualitätsprüfsystem als Assistenz der Mitarbeiter im Rahmen des Qualitätsprüfprozesses. Im Konzept wird es der QCS zugeordnet und nicht als eigenständiges Modul aufgelistet. Dennoch ist z. T. eine explizite Darstellung der Komponente erforderlich. Das QIS wird in Abschnitt 7.5 beschrieben.

Der Prozessablauf des Konzeptes wird über einen Hauptprozess und mehrere Subprozesse repräsentiert. Eine Übersicht der Prozesse wird durch Abbildung 4.6 dargestellt. Die Abbildung wird über ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) in Anhang L detailliert.

Die Durchführung des Prozessablaufes beinhaltet dabei unterschiedliche Anwendungsfälle der Rollen. Als Ergänzung zur Ablaufstruktur des

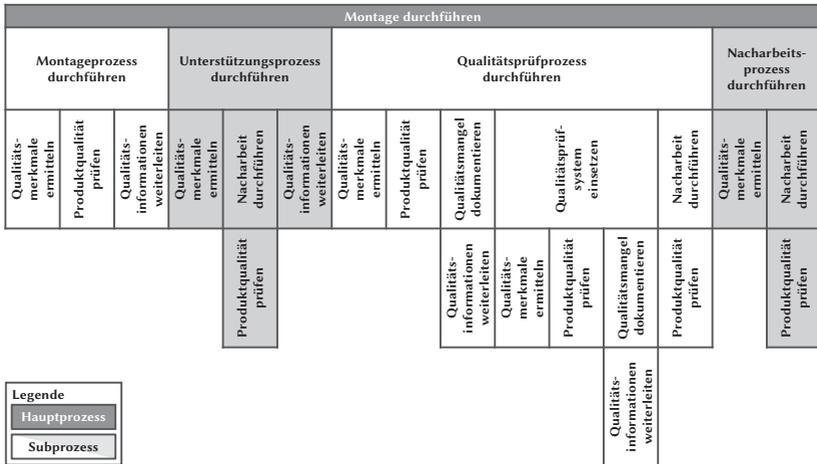


Abbildung 4.6: Übersicht des Prozessablaufes

Konzeptes zeigt Anhang I das Anwendungsfalldiagramm im Kontext der hybriden Qualitätsregelung durch die drei technischen Module. Spezielle Assoziationen wie bspw. include- oder extend-Beziehungen zwischen den Anwendungsfällen werden nicht dargestellt, da diese ausreichend über die EPK repräsentiert werden. In diesem Anwendungsfalldiagramm steht die Interaktion zwischen den Rollen und den Systemen im Vordergrund (hybrider Fokus).

4.4 Auswahl der Modellierungswerkzeuge

Die konzeptuelle und informationstechnische Modellierung des Konzeptes erfolgt primär über die grafische Modellierungssprache „Unified Modeling Language“ (UML). Diese dient zur Modellierung, Dokumentation, Spezifizierung und Visualisierung komplexer Systeme, unabhängig von deren Fach- und Realisierungsgebiet. Sie liefert die Notationselemente für statische und dynamische Modelle zur Analyse, zum Design und zur Architektur

[RUP12]. Da es sich vorwiegend um eine informationstechnische Modellierung zur Spezifikation, Konstruktion und Dokumentation des Konzeptes handelt, eignet sich folglich die UML als die aktuell dominierende Sprache für die Softwaresystem-Modellierung. Die UML umfasst 14 Diagrammarten. Tabelle 4.8 zeigt eine Übersicht der existierenden UML-Diagramme [RUP12; FOW03; BAL01]. Die in dieser Arbeit verwendeten Diagramme sind farblich hinterlegt.

Tabelle 4.8: UML-Diagramme dieser Arbeit

| Strukturdiagramme | Verhaltensdiagramme |
|------------------------------------|---|
| Paketdiagramm | Aktivitätsdiagramm |
| Objektdiagramm | Zustandsdiagramm |
| Klassendiagramm² | Anwendungsfalldiagramm² |
| Kompositionsstrukturdiagramm | Sequenzdiagramm |
| Komponentendiagramm | Kommunikationsdiagramm^{2 3} |
| Verteilungsdiagramm | Zeitverlaufdiagramm |
| Profildiagramm | Interaktionsübersichtsdiagramm |

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Prozess der Qualitätsregelung. Folglich steht das prozessbezogene Verhalten der Module im Vordergrund, welche über entsprechende Verhaltensdiagramme der UML beschrieben werden. Diese zeigen zum einen das Verhalten der Module innerhalb der Prozesse und zum anderen die Kollaboration mit den Rollen des Montagesystems. Lediglich das Klassendiagramm (vgl. Anhang J) zeigt die Struktur der Module, was für eine adäquate Beschreibung jedoch ausreicht.

Zudem erfolgt die grafische Modellierung der QCS mittels Blockschaltbild zur Adaption regelungstechnischer Elemente. Ein Blockschaltbild zeigt die Gliederung des Systems auf Basis seiner Elemente und deren Verkopplung. Trotz fehlender Beschreibung der dynamischen Eigenschaft erweist sich

² Das Klassendiagramm wird in Anhang J, das Anwendungsfalldiagramm in Anhang I und das Kommunikationsdiagramm in Abbildung 4.5 dargestellt.

³ Das Kommunikationsdiagramm wird als Kommunikationsstruktur dargestellt.

diese strukturelle Beschreibung als aussagekräftig und übersichtlich genug, um wichtige Phänomene eines RK erklären zu können [LUN16]. Ziel des Blockschaltbildes zur QCS ist es, die einzelnen Elemente, insbesondere die menschlichen und technischen Rollen bzgl. ihrer Kollaboration, im regelungstechnischen Kontext zu beschreiben. Die konkrete Modellierung des Blockschaltbildes zur QCS erfolgt in Unterabschnitt 7.7.1 sowie in Anhang N.

Weiterhin wird die Entscheidungslogik bzw. der Programmablauf der QCS über zwei weitere Modellierungsmethoden dargestellt. Zum einen erfolgt die Modellierung mittels Pseudocode. Dieser beschreibt die Funktionen in einer Syntax mit ähnlicher Präzision einer Programmiersprache. Jedoch wird beim Pseudocode die Syntax allgemein und einfach gehalten, sodass auch fachfremde Personen diesen verstehen können. [BEE03; MEH08; COR10] Der Pseudocode zur QCS wird in Anhang K aufgezeigt.

Zum anderen wird die QCS über eine „ereignisgesteuerte Prozesskette“ (EPK) modelliert. Eine EPK ist ein Werkzeug zur Modellierung von Geschäftsprozessen und charakterisiert sich als semi-formale Methode [SCH02a]. Diese Modellierungssprache erlaubt eine anschauliche Modellierung von Kontrollflüssen, welche auch für Modellnutzer ohne fundiertes modellierungstechnisches Vorwissen geeignet sind [ROS12]. Die Modellierung ermöglicht eine Darstellung des Kontrollflusses und von Nebenläufigkeit, die Abbildung von bedingten Verzweigungen und Schleifen sowie die Wiedergabe des Datenflusses und die Angabe der involvierten Organisationseinheiten bzw. IS [STA06]. Basis einer EPK ist der strukturelle Charakter bestehend aus Funktionen, Ereignissen, Konnektoren und Kanten sowie optional aus verschiedenen anderen Objekttypen [ROS12]. Die Modellierung der QCS über eine EPK wird in Anhang M dargestellt. Weiterhin wird das Zusammenspiel der betrachteten Prozesse aus Abschnitt 3.1 in Anwendung des Konzeptes in Anhang L dargestellt.

4.5 Zwischenfazit: Struktur des Konzeptes

Das Kapitel hat die notwendigen Anforderungen aufgezeigt, welche sich aus dem Status Quo der Fahrzeugmontage und den bestehenden Lösungsansätzen ergeben. Erkennbar ist die Vielschichtigkeit der Anforderungen für ein sachgerechtes Konzept zur effizienten Qualitätsregelung. Insbesondere die Anforderungen hinsichtlich der Kollaboration zwischen Mensch und System innerhalb der Qualitätsregelung stellen entscheidende Punkte dar.

Das Konzept baut auf fünf Modulen auf. Das „Characteristic-based Quality Design“ (CQD) als grundlegendes Qualitätskonzept liefert das methodische Fundament zur qualitativen, binären und quantitativen Qualitätsbeschreibung eines Betrachtungsobjektes. Die „Assembly-specific Production Quality“ (APQ) als Definition der montagespezifischen Produktionsqualität repräsentiert eine sachgerechte Beschreibung des Begriffes im Kontext der Fahrzeugmontage. Weiterhin stellen drei Säulen den methodischen Kern des Konzeptes zur effizienten Qualitätsregelung dar. Die „Quality Control Structure“ (QCS) als erste Säule ermöglicht über vorwärts- und rückwärtsgerichtete Qualitätsinformationsströme ein regelungstechnisches Management von Qualitätsinformationen zwischen den Rollen innerhalb des Montagesystems. Das „Worker Interaction Interface„ (WII) als zweite Säule liefert eine grafische Benutzungsoberfläche und visualisiert montage- und qualitätsrelevante Informationen in sach-, zeit- und rollengerechter Form. Zudem stellt es diverse Funktionen zum informationstechnischen Austausch zwischen den Rollen zur Verfügung und ermöglicht so eine adäquate Kollaboration zwischen Mensch und System. Das „Quality Visualization Model“ (QVM) als dritte Säule ermöglicht über ein grafisches Qualitätswerkzeug eine kontinuierliche Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes.

Die einzelnen Module wirken im Zusammenspiel mit Blick auf eine effiziente Qualitätsregelung als Beitrag zur Beantwortung der Forschungsfrage. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die einzelnen Module vorgestellt sowie deren konkreter Beitrag zur Erfüllung der Anforderungen und zur Vermeidung der genannten Defizite aufgezeigt.

5 Definition des Qualitätskonzeptes

„Man muss messen, was messbar ist, und messbar machen, was zunächst nicht messbar ist.“

GALILEO GALILEI (1564 – 1642)

Damit „Qualität“ messbar und evaluierbar sowie vergleichbar und regelbar gemacht werden kann, ist ein anforderungsgerechtes Qualitätskonzept erforderlich (Leitfrage 1). Das Ergebnis dieses Kapitels umfasst ein anforderungsgerechtes Qualitätskonzept mit binärer und zusätzlich quantitativer Bewertung der Qualität eines Betrachtungsobjektes bzw. einer Kombination mehrerer typunabhängiger Betrachtungsobjekte (Ergebnis 1). Dieses Qualitätskonzept wird als „Characteristic-based Quality Design“ (CQD) bezeichnet.

5.1 Strukturmodell der Qualität

In der vorliegenden Arbeit wird der Qualitätsbegriff in Anlehnung an die DIN EN ISO 9000 als Erfüllungsgrad von Anforderungen durch ein Satz inhärenter Merkmale verstanden [NOR15a]. Qualität umfasst somit eine Menge

von beschreibenden Merkmalen bzw. Eigenschaften, welche das Qualitätsurteil des Kunden legen [WEI78; SCH15]. In der Literatur lassen sich u. a. folgende Grundsätze zur Qualität finden [BRÜ15; BEN14; GEI08]:

1. Qualität ist kein absoluter sondern ein relativer Wert.
2. Qualität ist keine physikalische Größe und nicht messbar.
3. Qualität ist kein bivalenter bzw. binärer Begriff.

Der erste Grundsatz nach dem relativen Qualitätswert findet in dieser Arbeit Anwendung. Die Grundsätze 2 und 3 erhalten im Rahmen dieses Qualitätskonzeptes jedoch keinen Zuspruch. Qualität wird als relativer Grad der Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis und den vorgegebenen Forderungen gesehen, welcher folglich sowohl (quantitativ) messbar als auch binär bewertbar ist. Dabei bezieht sich Qualität als kontinuierliche und binäre Größe immer auf ein Betrachtungsobjekt. Ein Betrachtungsobjekt bezeichnet ein materielles Produkt, einen immateriellen Prozess oder ein materielles bzw. immaterielles System. Um die Qualität des Betrachtungsobjektes quantitativ oder binär bewerten zu können, müssen objektspezifische Qualitätsmerkmale vorliegen (vgl. Unterabschnitt 2.1.2). Diese Qualitätsmerkmale können eine quantitative oder qualitative Ausprägung besitzen und sind häufig nicht messbar. Zum Zweck der Messbarkeit der einzelnen Qualitätsmerkmale werden zu jedem Qualitätsmerkmal quantitative Prüfmerkmale¹ bereitgestellt. Für den Aufbau des Qualitätskonzeptes wird folgende Symbolik gewählt:

o_k := Betrachtungsobjekt

$m_{k,j}$:= Qualitätsmerkmal

$e_{k,j,i}$:= Prüfmerkmal

k := Index des Betrachtungsobjekts

j := Index des Qualitätsmerkmals

i := Index des Prüfmerkmals

¹ In der Automobilproduktion auch „Messpunkte“ genannt.

Jedes Prüfmerkmal besitzt zur adäquaten Messbarkeit der einzelnen Messpunkte einen Sollwert, eine obere und untere Toleranzgrenze, ggf. eine obere und untere Sicherheitsgrenze sowie nach einer Messung einen Istwert und ggf. eine Abweichung. Zur mathematischen Beschreibung sind zusätzliche Definitions-, Toleranz- und Sicherheitsmengen notwendig, in denen die Werte liegen können. Die Struktur wird in Abbildung 5.1 dargestellt.

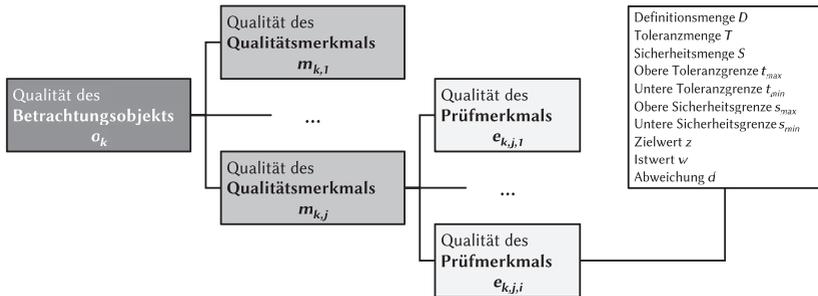


Abbildung 5.1: Struktur der Qualität eines Betrachtungsobjektes

D := Definitionsmenge

T := Toleranzmenge

S := Sicherheitsmenge

z := Sollwert

w := Istwert

d := Abweichung

t_{max} := Obere Toleranzgrenze

t_{min} := Untere Toleranzgrenze

s_{max} := Obere Sicherheitsgrenze

s_{min} := Untere Sicherheitsgrenze

$$D \subseteq \mathbb{R} \tag{5.1}$$

$$T \subseteq D \tag{5.2}$$

$$S \subseteq T \tag{5.3}$$

$$w, d \in D \tag{5.4}$$

$$t_{max}, t_{min} \in T \tag{5.5}$$

$$z, s_{max}, s_{min} \in S \tag{5.6}$$

$$t_{max} = \max(T) \tag{5.7}$$

$$t_{min} = \min(T) \tag{5.8}$$

$$s_{max} = \max(S) \tag{5.9}$$

$$s_{min} = \min(S) \tag{5.10}$$

$$d = w - z \tag{5.11}$$

5.2 Binäre Qualitätsbewertung

Die traditionelle Qualitätssicht ist toleranzbasiert. Innerhalb der DIN EN ISO 286-1 wird eine Toleranz als „Differenz zwischen der oberen und der unteren Toleranzgrenze“ definiert. Die Toleranzgrenze bezeichnet „vorgegebene Merkmalswerte, die die untere und / oder obere Grenze für den zulässigen Wert darstellen“. [NOR10a] Somit finden Toleranzen auch innerhalb des Qualitätskonzeptes dieser Arbeit eine entsprechende Anwendung.

Das Erreichen des Sollwertes (Optimum) wird zwar angestrebt, ist aber weder technisch noch mit wirtschaftlich adäquaten Mitteln realisierbar. Minimale Abweichungen sind im Zielbild einer industriellen Produktion akzeptabel und das Erreichen eines definierten Sollwertes daher nicht zwangsläufig notwendig. Folglich werden Toleranzbänder zur Qualitätsbewertung genutzt. Liegt der Istwert des Betrachtungsobjektes innerhalb der definierten Toleranzgrenzen, wird das Merkmal als fehlerfrei bzw. qualitätsgerecht bewertet. Jedoch führt die Überschreitung der oberen Toleranzgrenze bzw. Unterschreitung der unteren Toleranzgrenze zu einem nicht qualitätsgerechten Merkmal und verursacht zusätzliche Qualitätskosten. Diese traditionelle Qualitätssicht zeigt, dass Qualität über individuelle Merkmale messbar gemacht wird. Über die Prüfung nach Einhaltung der Toleranzgrenzen lässt sich so eine binäre Bewertung der Qualität des Merkmals und des Betrachtungsobjektes durchführen.

Der Begriff „binär“ beschreibt die Qualitätsbewertung anhand von zwei Werten (vgl. „Alternativmerkmal“ in Abbildung 2.1):

1. **True:** Die Qualitätsanforderungen sind erfüllt.
2. **False:** Die Qualitätsanforderungen sind nicht erfüllt.

In der Automobilindustrie werden dazu die Abkürzungen „i. O.“ (in Ordnung) und „n. i. O.“ (nicht in Ordnung) verwendet. Abbildung 5.2 zeigt die binäre Qualitätsbewertung mit symmetrischen Toleranzbereichen, welche ebenso asymmetrisch sein können. [BRÜ15]

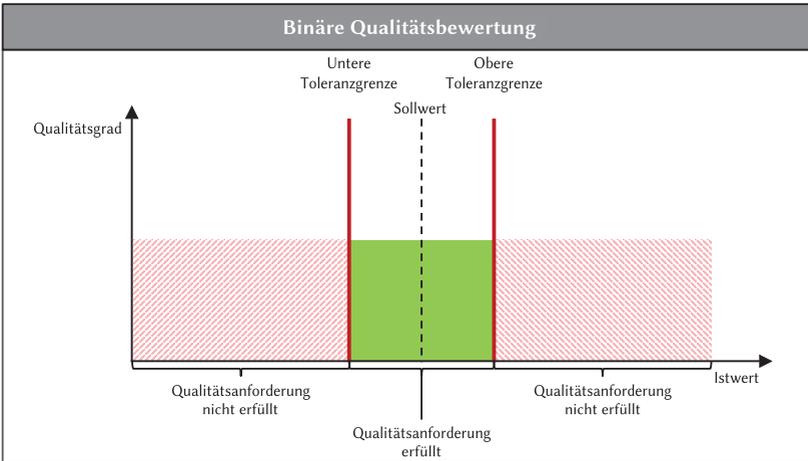


Abbildung 5.2: Binäre Qualitätsbewertung

Unter Berücksichtigung der spezifischen Toleranzgrenzen kann die binäre Bewertung der Prüf- und Qualitätsmerkmale sowie des Betrachtungsobjektes mittels nachfolgender Berechnungen abgeleitet werden. Formel 5.13 ermittelt den binären Qualitätswert eines Prüfmerkmals. Im Verbund mit den binären Qualitätswerten weiterer Prüfmerkmale folgt die binäre Qualitätsbewertung eines Qualitätsmerkmals in Formel 5.14. Abschließend erfolgt in Formel 5.15 auf Basis der binären Qualitätswerte der Qualitätsmerkmale eine Bewertung des binären Qualitätswertes des Betrachtungsobjektes.

q_B := Binärer Qualitätswert

$$q_B \in \{true, false\} \quad (5.12)$$

$$\forall_{k,j,i} : w(e_{k,j,i}) \in T(e_{k,j,i}) \Leftrightarrow q_B(e_{k,j,i}) = true \quad (5.13)$$

$$\forall_{k,j,i} : q_B(e_{k,j,i}) = true \Leftrightarrow q_B(m_{k,j}) = true \quad (5.14)$$

$$\forall_{k,j} : q_B(m_{k,j}) = true \Leftrightarrow q_B(o_k) = true \quad (5.15)$$

Liegen die Istwerte aller Prüfmerkmale eines Qualitätsmerkmals innerhalb ihrer individuellen Toleranzgrenzen, sind die Qualitätsanforderungen des Qualitätsmerkmals erfüllt und es liegt Qualität beim Qualitätsmerkmal vor. Sind wiederum die Qualitätsanforderungen aller Qualitätsmerkmale erfüllt, kann zugleich Qualität beim Betrachtungsobjekt bestätigt werden. Sofern jedoch ein einziger Istwert eines Prüfmerkmals außerhalb seiner individuellen Toleranzgrenzen liegt, kann keine Qualität für das Prüfmerkmal, das übergeordnete Qualitätsmerkmal sowie das gesamte Betrachtungsobjekt bestätigt werden.

5.3 Quantitative Qualitätsbewertung

Eine alternative Betrachtung stellt die Verlustfunktion nach TAGUCHI dar, nach der jede Abweichung vom Sollwert eine Qualitätsverschlechterung hervorruft und Qualitätskosten verursacht (vgl. Abbildung 2.6) [TAG04]. Abweichungen vom Sollwert können dann zu Qualitätskosten führen, wenn Prozessanpassungen bei systematischen Abweichungen (Trends und Runs) zur Näherung an den Sollwert notwendig sind. Jedoch führen Abweichungen im Rahmen der gesetzten Toleranzgrenzen nicht zwangsläufig zur Verschlechterung der Qualität des Betrachtungsobjektes und zu Qualitätskosten [WAL93]. Das Qualitätsverständnis nach TAGUCHI wird in diesem Qualitätskonzept nicht verfolgt.

Anforderungen gegenüber Qualitätsmerkmalen umfassen nicht die punktgenaue Erfüllung konkreter Sollwerte, sondern die Einhaltung (vom Kunden) akzeptierter Toleranzgrenzen (z. B. Spaltmaße eines Fahrzeuges). Neben der binären Qualitätsbewertung wird in diesem Qualitätskonzept die Qualität eines Betrachtungsobjektes und seiner Qualitätsmerkmale über Prüfmerkmale quantitativ durch den Abweichungsgrad des Istwertes vom Sollwert messbar gemacht. Dennoch erfordert eine aussagekräftige Bewertung der Qualität einen binären Qualitätswert über merkmalspezifische

Toleranzgrenzen. Abbildung 5.3 zeigt den qualitätsbezogenen Zielerreichungsgrad bzw. die quantitative Qualitätsbewertung eines Merkmals.

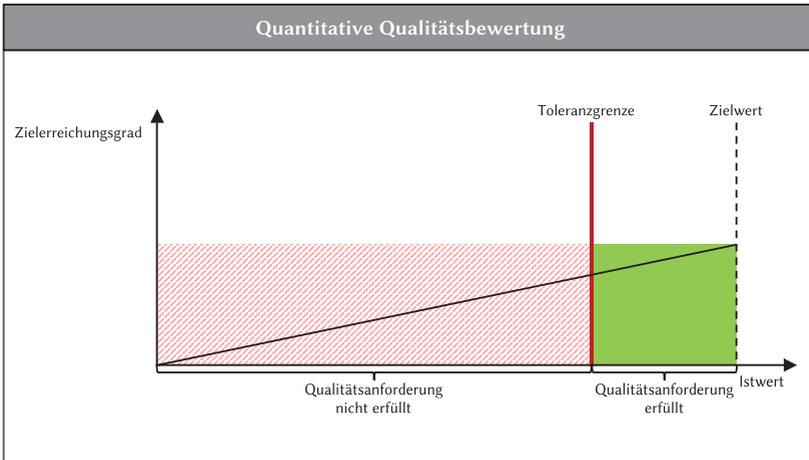


Abbildung 5.3: Quantitative Qualitätsbewertung

Die nachfolgenden Formeln zeigen die Ermittlung des quantitativen Qualitätswertes und die Messbarkeit über Qualitäts- und Prüfmerkmale. Formel 5.21 zeigt die Ermittlung des quantitativen Qualitätswertes eines Prüfmerkmals, welcher einen Beitrag zum quantitativen Qualitätswert des zugehörigen Qualitätsmerkmals in Formel 5.22 liefert. Abschließend werden über Formel 5.23 alle quantitativen Qualitätswerte der objektspezifischen Qualitätsmerkmale zur Ermittlung des quantitativen Qualitätswertes des Betrachtungsobjektes unter Berücksichtigung der merkmalspezifischen Gewichtungsfaktoren summiert.

In bestimmten Fällen besitzen einige Qualitätsmerkmale eine höhere Priorität. Die Nichterfüllung weniger wichtiger Merkmale kann durch die Erfüllung wichtiger Merkmale kompensiert werden. Aufgrund der kompensatorischen Wirkung ist eine Gewichtung der Qualitätsmerkmale ggf. notwendig.

Messpunktes dar, welches über- oder unterschritten werden kann. Beide Abweichungen vom Sollwert z reduzieren den quantitativen Qualitätswert q_Q . Es werden jedoch i. d. R. keine Grenzen als Zielwerte betrachtet, dessen Ziel nicht die punktgenaue Erreichung, sondern eine größtmögliche Unterschreitung ist. Eine Grenze stellt bspw. eine maximal zulässige Verbrauchsmenge dar. Dennoch werden Grenzen im CQD über Formel 5.20a und Formel 5.20b berücksichtigt.

5.4 Zwischenfazit: Definition des Qualitätskonzeptes

In diesem Kapitel wurde ein merkmalsbezogenes Qualitätskonzept mit binärer und zusätzlich quantitativer Bewertung der Qualität eines Betrachtungsobjektes bzw. einer Kombination mehrerer typunabhängiger Betrachtungsobjekte (Ergebnis 1) entwickelt. Dieses Qualitätskonzept wird als „Characteristic-based Quality Design“ (CQD) bezeichnet und ermöglicht es, Qualität messbar und evaluierbar sowie vergleichbar und regelbar zu gestalten.

Dies erfolgt über die merkmalsbasierte Struktur. Darauf aufbauend wird über den binären Qualitätswert q_B bewertet, ob die Qualitätsanforderungen „erfüllt“ oder „nicht erfüllt“ sind. Die Bewertungssicht des quantitativen Qualitätswertes q_Q ermöglicht zusätzlich eine quantitative Evaluation und macht Qualität vergleichbar sowie regelbar. Dies ist für ein anforderungsgerechtes Qualitätskonzept notwendig (Leitfrage 1).

Mit diesem Qualitätskonzept wurde die Grundlage zur Qualitätsregelung gebildet. Zum einen kann nun darauf aufbauend die sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität (APQ) in Kapitel 6 entwickelt werden. Zum anderen liefert dieses Qualitätskonzept das methodische Fundament zur Entwicklung des generischen Qualitätswerkzeugs (QVM) in Kapitel 9.

6 Definition der Produktionsqualität

„Die sicherste Grundlage einer Produktion ist die Qualität.“

ANDREW CARNEGIE (1835 – 1919)

Zur Regelung der Produktionsqualität im Bereich der Fahrzeugmontage ist zunächst eine für die Praxis adäquate Definition des Begriffes notwendig (Leitfrage 2). Dazu wird in diesem Kapitel eine sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität entwickelt (Ergebnis 2). Diese wird als „Assembly-specific Production Quality“ (APQ) bezeichnet.

6.1 Analyse der allgemeinen Produktionsqualität

In Unterabschnitt 3.3.1 wurden verschiedene Definitionsansätze zur Produktionsqualität vorgestellt. Kritisch zu bewerten sind der fehlende Detaillierungsgrad und die mangelhafte Spezifikation auf den Bereich der Fahrzeugmontage aller bestehenden Definitionen. Damit aus diesen allgemeinen Ansätzen eine sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität abgeleitet werden kann, muss zunächst die der Begriff anwendungsnah analysiert werden. Aus den Ergebnissen können im

Anschluss notwendige Informationen zur Ableitung der Definition gewonnen werden. Die folgende Sensitivitätsanalyse basiert auf dem Vorgehen nach OHLIGS [OHL17].

Die Definition nach BERENS und WALTHER weist im Vergleich zu den anderen Definitionen ein Strukturgerüst auf (vgl. Tabelle 3.1). Daher stellt diese eine angemessene Basis zur Entwicklung der APQ dar. In Anhang F wurde aufgezeigt, dass der Begriff der Produktionsqualität zwei unterschiedliche Perspektiven einnimmt – die Produktqualität und die Qualitätsfähigkeit, wobei sich letztere in vier Fähigkeiten aufteilt. Diese beiden Faktoren werden durch die qualitative Definition der allgemeinen Produktionsqualität in Formel 6.1 verknüpft.

$$\begin{aligned} \text{Produktionsqualität} &= \text{Produktqualität} && (6.1) \\ &+ \text{Planungsfähigkeit} \\ &+ \text{Beschaffungsfähigkeit} \\ &+ \text{Realisierungsfähigkeit} \\ &+ \text{Nutzungsfähigkeit} \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} &+ \text{Planungsfähigkeit} \\ &+ \text{Beschaffungsfähigkeit} \\ &+ \text{Realisierungsfähigkeit} \\ &+ \text{Nutzungsfähigkeit} \end{aligned}} \right\} \text{Qualitätsfähigkeit}$$

Die nachfolgende Sensitivitätsanalyse zeigt die Schwachstellen der Definition. Dazu werden Änderungen an den Fähigkeiten mit individuellen Auswirkungen vorgenommen. Zur Abstraktion werden die Beschaffungs- und Nutzungsfähigkeit konstant hoch gehalten, da diese außerhalb des Betrachtungsbereiches liegen. Die Planungs- und Realisierungsfähigkeit sowie die Produktqualität werden hingegen über drei Szenarien verändert.

Ausgangslage

Die Anforderungen des Kunden an einem Fahrzeug lassen sich durch folgende drei Qualitätsmerkmale bzw. zwei Merkmale¹ nach KANO konkretisieren:

¹ Nach KANO werden die Kundenanforderungen in Basis-, Leistungs- und Begeisterungsmerkmale sowie unerhebliche Merkmale und Rückweisungsmerkmale eingeteilt [KAN84].

1. Automatisches Cabrioletverdeck (Basismerkmale)
2. Leistungsstarker Motor (Leistungsmerkmal)
3. Ansprechendes Design (Leistungsmerkmal)

Szenario 1: Niedrige Planungsfähigkeit

Die Qualitätsanforderungen an die Motorleistung und das Design des Fahrzeugs wurden erfüllt, da alle entsprechenden Prüfmerkmale in ihren Toleranzbereichen liegen. Jedoch wurde aufgrund einer mangelhaften Marktforschung die Kundenanforderung nach einem Cabrioletverdeck im Entwurf nicht berücksichtigt. Dies führt sowohl zu einer *niedrigen Planungsfähigkeit* als auch, trotz *hoher Realisierungsfähigkeit*, zu einer *niedrigen Produktqualität*. Das Ergebnis ist eine *niedrige Produktionsqualität*.

Szenario 2: Niedrige Realisierungsfähigkeit

Durch eine effektivere Marktforschung fließen alle drei Kundenanforderungen nun in den Entwurf des Fahrzeugs ein. Aus den impliziten Kundenwünschen wurde außerdem eine Nackenheizung (Begeisterungsmerkmal) für eine verdeckfreie Fahrt bei niedrigen Temperaturen verbaut. In der Abschlussprüfung werden jedoch Qualitätsmängel auf der Oberfläche erkannt (Rückweisungsmerkmal). Das Ergebnis des zweiten Szenarios umfasst zwar eine *hohe Planungsfähigkeit*, jedoch ebenso eine *niedrige Realisierungsfähigkeit* sowie eine *niedrige Produktqualität*. In Summe folgt eine *niedrige Produktionsqualität*.

Szenario 3: Einsatz von Qualitätskosten

Trotz einer niedrigen Realisierungsfähigkeit in Szenario 2 ist eine hohe Produktqualität möglich. Die in der Abschlussprüfung identifizierten Qualitätsmängel wurden vor dem Versand des Fahrzeugs im Nacharbeitsbereich behoben. Sowohl die Abschlussprüfung als auch die Nacharbeit verursachen aufgrund mangelnder Qualitätsfähigkeit zusätzliche *Qualitätskosten*. Diese kompensieren die niedrige Realisierungsfähigkeit, sodass durch deren Einsatz eine *hohe Produktqualität* resultiert. Jedoch führen die *Qualitätskosten* in logischer Konsequenz zu einer *niedrigen Produktionsqualität*.

Dies zeigt, dass die Definition nach BERENS und WALTHER um den Faktor der Qualitätskosten erweitert werden muss und Formel 6.1 unvollständig ist. Auch ENGROFF zeigt den besonderen Stellenwert der Qualitätskosten zur Bewertung der Produktion auf [ENG14]. Somit gilt Formel 6.2:

$$\begin{aligned}
 \text{Erweiterte Produktionsqualität} &= \text{Produktqualität} && (6.2) \\
 &+ \text{Planungsfähigkeit} \\
 &+ \text{Beschaffungsfähigkeit} \\
 &+ \text{Realisierungsfähigkeit} \\
 &+ \text{Nutzungsfähigkeit} \\
 &- \text{Qualitätskosten}
 \end{aligned}$$

Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht in Tabelle 6.1, dass eine hohe Produktqualität unter einer niedrigen Qualitätsfähigkeit existieren kann. Der Fehlbetrag der Qualitätsfähigkeit muss dabei über Qualitätskosten ausgeglichen werden. Jedoch leidet nach Formel 6.2 die Produktionsqualität darunter.

Tabelle 6.1: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse

| | Szenario 1 | Szenario 2 | Szenario 3 |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Planungsfähigkeit | niedrig | hoch | hoch |
| Realisierungsfähigkeit | hoch | niedrig | niedrig |
| Qualitätsfähigkeit | niedrig | niedrig | niedrig |
| Qualitätskosten | - | - | hoch |
| Produktqualität | niedrig | niedrig | hoch |
| Produktionsqualität | niedrig | niedrig | niedrig |

Folglich betrachtet die Produktionsqualität den gesamten Produktionsprozess auf Basis des Qualitätskreises. Die notwendige Eingrenzung auf den Fertigungsbereich Montage erfordert die Extraktion montagespezifischer Aspekte. Die Identifikation qualitätsrelevanter Merkmale und Entwicklung der APQ erfolgt innerhalb der nachfolgenden Abschnitte.

6.2 Empirische Erhebung qualitätsrelevanter Merkmale

Im Rahmen einer Feldforschung im industriellen Produktionsumfeld wurden Interviews mit Experten unterschiedlicher Fachbereiche eines deutschen Automobilherstellers geführt. Das Ziel bestand in der Identifikation qualitätsrelevanter Merkmale des Montagesystems. Die Ergebnisse umfassen montagespezifische Qualitätsmerkmale zur Definition der APQ.

6.2.1 Wahl der Erhebungsmethode

Die Wahl der Erhebungsmethode ist abhängig von den vorhandenen Wissensformen. In der empirischen Sozialforschung ist die Methodik des Experteninterviews ein häufig eingesetztes Verfahren. Die Befragung von Fachexperten ist zeiteffektiv, um erfahrungsgestütztes Expertenwissen abzuholen [PIC09]. Insbesondere im Bereich der industrie-soziologischen Forschung findet dieses Verfahren der Datenerhebung eine große Akzeptanz. [BOG14]

Die Ermittlung montagespezifischer Qualitätsmerkmale zur Ableitung der APQ basiert auf Prozess-² und Deutungswissen. Die Durchführung von Experteninterviews wird somit nach BOGNER ET AL. gerechtfertigt. Zur Durchführung bedarf es der Vorgehensweise auf Basis von vier Phasen [PIC09]:

1. Auswahl der Experten
2. Vorbereitung des Gesprächsleitfadens
3. Durchführung des Experteninterviews
4. Auswertung der Ergebnisse

6.2.2 Auswahl der Experten

Der Begriff des Experten leitet sich vom lateinischen Wort „expertus“ (bewährt, erprobt) ab [BOG14]. Nach SCHMID und PICKEL ET AL. ist ein

² Prozesswissen umfasst i. e. S. weniger das Fachwissen, sondern das Erfahrungswissen.

Experte eine Person, welche die Verantwortung für den Entwurf, die Implementierung oder die Kontrolle einer Problemlösung trägt oder welche über privilegierten Zugang zu Informationen über Personengruppen oder Entscheidungsprozesse verfügt [SCH95a; PIC09]. Folglich wird eine Person als Experte bezeichnet, wenn diese über ein spezifisches Fachwissen verfügt, das sie nicht alleine verfügen muss, aber dennoch nicht für jeden frei zugänglich ist.

Bei der Auswahl der Experten wurden unterschiedliche Fachbereiche und Funktionen berücksichtigt. Anforderungen an die Definition der Produktionsqualität werden somit aus unterschiedlichen Perspektiven gerecht. Tabelle 6.2 zeigt die fachbezogene Auswahl der Experten.

Tabelle 6.2: Auswahl der Experten für Produktionsqualität

| Fachbereich | Primäre Indikatoren ³ | | | | | Experten |
|---|----------------------------------|----------|----------|---------|--------|----------|
| | Mensch | Maschine | Qualität | Termine | Umwelt | |
| Montage | X | | X | X | | 2 |
| Planung | X | X | X | X | | 2 |
| Instandhaltung | | X | | X | | 2 |
| Logistik | | | | X | | 2 |
| Q-Management | X | | X | X | | 2 |
| Q-Sicherung | X | | X | X | | 2 |
| Nacharbeit | X | | X | X | | 2 |
| Energie | | | | | X | 2 |
| Entsorgung | | | | | X | 2 |
| Anzahl der Experten und Experteninterviews | | | | | | 18 |

6.2.3 Vorbereitung des Gesprächsleitfadens

Leitfäden dienen zur Strukturierung des Untersuchungsfeldes und übernehmen im Interview eine Orientierungsfunktion [BOG14]. Es werden qualitative Interviews geführt, in denen nicht über alle Gespräche hinweg die identischen Fragen gestellt werden. Dies wäre bei einem quantitativen

Interview der Fall. Dennoch ist eine Vorbereitung konkreter Fragen empfehlenswert, welche bei Bedarf im Interview gestellt werden können. Der Gesprächsleitfaden unterstützt dabei die inhaltliche und methodische Vorbereitung der Erhebung. Wichtig ist die Anpassung der Leitfäden auf den Gesprächspartner und dessen Funktion und Qualifikation. Ein strukturierter Gesprächsleitfaden sichert zudem die Vergleichbarkeit der erhobenen Informationen. Die Fragen erfordern keine feste Reihenfolge, sondern sollen flexibel in das Gespräch einfließen. [BOG14] Der Gesprächsleitfaden ist in Anhang H beigefügt.

6.2.4 Durchführung des Experteninterviews

Die Durchführung des Experteninterviews strukturierte sich in vier Phasen. Der Erstkontakt erfolgte telefonisch. Dabei wurde der Interviewer vorgestellt und eine kurze Einführung in die Thematik der Forschungsarbeit gegeben. Es wurde ein aktiver Bezug zum Hintergrund des Experteninterviews geschaffen und das Thema grob beschrieben. Eine zeitnahe Termin- und Raumfindung wurde zugleich vereinbart. Eine Absage des Experteninterviews kam nicht vor.

Die Interviews basierten auf dem Leitfaden. Zur verbesserten Protokollierung wurde ein studentischer Mitarbeiter zu allen Experteninterviews hinzugezogen. Abschließend fand eine Zusammenfassung über das Interview statt. Der Zeitrahmen eines Interviews umfasste ca. 60 Minuten und in Summe ca. 18 Stunden. Die Interviews wurden vor Ort beim Experten durchgeführt.

6.2.5 Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung des Interviews und der Identifikation qualitätsrelevanter Merkmale der APQ erfolgt mit einer qualitativen Inhaltsanalyse. Dazu folgen nach BOGNER ET AL. vier Schritte [BOG14]:

³ Die Indikatoren wurden modifiziert entnommen aus [ENG14].

- 1. Fragestellung und Materialauswahl:** Vor dem Hintergrund der Leitfrage 2 werden die relevanten Inhalte hervorgehoben. Die Selektion stichhaltiger Informationen aus den Interviews geschieht bereits während der Dokumentation der Interviewprotokolle.
- 2. Extraktion:** Im zweiten Schritt erfolgt die Extraktion der Interviews mit dem Ziel aus den Ergebnissen eine Informationsbasis zu schaffen.
- 3. Aufbereitung:** Die Qualität der Datenbasis wird verbessert indem inhaltlich zusammenhängende Informationen zusammengefasst, redundante Informationen reduziert und offensichtliche Fehler korrigiert werden.
- 4. Auswertung:** Auf Grundlage der Ergebnisse folgt die Ableitung von montagespezifischen Qualitätsmerkmalen und der APQ (Ergebnis 2).

6.3 Betrachtungsobjekt und Qualitätsmerkmale

Die APQ erfordert zur Bewertung der montagespezifischen Produktionsqualität ein adäquates Betrachtungsobjekt. Dazu können unterschiedliche Instanzen des Montagesystems (vgl. Unterabschnitt 3.2.2) als Betrachtungsobjekt fungieren. Somit kann eine Betrachtung z. B. auf System-, Abschnitt-, Band- oder Stationsebene erfolgen. Das Betrachtungsobjekt ist je nach Anwendungsfall zu wählen.

Auf Grundlage des CQD in Kapitel 5 wird die Qualität eines Betrachtungsobjektes durch Qualitätsmerkmale beschrieben. Über Experteninterviews wurden acht Qualitätsmerkmale der Montage zur sachgerechten Beschreibung

der APQ identifiziert. Diese decken sich z. T. mit den empfohlenen Produktionskennzahlen der AWF nach ENGRÖFF (vgl. Anhang A). Die erhobenen Qualitätsmerkmale⁴ der APQ sind in Abbildung 6.1 dargestellt.

| | | | |
|---------------|-----------------|----------------|-------------------|
| TQE Montage | | | |
| | Geradeauslauf | Verfügbarkeit | Hours Per Vehicle |
| Kosten | Qualitätskosten | APQ | Energieverbrauch |
| | Maßnahmenerfolg | Prüfsicherheit | Abfallproduktion |
| QE Endprüfung | | | |

Abbildung 6.1: Qualitätsmerkmale der Montage

Geradeauslauf

Der *Geradeauslauf* bezeichnet den Zielerreichungsgrad der effektiven Produktion. Dieser wird über den Quotienten aus der Anzahl fehlerfreier Fahrzeuge und der Anzahl produzierter Fahrzeuge ermittelt. Die Kennzahl repräsentiert die „produzierte Qualität“ und ist der Qualitätsrate bzw. invertierten Fehlerrate identisch [CHR15]. Indirekt umfasst die Kennzahl zudem die Stückzahl.

$$\text{Geradeauslauf} = \frac{\text{fehlerfreie Fahrzeuge}}{\text{produzierte Fahrzeuge}} \in [0,1] \quad (6.3)$$

⁴ Diese wurden z. T. modifiziert in der Arbeit des studentischen Mitarbeiters verwendet [OHL17].

Verfügbarkeit

Eine weitere Kennzahl ist die *Verfügbarkeit*. Der Quotient aus der Hauptnutzzeit und der Plannutzzeit gibt an, wie stark die Kapazität der Produktion für die wertschöpfenden Funktionen genutzt wird. Die Hauptnutzzeit ist die Betriebszeit abzüglich störungsbedingter Unterbrechungen. Die Plannutzzeit ist die Zeit, welche für die Erreichung der Stückzahl eingeplant wird.

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{Hauptnutzzeit}}{\text{Plannutzzeit}} \in [0,1] \quad (6.4)$$

Hours Per Vehicle

Die Kennzahl *Hours Per Vehicle* (HPV) ist eine Personalproduktivitätskennzahl und setzt alle bezahlten Anwesenheitsstunden der produktionsbezogenen Mitarbeiter in Relation zu den produzierten Fahrzeugen im gleichen Betrachtungszeitraum [WEY11]. Es werden Mitarbeiter berücksichtigt, welche direkt oder indirekt in den Prozessen aus Unterabschnitt 3.2.5 involviert sind. Die Kennzahl der relativen HPV setzt den Istwert zum Sollwert ins Verhältnis. Alternativ auch als „Hours Per Unit“ oder „Hours Per Job“ bezeichnet.

$$\text{Absolute HPV} = \frac{\text{bezahlte Anwesenheitszeit}}{\text{produzierte Fahrzeuge}} \in \mathbb{R}_0^+ \quad (6.5)$$

$$\text{Relative HPV} = \frac{\text{geplante HPV}}{\text{reale HPV}} \in \mathbb{R}_0^+ \quad (6.6)$$

Energieverbrauch

Als positiven Beitrag zur nachhaltigen Produktion stellt der *Energieverbrauch* ein wichtiges Qualitätsmerkmal dar [DEH17]. U. a. strebt die Daimler AG eine „grüne Produktion“ über eine CO₂-neutrale Produktion der deutschen Produktionsstandorte an. Dabei soll elektrische Energie nur noch aus regenerativen Quellen bezogen und vollständig auf Kohlestrom verzichtet werden [KAR18].

Die Hauptenergieträger sind Strom und Wärme, zusätzlich kann der befüllte Kraftstoff hinzugezogen werden. Die Befüllung erfolgt jedoch automatisiert, sodass eine Abweichung zwischen Ist- und Sollwert nicht berücksichtigt wird. Der Energieverbrauch durch Beleuchtung und Heizung lässt sich in der Fahrzeugmontage nur auf der Ebene des Montagesystems messen. Eine Aufschlüsselung des Energieverbrauches der einzelnen Montagebänder nach Fläche kann dieses Problem beheben. Im Anschluss kann eine Verteilung auf Fahrzeugebene erfolgen. Ziel ist die Unterschreitung der Obergrenze des Energieverbrauchs für einen positiven Beitrag zur APQ.

$$\text{Energieverbrauch} = \frac{\text{geplante Energieverbrauchsmenge}}{\text{reale Energieverbrauchsmenge}} \in \mathbb{R}_0^+ \quad (6.7)$$

Abfallproduktion

Der Output einer Produktion umfasst das Produkt, Informationen und Abfallprodukte [RUD14]. Somit verkörpert die *Abfallproduktion* eine wichtige Kennzahl im Kontext einer nachhaltigen industriellen Produktion. Je geringer die Abfallmenge, desto ökologischer und nachhaltiger ist die Produktion. Zusätzlich zu den Wirtschaftsgütern stellen Produktionsabfälle wie Verpackungsmaterialien, chemische Stoffe, kurzlebige Betriebsmittel, Abwassermenge und Ausschuss einen relevanten Anteil des Outputs der Automobilproduktion dar [SCH95b]. Das Ziel ist auch hier die Unterschreitung der gesetzten Obergrenze der Abfallproduktion, um einen positiven Beitrag zur APQ zu leisten.

$$\text{Abfallproduktion} = \frac{\text{geplante Abfallmenge}}{\text{reale Abfallmenge}} \in \mathbb{R}_0^+ \quad (6.8)$$

Prüfsicherheit

Die *Prüfsicherheit* stellt die Nettofehler in das Verhältnis zu den Bruttofehlern. Nettofehler bezeichnet alle entdeckten Qualitätsmängel durch eine obligatorische Qualitätsprüfung, Bruttofehler hingegen alle entstandenen Qualitätsmängel, sowohl die entdeckten als auch die von der obligatorischen Qualitätsprüfung unentdeckten Qualitätsmängel. Je kleiner die

Prüfsicherheit, desto unzuverlässiger arbeiten die Qualitätsprüfung und das QE Endprüfung. Das Ziel des QE Endprüfung ist die Entdeckung aller Bruttofehler. Innerhalb der Fahrzeugmontage werden unentdeckte Fehler als „Fehlerschlupf“ bezeichnet. Das Ziel der Prüfsicherheit ist die Vermeidung von Fehlerschlupf.

$$\text{Prüfsicherheit} = \frac{\text{Nettofehler}}{\text{Bruttofehler}} \in [0,1] \quad (6.9)$$

Maßnahmenerfolg

Der *Maßnahmenerfolg* gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass eine eingeleitete Korrekturmaßnahme erfolgreich ist und sich der abweichende Istwert über die Qualitätsregelung an den Sollwert anpasst. Somit stellt eine Korrekturmaßnahme eine Rückkopplung im Rahmen der Qualitätsregelung dar.

$$\text{Maßnahmenerfolg} = \frac{\text{erfolgreiche Maßnahmen}}{\text{eingeleitete Maßnahmen}} \in [0,1] \quad (6.10)$$

Qualitätskosten

Die *Qualitätskosten* repräsentieren ein entscheidendes Qualitätsmerkmal der Montage. Diese unterteilen sich in Fehlervermeidungskosten C_f , Prüfkosten C_p und Nacharbeitskosten C_r (vgl. Unterabschnitt 2.1.4). Die Exponenten geben an, ob es sich um Sollwerte z oder Istwerte w handelt.

$$\text{Qualitätskosten} = \frac{C_f^z + C_p^z}{C_f^w + C_p^w + C_r} \in [0,1] \quad (6.11)$$

Die Sollwerte resultieren aus den geplanten Werten auf Basis einer adäquaten Referenz des Betrachtungsobjektes (z. B. einer Referenzfabrik). In Formel 6.11 wird folglich die Annahme getroffen, dass Sollwerte vorliegen und diese die minimalen Qualitätskosten darstellen. Nacharbeitskosten sind verständlicherweise ungeplant, sodass C_r keinen Exponenten besitzt. Jedoch führt die Definition von C_f^z zu einer weiteren Herausforderung. Wenn C_f^z

steigt, fällt grundsätzlich C_r und führt zu einem Kennzahlenwert der Qualitätskosten nahe dem Wert 1. In einem theoretischen Beispiel führt dies ggf. dazu, dass C_f^z astronomisch hoch angesetzt wird, um sehr niedrige C_r sowie Qualitätskosten nahe dem Wert 1 zu erhalten.

Die acht Qualitätsmerkmale liefern einen relevanten Beitrag zur Entwicklung einer sachgerechten Definition der Produktionsqualität. Jedoch erheben diese keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da ggf. weitere Qualitätsmerkmale relevant sein können. So können u. a. die *Perlenkettengüte*, die *Unfallbelastung* und die *Durchlaufzeit* zur Erweiterung der sachgerechten Definition hinzugezogen werden. Trotz der Mannigfaltigkeit der relevanten Merkmale der montagespezifischen Produktionsqualität repräsentieren die ermittelten acht Qualitätsmerkmale den Kern. Diese werden zum weiteren Aufbau der qualitativen, binären und quantitativen Definition genutzt.

6.4 Qualitative Definition der APQ

Dieser Abschnitt erarbeitet eine sachgerechte Definition der APQ. Dabei erfolgt durch die Spezifikation auf den Produktionsbereich der Montage eine Abgrenzung gegenüber anderen Produktionsbereichen. Zunächst erfolgt eine Einordnung in den Qualitätskreis. Zudem werden die Bestandteile der APQ erläutert, insbesondere die Einbeziehung der Qualitätskosten und die Notwendigkeit der Produktqualität. Abschließend wird eine qualitative Definition für die weitere Betrachtung innerhalb der Arbeit entwickelt.

6.4.1 Einordnung in den Qualitätskreis

Die Qualitätsphase der Realisierung beinhaltet die QE der Beschaffung, Fertigung, Endprüfung, Lagerung und Versand. Der Fokus der APQ liegt auf dem QE Fertigung, welches jedoch alle Fertigungsschritte der Wertschöpfungskette beinhaltet und nicht auf die Montage spezifiziert ist. Das QE Fertigung umfasst die dem wertschöpfenden Fertigungsprozess zugeordneten Teilelemente Umformen, Fügen, Lackieren und Montieren. Aufgrund

der Eingrenzung wird jedoch lediglich das Teilqualitätselement Montieren bzw. Montage (TQE Montage) betrachtet. Weiterhin wird das QE Endprüfung einbezogen, da es ein zentrales Element im QRK der Montage darstellt. Abbildung 6.2 zeigt die Einordnung der APQ und ihrer inkludierten QE in den Qualitätskreis.

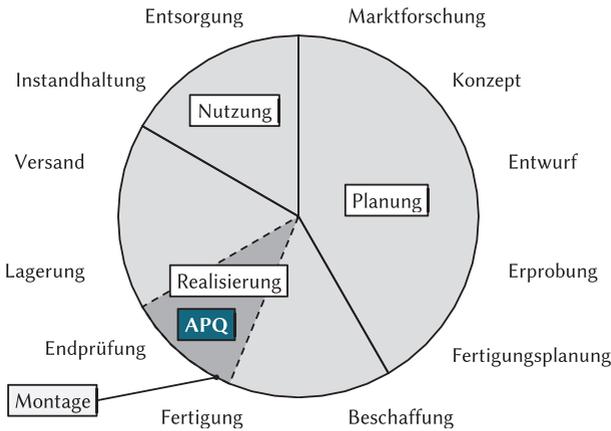


Abbildung 6.2: Einordnung der APQ in den Qualitätskreis

6.4.2 Einbeziehung der Qualitätskosten

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 6.1 wurde analysiert, dass trotz einer niedrigen Qualitätsfähigkeit die Erzeugung einer hohen Produktqualität über Qualitätskosten möglich ist. Die APQ inkludiert folglich den relevanten Faktor der Qualitätskosten. Aufgrund des feineren Detaillierungsgrades wird im Rahmen dieser Arbeit das traditionelle Qualitätskostenmodell mit den drei Hauptkategorien der Fehlerverhütungskosten, Prüfkosten und Fehlerkosten angewendet (vgl. Abbildung 2.4).

6.4.3 Berücksichtigung der Produktqualität

Die allgemeine Definition der Produktionsqualität zeigt, dass die Produktqualität ein wichtiger Faktor ist. Dennoch muss geklärt werden, ob die Produktqualität als direkte Größe in die APQ einfließen darf. Die Produktqualität kann durch eine niedrige Entwurfsqualität oder durch eine niedrige Ausführungsqualität reduziert werden [WAL93; BER80]. Aufgrund der Spezifikation auf die Montage betrachtet die APQ jedoch nicht den Bereich der Entwurfsqualität – diese wird von der Qualitätsphase der Planung realisiert. Die Ausführungsqualität hingegen wird von der Qualitätsphase der Realisierung und dem TQE Montage realisiert und beeinflusst so die Produktqualität. Diese Betrachtung findet bereits durch die Realisierungsfähigkeit und dem TQE Montage sowie QE Endprüfung statt. Somit wird die Produktqualität durch die Einbindung der beiden QE bereits berücksichtigt. Der Faktor Produktqualität fließt somit nicht direkt in die Definition der APQ ein, sondern indirekt über die beiden QE. Abbildung 6.3 zeigt die Bestandteile der APQ.

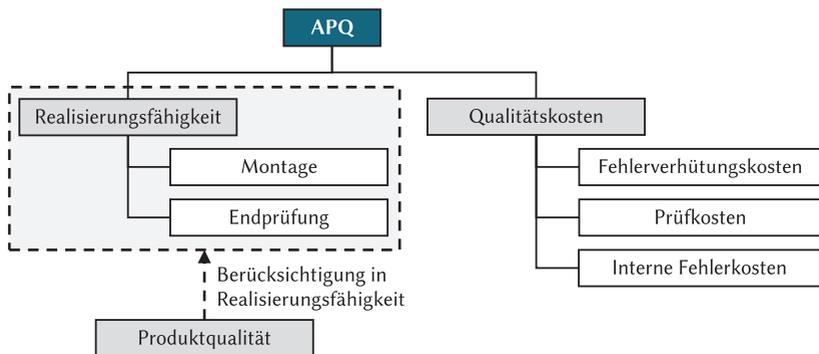


Abbildung 6.3: Bestandteile der APQ

6.4.4 Zusammenfassende Definition

Auf Basis dieser Erkenntnisse kann die APQ in qualitativer Form durch Formel 6.12 definiert werden.

$$\begin{aligned}
 \text{APQ} &= \text{TQE Montage} \\
 &+ \text{QE Endprüfung} \\
 &- \text{Qualitätskosten}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} \text{APQ} &= \text{TQE Montage} \\ &+ \text{QE Endprüfung} \\ &- \text{Qualitätskosten} \end{aligned}} \right\} \text{Realisierungsfähigkeit} \tag{6.12}$$

Abbildung 6.4 zeigt den konkreten Beitrag der APQ. Erst die Festlegung montagespezifischer Qualitätsmerkmale und deren Kombination ermöglicht eine bereichsübergreifende Vergleichbarkeit der Produktionsqualität.

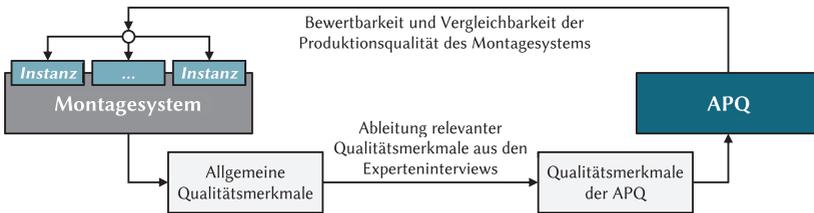


Abbildung 6.4: APQ als Qualitätskennzahl

Somit kann folgende Beschreibung als sachgerechte qualitative Definition der montagespezifischen Produktionsqualität angenommen werden:

Die montagespezifische Produktionsqualität (APQ) ist ein Maß für die Zielerreichung der Montage im Hinblick auf die gesetzten Qualitätsanforderungen. Diese setzt sich zusammen aus der Realisierungsfähigkeit, bestehend aus dem Teilqualitätselement Montage und dem Qualitätselement Endprüfung sowie den damit verbundenen Qualitätskosten zur Identifikation, Beseitigung und nachhaltigen Vermeidung von Qualitätsabweichungen. Aus diesen Qualitätselementen können acht relevante Qualitätsmerkmale abgeleitet werden,

deren Fokus auf einem maximalen Zielerreichungsgrad liegt. Diese Qualitätsmerkmale umfassen: der Geradeauslauf, die Verfügbarkeit, die HPV, der Energieverbrauch und die Abfallproduktion aus dem Teilqualitätselement Montage; die Prüfsicherheit und der Maßnahmenenerfolg aus dem Qualitätselement Endprüfung sowie die Qualitätskosten.

6.5 Binäre Bewertung der APQ

Damit die APQ evaluierbar gestaltet wird und eine Aussage mit den beiden Ausprägungen „Qualität erfüllt“ und „Qualität nicht erfüllt“ getroffen werden kann, ist eine binäre Bewertung der APQ erforderlich. Die binäre Bewertung basiert dabei auf das CQD aus Abschnitt 5.2. Die Voraussetzungen für eine binäre Betrachtung sind merkmalspezifische Toleranzgrenzen, um eine unzulässige Qualitätsabweichung identifizieren zu können.

Der binäre Qualitätswert q_B eines Qualitätsmerkmals m nimmt den booleschen Wert „true“ an, sofern der Istwert w innerhalb seines individuellen Toleranzbereiches T liegt und somit „Qualität erfüllt“ ist. Im Gegenzug wird der boolesche Wert „false“ angenommen, wenn der Istwert w außerhalb des Toleranzbereiches T liegt und „Qualität nicht erfüllt“ ist.

Die Verkettung aller binären Werte der Qualitätsmerkmale ermöglicht eine binäre Bewertung der APQ in Form der APQ_B . Wird bei dieser binären Betrachtung die Qualität eines Merkmals nicht erfüllt, führt dies zu einer Nichterfüllung der gesamten APQ – ein Gewichtungsfaktor ist obsolet. In Summe kann eine erfüllte APQ nur vorliegen, wenn alle Qualitätsmerkmale innerhalb ihrer Toleranzmengen T liegen. Formel 6.15 und Formel 6.16 liefern die binäre Bewertung der APQ über die Verkettung der Qualitätswerte hin zur APQ_B in Analogie zu Formel 5.13, Formel 5.14 und Formel 5.15.

| | | |
|------------|----|--|
| APQ_B | := | Montagespezifische Produktionsqualität (binär) |
| $q_B(m_j)$ | := | Binärer Qualitätswert des Qualitätsmerkmals |
| $w(m_j)$ | := | Istwert des Qualitätsmerkmals |
| $T(m_j)$ | := | Toleranzmenge des Qualitätsmerkmals |

$$APQ_{B,q_B}(m_j) \in \{true, false\} \quad (6.13)$$

$$\forall_j : w(m_j) \in T(m_j) \Leftrightarrow q_B(m_j) = true \quad (6.14)$$

$$APQ_B = q_B(m_1) \wedge \dots \wedge q_B(m_8) \quad (6.15)$$

$$\forall_j : q_B(m_j) = true \Leftrightarrow APQ_B = true \quad (6.16)$$

6.6 Quantitative Bewertung der APQ

Die Kennzahlen aus Abschnitt 6.3 liefern bereits einen individuellen Beitrag zur Bewertung der APQ. Jedoch ist zur adäquaten Vergleichbarkeit und Regelbarkeit der APQ ein aussagekräftiger Zusammenhang notwendig. Ziel ist die Entwicklung eines übergeordneten Kennzahlensystems, welches die APQ als messbare Größe widerspiegelt. Die Kennzahlen können über ihren relativen Zielerreichungsgrad q_Q zum Kennzahlensystem APQ_Q in Analogie zu Formel 5.23 konsolidiert werden. Dies ermöglicht, neben der Evaluierung über die binäre APQ_B , eine zusätzliche aussagekräftige Vergleichbarkeit und Regelbarkeit der APQ über die quantitative APQ_Q . Die quantitative Bewertung basiert dabei auf das CQD aus Abschnitt 5.3.

| | | |
|--------------|----|--|
| APQ_Q | := | Montagespezifische Produktionsqualität (quantitativ) |
| m_j | := | Qualitätsmerkmal |
| $q_Q(m_j)$ | := | Quantitativer Qualitätswert des Qualitätsmerkmals |
| $\beta(m_j)$ | := | Gewichtungsfaktor |

$$j \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\} \quad (6.17)$$

$$q_Q(m_j) = \begin{cases} q_Q(m_j) & \text{für } q_Q(m_j) \leq 1 \\ 1 & \text{für } q_Q(m_j) > 1 \end{cases} \quad (6.18a)$$

$$\quad (6.18b)$$

$$\beta(m_j) \in [0^\circ, 360^\circ) \quad (6.19)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta(m_j) = 360^\circ \quad (6.20)$$

$$APQ_Q \in [0,1] \quad (6.21)$$

$$APQ_Q = 1 - \sum_{j=1}^8 \frac{\beta(m_j)}{360^\circ} \cdot |q_Q(m_j) - 1| \quad (6.22)$$

Eine Kennzahl m repräsentiert ein Qualitätsmerkmal der betrachteten APQ_Q . Je Kennzahl kann ein individueller Gewichtungsfaktor vergeben werden, um besonderen Qualitätsmerkmalen eine hohe oder niedrige Bedeutung an der APQ zu verleihen. Eine sehr große Anzahl an Kennzahlen ist ohne individuelle Gewichtung jedoch nicht zu empfehlen, da der Einfluss aller einzelnen Kennzahlen auf die APQ_Q unbedeutend gering wird. Die Ausprägung einer Kennzahl wird über den relativen Zielerreichungsgrad q_Q eines Qualitätsmerkmals ermittelt und die Differenz zur Zielerreichung, ggf. nach einer individuellen Gewichtung, vom Sollwert 1 der APQ_Q subtrahiert. Das Ergebnis der APQ_Q repräsentiert somit den Erfüllungsgrad der APQ .

6.7 Abgrenzung zu ähnlichen Leistungskennzahlen

Die APQ unterscheidet sich von anderen Kennzahlen zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit eines Betrachtungsobjektes. In diesem Abschnitt erfolgt eine Abgrenzung zu ähnlichen Leistungskennzahlen in Anlehnung an SCHWALBACH [SCH18]. Abbildung 6.5 zeigt eine Übersicht und Einordnung der verschiedenen Kennzahlen inkl. der Qualitätsmerkmale.

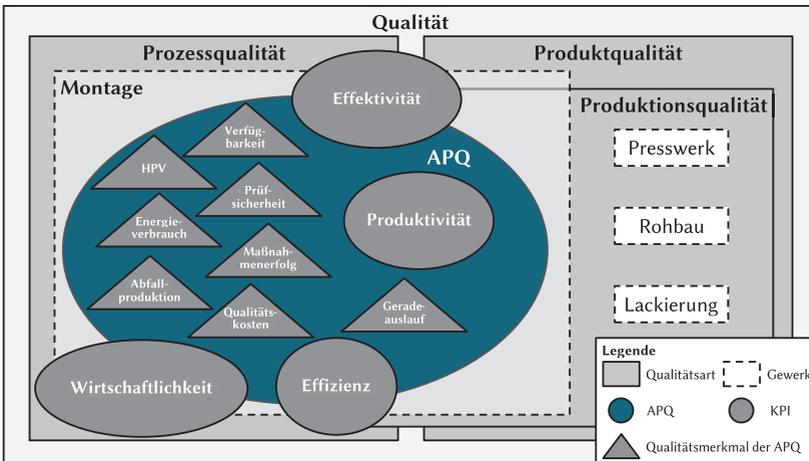


Abbildung 6.5: Abgrenzung der APQ zu ähnlichen Kennzahlen

Abgrenzung zur Produktqualität

Die *Produktqualität* betrachtet eine fertige Einheit, die nach der Gesamtheit aller Prozesse vorliegt und an ihren Qualitätsanforderungen gemessen wird [WAL93; FAL14; LEE87]. Dabei wird der Weg der Produktentstehung (Prozess) vernachlässigt. Die Produktqualität schließt folglich die QE Montage und Endprüfung des Qualitätskreises ein. Jedoch werden Qualitätskosten zur Einhaltung der Kundenanforderungen nicht berücksichtigt.

Abgrenzung zur Prozessqualität

Die *Prozessqualität* gibt Auskunft über den Grad der Anforderungserfüllung der ablaufenden Prozesse während der Produktentstehung bzw. Dienstleistungserbringung [CZA09; SCH08]. Diese kann, nach Auswahl der relevanten Qualitätsmerkmale, für alle Unternehmensbereiche erstellt und qualitativ beschrieben werden. Vereinzelt werden Qualitätsmerkmale genannt (vgl. Anhang A), jedoch existiert keine montagespezifische Definition mit zugehörigem Kennzahlensystem für eine direkte Vergleichbarkeit.

Abgrenzung zur Effektivität / Wirksamkeit

Die *Effektivität* beschreibt das Verhältnis aus erzieltm Ergebnis zum angestrebten Ziel [NOR15a]. Eine Effektivitätskennzahl der Automobilproduktion ist der Geradeauslauf der Produktion. Grundlegend sind keine Effektivitätskennzahlen definiert, um die Produktionsqualität zu quantifizieren (vgl. Unterabschnitt 3.3.1). Somit stellt der Geradeauslauf einen Teil der APQ dar.

Abgrenzung zur Effizienz

Die *Effizienz* stellt das Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen dar [NOR15a]. Die APQ stellt analog zur Effizienz ein Aufwand-Nutzen-Verhältnis her, unterscheidet sich aber dadurch, dass explizit auf das Montagesystem Bezug genommen wird. Über definierte Qualitätsmerkmale lässt sich eine vergleichbare und quantifizierbare Aussage über die Produktionsqualität treffen. Somit ist die Ermittlung der APQ über die relevanten Faktoren eindeutig festgelegt.

Abgrenzung zur Produktivität

Die *Produktivität* stellt das Verhältnis von eingesetztem Input zu daraus erhaltenem Output dar [MOH12; SCH09b]. Diese Definition lässt ein breites Anwendungsgebiet zu, aber ermöglicht erst durch Absprache gleicher Betrachtungsbereiche eine Vergleichbarkeit ähnlicher Arbeitssektoren. Um dies in der Fahrzeugmontage zu gewährleisten, leistet die APQ einen wichtigen Beitrag durch Festlegung konkreter Produktivitätskennzahlen (z. B. Verfügbarkeit, Maßnahmenenerfolg und Prüfsicherheit). Die Produktivität des Montagesystems wird somit in den Qualitätsmerkmalen der APQ berücksichtigt.

Abgrenzung zur Wirtschaftlichkeit

Die APQ zielt auf die transparente Darlegung von Ineffizienzen und Qualitätsabweichungen in Prozessen ab und berücksichtigt sowohl ausgewählte technische als auch wirtschaftliche Aspekte. Die Kennzahl der *Wirtschaftlichkeit* beschränkt sich jedoch lediglich auf wirtschaftliche Aspekte (z. B.

Kapital, Kosten und Erträge) [WÖH16]. Die APQ erfasst hingegen Teilaspekte der Wirtschaftlichkeit (Qualitätskosten und HPV).

Die Qualitätsmerkmale der APQ repräsentieren die o. g. Leistungskennzahlen. Die Verfügbarkeit, Maßnahmenenerfolg und Prüfsicherheit, stellen spezifische Kennzahlen für einzelne Anwendungsbereiche der Produktion dar. Die Effektivität wird u. a. in den Kennzahlen Maßnahmenenerfolg, Prüfsicherheit oder Qualitätskosten berücksichtigt. Dadurch ermöglicht die APQ einen ganzheitlichen Blick auf die Produktionsqualität in der Montage sowie Optimierungspotenziale anhand festgelegter Kennzahlen zu identifizieren und eine Vergleichbarkeit durch Quantifizierung der Qualitätsmerkmale zu realisieren.

6.8 Zwischenfazit: Definition der Produktionsqualität

In dieser Arbeit wurde eine sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität, bezeichnet als „Assembly-specific Production Quality“ (APQ), als Fundament zur hybriden Regelung der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage gebildet (Ergebnis 2).

Die APQ spezifiziert sich auf den Produktionsbereich der Montage. Folglich fokussiert sich die APQ auf die Realisierungsfähigkeit der Produktion und spezifiziert sich im Qualitätskreis auf das TQE Montage und das QE Endprüfung. Zusätzlich werden innerhalb der APQ die Produktqualität bereits über die Realisierungsfähigkeit abgedeckt und die (bisher unberücksichtigten) Qualitätskosten einbezogen. Anhand einer Datenerhebung konnten acht Qualitätsmerkmale der APQ identifiziert werden. Zudem wurde eine qualitative Definition der APQ sowie eine binäre und quantitative Bewertung der APQ auf Basis eines produktionsorientierten Kennzahlensystems gebildet. Durch einen Vergleich mit ähnlichen Produktionskennzahlen konnte die APQ präzise als eigenständiges Kennzahlensystem abgegrenzt werden.

Über die APQ werden die Anforderungen an die Definition der Produktionsqualität (vgl. Tabelle 4.1 bzw. Anhang G) erfüllt. Folglich befriedigt die APQ die Forderung nach einer für die Praxis sachgerechten Definition der Produktionsqualität für die Fahrzeugmontage (Leitfrage 2). Das System zur Regelung der APQ kann nun in Kapitel 7 aufgebaut werden.

7 Regelung der Produktionsqualität

„Jeder Mitarbeiter sollte ein Qualitäter sein.“

HANS-JÜRGEN QUADBECK-SEEGER (*1939)

Eine effiziente hybride Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage erfordert eine informationstechnische Struktur und Logik mit adäquatem Aufbau (Leitfrage 3). Dazu entwickelt dieses Kapitel ein informationstechnisches Referenzmodell einer hybriden Qualitätsregelung zum bidirektionalen Management von Qualitätsinformationen (Ergebnis 3). Dieses wird als „Quality Control Structure“ (QCS) bezeichnet. Fragmente der QCS wurden bereits über Konferenzbeiträge von GEWOHN ET AL. der Wissenschaft zugänglich gemacht [GEW18g; GEW18b; GEW18a; GEW18e; PIE18].

7.1 Allgemeiner Aufbau

Die QCS bildet die Logik der hybriden Qualitätsregelung und verkörpert den Controller in der Architektur des Konzeptes. Dabei fokussiert sich die Struktur auf die Sammlung und Weiterleitung von Qualitätsinformationen (Informationsmanagement). Die QCS besitzt einen bidirektionalen Aufbau und unterteilt sich in einen rückwärtsgerichteten „Quality Backward Stream“ (QBS) und einen vorwärtsgerichteten „Quality Forward Stream“ (QFS).

Der QBS meldet Qualitätsinformationen an vorgelagerte Bereiche zurück, während der QFS Qualitätsinformationen an nachgelagerte Bereiche weiterleitet. Abbildung 7.1 zeigt eine Übersicht der QCS mit den beiden Qualitätsinformationsströmen QBS und QFS im Kontext der Automobilproduktion.

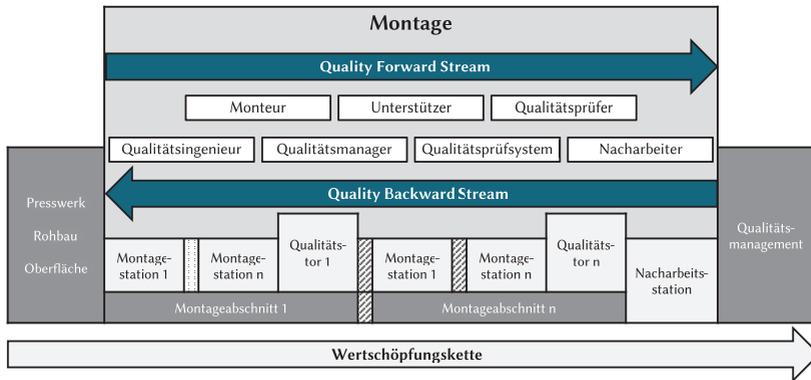


Abbildung 7.1: Übersicht der QCS

QBS und QFS umfassen einzelne darunterliegende Streams. Das Zusammenspiel dieser Streams verkörpert eine Vernetzung aller Rollen innerhalb der Montagelinie zum Zweck einer effizienten hybriden Qualitätsregelung. Dabei werden die Streams auf Basis einer Entscheidungslogik aktiviert.

7.2 Rückwärtsgerichteter Informationsstrom

Der QBS beschreibt eine Weiterleitung von Qualitätsinformationen an vorgelagerte Bereiche auf horizontaler Ebene und bildet die notwendige Struktur zur effizienten Qualitätsrückmeldung innerhalb des Montagesystems.

Die Struktur umfasst vier rückwärtsgerichtete Qualitätsinformationsströme (QFS- n^1) mit der Kardinalität einer 1:1-Beziehung².

Die Zielsetzungen des QBS bestehen aus folgenden sechs Punkten:

1. Schnelle Qualitätsrückmeldung
2. Hohe Informationstransparenz
3. Schnelle Fehlerabstellung
4. Niedrige Fehlerreproduktion
5. Nachhaltige Qualitätssicherung
6. Hohe Produktionseffizienz

Abbildung 7.2 zeigt eine Übersicht des QBS mit den einzelnen Streams. Diese ermöglichen einen dedizierten Informationsfluss zwischen den Rollen, agieren aber dennoch gleichzeitig im Sinne der effizienten Qualitätsrückmeldung. Nachfolgend werden die einzelnen Streams detailliert beschrieben.

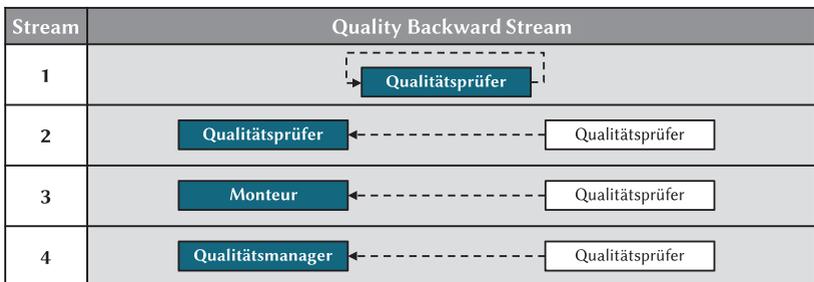


Abbildung 7.2: Quality Backward Stream (QBS)

¹ $n \in \{1,2,3,4\}$

² Beziehung bezieht sich auf Sender zu Empfänger.

7.2.1 Erster Stream der Qualitätsrückmeldung

Der erste Stream der Qualitätsrückmeldung (QBS-1) meldet das vom Qualitätsprüfer identifizierte Fehleraufkommen und die Fehlerschwerpunkte seines Montageabschnittes als Übersicht in absteigend gruppierter Form nach dem Fehlerbild zurück. Sobald ein Qualitätsprüfer einen Qualitätsmangel systemseitig dokumentiert hat, wird dieser über die QCS automatisiert und in Echtzeit als identifiziertes Fehleraufkommen der eigenen Übersicht hinzugefügt.

Durch den QBS-1 werden dem Qualitätsprüfer die für seinen Bereich relevanten Fehlerschwerpunkte aufgezeigt, wodurch dieser zur verstärkten Qualitätsprüfung der betroffenen Qualitäts- und Prüfmerkmale sensibilisiert wird.

7.2.2 Zweiter Stream der Qualitätsrückmeldung

Der zweite Stream der Qualitätsrückmeldung (QBS-2) meldet Informationen zum Fehlerschlupf an die betroffenen Qualitätsprüfer zurück. Sobald ein Qualitätsprüfer einen Qualitätsmangel identifiziert und systemseitig dokumentiert hat, dieser Qualitätsmangel jedoch bereits von einem oder mehreren vorgelagerten Qualitätsprüfern mit dem Ergebnis „i. O.“ geprüft wurde, wird dieser Qualitätsmangel als Fehlerschlupfinformation an die verantwortlichen vorgelagerten Qualitätsprüfer zurückgemeldet.

Durch den QBS-2 wird dem Qualitätsprüfer der individuelle Fehlerschlupf aufgezeigt, sodass dieser zur verstärkten Qualitätsprüfung des durchgeschlupften Fehlerbildes kontinuierlich sensibilisiert und bzgl. seiner Qualitätsprüfung im Prüfprozess geschult wird. Die verantwortlichen Qualitätsprüfer lassen sich so durch echtzeitorientierte Informationsflüsse fachlich stärken. Ebenso können Qualitätsmängel frühzeitig durch erhöhte Transparenz erkannt werden.

7.2.3 Dritter Stream der Qualitätsrückmeldung

Durch die ersten beiden Streams wurden die Qualitätsprüfer über aufkommende und durchgeschlupfte Fehler informiert. Das entscheidende Glied in der sozio-technischen Qualitätsregelung stellt der Monteur dar. Dieser muss ebenfalls über Qualitätsmängel seiner Arbeit informiert und bzgl. qualitätskritischer Faktoren sensibilisiert werden. Dazu ist es notwendig, dass die relevanten Qualitätsinformationen und erforderlichen Handlungsmaßnahmen rollen-, sach- und zeitgerecht platziert werden.

Der dritte Stream der Qualitätsrückmeldung (QBS-3) meldet somit Qualitätsinformationen vom Qualitätsprüfer an den Monteur zurück. Jedoch werden bei der Qualitätsrückmeldung zwei Arten unterschieden:

1. Passive Qualitätsrückmeldung
2. Aktive Qualitätsrückmeldung

Bei der *passiven Qualitätsrückmeldung* erhält der Monteur zu jedem identifizierten Qualitätsmangel eine Rückmeldung. Diese wird nicht aktiv angezeigt, sondern passiv in einer digitalen Liste zum Fehleraufkommen der Montagestation in der Datenbank gespeichert. Der Monteur wird dadurch in seinem Arbeitsgang und dem qualitätsherstellenden Prozess durch die Qualitätsrückmeldung nicht gestört. Für Schulungszwecke oder Fachgespräche mit dem Qualitätsmanager sowie bei persönlicher Motivation kann das individuelle Fehleraufkommen aufgerufen werden. Eine passive Qualitätsrückmeldung umfasst insbesondere stochastische Qualitätsmängel.

Eine *aktive Qualitätsrückmeldung* beinhaltet eine Rückmeldung bei einer bestimmten Häufigkeit bzw. Systematik oder Priorität. Dabei wird dem Monteur aktiv eine Information über das Fehlerbild zurückgemeldet, welche er während seines Arbeitsganges wahrnehmen und bestätigen muss. Dies sichert eine schnellstmögliche Sensibilisierung sowie eine sofortige Fehlervermeidung am verbauenden Ort.

Jedoch können z. T. keine Informationen zur Fehlerursache und zu Fehlerabstellmaßnahmen gegeben werden, da diese entweder aufgrund des Fehlerbildes nicht vorliegen (z. B. neues Fehlerbild bzw. Ursache unbekannt) oder zu

detailliert für eine schnelle Rückmeldung sind (z. B. Schulung notwendig). Dennoch beinhaltet der QBS die Rückmeldung aller maximal verfügbaren und erforderlichen Informationen zur Qualitätsregelung.

Durch den QBS-3 können dem Monteur alle verursachten Qualitätsmängel (stochastisch und systematisch) rollen-, sach- und zeitgerecht zurückgemeldet werden. Aufgrund der schnellen Rückkopplung und der transparenten Qualitätsdarstellung kann die Reproduktion identischer Fehlerbilder an der Quelle direkt vermieden werden – dies fördert den direkten Qualitätsverbau. Somit lässt sich die Qualitätsregelung der Montagestation stärken und die Produktionsqualität erhöhen.

7.2.4 Vierter Stream der Qualitätsrückmeldung

Ein systematischer Qualitätsmangel soll nicht nur an relevante Qualitätsprüfer und Monteure zurückgemeldet, sondern vor allem langfristig abgestellt werden. Dies erfolgt über Maßnahmen in Form von Fehlerabstellprozessen. Zur Gewährleistung einer nachhaltigen Fehlerabstellung muss der Qualitätsmanager über den systematischen Qualitätsmangel informiert werden.

Der vierte Stream der Qualitätsrückmeldung (QBS-4) leitet systematische Qualitätsabweichungen vom Qualitätsprüfer an den Qualitätsmanager weiter. Dieser wird automatisch durch die QCS informiert, um Maßnahmen über den nachhaltigen Fehlerabstellprozess einzuleiten. Der Qualitätsmanager ist durch die intelligente Vernetzung und informationstechnische Bereitschaft in der Lage, zu jedem Zeitpunkt mobil über Qualitätsprobleme in seinem Montagebereich informiert zu werden.

Um zeitnah effektive Fehlerabstellmaßnahmen einleiten zu können, müssen Qualitätsinformationen über Gruppenattribute, bestehend aus dem Fehlerbild, dem Zeitraum und ggf. der Ursache mit potenziellem Verursacher, angemessen aufbereitet sein. Nur bei Vollständigkeit und Richtigkeit dieser Informationen kann die Effektivität und Effizienz der zu treffenden Fehlerabstellmaßnahmen gewährleistet werden. Bei bereits bekannter und systemseitig erfasster Fehlerursache kann der Anstoß des

Fehlerabstellprozesses beschleunigt werden, indem bereits adäquate Fehlerabstellmaßnahmen vorgeschlagen werden. Dies erfordert jedoch ein im Hintergrund agierendes Wissensmanagement über Fehlersymptome und deren Ursachen. Nach Einleitung des Fehlerabstellprozesses müssen zudem die Wirksamkeit und Nachhaltigkeit dieser Maßnahmen zurückgemeldet werden, um bei weiter anhaltendem Fehleraufkommen effektivere Maßnahmen anstoßen zu können.

Durch den QBS-4 werden dem Qualitätsmanager systematische Qualitätsmängel schnellstmöglich weitergeleitet und transparent gemacht. Dies beschleunigt zum einen die Initiierung und Durchführung des Fehlerabstellprozesses. Zum anderen trägt dies positiv zur Steigerung der Produktionsqualität bei.

7.3 Vorwärtsgerichteter Informationsstrom

Der QFS beschreibt eine Weiterleitung von Qualitätsinformationen an nachgelagerte Bereiche auf horizontaler Ebene und bildet die notwendige Struktur zur effizienten Nacharbeitssteuerung innerhalb des Montagesystems. Die Struktur umfasst acht vorwärtsgerichtete Qualitätsinformationsströme (QFS- n^3) mit der Kardinalität einer 1:1-Beziehung.

Die Zielsetzungen des QFS bestehen aus folgenden vier Punkten:

1. Vollständige Dokumentation
2. Schnelle Nacharbeitsmeldung
3. Effiziente Nacharbeitssteuerung
4. Hohe Produktionseffizienz

Abbildung 7.3 zeigt eine Übersicht des QFS mit der logischen Struktur durch die Streams. Diese ermöglichen, ebenso wie die des QBS, einen dedizierten Informationsfluss zwischen den Rollen im Sinne der effizienten Nacharbeitssteuerung. Im Folgenden werden die einzelnen Streams beschrieben.

³ $n \in \{1,2a,2b,2c,3a,3b,3c,4\}$

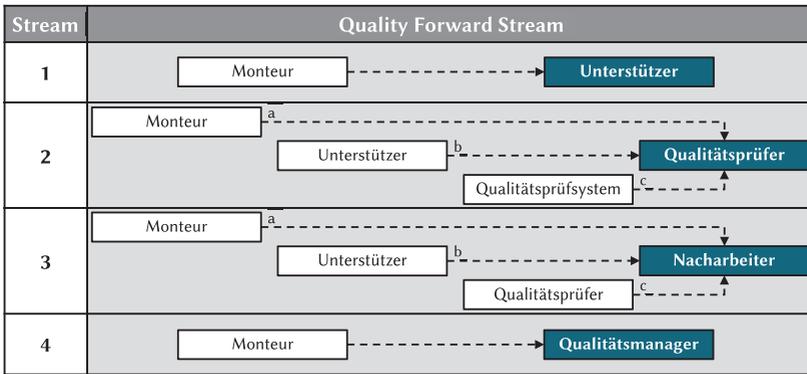


Abbildung 7.3: Quality Forward Stream (QFS)

7.3.1 Erster Stream der Nacharbeitsmeldung

Der erste Stream der Nacharbeitssteuerung (QFS-1) leitet relevante Nacharbeitsinformationen vom Monteur zum Unterstützer weiter. Der Stream wird aktiv, sobald ein Monteur während seiner Montage Tätigkeit einen Qualitätsmangel feststellt, den er selbst aus zeitlichen oder technischen Gründen nicht beheben kann. Sobald der Monteur diesen Qualitätsmangel systemseitig dokumentiert und das System anhand des Fehlerbildes eine Nacharbeit durch den Unterstützer zulässt, erhält dieser eine direkte Nacharbeitsmeldung.

Die Voraussetzung ist hierbei die Fähigkeit des Unterstützers zur Nacharbeit. So kann u. a. bereits anhand des Fehlerbildes erkannt werden, ob ein Unterstützer eine Nacharbeit durchführen kann (z. B. Drehmoment einer Verschraubung nicht erreicht) oder nicht (z. B. Fehlteil, Lackbeschädigung oder erforderliche Demontage anderer Bauteile). Folglich werden ausschließlich Nacharbeiten an den Unterstützer gesendet, die durch diesen zeitlich und technisch potenziell gelöst werden können. Nacharbeiten, die der Unterstützer aufgrund der bekannten Eigenschaften nicht lösen kann, werden an die nächsthöhere Instanz (Nacharbeiter) über den QFS-3a gesendet.

Der Unterstützer erhält im Produktionsbetrieb eine sich aktualisierende priorisierte Liste an offenen Nacharbeiten innerhalb des für ihn definierten Unterstützungsbereiches. In der industriellen Praxis existieren Nacharbeitsmeldungen, die aufgrund ihrer Eigenschaften priorisiert und schnell behoben werden müssen (z. B. Fehler, die zeitnah zugebaut werden), während andere Nacharbeiten auch nach Montageende behoben werden können (z. B. Lackbeschädigungen). Die Priorität wird über einen Algorithmus vergeben, der die Nacharbeitskosten und -dauer in Relation zur offenen Nacharbeit über den Montageverlauf berücksichtigt. Dieser Algorithmus ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Durch den QFS-1 können dem Unterstützer relevante Nacharbeitsinformationen effizient bzw. schnell weitergeleitet werden. Über den Stream werden die Nacharbeiten innerhalb einer Montagelinie logisch koordiniert und informationsvollständig sowie priorisiert und automatisiert an den Unterstützer weitergeleitet. Dadurch werden Nacharbeiten schnellstmöglich zu geringen Nacharbeitskosten behoben (vgl. Zehnerregel der Fehlerkosten bzw. Abbildung 2.5). Ebenso werden Qualitätsabweichungen sofort systemseitig dokumentiert und eine synchrone Qualitätssituation (Montagelinie und IS) geschaffen. Dies ermöglicht eine hohe Reaktionsfähigkeit im Unterstützungsprozess.

7.3.2 Zweiter Stream der Nacharbeitsmeldung

Der zweite Stream der Nacharbeitssteuerung (QFS-2) leitet Qualitätsinformationen zum Qualitätsprüfer weiter. Dieser wird durch den Stream über alle offenen und geschlossenen Nacharbeiten am Fahrzeug informiert, sobald dieses zur Qualitätsprüfung in das Q-Tor eintrifft.

Eine offene Nacharbeitsmeldung liegt vor, wenn die Nacharbeit bis zum Eintreffen des Fahrzeugs im Q-Tor nicht behoben wurde. Die Visualisierung der offenen Nacharbeiten hat den Zweck, dass der Prüfer über die Qualitätsabweichung informiert und keine neue Nacharbeitsmeldung erstellt wird. Dadurch sollen Redundanzen in der Fehlerdokumentation vermieden und eine korrekte Datenbasis bzgl. der Qualitätssituation gewährleistet werden.

Eine geschlossene Nacharbeit hingegen liegt vor, wenn die Nacharbeit bereits durch den Unterstützer behoben wurde. Die Visualisierung der geschlossenen Nacharbeiten verfolgt den Zweck, dass der Qualitätsprüfer mittels zweiter Sichtprüfung die Nacharbeit kontrolliert. Dieser öffnet den Nacharbeitsfall wieder, falls die Qualitätsanforderung durch die Nacharbeit nicht erreicht wurde.

Der QFS-2 wird durch unterschiedliche Sender in drei weitere Substreams unterteilt. Einheitlich ist bei allen Substreams des QFS-2 die Weiterleitung von Nacharbeitsinformationen an den Qualitätsprüfer als Empfänger. Beim QFS-2 existiert somit eine Kardinalität einer 3:1-Beziehung.

- **QFS-2a:** Monteur → Qualitätsprüfer
- **QFS-2b:** Unterstützer → Qualitätsprüfer
- **QFS-2c:** Qualitätsprüfsystem → Qualitätsprüfer

Der *erste Substream* (QFS-2a) leitet Qualitätsmeldungen vom Monteur an den Qualitätsprüfer weiter. Sobald ein Monteur eine Qualitätsabweichung systemseitig dokumentiert und diese nicht durch den Unterstützer bearbeitet wird (z. B. aufgrund fehlender zeitlicher oder technischer Möglichkeit), wird der Qualitätsmangel vom Monteur an den Qualitätsprüfer weitergeleitet und beim Eintreffen des Fahrzeugs im Q-Tor visualisiert – der Monteur ist der Sender.

Der *zweite Substream* (QFS-2b) leitet Qualitätsmeldungen vom Unterstützer an den Qualitätsprüfer weiter. Sofern eine vom Monteur dokumentierte Qualitätsabweichung durch den Unterstützer bearbeitet wurde, erfolgt beim Eintreffen des Fahrzeugs im Q-Tor eine Qualitätsinformation vom Unterstützer an den Qualitätsprüfer – der Unterstützer ist der Sender. Die Qualitätsmeldung ist dabei unabhängig vom Ergebnis der Nacharbeit. Relevant ist lediglich der letzte Bearbeiter des Qualitätsmangels.

Der *dritte Substream* (QFS-2c) leitet Qualitätsinformationen von einem Qualitätsprüfsystem an den Qualitätsprüfer weiter – der (menschliche) Qualitätsprüfer wird in seinem Prüfprozess durch ein (technisches) Qualitätsprüfsystem unterstützt. Dieses wurde bereits in Abschnitt 4.3 als

„Quality Inspection System“ (QIS) vorgestellt. Sobald ein Betrachtungsobjekt über das taktgesteuerte Montageband in das Q-Tor einfährt, wird zur Qualitätsprüfung im QFS-2c ein Prüfprozess mit drei obligatorischen Schritten (M1-M3) und drei optionalen Schritten (O4-O6) durchgeführt.

M1. Detaillierte Qualitätsprüfung: Im ersten Schritt erfolgt eine Qualitätsprüfung durch das QIS. Dieses überprüft im Fließbetrieb die Produktqualität anhand eines Soll-Ist-Vergleiches auf Basis von Prüfmerkmalen. Erforderlich ist, dass im QIS die zu überprüfenden Prüfmerkmale mit ihren individuellen Sollwerten und Toleranzbändern für jedes spezifische Objekt (Bauteil, Baureihe, Ausprägung) als digitaler Zwilling hinterlegt ist – eine Synchronisation zwischen virtuellen Daten und realen Betrachtungsobjekten ist zwingend notwendig. Abbildung 7.4 zeigt ein exemplarisches Beispiel einer kamerabasierten Qualitätsprüfung mittels CAD-Abgleich.

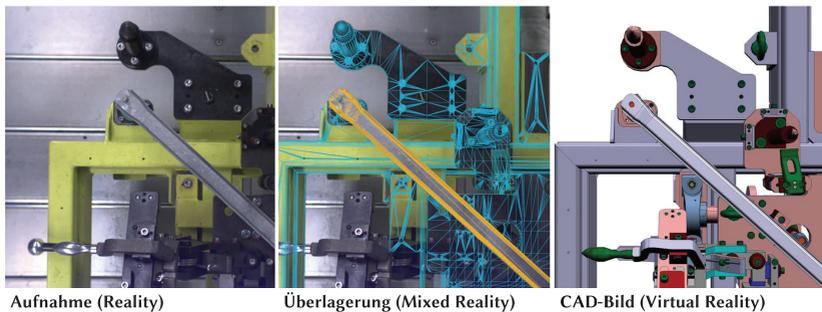


Abbildung 7.4: Kamerabasierte Qualitätsprüfung

In diesem Beispiel überprüft das QIS folgende Aspekte:

1. **Anwesenheitsprüfung:** Wurde ein Bauteil montiert?
2. **Variantenprüfung:** Wurde das richtige Bauteil montiert?
3. **Positionsprüfung:** Wurde das Bauteil richtig montiert?

M2. Visualisierung der Qualitätsprüfungsergebnisse: Im Anschluss der detaillierten Qualitätsprüfung durch ein QIS erfolgt die Visualisierung der

Qualitätsprüfergebnisse für den Qualitätsprüfer. Eine Möglichkeit besteht in der Darstellung mittels Touchscreen, auf dem die positiven und negativen Prüfergebnisse mit ggf. Zusatzinformationen (Sollwert, Istwert, Abweichung, Häufigkeit, Schweregrad) angezeigt werden. Diese Qualitätsmeldung wird dem Qualitätsprüfer in Form einer Zusammenfassung der detaillierten Qualitätsprüfung bereitgestellt.

M3. Überprüfung der Qualitätsprüfergebnisse: Im dritten Schritt erfolgt die Überprüfung der Qualitätsprüfergebnisse durch den Qualitätsprüfer. Dabei können nach Tabelle 7.1 vier Zustände je Prüfmerkmal auftreten:

Tabelle 7.1: Ergebnisse der technischen Qualitätsprüfung

| Istzustand | Systemdeklaration | Prüfergebnis |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| in Ordnung (i. O.) | in Ordnung (i. O.) | korrekt |
| nicht in Ordnung (n. i. O.) | nicht in Ordnung (n. i. O.) | korrekt |
| in Ordnung (i. O.) | nicht in Ordnung (n. i. O.) | falsch |
| nicht in Ordnung (n. i. O.) | in Ordnung (i. O.) | kritisch falsch |

Ein falsches Prüfergebnis liegt vor, sofern ein Prüfmerkmal durch das QIS als „n. i. O.“ deklariert wird, der Qualitätsprüfer jedoch später den Zustand „i. O.“ feststellt. Dies ist zwar ein Fehler durch das QIS, jedoch ist dieser nicht kritisch zu beurteilen, da eine hohe Produktqualität bereits vorliegt. Sofern jedoch ein Prüfmerkmal durch das QIS als „i. O.“ deklariert wird, der Qualitätsprüfer jedoch später das Prüfmerkmal als „n. i. O.“ identifiziert, liegt ein kritisches falsches Prüfergebnis vor. Dieser kritische Systemfehler muss zur Gewährleistung einer hohen Zuverlässigkeit schnellstmöglich behoben werden. Der Fehler würde ansonsten bei Folgeobjekten im Q-Tor durchschlüpfen und zur Qualitätsminderung beitragen.

Der Qualitätsprüfer hat hier die beiden Alternativen

- (a) das Gesamtergebnis in Summe zu verifizieren oder
- (b) das Prüfergebnis pro Prüfmerkmal zu falsifizieren und zu korrigieren.

Der Qualitätsprüfer stellt somit im Kontext der Mensch-System-Kollaboration die letzte Entscheidungsinstanz innerhalb der Qualitätsbewertung dar. Dies schafft einen erheblichen Beitrag zum echtzeitfähigen konsistenten Abbild (digitaler Zwilling) der Fehler- bzw. Qualitätssituation in der Produktion.

04. Spezifische Qualitätsprüfung: Dennoch ist neben der detaillierten Qualitätsprüfung durch ein QIS z. T. eine weitere spezifische Qualitätsprüfung notwendig. Dies können Prüfmerkmale sein, welche mit einem QIS nicht zuverlässig überprüft werden können. Ebenso müssen einige Prüfmerkmale manuell überprüft werden, da ein technisches Prüfmittel nicht verfügbar ist. Eine solche spezifische Prüfung muss daher in klassischer Weise als Ergänzung der detaillierten (technischen) Qualitätsprüfung durchgeführt werden, um eine vollständige Qualitätsprüfung des Betrachtungsobjektes zu gewährleisten. Existieren keine individuell zu prüfenden Prüfmerkmale, entfällt eine spezifische Qualitätsprüfung.

05. Dokumentation der Qualitätsmängel: Sofern innerhalb der spezifischen Qualitätsprüfung durch den Qualitätsprüfer ein Qualitätsmangel identifiziert wird, muss dieser entsprechend systemseitig dokumentiert werden. Wird kein Qualitätsmangel entdeckt, entfällt dieser optionale Schritt.

06. Nacharbeit der Qualitätsmängel: Das Ziel des Q-Tors liegt in der frühestmöglichen Identifikation von Qualitätsmängeln und der effizientesten Korrektur dieser Qualitätsmängel bzgl. Nacharbeitszeit und Nacharbeitskosten. Im QFS-2c erfolgt für den Qualitätsprüfer ein Job Enrichment, indem er nicht mehr ausschließlich für die Qualitätsprüfung im Q-Tor verantwortlich ist, sondern zudem „einfache“ Qualitätsmängel direkt nach der Identifikation nacharbeitet. Im optionalen Schritt 6 erfolgt somit im Fall eines Qualitätsmangels eine Nacharbeit durch den Qualitätsprüfer. Dies ist jedoch nur möglich, sofern dieser auch die Fähigkeit und Mittel zur Nacharbeit des Qualitätsmangels besitzt. Andernfalls würde der Fehler zum Nacharbeiter weitergeleitet werden.

Das Job Enrichment durch den QFS-2c ist ein signifikanter Beitrag zur Qualitätsregelung. Die rudimentäre detaillierte Qualitätsprüfung übernimmt ein QIS. Die neuen Aufgaben des Qualitätsprüfers umfassen nun:

1. Überprüfung der Prüfergebnisse der technischen Qualitätsprüfung
2. Validierung oder Falsifizierung mit Korrektur der Prüfergebnisse
3. Qualitätsprüfung bei Sonderfällen mit Dokumentation im Fehlerfall
4. Nacharbeit bei einfachen Qualitätsmängeln

Dem Qualitätsprüfer wird dadurch ein hohes Maß an Verantwortung zugewiesen. Durch seine Funktion als letzte Entscheidungsinstanz der Qualitätsbewertung stellt der Qualitätsprüfer eine wichtige Säule innerhalb der Qualitätsregelung dar. Durch diese technische Ergänzung im Q-Tor und Unterstützung des Qualitätsprüfers kann die Prüfsicherheit gesteigert, der Fehlerschlupf reduziert und die Zuverlässigkeit des Q-Tors erhöht werden.

Der QFS-2c hat einen direkten Beitrag zu den folgenden fünf Punkten:

1. Transparenz über die bestehende Qualitätssituation
2. Steigerung der Prüfsicherheit und Reduzierung des Fehlerschlupfes
3. Reduzierung der Fehlerkosten
4. Reduzierung langer Reaktionszeiten bzw. der Totzeit
5. Steigerung der Produkt- und Produktionsqualität

7.3.3 Dritter Stream der Nacharbeitsmeldung

Der dritte Stream der Nacharbeitssteuerung (QFS-3) leitet Nacharbeitsinformationen zum Nacharbeiter weiter. Ebenso wie der QFS-2 wird auch der QFS-3 durch unterschiedliche Sender in drei weitere Substreams unterteilt. Einheitlich ist bei allen Substreams des QFS-3 jedoch die Weiterleitung von Nacharbeitsinformationen an den Nacharbeiter als Empfänger. Folglich existiert hier ebenso die Kardinalität einer 3:1-Beziehung.

- **QFS-3a:** Monteur → Nacharbeiter
- **QFS-3b:** Unterstützer → Nacharbeiter
- **QFS-3c:** Qualitätsprüfer → Nacharbeiter

Der *erste Substream* (QFS-3a) leitet Nacharbeitsinformationen vom Monteur zum Nacharbeiter weiter. Dieser Substream wird dann aktiviert, sofern die Voraussetzungen für den QFS-1 nicht gegeben sind. Dies bedeutet, dass der Monteur systemseitig einen Qualitätsmangel dokumentiert, dieser aber nicht von der ersten Nacharbeitsinstanz (Unterstützer) aufgrund der bekannten Eigenschaften (z. B. Nacharbeitsdauer oder fehlende technische Mittel) behoben werden kann. Folglich wird die Nacharbeitsinformation direkt an den Nacharbeiter über den Substream QFS-3a weitergeleitet.

Der *zweite Substream* (QFS-3b) leitet Nacharbeitsinformationen vom Unterstützer zum Nacharbeiter weiter. Sofern eine Nacharbeitsinformation vom Monteur über den QFS-1 an den Unterstützer weitergeleitet wird, dieser jedoch den Qualitätsmangel nicht nacharbeiten kann und entsprechend weiterhin eine offene Nacharbeit besteht, erfolgt eine Weiterleitung des Qualitätsmangels über die Nacharbeitsinformation mittels QFS-3b.

Der *dritte Substream* (QFS-3c) leitet Nacharbeitsinformationen vom Qualitätsprüfer zum Nacharbeiter weiter. Identifiziert der Qualitätsprüfer im Rahmen seiner Qualitätsprüfung einen Qualitätsmangel, dokumentiert er diesen systemseitig. Besteht die Möglichkeit einer schnellen Nacharbeit durch den Qualitätsprüfer, findet keine weitere Qualitätsweiterleitung statt. Sofern er diesen Qualitätsmangel jedoch nicht beheben kann, wird dieser Qualitätsmangel entsprechend über den QFS-3c an den Nacharbeiter weitergeleitet.

Der Nacharbeiter erhält ebenfalls eine priorisierte Liste mit allen offenen Nacharbeiten. Die Priorisierung auf Basis der Nacharbeitszeit und -kosten ist zielführend, um strukturiert alle offenen Nacharbeiten beheben zu können. Der Nacharbeiter besitzt einen höheren Handlungsspielraum, da dieser entkoppelt von der Taktzeit mit den erforderlichen Mitteln nacharbeiten kann. Nachdem eine Qualitätsabweichung behoben wurde, wird die Ursache systemseitig dokumentiert, sodass künftig bei gleichem Symptom die Lösung zeiteffizient gefunden und die Qualitätsabweichung direkt behoben werden kann.

Durch den QFS-3 wird eine logische Struktur der offenen Nacharbeiten für den Nacharbeiter bereitgestellt und die zentrale Nacharbeit effizient organisiert. Die Ressource des Nacharbeiters wird somit optimal und zielgetrieben eingesetzt, Qualitätsmängel effizient behoben und weitere Qualitätskosten vermieden.

7.3.4 Vierter Stream der Nacharbeitsmeldung

Der vierte Stream der Nacharbeitssteuerung (QFS-4) leitet systematische Qualitätsinformationen bzw. Nacharbeitsmeldungen vom Monteur an den Qualitätsmanager weiter. Der Qualitätsmanager wird über dokumentierte Nacharbeiten informiert, sobald ein bestimmtes Fehlerbild, eine systematische Qualitätsabweichung oder ein Trend bzw. Run vorliegt.

Sobald der Qualitätsmanager informiert wird, liegt es in seiner Verantwortung, den Fehlerabstellprozess einzuleiten und schnellstmöglich eine langfristige Fehlerabstellung zu erreichen. Wenn die Fehlerabstellmaßnahmen greifen, wird das Montagesystem entlastet, sodass hier aufgrund der Absicherungsmaßnahmen bzgl. des Fehlerbildes die Produktionsqualität gesteigert wird.

Durch den QFS-4 können systematische Qualitätsabweichungen verzögerungsfrei von der systemseitigen Dokumentation zum Qualitätsmanager weitergeleitet und transparent gemacht werden. Dies ermöglicht eine schnelle Generierung von Fehlerabstellmaßnahmen und die Vermeidung weiterer Qualitätsmängel mit ebenso weiteren Nacharbeitskosten.

7.4 Automatisiertes Informationsmanagement

Die Informationseingabe in das QCS erfolgt über eine manuelle Dokumentation durch die Mitarbeiter. Das Informationsmanagement des QBS und QFS erfolgt hingegen automatisiert, sodass alle Rollen schnellstmöglich

über die Qualitätssituation informiert werden. Die QCS basiert auf einem logischen Management- und Kommunikationskonzept, welches bei systemseitiger Fehlerdokumentation automatisch anhand des Fehlerbildes die richtige Zuordnung der Empfänger ermittelt und eine sofortige Weiterleitung mithilfe einer Entscheidungslogik umsetzt. Für die richtige Zuordnung sind der Sender, das Fehlerbild, die bisherige Häufigkeit des Fehlerbildes und Prozesskenntnisse bzgl. der weiteren Arbeitsschritte für eine effiziente Festlegung der zu aktivierenden QBS- und QFS-Streams notwendig. Die Wahl der relevanten Streams ist folglich an Bedingungen geknüpft. Anhang K zeigt einen Entwurf der Entscheidungslogik der QCS mittels Pseudocode. Zusätzlich zeigt Anhang M einen Entwurf der Entscheidungslogik mittels einer EPK.

7.5 Integration von Qualitätsprüfsystemen

Der Satz „Man muss messen, was messbar ist, und messbar machen, was zunächst nicht messbar ist.“ nach GALILEI verbalisiert ein grundlegendes Prinzip der Wissenschaft [KLE09]. In unterschiedlichen Produktionsbereichen können Messwerte nützlich sein, sodass eine Erhebung der Messdaten wünschenswert oder sogar erforderlich ist. VON NITZSCH UND MERSMANN sprechen sich in diesem Kontext für eine Einbettung wertschöpfender Messtechnik in QRK aus [VON10]. Als Maßnahme könnte man daraus ableiten, dass alle Sicht- und Lehrenprüfungen in der Fahrzeugmontage konsequent durch Messungen ersetzt werden sollen. Manuelle Messungen durch Qualitätsprüfer sind aufgrund des zeitintensiven Aufwands jedoch keine Lösung. Ebenso ist eine Substitution aller messfreien durch messtechnischen Qualitätsprüfungen und folglich das vollständige Ersetzen menschlicher Qualitätsprüfer durch technische QIS zum derzeitigen Zeitpunkt wirtschaftlich nicht mit angemessenen Mitteln realisierbar. Einen adäquaten Einsatz von Messungen zur Qualitätsprüfung in der Montagelinie stellt hingegen die Integration von hybriden QIS dar.

Bei hybriden QIS liegt der Kern auf einer Kollaboration zwischen Mensch und QIS. Der (menschliche) Qualitätsprüfer wird im Rahmen seiner Qualitätsprüfung durch ein (technisches) QIS unterstützt. Das System misst selbstständig den Istwert und vergleicht diesen mit dem Sollwert sowie den Sicherheits- und Toleranzgrenzen. Das Qualitätsprüfergebnis wird über eine Rückkopplung in die Datenbank unter Vorbehalt hinterlegt und dem Qualitätsprüfer in Echtzeit übermittelt. Der Qualitätsprüfer hat nach der Qualitätsprüfung durch das QIS die Möglichkeit, das Prüfergebnis zu verifizieren oder zu falsifizieren und zu korrigieren. Ebenso kann er weitere identifizierte Qualitätsmängel dokumentieren, welche nicht im Prüfumfang des QIS liegen oder nicht entdeckt wurden. Der Qualitätsprüfer bleibt in dieser Kollaboration weiterhin die letzte Entscheidungsinstanz. Die Nutzung eines QIS als vorgelagerte Qualitätsprüfung in der Montagelinie erzeugt eine zusätzliche Kaskade innerhalb der QRK-Struktur, welche in der QCS durch den QFS-2c repräsentiert wird.

Ein zukünftiger Schritt der technischen Qualitätsprüfung durch Messtechnik ist der Einsatz vollautomatisierter QIS. Durch Implementierung in der Montagelinie sind keine weiteren Qualitätsprüfer zur Qualitätsprüfung dieser Prüfumfänge mehr notwendig. Das QIS misst auch hier selbstständig den Istwert, vergleicht diesen mit dem Sollwert sowie mit den individuellen Sicherheits- und Toleranzgrenzen und stellt die notwendigen Maßnahmen. Das Qualitätsprüfergebnis wird automatisiert in die Datenbank übertragen. Im Fall eines Qualitätsmangels werden automatisiert die entsprechenden Qualitätsinformationsströme aus QFS und QBS aktiviert. Ein Qualitätsprüfer ist somit durch zuverlässige vollautomatisierte QIS obsolet. Fachpersonal ist hier lediglich zur Instandhaltung der Anlage und zur Pflege der Basisdaten erforderlich.

In diesem Kontext prognostiziert HUBER einen Anstieg des Automatisierungsgrades in der Fahrzeugmontage aufgrund einer zunehmenden Bedeutung sensitiver Roboter [HUB16]. Eine Automatisierung der Qualitätsprüfungen in der Fahrzeugmontage in mittel- bis langfristiger Zukunft (ca. 5-7 Jahre) wäre eine mögliche Folge. Tabelle 7.2 gibt eine Übersicht der Vor- und Nachteile des Einsatzes von QIS.

Tabelle 7.2: Vor- und Nachteile von QIS

| Vorteile |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Objektive Qualitätsprüfung ■ Erhöhte Prüfsicherheit und reduzierter Fehlerschlupf ■ Kontinuierliche Messwerte statt lediglich binäre Ergebnisse ■ Reduzierte Personalkosten ■ Hohe Wandlungsfähigkeit bzw. Flexibilität ■ Erhöhte Produktionseffizienz |
| Nachteile |
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Hohe Investitionskosten ■ Erhöhter Planungsaufwand (Umfeldanalyse, Konfiguration) ■ Erhöhter Betriebsaufwand (Instandhaltung, Datenpflege, Anpassungen) |

Ein entscheidender Vorteil beim Einsatz von QIS liegt insbesondere in der objektiven Qualitätsprüfung. Bei manuellen Qualitätsprüfungen sind Prüfergebnisse subjektiver Natur und hängen von der individuellen Fehlerschwelle des Qualitätsprüfers ab. Eine Verbesserung der subjektiven Qualitätsprüfung kann nur durch zeit- und kostenintensive Schulungen der Qualitätsprüfer erfolgen. Diese Nachschulung entfällt beim Einsatz von QIS. Jedoch erfordert ein QIS eine Konfiguration und Parametrisierung der Anlage.

Die hohe Präzision, insbesondere bei einer hohen Anzahl an Prüfpunkten, trägt deutlich zur Steigerung der Prüfsicherheit und Reduzierung des Fehlerschlupfs bei. Ebenso wird durch die Ermittlung von kontinuierlichen Messwerten die Grundlage für die Anwendung von Qualitätswerkzeugen geschaffen. Dies ist für einen effizienten Einsatz des Quality Visualization Models (QVM) in Kapitel 9 eine wichtige Voraussetzung.

Weiterhin sind ein reduzierter Personalbedarf und folglich reduzierte Personalkosten spürbare Vorteile von QIS. Während hybride QIS aufgrund der Reduktion von Fehlerschlupf und Fehlerkosten die Personalkapazitäten für die Nacharbeit einspart, ermöglichen vollautomatisierte QIS darüber hinaus noch die Einsparung von Personalkapazitäten zur Qualitätsprüfung. Dies leistet einen relevanten Beitrag zu den HPV und den Produktionskosten.

Ebenso sind eine hohe Wandlungsfähigkeit und Flexibilität der Qualitätsprüfung durch QIS gewährleistet. Durch die Hinterlegung der aktuellen

Prüfpunkte mit den individuellen Sollwerten sowie den Sicherheits- und Toleranzgrenzen kann die Qualitätsprüfung in Echtzeit auf neue Anforderungen angepasst werden. Eine Änderung der Prüfinhalte bei rein manueller Qualitätsprüfung kann erst nach intensiver Kommunikation und ggf. Schulung aller relevanten Qualitätsprüfer erfolgen. Die Wandlungsfähigkeit und Flexibilität erfordert jedoch eine ausreichende Vernetzung mit bestehenden IS und Datenbanken für einen systemseitigen automatisierten Echtzeitabgriff aktueller Daten. Der wesentliche Vorteil automatisierter QIS liegt in Summe auf der erhöhten Produktionseffizienz mit entscheidendem Beitrag zu den fünf Kernfaktoren Zeit, Kosten, Qualität, Flexibilität und Transparenz (vgl. Abbildung 1.1).

Jedoch müssen z. T. hohe Investitionskosten für Hardware und Software sowie die initiale Konfiguration und Schulung aufgewendet werden. Ebenso sind erhöhte Planungsaufwände durch intensive Umfeldanalysen (Störfaktoren wie z. B. Licht, Temperatur, Mensch, etc.) und informationstechnische Konfigurationen (z. B. Schnittstellenbildung und Vernetzung mit bestehenden Systemen) sowie erhöhte Betriebsaufwände durch Maßnahmen zur Instandhaltung (z. B. Hardwaretausch), Datenpflege und Anpassung (z. B. bei neuen Baureihen, Bauteilen, Prüfpunkten, etc.) des QIS einzuplanen.

7.6 Einordnung der Rollen

Diese Arbeit fokussiert den hybriden Aspekt der Qualitätsregelung. Folglich sind nun die bestehenden Rollen des Montagesystems aus Unterabschnitt 3.2.3 in die QCS unter Aspekten der Qualitätsregelung einzuordnen. Dies ermöglicht eine klare Definition der Funktionen zur Vermeidung von Ineffizienzen bei der Qualitätsregelung. Tabelle 7.3 zeigt die Einordnung der bestehenden Rollen in die QCS anhand ihrer individuellen Funktionen.

Anhand der Einordnung ist ersichtlich, dass die Rollen Quality Sensor, Quality Controller und z. T. Quality Actuator zugleich sind. Dies zeigt die Vielschichtigkeit der Tätigkeitsumfänge der Rollen, welche sich nicht auf eine

Tabelle 7.3: Einordnung der Rollen in die QCS

| Rolle | Quality Actuator | Quality Sensor | Quality Controller | Legende |
|--------------------|------------------|----------------|--------------------|--|
| Monteur | ● | ◐ | ◑ | Art der Aufgabe: ● Kern ◐ Zusatz (immer) ◑ Zusatz (häufig) ◒ Zusatz (selten) ○ keine Funktion |
| Unterstützer | ● | ◐ | ◑ | |
| Qualitätsprüfer | ◑ | ● | ◑ | |
| Nacharbeiter | ● | ◐ | ◑ | |
| Qualitätsmanager | ○ | ◑ | ● | |
| Qualitätsingenieur | ○ | ◑ | ● | |

einzige Funktion eingrenzen lassen. Jede Rolle zeigt, dass sie einen relevanten Beitrag zur Qualitätsregelung leistet, sodass jede Rolle in der QCS einen QRK repräsentiert. In kaskadierter Form ergibt sich so das Gesamtkonstrukt der hybriden Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage nach QCS.

Der *Monteur* ist aufgrund seiner wertschöpfenden Montagetätigkeit primär ein Quality Actuator. Zusätzlich ist er durch seine obligatorische Selbstprüfung ein Quality Sensor. In unterschiedlichen Fällen agiert der Monteur als Quality Controller. Sofern der Monteur bei seiner Selbstprüfung einen Qualitätsmangel identifiziert, wird er den Mangel durch Festlegung der notwendigen Maßnahmen (eigene Nacharbeit oder QFS-1 bzw. QFS-3a) regeln. Ebenso regelt der Monteur seine individuelle Montage- und Prüfqualifikation, indem er die Qualitätsrückmeldung aus dem QBS-3 beachtet und anwendet. Durch den positiven Beitrag der QCS zur Produktionsqualität wird der Monteur diese Rolle jedoch im Vergleich zum Status Quo seltener durchführen.

Der *Unterstützer* ist durch seine Nacharbeitstätigkeit ebenfalls in erster Linie ein Quality Actuator. Auch er ist an seine obligatorische Selbstprüfung gebunden und agiert als Quality Sensor. Weiterhin regelt er über die Festlegung der Maßnahme zur Nacharbeit (eigene Nacharbeit oder QFS-3b), sodass auch er als Quality Controller agiert. Da ein Unterstützer diese Rolle immer ausführt, besitzt diese eine entsprechende Relevanz.

Der *Qualitätsprüfer* ist im Kern durch seine Qualitätsprüfung ein Quality Sensor. Im Fall eines Qualitätsmangels (eigene Identifikation oder über QFS-2c) wird der Qualitätsprüfer die notwendigen Maßnahmen (eigene

Nacharbeit oder QFS-3c) zur Nacharbeit bzw. Qualitätsregelung treffen und agiert als *Quality Actuator*. Ebenso regelt er durch den QBS-1 und QBS-2 seine individuelle Prüfqualifikation. Somit ist der Qualitätsprüfer häufig auch *Quality Controller*.

Der *Nacharbeiter* ist durch seine Nacharbeitsfunktion grundsätzlich ein *Quality Actuator*. Nach der Montagetätigkeit ist auch er an seine obligatorische Selbstprüfung gebunden und agiert als *Quality Sensor*. Zudem ist der Nacharbeiter durch seine Festlegung der notwendigen Maßnahme zur Nacharbeit ein *Quality Controller*. Über ein „prädiktives“⁴ IS in Kombination mit einer Wissensdatenbank zu vergangenen Nacharbeiten werden dem Nacharbeiter bereits Symptome und Ursachen sowie potenzielle Lösungen zur bestehenden Nacharbeit vorgeschlagen. Dies hat den positiven Effekt, dass der Nacharbeiter bei seiner Regelung von diesem IS unterstützt wird und die Regelung auf verfügbare Informationen beruhen. Diese Informationen werden durch die Nacharbeitsinformationen regelmäßig vom Nacharbeiter gepflegt.

Sowohl der *Qualitätsmanager* als auch der *Qualitätsingenieur* sind im Kern ein *Quality Controller*. Beide nehmen den notwendigen Einfluss auf die Prozesse und regeln diese bei kritischen Abweichungen. Dazu wenden beide unterschiedliche Qualitätsmethoden an, während der Qualitätsmanager die Regelung im Montageband durchführt und der Qualitätsingenieur die fachliche Analyse und Lösungsgestaltung übernimmt. Beide sind als Kooperationspartner im Rahmen der Qualitätsregelung zu sehen. Zudem überwachen beide die Produkt- und Produktionsqualität und agieren als *Quality Sensor*. Dazu nutzen sie unterschiedliche Kennzahlen und Qualitätswerkzeuge. Eine sachgerechte Kennzahl ist die APQ in Kapitel 6 sowie ein adäquates Qualitätswerkzeug das QVM in Kapitel 9. Da beide Rollen keine operativen Tätigkeiten am Produkt umsetzen, verkörpern sie nicht die Funktion des *Quality Actuators*.

⁴ Der Begriff „prädiktiv“ ist synonym zum Begriff „vorhersagbar“ [DUD17].

7.7 Regelungstechnische Merkmale

Analog zu einem technischen System kann auch ein hybrides Montagesystem und dessen Qualität durch das Konzept des technischen RK mittels kaskadierter QRK beschrieben werden (vgl. Unterabschnitt 2.2.2). Dazu wird nachfolgend die hybride Qualitätsregelung auf die Komponenten der technischen Regelung adaptiert und ein aussagekräftiges Blockschaltbild entwickelt. Zusätzlich erfolgt eine Beschreibung der verschiedenen Einflussgrößen auf den hybriden QRK sowie eine Ableitung von regelungstechnischen Eigenschaften.

7.7.1 Aufbau der technischen Qualitätsregelung

Die QCS basiert auf den drei Faktoren Mensch, System und Information. Diese stehen in direkter Interaktion zueinander und zielen auf eine Kollaboration zur hybriden Qualitätsregelung ab. Anhand der unterschiedlichen Rollen und Funktionen ist ersichtlich, dass es sich bei der Qualitätsregelung innerhalb eines Montagesystems nicht um einen einzigen QRK handelt, sondern diese aus mehreren QRK besteht. QRK lassen sich prozesslogisch miteinander verketteten und zu einer ganzheitlichen Qualitätsregelung kaskadieren. Folglich bildet auch jede individuelle Rolle aus Unterabschnitt 3.2.3 einen eigenen RK ab. Anhang N zeigt das Blockschaltbild der hybriden Qualitätsregelung.⁵

Die Kanten (Signale) innerhalb des Blockschaltbildes übertragen die relevanten Informationen zwischen den Knoten (Blöcke), welche zur Qualitätsregelung erforderlich sind. Ziel einer Regelung ist die Erreichung des definierten Sollwertes z . Dieser Wert wird den Rollen als Zielwert bereitgestellt. Anhand dessen definieren die Rollen den individuellen Stellwert u zur Umsetzung innerhalb der Regelstrecke (Montage oder Nacharbeit). Aufgrund verschiedener Einflussgrößen E auf die Regelstrecke ergibt sich eine Abweichung d

⁵ Im Blockschaltbild werden bereits die weiteren Module WII und QVM dieser Arbeit aufgegriffen.

und folglich ein realisierter Istwert w . Die Einflussgrößen E können unterschiedlich im Ursprung und der Ausprägung sein (vgl. Unterabschnitt 7.7.2). Der binäre Qualitätswert q_B , welcher sich über das CQD in Kapitel 5 ermitteln lässt, wird abschließend im WII⁶ dokumentiert und die Qualität über die QCS geregelt.

Das Blockschaltbild zeigt, dass alle Rollen der hybriden Qualitätsregelung über das WII mit der QCS verbunden sind. Alle relevanten Informationen werden folglich über das WII dokumentiert und im Folgeschritt über die QCS an alle notwendigen Rollen weitergeleitet. Erkennbar sind im Blockschaltbild zwei Typen von Signalen. Zum einen die obligatorischen Signale (durchgezogene Kanten), welche in jedem Fall geschaltet werden. Zum anderen bedingte Signale (gestrichelte Kanten), welche hingegen optional je nach Situation geschaltet werden. Diese Struktur sichert eine ganzheitliche Vernetzung im Kontext einer Mensch-System-Kollaboration und schafft die Voraussetzung für eine effiziente Qualitätsregelung.

7.7.2 Einflussgrößen im Qualitätsregelsystem

Das Montagesystem ist ein dynamisches, nichtlineares und hochkomplexes Regelungssystem und muss als solches im Rahmen der Produktions- und Qualitätsplanung berücksichtigt werden. Kleine Anpassungen an einem Parameter können große Auswirkungen auf das gesamte System und seine Ergebnisse haben.⁷ Es gilt daher, die Einflussgrößen E des Montagesystems bzw. Störgrößen des QRK zunächst zu kennen, Kausalitäten zu identifizieren und ihren Einfluss auf die Qualitätsregelung durch Maßnahmen zu minimieren.

Während im technischen RK die vorhandenen Störfaktoren auf die Regelstrecke Einfluss nehmen, wirken die Einflussfaktoren E im Montagesystem

⁶ Das „Worker Interaction Interface“ (WII) stellt die Benutzungsoberfläche des Konzeptes dar und wird in Kapitel 8 vorgestellt.

⁷ Vgl. „Theorie des Schmetterlingseffektes“ nach LORENZ [LOR93].

auf alle Komponenten der hybriden Qualitätsregelung. Zum einen beeinflussen sie prozessuale Komponenten wie die Regelstrecke (Montage, Qualitätsprüfung und Nacharbeit), zum anderen aber auch menschliche und technische Komponenten (Regler und Prüfglied). Relevante Einflussgrößen auf das Montagesystem mit direkter Auswirkung auf die Produktionsqualität können u. a. auf Basis der 7M-Methode (vgl. Ishikawa-Diagramm in Unterabschnitt 3.3.4) identifiziert werden. Tabelle 7.4 zeigt exemplarische Einflussgrößen auf das Montagesystem. Die Kategorie „Messbarkeit“ wurde durch „Information“ ersetzt, da keine Messung innerhalb des Montagesystems erfolgt. Stattdessen liefern Informationen einen maßgeblichen Beitrag zur Qualitätsregelung und sind entscheidende Einflussgrößen.

Tabelle 7.4: Einflussgrößen auf das Montagesystem

| Kategorie | Einflussgrößen |
|-------------|---|
| Mensch | Anzahl, Qualifikation, Motivation, Auslastung |
| Maschine | Anzahl, Funktionalität, Zuverlässigkeit, Echtzeitfähigkeit, Kollaborationsfähigkeit, Automatisierungsgrad |
| Material | Anzahl, Komplexität, Änderbarkeit, Reifegrad, Logistik, Varianz, Vollständigkeit |
| Methode | Determiniertheit, Präzision, Flexibilität, Komplexität |
| Mitwelt | Struktur, Dynamik, Vernetzung, Ergonomie, Taktzeit, Bandgeschwindigkeit, Technisierungsgrad |
| Management | Umfang, Schnelligkeit, Präzision, Prädizierbarkeit, Nachhaltigkeit |
| Information | Quantität, Qualität, Zeitpunkt, Frequenz, Verfügbarkeit, Aktualität, Individualität |

Bei Betrachtung der Einflussgrößen und der Komponenten des Blockschaltbildes ist die Bedeutsamkeit der Faktoren Mensch und Information zu erkennen. Beide leisten einen entscheidenden Beitrag zur Produkt- und Produktionsqualität, wobei das Management von Menschen und Informationen eine besondere Herausforderung darstellt. Vor allem der Faktor Mensch ist in seinen spezifischen Handlungen und Beiträgen zur Wertschöpfung nur bedingt vorhersagbar und regelbar. Jedoch sind das implizite und explizite Wissen sowie die individuellen Fähigkeiten eines jeden Mitarbeiters qualitätsentscheidende Komponenten. Dies verlangt eine entsprechend

hohe Einbeziehung in den Qualitätsherstellungsprozess sowie eine intensive Beachtung der zur Qualitätsherstellung notwendigen Bedürfnisse der Mitarbeiter. Es ist somit erforderlich, die Qualifikation der Mitarbeiter kontinuierlich zu schulen und ihre Anforderungen zu berücksichtigen. Dazu unterstützt die QCS alle relevanten Mitarbeiter in der Qualitätsregelung.

7.7.3 Eigenschaften des hybriden Qualitätsregelsystems

In Unterabschnitt 2.2.1 wurden die Eigenschaften einer Regelung beschrieben und in Tabelle 4.2 bzw. Anhang G als Anforderung an die Qualitätsregelung festgelegt. Die Anforderung *Messen* wird in der Fahrzeugmontage nicht erfüllt. Wie in Unterabschnitt 3.2.5 beschrieben, finden innerhalb der Montagelinie lediglich Sichtprüfungen bzw. Qualitätsprüfungen durch Lehren und eine Ermittlung des binären Qualitätswertes q_B statt. Der Anteil technischer Messungen und der Ermittlung des quantitativen Qualitätswertes q_Q ist sehr gering. Messungen sind zwar grundsätzlich zu bevorzugen, jedoch deren Implementierung in der Montagelinie aus wirtschaftlicher Sicht nicht immer sinnvoll.

Ein *Vergleichen* erfolgt während der qualitätsprüfenden Prozessschritte innerhalb der Montagelinie durch die verschiedenen Rollen (vgl. Tabelle 7.3). Allerdings handelt es sich bei der Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage nicht um eine kontinuierliche Regelung mit dem Ziel, den Istwert w möglichst nah an den Sollwert z zu bringen. Ziel ist die Einhaltung der merkmalspezifischen Toleranzgrenzen t_{min} und t_{max} . Eine Regelung erfolgt, wenn Zustände außerhalb eines Toleranzbereiches identifiziert werden bzw. der quantitative Qualitätswert q_B den Wert „false“ annimmt. Ebenso findet eine Regelung statt, wenn ein Trend oder Run im Werteverlauf erkannt wird.

Das *Stellen* wird in der QCS primär von Monteuren durch Montage sowie von Unterstützern und Nacharbeitern durch Nacharbeit übernommen – also von Mitarbeitern, die Arbeitsvorgänge am Produkt ausführen und Qualitätskennwerte beeinflussen. Bei geringer Komplexität des Qualitätsmangels übernimmt auch der Qualitätsprüfer durch Nacharbeit das Stellen. Sekundär erfolgt das Stellen auch durch den Qualitätsmanager und den

Qualitätsingenieur. Dabei handelt es sich jedoch weniger um das produkt-spezifische Stellen sondern vielmehr um das prozess- bzw. produktionsspezifische Stellen. Zusammengefasst sind alle Rollen am regelungstechnischen Prinzip des Stellens beteiligt.

Zum anderen umfassen die geforderten Eigenschaften in Tabelle 4.2 bzw. Anhang G die vier Güteanforderungen der Genauigkeit, Schnelligkeit, Stabilität und Robustheit der Qualitätsregelung. Die *Genauigkeit* der Qualitätsregelung wird durch die QCS gewährleistet. Der Istwert w bezeichnet das Montageergebnis, dessen Qualitätsergebnis über den binären Qualitätswert q_B verkörpert wird. Einen entscheidenden Unterschied zwischen klassischer Regelungstechnik und der hybriden Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage stellen Toleranzbänder dar. Ein Istwert w muss lediglich innerhalb der definierten Toleranzgrenzen t_{min} und t_{max} liegen, jedoch den Sollwert z zur Erfüllung der Qualitätsanforderung nicht vollständig erreichen. Somit muss die Forderung nach Genauigkeit nur bedingt erfüllt werden.

Eine *Schnelligkeit* der Qualitätsregelung ist ebenso durch die QCS sichergestellt. Aufgrund der schnellen Qualitätsrückmeldung mittels QBS und der effizienten Nacharbeitssteuerung durch QFS sind alle Rollen direkt in Echtzeit über die jeweilige Qualitätsinformation auf Basis einer hohen Transparenz informiert. Insbesondere durch die automatisierten und digitalen Informationsflüsse kann eine hohe Schnelligkeit ermöglicht werden. Durch zusätzliche Informationen in Form von Handlungsanweisungen und Lösungsvorschlägen kann die Effizienz und Transparenz zudem weiter gesteigert werden. Der Istwert w kann somit schnellstmöglich an den Sollwert z angenähert werden. Diese rollen-, sach- und zeitgerechten Qualitätsinformationen ermöglichen einen hohen Schnelligkeitsgrad der Qualitätsregelung.

Die *Stabilität* der Qualitätsregelung wird ebenfalls über die QCS erreicht. Die hohe Informationstransparenz und die direkte Mitarbeiteransprache durch QBS und QFS ermöglichen eine hohe Stabilität der Qualitätsregelung bzw. der Produktionsqualität. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Einflussgrößen auf die Produkt- bzw. Produktionsqualität können durch die hohe Vernetzung zwischen den einzelnen Rollen schnell über eine sofortige

Qualitätsregelung abgeschwächt werden. Über die direkte Einbindung des Qualitätsmanagers und des Qualitätsingenieurs können Sofortmaßnahmen als direkte Reaktion zur Sicherung der Produkt- und Produktionsqualität erfolgen. Eine Überschwingung des Montagesystems wird durch die QCS vermieden.

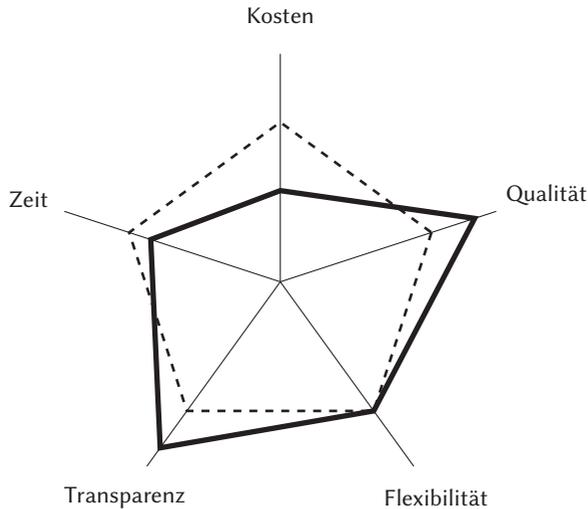
Die *Robustheit* der Qualitätsregelung stellt die QCS ebenfalls sicher. Durch kontinuierliches und automatisiertes Management von Qualitätsinformationen wird eine hohe Transparenz zur Qualitätssituation ermöglicht. Dies reduziert die Fehleranfälligkeit des Montagesystems und ebenso eine falsche Regelung.

Zudem besitzt die Struktur der QCS eine generische Eigenschaft und kann je nach Bedarf um zusätzliche Informationsströme erweitert werden. Darüber hinaus fokussiert die QCS eine echtzeitorientierte Qualitätsregelung, um eine schnellstmögliche und maximale Transparenz zu schaffen sowie daraus effiziente Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Folglich stellt die QCS ein Referenzmodell einer hybriden Qualitätsregelung innerhalb der Fahrzeugmontage dar und kann bedarfsgerecht angepasst werden.

7.8 Zielsetzungen des Systems

Zur Einleitung dieser Arbeit wurde das magische Dreieck der perfekten Produktion aufgezeigt (vgl. Abbildung 1.1). Es zeigt das magische Dreieck in klassischer Form mit den drei Parametern „Zeit“, „Kosten“ und „Qualität“, erweitert es jedoch um die Faktoren „Flexibilität“⁸ und „Transparenz“ [KLE14]. Diese Erweiterung schafft ein modernes Bild der unternehmerischen Herausforderungen innerhalb einer Produktion. Abbildung 7.5 zeigt die Einordnung der QCS in die Faktoren.

⁸ Vgl. das „Teufelsviereck“ nach HANSEN ET AL. [HAN15] bzw. den „Manufacturing Tetraedron“ nach CHRYSSOLOURIS [CHR06].

**Legende**

- - - Ausgangslage ——— QCS

Abbildung 7.5: Einordnung der QCS in die Faktoren der perfekten Produktion

Die Kernaufgabe der QCS umfasst die Qualitätsregelung. Die *Kosten* bzw. Qualitätskosten sollen durch die positiven Effekte der QCS langfristig reduziert werden. Jedoch steigen diese zunächst durch initiale Investitionen zur Implementierung der QCS. Ebenso erfolgt eine Einsparung hinsichtlich der *Zeit* bzw. der Dokumentations- und Fehlerbehebungszeit durch die QCS. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sich die Dokumentationszeit (z. B. zur Fehlereingabe oder Lösungsdokumentation) für bestimmte Rollen erhöhen wird. Aufgrund der angestrebten Effizienz sollen höhere Dokumentationszeiten vermieden werden und zeitwirtschaftliche Vorteile entstehen.

Die *Flexibilität* wird durch die QCS ebenfalls tangiert. Durch einen höheren Digitalisierungs- und Automatisierungsgrad wird die Flexibilität in der Qualitätsregelung und in der Dokumentation an diversen Punkten reduziert (z. B. bei der Fehlereingabe), an anderer Stelle voraussichtlich jedoch erhöht

(z. B. Qualitätsprüfung im Produktionsanlauf neuer Baureihen). Weiterhin müssen die Daten des neuen Systems gepflegt werden, was einen direkten Einfluss auf die Flexibilität besitzt. Handschriftliche Dokumentationen, die den Mitarbeitern größtmögliche Flexibilität bieten, sollen durch digitale Lösungen ersetzt werden. Dies schafft den Vorteil der Vermeidung unpräziser Informationen. Des Weiteren wird die *Transparenz* bzgl. qualitätsbezogener Daten, Informationen und Situationen durch die QCS deutlich gesteigert. In Summe regelt und steigert dies die *Qualität* der Produktion und Produkte.

Durch Anbindung aller Akteure an die QCS können die o. g. Faktoren sowie verschiedenen Anforderungen aus Abschnitt 4.1 erzielt und die damit verbundenen Defizite aus Unterabschnitt 3.2.6 behoben werden. Alle Akteure können Informationen empfangen und senden bzw. dokumentieren. Eingetragene Qualitätsmängel sind damit sofort für Akteure anderer Kaskaden einsehbar. Analoge Systeme (vgl. Unterabschnitt 3.2.4) und mündliche Kommunikationen zwischen Monteur und Unterstützer sind in der QCS nicht mehr notwendig. Das Montagesystem wird um das Qualitätsinformationsmanagement erweitert.

7.9 Zwischenfazit: Regelung der Produktionsqualität

Die „Quality Control Structure“ (QCS) repräsentiert ein informationstechnisches Referenzmodell zum rückwärts- und vorwärtsgerichteten Management von Qualitätsinformationen auf horizontaler Ebene der Wertschöpfungskette eines Montagesystems (Ergebnis 3). Der rückwärtsgerichtete QBS leitet Qualitätsinformationen als Rückkopplung über vier Streams an vorgelagerte Orte zurück. Dies dient dem Zweck einer schnellen Qualitätsrückmeldung und hohen Informationstransparenz sowie einer hohen Qualitätsfähigkeit im Montageprozess und hohen Prüfsicherheit im Qualitätsprüfprozess. Das Ziel des QBS umfasst eine nachhaltige Qualitätssicherung. Der vorwärtsgerichtete QFS leitet Qualitätsinformationen über acht Streams an nachgelagerte Orte als Nacharbeitsmeldung weiter. Der

QFS dient zur vollständigen Fehlerdokumentation, schnellen Nacharbeitsmeldung und effizienten Nacharbeitssteuerung.

Insgesamt charakterisiert sich die QCS durch ein automatisiertes Management von Qualitätsinformationen unter Anwendung regelungstechnischer Prinzipien. Durch die QCS werden die Anforderungen an die hybride Qualitätsregelung erfüllt und schafft so eine informationstechnische Struktur und Logik für eine Qualitätsregelung innerhalb der Fahrzeugmontage (Leitfrage 3). Nun gilt es, diese Qualitätsinformationen in adäquater Form innerhalb der Montagelinie durch ein anwenderorientiertes Modell in Kapitel 8 zu visualisieren.

8 Visualisierung der Informationen

„Qualität muss produziert werden, sie kann nicht herbeigeprüft werden.“

WERNER NIEFER (1928 – 1993)

Zur effizienten Informationsversorgung der Rollen im Kontext einer hybriden Qualitätsregelung ist ein adäquates Visualisierungskonzept erforderlich. Zum einen gilt es zu definieren, wie und mit welchen Hilfsmitteln die Nutzer mit relevanten qualitätsbezogenen Informationen rollen-, sach- und zeitgerecht versorgt werden müssen (Leitfrage 4). Zum anderen muss festgelegt werden, wie qualitätsbezogene Informationen in Form von Kennzahlen und durch Visualisierung rollengerecht bereitgestellt werden müssen (Leitfrage 5). Dazu entwickelt dieses Kapitel ein anwenderorientiertes Modell einer grafischen Benutzungsoberfläche zur Ein- und Ausgabe von qualitäts- und montagebezogenen Informationen innerhalb der Montagelinie (Ergebnis 4). Das Modell wird als „Worker Interaction Interface“ (WII) bezeichnet. Das WII wurde im rudimentären Ansatz durch zwei Konferenzbeiträge der Wissenschaft zugänglich gemacht [GEW18a; GEW18d].

8.1 Allgemeiner Aufbau

Die Analyse des Status Quo der Fahrzeugmontage in Abschnitt 3.2 zeigt die Notwendigkeit einer Revitalisierung der Kommunikationsstruktur innerhalb der Montagelinie. Die bestehenden Ansätze zur Informationsvisualisierung in Unterabschnitt 3.3.3 konnten für eine hybride Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage keine ausreichende Lösung bereitstellen.

Das WII bildet die grafische Benutzungsoberfläche zur Qualitätsregelung innerhalb der Montagelinie und verkörpert eine View¹ innerhalb der Architektur des Konzeptes. Dabei fokussiert sich das System auf die Bereitstellung bzw. die Ein- und Ausgabe von Qualitätsinformationen zur hybriden Qualitätsregelung. Als grafisches Modell liefert es einen Beitrag in Form eines Montageinformationssystems. Innerhalb der Montagelinie wird jede informationsrelevante Montage- und Nacharbeitsstation, jeder Unterstützer sowie jedes Q-Tor mit dem WII ausgestattet. Die Rollen erhalten dabei ein digitales Medium zur Ein- und Ausgabe von relevanten Montage- und Qualitätsinformationen.

Der inhaltliche Aufbau des WII ist abhängig von den spezifischen Anforderungen und den notwendigen Funktionen der Rollen. Aufgrund unterschiedlicher Informationsbedarfe sind verschiedene Informationssichten erforderlich. Das WII wird dazu entsprechend in drei Anwendungsbereiche aufgeteilt:

1. Montagesicht
2. Qualitätsprüfsicht
3. Nacharbeitssicht

Trotz der Separation in Sichten ist zur Erreichung einer vernetzten Informationslandschaft ein ganzheitliches System zur Erfüllung der Anforderungen nach Visualisierung, Qualitätsrückmeldung, Nacharbeitssteuerung und Dokumentation erforderlich. Die Funktionen werden im WII über Bausteine realisiert, welche je nach Anforderung genutzt werden können. Somit können die Bausteine nach den o. g. Sichten eingeordnet werden.

¹ Die beiden Views des Konzeptes sind das WII und das QVM (vgl. Abbildung 4.2).

8.2 Technische Basis

Das WII umfasst sowohl eine Definition des GUI als auch eine Beschreibung der technischen Umsetzung. Das GUI wird über die Sichten und Bausteine definiert. Vor einer Implementierung ist zunächst eine Auswahl sachgerechter Endgeräte erforderlich. Der Einsatz einer papierbasierten Informationsvisualisierung in der Produktion wird aufgrund der genannten Herausforderungen sowie der Defizite in Unterabschnitt 3.2.6 dem Anspruch nach einer gezielten Informationsdarstellung nicht mehr gerecht, sodass eine automatisierte digitale Visualisierung zunehmend erforderlich ist. Dazu haben u. a. LUŠIĆ ET AL. unterschiedliche Technologien gegenüber gestellt [LUŠ16].

Das WII basiert zum einen auf festinstallierte Bildschirme für Arbeitsbereiche mit geringem Mobilitätsbedarf. Zum anderen werden mobile Endgeräte in Form von Tablets und Smartphones für flexible Arbeitsbereiche mit hohem Mobilitätsbedarf verwendet. Zusätzlich werden die Mitarbeiter mit einer industriellen Smartwatch ausgestattet. Diese ermöglicht, dass ein Mitarbeiter orts- und tätigkeitsunabhängig informiert wird und zusätzlich die Informationen direkt abgerufen werden können. Dies ist insbesondere für Exotenalarmierungen² oder kurzfristige Prozessänderungen mit Sofortmaßnahmen sinnvoll. Die Auswahl der Größe der jeweiligen Bildschirme muss aufgrund unterschiedlicher Anforderungen stationsspezifisch erfolgen, sodass eine allgemeingültige Festlegung nicht getroffen werden kann. Tabelle 8.1 zeigt eine Zuordnung der Endgeräte mit ihrem Inhalt zu den Rollen in der Montagelinie.

Zwar sind die Endgeräte der Rollen im WII definiert, jedoch ist eine universale Lösung für Montagestationen aufgrund variierender Anforderungen nicht möglich. Innerhalb einer Montagelinie charakterisieren sich die Informations- und Visualisierungsbedarfe der Montagestationen anhand der Montageumfänge. So kann für eine Montagestation ein Montagewagen zur Verfügung stehen. Der Monteur interagiert während des Montageprozesses mit dem Montagewagen, sodass ein statischer Bildschirm aufgrund

² Ein Exotenfahrzeug besitzt eine außergewöhnliche Ausstattung (z. B. Vollausrüstung).

Tabelle 8.1: Zuordnung der Endgeräte zu den Rollen

| Rolle | Endgerät | Inhalt |
|--------------------|------------------------|--|
| Monteur | Bildschirm oder Tablet | Montage- und Qualitätsinformationen sowie Qualitätsrückmeldungen |
| | Smartwatch | Exotenalarmierungen |
| Unterstützer | Smartphone | Nacharbeitsinformationen |
| Qualitätsprüfer | Bildschirm | Qualitätsinformationen und Qualitätsrückmeldungen |
| | Smartphone | Qualitäts- und Prüfmerkmale |
| Nacharbeiter | Bildschirm | Montage- und Nacharbeitsinformationen |
| Qualitätsmanager | Smartphone | Qualitätsinformationen |
| Qualitätsingenieur | Smartphone | Qualitätsinformationen |

der mangelhaften Sichtbarkeit der Informationen ungeeignet wäre. In diesem Anwendungsfall eignet sich bspw. der Einsatz eines Tablets, das am Montagewagen befestigt und über eine industrielle Batterielösung (Wechsel pro Schicht) betrieben wird. Andere Montagestationen ohne Montagewagen hingegen erfordern den Einsatz einer statischen Bildschirmlösung. Je nach Anwendungsbereich kann aus der bestehenden Palette ausgewählt werden. Zusätzlich können Lichtanlagen als visuelle Unterstützung beim Bauteilabgriff verwendet werden. Dazu eignet sich innerhalb der Montagelinie die Technologie des Pick-by-Light.

Der Vorteil zeigt sich in der Flexibilität durch Tablets und Bildschirme. Informationen sind nicht mehr statisch an einem festen Punkt (Zentralisierung) in der Montagelinie, sondern bewegen sich dynamisch mit dem Monteur entlang der Montagelinie (Dezentralisierung). Die Voraussetzung ist jedoch die korrekte Informationszuweisung, bspw. über die Kopplung mit einem Ortungssystem. Ebenso ermöglicht der Einsatz von Smartphones und Smartwatches die echtzeitorientierte Informationsweitergabe an die Rollen. Durch einen Informationsfluss auf Echtzeitbasis werden alle Rollen sofort informiert und können schnell sowie flexibel auf die Situation reagieren. Dies schafft eine hohe Informationstransparenz und liefert einen Beitrag zur effizienten Produktion. Anhang O konkretisiert die technische Ausstattung des WII.

8.3 Montagebezogene Bausteine

Das WII umfasst vier montagebezogene Bausteine. Diese gewährleisten einen kontinuierlichen Informationsfluss zwischen IS und Mitarbeiter in der Montagelinie. Folgende montagebezogene Bausteine umfasst das WII:

1. Montageinformation
2. Sonderausstattungshinweis
3. Montageanleitung
4. Tätigkeitsdokumentation

8.3.1 Darstellung von Montageinformationen

Für die Visualisierung von Montageinformationen hat sich im Rahmen industrieller Experimente eine Kombination aus Bild- und Textinformationen bewährt. Abstrakte Bildinformationen zur Darstellung der relevanten Bauteile werden als isometrische CAD-Bilder angezeigt. Zusammen mit Textinformationen in Form einer Kurzbezeichnung ist eine eindeutige Identifikation des Bauteils gewährleistet. Die Anordnung der Bild-Text-Kombination sollte einem einheitlichen Muster folgen. Empfohlen wird eine Anzeige der Bauteile in geplanter Prozessreihenfolge in Leserichtung auf Basis von zwei Zeilen und drei Spalten. In Ausnahmefällen (z. B. bei längeren Montagetakten und folglich höheren Montageumfängen) können diese zu einer Anordnung von drei Zeilen und vier Spalten erweitert werden. Abbildung 8.1 zeigt ein exemplarisches Beispiel der Visualisierung von Montageinhalten für einen Monteur nach WII.

Die Basisinformationen zur Montagestation und zum Fahrzeug, welche für alle Montagestationen relevant sind, finden sich in den beiden Kopfzeilen. Neben einer länderspezifischen Kennung ist dort das aktuelle Fahrzeug visualisiert. Dies schafft eine zusätzliche Absicherung zur Koinzidenz zwischen angezeigten Informationen und realem Fahrzeug. Auf der rechten Seite sind die entsprechenden Navigationsschaltflächen positioniert. Die aktuelle Registerkarte des Bildschirms wird über die blau hinterlegte Schaltfläche angezeigt.

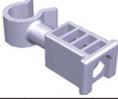
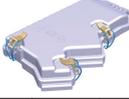
| | | | | | | |
|---|---|---|-----------------------------|-------------------------|---|---|
| Montageband <i>Bd 5</i> | Sequenznummer <i>T 123</i> | Baureihe <i>F 815</i> | Kraftstoff <i>Benzin</i> | Lenkung <i>LL</i> |  |  |
| Montagestation <i>St 21</i> | Produktionsnummer <i>P 123 456 789</i> | Getriebe <i>Automatik</i> | Motor <i>8 Zylinder</i> | Edition <i>Sport</i> | | |
| 1  🔧 1x - | 2  ☞ 4x N23 | 3  ☞ 1x VK2 | Montageinformation | | | |
| 4  ☞ 1x - | 5  ☞ 2x C2D | 6  🔧 1x - | Montageanleitung | | | |
| | | | Nacharbeitsmeldung | | | |
| | | | Qualitätsinformation | | | |
| | | | abmelden | | | |
| ! Sonderausstattung Verdeckkastendeckel Typ D (USA) ! | | | | | |   |

Abbildung 8.1: Visualisierung von Montageinhalten

Zwecks Vorschau auf Montageinformationen zu kommenden Fahrzeugen bzw. eines Rückblicks auf Visualisierungsinhalte zu bereits montierten Fahrzeugen (z. B. zur nachträglichen Absicherung der richtigen Montage) sind Navigationsschaltflächen durch Pfeile hinterlegt. Diese lassen den Monteur in der Perlenkette vor- und zurückblättern. Ebenfalls dienen diese Schaltflächen als Notfallkonzept im Fall einer Störung bzw. Ausfall des Ortungssystems.

Zentral im Bildschirm sind die Montageumfänge platziert. Neben der abstrahierten Bildinformation über ein isometrisches CAD-Bild des Bauteils sind weitere Informationen unterhalb des Bildes in Form von Piktogrammen bereitgestellt. Es werden folgende Inhalte über Piktogramme dargestellt:

1. **Werkzeuginformation:** Zeigt die Montageart an (Werkzeug bzw. Hand).
2. **Mengeninformation:** Zeigt die Menge der benötigten Bauteile an.
3. **Fachinformation:** Zeigt die Nummer des Fachs in der Materialzone an.

8.3.2 Exotenalarm und Sonderausstattungshinweis

Ebenso ist ein Hinweis des Monteurs auf Exotenfahrzeuge bzw. Sonderausstattungen zur maximalen Aufmerksamkeit notwendig. Im WII sollen zum einen besondere Ausstattungsvarianten situationsgerecht visuell in den Vordergrund gerückt werden, zum anderen soll der Monteur auf komplexere Montageumfänge sensibilisiert werden. Visuell sollte der Sonderausstattungshinweis an einem Fixpunkt (z. B. in der Fußzeile des GUI in Kombination mit einer auffälligen Farbe) platziert werden. Optional wäre zusätzlich ein akustischer oder haptischer Hinweis, bspw. über die Verwendung eines Signaltons oder ggf. eines Vibrationsarmbandes bzw. einer Smartwatch. Dadurch wird der Monteur sofort informiert und auf den Montageumfang sowie auf qualitätsbezogene Merkmale sensibilisiert. In Abbildung 8.1 ist entsprechend die Fußzeile als Warnhinweis deutlich zu erkennen. Diese wird in Sonderfällen aktiviert.

8.3.3 Bereitstellung einer Montageanleitung

Neben der Kombination von Bild- und Textinformationen zu den Montageeinhalten sowie der Angabe von Sonderausstattungshinweisen sind z. T. Montageanleitungen notwendig. Für einen Monteur mit hoher Erfahrung ist eine Montageanleitung weniger erforderlich. Da in der Fahrzeugmontage jedoch verstärkt Zeitarbeitnehmer und Ferienarbeitskräfte mit geringer Erfahrung eingesetzt werden, stellt eine leicht verständliche und schnell abrufbare Montageanleitung in der Montagestation einen erheblichen Mehrwert zur Gewährleistung eines direkten Qualitätsverbaus dar. Bei Unsicherheit zum Montageschritt soll dem Monteur per intuitiver Interaktion mit wenigen Schritten eine Montageanleitung auf Basis der bekannten isometrischen CAD-Bilder sowie ggf. kurzer Animationen angezeigt werden. In den industriellen Experimenten konnten positive Erfahrungen mit einer abstrahierten Explosionsdarstellungen ähnlich einer Lego-Bauanleitung gemacht werden. Abbildung 8.2 zeigt ein exemplarisches Beispiel einer Montageanleitung für einen Monteur nach WII.

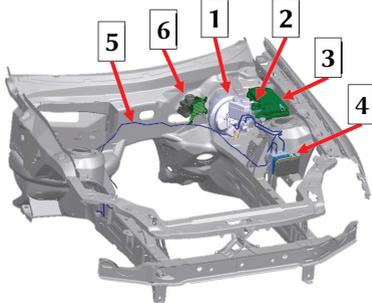
| | | | | | | |
|---|---|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---|---|
| Montageband <i>Bd 5</i> | Sequenznummer <i>T 123</i> | Baureihe <i>F 815</i> | Kraftstoff <i>Benzin</i> | Lenkung <i>LL</i> |  |  |
| Montagestation <i>St 21</i> | Produktionsnummer <i>P 123 456 789</i> | Getriebe <i>Automatik</i> | Motor <i>8 Zylinder</i> | Edition <i>Sport</i> | | |
| 1 – Bremskraftverstärker einsetzen und verschrauben |  | | | | | Montageinformation |
| 2 – Leitungshalterungen (4x) einsetzen und Sitz prüfen | | | | | | Montageanleitung |
| 3 – Verdeckkastendeckel montieren | | | | | | Nacharbeitsmeldung |
| 4 – SAM-Modul einsetzen und mit Kabel verbinden | | | | | | Qualitätsinformation |
| 5 – Bremsleitungen (2x) an Bremskraftverstärker montieren | | | | | | abmelden |
| 6 – ESP-Modul einsetzen und verschrauben | | | | | | |
| ! Sonderausstattung Verdeckkastendeckel Typ D (USA) ! | | | | | |   |

Abbildung 8.2: Montageanleitung

Auf der linken Seite sind die Montageschritte in kompakter Textform dargestellt. Im Zentrum ist eine isometrische CAD-Darstellung visualisiert. Dies ermöglicht relevante Informationen in rollen-, sach- und zeitgerechter Form.

8.3.4 Tätigkeitsdokumentation

Eine Besonderheit stellt die Funktion der Tätigkeitsdokumentation dar. Einige Montageschritte sind aus sicherheits- oder qualitätsrelevanten Aspekten (z. B. Airbag oder Sonderausstattungen) sowie komplette Arbeitsgänge³ zu dokumentieren. Im WII werden Tätigkeiten digital und automatisiert mit dem Takt und der Authentifizierung des Monteurs im IS hinterlegt. Sicherheits- oder qualitätsrelevante Bauteile werden dabei über das WII unmittelbar nach dem Verbau im IS quittiert. Dadurch entfällt die papierbasierte Dokumentation sowie das Risiko vergessener Dokumentation und schafft einen deutlichen Mehrwert in der Prozesssicherheit. Ebenso

³ Ein Arbeitsgang beschreibt eine vollständige unterbrechungsfreie Montagetätigkeit von Fahrzeug x bis Fahrzeug x+n.

entfällt die nachträgliche Dokumentation und Archivierung der quittierten Wagenbegleitkarten und Stationsblätter.

Abbildung 8.1 zeigt über die grün bzw. rot markierten Felder der Bauteile die Funktion der Tätigkeitsdokumentation. Diese geben den Dokumentationsstatus bzw. digitalen Stempel wieder. Sofern ein Montageumfang nicht dokumentiert werden muss, ist das Bauteil weiß hinterlegt. Im Fall einer manuellen Dokumentationspflicht des Bauteils bzw. Montageschrittes durch den Monteur ist das Bauteil in der Ausgangssituation rot hinterlegt. Dokumentiert der Monteur das Bauteil durch Betätigung der roten Schaltfläche, ist dies im IS dokumentiert und wird durch eine grüne Färbung repräsentiert.

Sofern ein dokumentationspflichtiges Bauteil nicht digital gestempelt wird und der Monteur zum nächsten Fahrzeug wechselt, informiert das WII den Monteur entsprechend über die fehlende Dokumentation. Der Monteur würde die Montageinformationen des nachfolgenden Fahrzeugs nicht angezeigt bekommen, solange er das aktuelle Fahrzeug nicht vollständig dokumentiert hat. Dieser kann eine Dokumentation nachpflegen oder eine Nacharbeitsmeldung aufgeben. Diese systemseitige Überwachung vermeidet daher vergessene Dokumentationen und hohen administrativen Aufwand zur nachträglichen Dokumentation oder ggf. die Demontage zwecks Überprüfung des Montageschritts. Dies fördert zudem ein synchrones bzw. echtzeitfähiges Berichtswesen zum Produkt und zur Produktion.

8.4 Qualitätsbezogene Bausteine

Neben montagebezogenen Referenzbausteinen enthält das WII zur effizienten Qualitätsregelung in der Montagelinie zwei qualitätsbezogene Bausteine. Diese sichern über ihre bidirektionale Eigenschaft sowohl eine rückwärtsgerichtete Qualitätsrückmeldung als auch eine vorwärtsgerichtete Nacharbeitsmeldung. Die zwei Bausteine verkörpern die grafische Schnittstelle des QBS sowie QFS und werden nachfolgend erläutert:

1. Qualitätsrückmeldung
2. Nacharbeitsmeldung

8.4.1 Rückmeldung von Qualitätsinformationen

Sobald eine Qualitätsabweichung identifiziert wird, muss diese an die verantwortliche Montagestation zurückgemeldet werden (QBS-3). Dazu wird der Monteur im WII über eine direkte und indirekte Qualitätsinformation an seinem Endgerät bzgl. des Qualitätsmangels sensibilisiert und über Qualitätsmerkmale im Montageprozess geschult. Eine direkte Qualitätsinformation fordert die Aufmerksamkeit und Bestätigung der Kenntnisnahme durch den Monteur ein (systematische Qualitätsabweichungen). Eine indirekte Qualitätsinformation wird lediglich bei aktivem Abruf der stationsspezifischen Fehlersituation durch den Monteur in Form einer Liste aller Fehler visualisiert (stochastische Qualitätsabweichungen). Abbildung 8.3 zeigt ein exemplarisches Beispiel einer Rückmeldung von Qualitätsinformationen zum Monteur nach WII.

| Montageband <i>Bd 5</i> | Sequenznummer <i>T 123</i> | Baureihe <i>F 815</i> | Kraftstoff <i>Benzin</i> | Lenkung <i>LL</i> |  |  |
|---|---|------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---|---|
| Montagestation <i>St 21</i> | Produktionsnummer <i>P 123 456 789</i> | Getriebe <i>Automatik</i> | Motor <i>8 Zylinder</i> | Edition <i>Sport</i> | | |
| Fehler der Montagestation | | | Fehlerabstellmaßnahme | | | Montageinformation |
| # | Fehlerbild | Anteil | | | | |
| 1 | SAM-Modul nicht verbunden | 33% | Systemseitig dokumentieren | | | Montageanleitung |
| 2 | EPS-Modul nicht verschraubt | 25% | Verschraubung explizit prüfen | | | |
| 3 | Falsche VDKD-Variante | 19% | Aufnahme des SA-Hinweises in Fußzeile | | | Nacharbeitsmeldung |
| 4 | BKV-Modul nicht verschraubt | 9% | | | | |
| 5 | Leitungshalterung schief | 8% | | | | Qualitätsinformation |
| 6 | Leitung 2 gebrochen | 7% | | | | |
| 7 | Leitung 1 falsch montiert | 5% | | | | abmelden |
| 8 | Falsche Leitungshalterung | 4% | | | | |
| 9 | Leitungshalterung 3 fehlt | 2% | | | | |
| 10 | VDKD nicht montiert | 1% | | | | |
| ! Sonderausstattung Verdeckkastendeckel Typ D (USA) ! | | | | | | |
| | | | | |  |  |

Abbildung 8.3: Rückmeldung von Qualitätsinformationen zum Monteur

Ebenso erhält im WII auch ein Qualitätsprüfer eine Qualitätsrückmeldung über sein Endgerät. Dem Qualitätsprüfer werden die Qualitätsdaten in

Echtzeit zu anwendergerechten Informationen aufbereitet und sowohl über maximal notwendige Textinformationen als auch über Fehlerbilder visualisiert. Dies erweitert die Transparenz über die Qualitätssituation im eigenen Montageabschnitt. Die Qualitätsrückmeldung erfolgt dabei anhand einer geteilten Visualisierung. Auf der linken Seite wird das Fehleraufkommen der eigenen Qualitätsprüfung visualisiert (QBS-1). Auf der rechten Seite erhält der Qualitätsprüfer eine Qualitätsrückmeldung in Form des Fehlerschlupfes, also der unentdeckten Qualitätsmängel, welche in nachgelagerten Q-Toren entdeckt wurden (QBS-2). Beide Qualitätsrückmeldungen sollen Qualitätsprüfer über die Qualitätssituation des zu prüfenden Montageabschnittes informieren und sensibilisieren. Abbildung 8.4 zeigt ein Beispiel der Qualitätsrückmeldung zum Qualitätsprüfer nach WII.

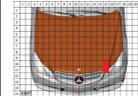
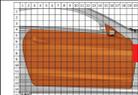
| Qualitätstor Qt 4 | Montageband Bd 5 | Montagemeisterei Ms 6 | abmelden |
|---|---|---|---|
| Fehleraufkommen | | Fehlerschlupf | |
|  | F 815 – Stoßfänger hinten – lose 10.09.2018 17:20 10.09.2018 17:15 10.09.2018 16:58 |  | F 815 – Lack Motorhaube – Kratzer 10.09.2018 16:30 10.09.2018 15:25 10.09.2018 15:20 |
| 8 Fehler | Details zum Fehlerbild | 4 Fehler | Details zum Fehlerbild |
|  | F 815 – Stoßfänger vorn – Spalt zu groß 10.09.2018 17:22 10.09.2018 17:05 10.09.2018 16:58 |  | K 251 – Lack Falz Heckdeckel – Delle 10.09.2018 16:05 10.09.2018 15:55 10.09.2018 14:30 |
| 7 Fehler | Details zum Fehlerbild | 5 Fehler | Details zum Fehlerbild |
|  | K 251 – Heckdeckel – schließt schlecht 10.09.2018 17:10 10.09.2018 17:00 10.09.2018 16:52 |  | F 815 – Vordertür rechts – Spalt zu klein 10.09.2018 16:00 10.09.2018 15:58 10.09.2018 15:50 |
| 5 Fehler | Details zum Fehlerbild | 4 Fehler | Details zum Fehlerbild |

Abbildung 8.4: Rückmeldung von Qualitätsinformationen zum Qualitätsprüfer

Dennoch umfasst die Rückmeldung der Prüfergebnisse nachgelagerter Qualitätsprüfungen über das WII kein theoretisches Idealbild, da auch hier weiterhin eine prozessbedingte Totzeit der Qualitätsrückmeldung existiert. Formel 8.1 zeigt die Berechnung der prozessbedingten Totzeit in Minuten.

$$\text{Totzeit} = \text{Taktzeit} \cdot \text{Anzahl der Montagestationen}^4 + \text{SZ} + \text{SU} \quad (8.1)$$

Für eine sofortige Rückmeldung von Qualitätsmängeln an den Monteur sind daher weitere QIS notwendig (vgl. Abschnitt 7.5). Diese besitzen jedoch in der Regel keinen situativen Bezug zum Verhalten des Monteurs und zum aktuellen physischen Montageprozess. Erst QIS mit integrierten Rückmelde-möglichkeiten und Schnittstellen zum physischen Montageprozess ermöglichen eine Weiterentwicklung von starren Informationsdarstellungen zu umfassend und intelligent in die Montagelinie integrierten dynamischen Lösungen. Hierbei gilt es, die Vorteile von QIS mit den kognitiven Fähigkeiten des Monteurs sinnvoll zu vereinen und somit den Gesamtprozess zugleich robuster, flexibler und effizienter zu gestalten.

Ziel einer intelligenten Lösung muss daher sein, auch außerplanmäßige Prozessabweichungen zu identifizieren und über kurze automatisierte QRK schnell und gezielt Gegenmaßnahmen einzuleiten. Durch das automatische Erfassen der Aktivitäten des Monteurs (z. B. über kamerabasiertes Ver-folgen der Bewegung) kann der Monteur über potenzielles Fehlverhalten vollautomatisch durch das System unterrichtet werden. Zu diesem Zweck eignet sich der Einsatz automatisierter QIS (vgl. Abschnitt 7.5). Die Visualisierung der Qualitätsrückmeldung erfolgt über das WII, jedoch übermittelt der rückwärtsgerichtete QBS die Qualitätsinformationen an die jeweiligen Nutzer (vgl. Abschnitt 7.2).

8.4.2 Meldung von Nacharbeiten

Das WII bietet dem Monteur die Eingabe der Nacharbeitsmeldung über das stationsbezogene Endgerät. Dazu wählt der Monteur die Schaltfläche „Nacharbeit“ und selektiert das fehlerhafte Bauteil sowie die Fehlerart. Es werden dem Monteur dabei lediglich die Bauteile bzw. Montageschritte aus

⁴ Anzahl der Stationen zwischen verbauender Montagestation und identifizierendem Q-Tor.

seinem Montageumfang angezeigt. Ebenso werden ausschließlich Fehlerarten zu den Bauteilen angezeigt, welche auf Basis vergangener Daten eine hohe Fehlerwahrscheinlichkeit haben. Diese Eingrenzung ermöglicht eine schnelle Nacharbeitsmeldung, sodass die Eingabe über das WII in einer taktgebundenen Montagelinie nutzbar ist. Sofern eine andere Fehlerart vorliegt, kann der Eintrag „Sonstiges“ gewählt werden.

Das bestehende Andon-System wird im WII folglich obsolet. Ebenso sind das Verlassen der Montagestation zum Ziehen der Andon-Leine und die anschließende verbale Kommunikation mit dem Unterstützer aufgrund der automatisierten Weiterleitung aller notwendigen Informationen nicht mehr erforderlich. Dies schafft zeitwirtschaftliche Vorteile und vermeidet Störungen im Arbeitsgang.

Nach Auswahl des Bauteils bzw. Montageschrittes quittiert der Monteur die Eingabe und sendet die offene Nacharbeit automatisiert an den Unterstützer (QFS-1) bzw. Nacharbeiter (QFS-3a). Abbildung 8.5 zeigt ein exemplarisches Beispiel einer Nacharbeitsmeldung vom Monteur nach WII. In diesem Beispiel wurden das Bauteil „6 – ESP-Modul“ und die Fehlerart „Verschraubung n. i. O.“ selektiert. Das Bauteil „4 – SAM-Modul“ wurde ebenfalls selektiert, jedoch ist noch die Auswahl der Fehlerart erforderlich.

Je nach Fehlerbild erfolgt eine automatisierte Nacharbeitsmeldung an den Unterstützer oder den Nacharbeiter. Aufgrund der automatischen Zuordnung der Nacharbeitsmeldung zur Montagestation und dem Fahrzeug sowie der manuellen Ergänzung des Fehlerbildes durch den Monteur erhält der Unterstützer bzw. Nacharbeiter sach- und rollengerecht alle notwendigen Informationen zur Nacharbeit. Die Nacharbeitssteuerung wird zwar über das WII systemseitig eingegeben, jedoch priorisiert und übermittelt der vorwärtsgerichtete QFS die Nacharbeitsmeldungen an die jeweiligen Rollen (vgl. Abschnitt 7.3).

| | | | | | | |
|---|---|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---|---|
| Montageband <i>Bd 5</i> | Sequenznummer <i>T 123</i> | Baureihe <i>F 815</i> | Kraftstoff <i>Benzin</i> | Lenkung <i>LL</i> |  |  |
| Montagestation <i>St 21</i> | Produktionsnummer <i>P 123 456 789</i> | Getriebe <i>Automatik</i> | Motor <i>8 Zylinder</i> | Edition <i>Sport</i> | | |
| 1 – Bremskraftverstärker einsetzen und verschrauben | | | | | | Montageinformation |
| 2 – Leitungshalterungen (4x) einsetzen und Sitz prüfen | Passung n. i. O. | | | | | Montageanleitung |
| 3 – Verdeckkastendeckel montieren | Verbindung n. i. O. | | | | | Nacharbeitsmeldung |
| 4 – SAM-Modul einsetzen und mit Kabel verbinden | Sonstiges | | | | | Qualitätsinformation |
| 5 – Bremsleitungen (2x) an Bremskraftverstärker montieren | | | | | | abmelden |
| 6 – ESP-Modul einsetzen und verschrauben | Verschraubung n. i. O. | | | | | |
| ! Sonderausstattung Verdeckkastendeckel Typ D (USA) ! | | | | | Abbruch | Senden |

Abbildung 8.5: Nacharbeitsmeldung vom Monteur

8.5 Nacharbeitsbezogene Bausteine

Ebenso besitzt das WII nacharbeitsbezogene Bausteine. Diese sind essentielle Bestandteile einer effizienten Nacharbeit. Beide nacharbeitsbezogenen Bausteine werden im Folgenden erläutert:

1. Nacharbeitspriorisierung
2. Lösungsprädiktion

8.5.1 Priorisierung von Nacharbeitsmeldungen

Das WII beinhaltet eine Priorisierung der Nacharbeiten auf Basis der im System hinterlegten Daten zur Prozessreihenfolge, zu den Bauteilen und Fehlerbildern sowie zu den potenziellen Nacharbeitskosten. Die logische Priorisierung erfolgt dabei über die QCS, ist jedoch nicht inhaltlicher Gegenstand dieser Arbeit. Die Nacharbeiten werden nach Priorität sortiert und in absteigender Reihenfolge visualisiert. Sobald der Qualitätsmangel durch den Unterstützer behoben wurde, dokumentiert dieser entweder eine

erfolgreiche Nacharbeit (i. O.) oder eine erfolglose Nacharbeit (n. i. O.). Dies liefert einen entscheidenden Beitrag zu einer effizienten Nacharbeit mit reduzierten Nacharbeitskosten, einem höheren Geradeauslauf sowie höherer Termintreue und einer verbesserten APQ. Abbildung 8.6 zeigt die Benutzungsoberfläche des Unterstützers.

| Unterstützer 4711 | | Montageband Bd 5 | | Montagemeisterei Ms 6 | | abmelden | |
|----------------------|----------|---------------------|-----------------------|--------------------------|--------|----------|----------|
| Priorität | Standort | Sequenz | Bauteil | Fehlerart | Melder | Ergebnis | |
| 1 | St 23 | T 123 | 21.4 – SAM-Modul | Verbindung n. i. O. | St 21 | i. O. | n. i. O. |
| 2 | St 23 | T 123 | 21.6 – ESP-Modul | Verschraubung n. i. O. | St 21 | i. O. | n. i. O. |
| 3 | St 18 | T 128 | 16.1 – Schraubfall 3A | Verschraubung n. i. O. | St 16 | i. O. | n. i. O. |
| 4 | St 19 | T 127 | 14.3 – Stecker E4711 | Kabelbruch | St 14 | i. O. | n. i. O. |
| 5 | St 25 | T 121 | 24.5 – Dichtung Haube | Ringpassung n. i. O. | St 24 | i. O. | n. i. O. |

Abbildung 8.6: Benutzungsoberfläche des Unterstützers

8.5.2 Prädiktion von Nacharbeitslösungen

Das WII bietet eine Vorhersagbarkeit von Nacharbeitslösungen auf Basis des Fehlerbildes und bereits dokumentierter Lösungen. Einem Nacharbeiter wird auf seinem Endgerät zu einem Fehlerbild eine Liste an potenziellen Lösungen, sortiert nach dem prozentualen Lösungsanteil, angezeigt. Dies ermöglicht eine schnelle Lösungsfindung und eine schnelle Nacharbeit mit reduzierten Nacharbeitskosten. Sofern ein identisches Fehlerbild als Nacharbeit auftritt, können alle Nacharbeiter auf die Ursache zurückgreifen und die Nacharbeit effizient durchführen. Die Funktionalität und Nutzbarkeit des Bausteins erfordert jedoch die vollständige Dokumentation der Ursachen bzw. Lösungen zu dem Symptom bzw. Fehlerbild. Ohne die richtigen

Daten können keine sinnvollen Analysen durchgeführt und folglich auch keine zuverlässigen Informationen generiert werden.

Insbesondere zur standortübergreifenden Kollaboration stellt dies einen entscheidenden Mehrwert dar. Baureihen werden z. T. an mehreren Standorten produziert. Über diesen Baustein werden Nacharbeitslösungen standortübergreifend zur Verfügung gestellt. Sofern ein Standort bereits eine Nacharbeitslösung zu einem bestimmten Fehlerbild im WII dokumentiert hat, können diese von anderen Standorten in Echtzeit abgerufen werden. Dies trägt zu einem maximalen Wissensaustausch bei und fördert eine hohe APQ.

8.6 Zielsetzungen des Systems

Eine rollen-, sach- und zeitgerechte Visualisierung von Qualitäts- und Montageinformationen über ein anwenderorientiertes GUI soll die grundlegende Schnittstelle für alle Informationsflüsse zwischen den Mitarbeitern sein. Insbesondere der Informationsfluss zum und vom Monteur zurück muss zwecks Effizienzsteigerung im Montagesystem und Prozessabsicherung bei manuellen Tätigkeiten optimiert sein. Der Kern des WII umfasst den Aufbau einer hybriden Struktur zwischen Mensch und IS. Das WII soll darüber hinaus neue Interaktionsmöglichkeiten über zusätzliche Informationen bereitstellen, welche bisher ohne das WII den Mitarbeitern nicht zur Verfügung standen. Dies schafft Transparenz und eine schnelle Reaktionsfähigkeit auf veränderte Gegebenheiten. Zugleich reduzieren zusätzliche Informationen nicht-wertschöpfende Tätigkeiten und verbessern die Produktivität des Monteurs. Weiterhin sollen Qualitätsabweichungen durch Falschabgriff und Montage durch den Monteur reduziert und die Produktqualität über die Erreichung eines hohen Geradeauslaufes gesteigert werden. Damit verbunden sollen die Nacharbeitsaufwände und Nacharbeits- bzw. Qualitätskosten sowie ggf. der Anlern- und Schulungsaufwand von neuen Mitarbeitern oder bei Prozessänderungen reduziert werden. Dies liefert langfristig einen entscheidenden Beitrag zur Gewährleistung einer hohen APQ.

8.7 Zwischenfazit: Visualisierung der Informationen

Das „Worker Interaction Interface“ (WII) zeigt ein anwenderorientiertes Modell einer grafischen Benutzungsoberfläche zur Ein- und Ausgabe von qualitäts- und montagebezogenen Informationen innerhalb der Montagelinie (Ergebnis 4). Grundlage des WII stellen unterschiedliche Hardwarekomponenten (Tablet, Bildschirme, Smartphones und Smartwatches) als persönliches Interaktionsmedium zwischen dem IS und den Rollen dar. Ebenso erforderlich ist eine vollständige Anbindung des WII an die bestehenden IS der Systemlandschaft zur Gewährleistung eines echtzeitorientierten Managements der relevanten Informationen.

Im Kern werden über das WII drei Kategorien zur Interaktion bereitgestellt. Die montagebezogenen Bausteine ermöglichen eine rollen- und sachgerechte Unterstützung des Montageprozesses. Eine adäquate Informationsvisualisierung innerhalb des Qualitätsprüfprozesses wird über die qualitätsbezogenen Bausteine ermöglicht. Weiterhin unterstützen die nacharbeitsbezogenen Bausteine einen effizienten Nacharbeitsprozess. Diese Bausteine können im WII über die drei Sichten der Montage-, Qualitätsprüf- und Nacharbeitssicht verwendet werden und eine Schnittstelle zwischen Mensch und System verkörpern.

Das WII erfüllt die gestellten Anforderungen an die Informationsvisualisierung (vgl. Tabelle 4.3 bzw. Anhang G). Insbesondere die Erfüllung der Norm ISO/IEC 25030 und der Normenreihe DIN EN ISO 9241 wird durch das System sichergestellt. Dadurch wird zum einen festgelegt, wie und mit welchen Hilfsmitteln die Nutzer mit relevanten qualitätsbezogenen Informationen rollen-, sach- und zeitgerecht versorgt werden (Leitfrage 4). Zum anderen wird durch das WII definiert, wie qualitätsbezogene Informationen in Form von Kennzahlen und durch Visualisierung rollengerecht bereitgestellt werden müssen (Leitfrage 5).

Folglich sichern die Eigenschaften und der Aufbau des WII die Vorteile einer intensiven Mensch-System-Kollaboration. Neben der Einbringung von

Erfahrung, Wissen und Fähigkeiten des Mitarbeiters wird dieser in effizienter Weise durch Montage- und Qualitätsinformationen bei seinen Aufgaben unterstützt. Durch die Kombination von Erfahrungen und Wissen sowie aktueller und richtiger Informationen zum Montageprozess kann ein Beitrag zur Gewährleistung einer hohen Produktivität, Effizienz und Qualität geleistet werden.

Die informationstechnische Definition der hybriden Qualitätsregelung ist nun mit der QCS als Controller und dem WII als eine View erfolgt. Als Ergänzung zur Qualitätsüberwachung ist nun ein generisches Qualitätswerkzeug zur kontinuierlichen Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes erforderlich. Dies wird durch das QVM in Kapitel 9 ermöglicht.

9 Überwachung der Produktionsqualität

„Die Visualisierung von Informationen ermöglicht eine schnelle Lösungsfindung zu Problemen. Es schafft Klarheit oder liefert sogar die Antwort in sehr schneller Form.“

DAVID MCCANDLESS (*1971)

Nachdem das Qualitätskonzept (CQD) erstellt, die montagespezifische Produktionsqualität (APQ) definiert sowie die hybride Struktur und Logik der Qualitätsregelung (QCS) und die anwenderorientierte Benutzungsoberfläche (WII) festgelegt wurden, ist abschließend ein geeignetes Werkzeug zur anforderungsgerechten Visualisierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes erforderlich (Leitfrage 6). Dazu wird in diesem Kapitel ein generisches Qualitätswerkzeug zur kontinuierlichen Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualität eines Betrachtungsobjektes vorgestellt (Ergebnis 5). Das Qualitätswerkzeug wird als „Quality Visualization Model“ (QVM) bezeichnet. Das QVM war bereits Gegenstand von zwei wissenschaftlichen Konferenzbeiträgen [GEW18c; GEW18f]. Zudem wurden Teile des QVM in der Arbeit eines studentischen Mitarbeiters genutzt [KRA17].

9.1 Allgemeiner Aufbau

9.1.1 Konzeptuelle Modellstruktur

In Unterabschnitt 3.3.4 wurden acht Qualitätswerkzeuge vorgestellt sowie deren Anwendbarkeit anhand objektiver und subjektiver Kriterien voneinander abgegrenzt. Es konnte ermittelt werden, dass durch die bestehenden Ansätze kein ausreichendes Qualitätswerkzeug zur merkmalsbasierten Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes bereitgestellt wird. Jedoch liefern die bestehenden Ansätze eine nutzbare Ausgangsbasis.

Das QVM kombiniert in seiner konzeptuellen Struktur drei Qualitätswerkzeuge. Zunächst das Netzdiagramm zur grundlegenden Visualisierung der Qualitätssituation der Qualitäts- und Prüfmerkmale sowie des Betrachtungsobjektes und liefert folglich das grafische Grundgerüst zur Visualisierung in Form der Netzansicht. Weiterhin wird die Methode der Qualitätsregelkarte zur Darstellung von Toleranz- und Sicherheitsbereichen, Zielerreichungsgraden und Qualitätsabweichungen genutzt. Das QVM besitzt neben der Netzansicht eine detailliertere Kartenansicht. Diese wird in Form einer Qualitätsregelkarte angezeigt. Als dritte Grundlage liefert das Boxplot die Methode zum Clustering von Merkmalswerten. Abbildung 9.1 zeigt das Fundament des QVM.

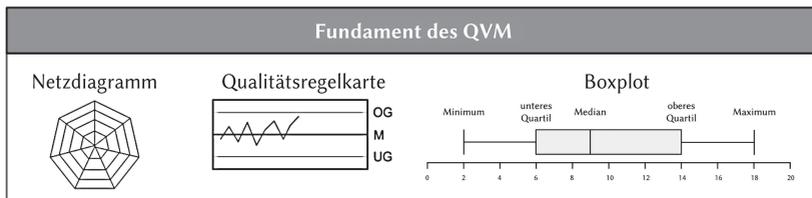


Abbildung 9.1: Fundament des QVM

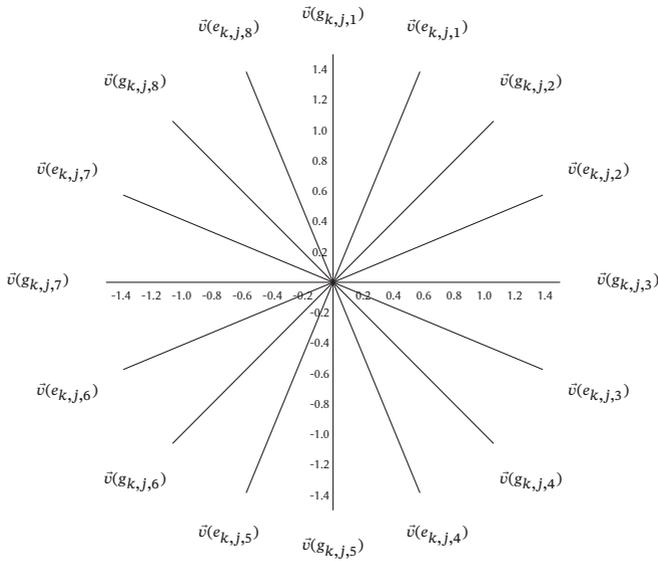
9.1.2 Mathematische Modellstruktur

Die mathematische Grundlage des QVM stellt die Vektorrechnung dar. Es werden Vektoren \vec{v} über ihre xy -Koordinaten in einem Koordinatensystem dargestellt und dabei zwei Vektortypen unterschieden – die Prüfmerkmalsvektoren $\vec{v}(e_{k,j,i})$ und die Grenzvektoren $\vec{v}(g_{k,j,i})$. Zwischen zwei Grenzvektoren $\vec{v}(g_{k,j,i})$ und $\vec{v}(g_{k,j,i+1})$ befindet sich ein Prüfmerkmalsvektor $\vec{v}(e_{k,j,i})$. Grenzvektoren $\vec{v}(g_{k,j,i})$ unterscheiden sich zwischen Qualitätsmerkmalsgrenzvektoren und Prüfmerkmalsgrenzvektoren, welche die Qualitätsmerkmale $m_{k,j}$ bzw. Prüfmerkmale $e_{k,j,i}$ voneinander abgrenzen. Aufgrund der identischen Funktion und Eigenschaft wird im Qualitätsmodell vereinfacht der Begriff Grenzvektor verwendet. Die einzige Funktion eines Grenzvektors $\vec{v}(g_{k,j,i})$ besteht in der Separation der Flächen zweier Prüfmerkmalsvektoren $\vec{v}(e_{k,j,i-1})$ und $\vec{v}(e_{k,j,i})$, um eine isolierte Sicht auf ein Prüfmerkmal $e_{k,j,i}$ ohne Beeinflussung der benachbarten Prüfmerkmale $e_{k,j,i-1}$ und $e_{k,j,i+1}$ zu erhalten. Jeder zweite Vektor visualisiert somit ein qualitätsrelevantes Merkmal. Da zu jedem Prüfmerkmalsvektor $\vec{v}(e_{k,j,i})$ ein Grenzvektor $\vec{v}(g_{k,j,i})$ existiert, besteht ein Koordinatensystem im QVM folglich aus $2 \cdot \max(i)$ Vektoren. Abbildung 9.2 zeigt die Vektorendarstellung im Koordinatensystem.¹

| | | |
|----------------------|----|--------------------|
| \vec{v} | := | Vektor |
| $\vec{v}(e_{k,j,i})$ | := | Prüfmerkmalsvektor |
| $\vec{v}(g_{k,j,i})$ | := | Grenzvektor |

Die individuellen xy -Koordinaten eines Vektors sind abhängig von der Anzahl, Gewichtung und Ausprägung der Vektoren. Die Vektoren haben ihren Anfangspunkt im Ursprung des Koordinatensystems. Zur Berechnung der Endpunktkoordinaten sind der individuelle Gewichtungsfaktor β eines Prüfmerkmalsvektors $\vec{v}(e_{k,j,i})$ sowie der Winkel α zwischen den Vektoren \vec{v} erforderlich.

¹ Die Vektorendarstellung wurde um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Der erste Vektor $\vec{v}(g_{k,j,1})$ würde somit bei $x = 1$ und $y = 0$ liegen und dem Uhrzeigersinn folgen.



Legende

$\vec{v}(g_{k,j,i})$:= Grenzvektor

$\vec{v}(e_{k,j,i})$:= Prüfmerkmalsvektor

Abbildung 9.2: Vektorendarstellung im Koordinatensystem

α := Winkel eines Vektors

$\alpha(g_{k,j,j})$:= Winkel eines Grenzvektors

$\alpha(e_{k,j,j})$:= Winkel eines Prüfmerkmalsvektors

β := Gewichtungsfaktor

$\beta(e_{k,j,j})$:= Gewichtungsfaktor eines Prüfmerkmals

$$\alpha(e_{k,j,j}), \alpha(g_{k,j,j}), \beta(e_{k,j,j}) \in [0^\circ, 360^\circ) \tag{9.1}$$

$$\beta(e_{k,j,i}) = \frac{360^\circ}{\max(i)} \tag{9.2}$$

$$\beta(e_{k,j,0}) = 0^\circ \quad (9.3)$$

$$\alpha(e_{k,j,i}) = \sum_{i=1}^n \beta(e_{k,j,i-1}) + \frac{\beta(e_{k,j,i})}{2} \quad (9.4)$$

$$\alpha(g_{k,j,i}) = \sum_{i=1}^n \beta(e_{k,j,i-1}) \quad (9.5)$$

$$x(\vec{v}) = \cos\left(\alpha \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}\right) \quad (9.6)$$

$$y(\vec{v}) = \sin\left(\alpha \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}\right) \quad (9.7)$$

Die Länge λ eines Vektors \vec{v} liegt im Definitionsbereich von 0 bis n und wird im QVM über den Zielerreichungsgrad z gesteuert. Aufgrund der gesonderten Funktion eines Grenzvektors zur Trennung von Qualitäts- bzw. Prüfmerkmalen besitzen Grenzvektoren die Länge 1 und stellen somit Einheitsvektoren² dar. Die Länge eines Grenzvektors ist für w und z identisch und wird somit als $\lambda(g_{k,j,i})$ allgemein gehalten. Die Länge der Prüfmerkmalsvektoren steht repräsentativ für die prozentuale Erreichung des angestrebten Sollwertes des Prüfmerkmals, sodass die Solllänge 1 für einen Prüfmerkmalsvektor $\vec{v}(e_{k,j,i})$ anzustreben ist und ebenfalls den Einheitsvektor repräsentiert. Wird eine Abweichung zwischen Soll und Ist eines Prüfmerkmals identifiziert, ändert sich die Länge des Prüfmerkmalsvektors entsprechend der Abweichungsrichtung – der Prüfmerkmalsvektor verkürzt oder verlängert sich in kontinuierlicher Form. Somit wird die Länge eines Prüfmerkmalsvektors für die Solllänge als $\lambda(z(e_{k,j,i}))$ und für die Istlänge als $\lambda(w(e_{k,j,i}))$ definiert.

² Im QVM wird auf die etablierte Symbolik des Einheitsvektors über \vec{v} verzichtet.

λ := Länge eines Vektors
 $\lambda(g_{k,j,i})$:= Länge eines Grenzvektors
 $\lambda(z(e_{k,j,i}))$:= Solllänge eines Prüfmerkmalsvektors
 $\lambda(w(e_{k,j,i}))$:= Istlänge eines Prüfmerkmalsvektors

$$\lambda(z(e_{k,j,i})), \lambda(g_{k,j,i}) = 1 \quad (9.8)$$

$$\lambda(w(e_{k,j,i})) \in [0, \infty) \quad (9.9)$$

$$\lambda(w(e_{k,j,i})) = \frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})} \quad (9.10)$$

$$\lambda(w(e_{k,j,i})) = \begin{cases} \lambda(w(e_{k,j,i})) & \text{für } \lambda(w(e_{k,j,i})) \geq 0 \\ 0 & \text{für } \lambda(w(e_{k,j,i})) < 0 \end{cases} \quad (9.11a)$$

$$\text{für } \lambda(w(e_{k,j,i})) < 0 \quad (9.11b)$$

Mittels Längendarstellung werden die Vektoren innerhalb des Qualitätsmodells auf eine relative Basis gesetzt, sodass über die Länge λ die Zielerreichungsgrade der Prüfmerkmale dargestellt werden. Somit steht die Länge λ repräsentativ für den quantitativen Qualitätswert q_Q eines Prüfmerkmals (vgl. Kapitel 5). Jedoch kann die Länge λ ebenso einen Wert > 1 annehmen, wobei nach Formel 5.19 hingegen ein Wert > 1 nicht im Wertebereich des quantitativen Qualitätswertes q_Q liegt. Die verschiedenen Soll- und Istwerte mit ihren unterschiedlichen Größen und Dimensionen (z. B. Länge, Masse, Zeit, Stromstärke, Lichtstärke) sowie Einheiten (z. B. Meter, Kilogramm, Sekunde, Ampere, Candela) der Prüfmerkmale werden über diese relative Basis zueinander vergleichbar gemacht bzw. homomorph³ gestaltet und können erst durch diesen Schritt gemeinsam im QVM dargestellt werden.

Durch die Abweichungen von $z(e_{k,j,i})$ ergeben sich $w(e_{k,j,i})$ sowie veränderte xy-Koordinaten. Diese lassen sich über folgende Formeln bestimmen.

³ Die Eigenschaft „homomorph“ beschreibt folglich in diesem Kontext eine gleichartige Einheits- und Dimensionsbasis aller betrachteten Merkmale.

$$x(\vec{v}(g_{k,j,i})) = \cos(\alpha(g_{k,j,i}) \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}) \quad (9.12)$$

$$y(\vec{v}(g_{k,j,i})) = \sin(\alpha(g_{k,j,i}) \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}) \quad (9.13)$$

$$x(\vec{v}(w(e_{k,j,i}))) = \lambda(w(e_{k,j,i})) \cdot \cos(\alpha(e_{k,j,i}) \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}) \quad (9.14)$$

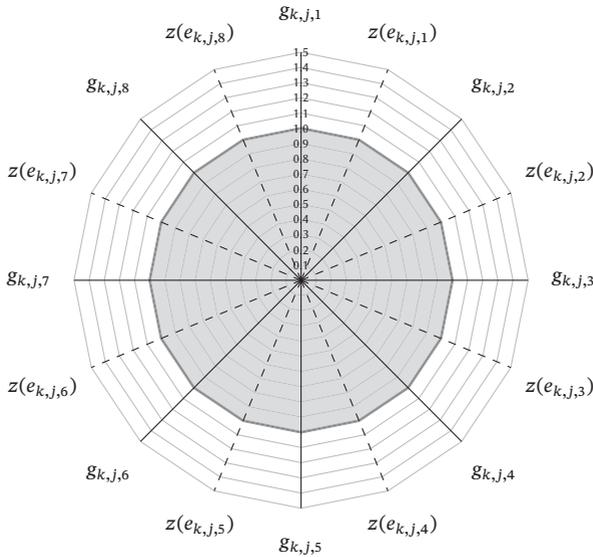
$$y(\vec{v}(w(e_{k,j,i}))) = \lambda(w(e_{k,j,i})) \cdot \sin(\alpha(e_{k,j,i}) \cdot \frac{2\pi}{360^\circ}) \quad (9.15)$$

9.1.3 Visualisierung des Modells

Das Koordinatensystem mit den unterschiedlichen Vektoren wird im Qualitätsmodell QVM als Schicht bezeichnet. Eine Schicht repräsentiert in produktbezogener Anwendung die Qualität eines spezifischen Betrachtungsobjektes o_k oder einer Kombination aus mehreren Betrachtungsobjekten im Zusammenspiel bzw. in gemeinsamer Betrachtung.

Wie bereits in Unterabschnitt 9.1.2 erläutert wurde, werden im QVM die Prüfmerkmale $e_{k,j,i}$ eines Betrachtungsobjektes o_k in der mathematischen Betrachtung mittels Vektoren \vec{v} dargestellt. Für eine visuelle Darstellung der Qualität ist eine Skalarbetrachtung über die Länge $\lambda(w(e_{k,j,i}))$ erforderlich, sodass eine Darstellung der Prüfmerkmale durch Vektoren \vec{v} zwar syntaktisch korrekt, jedoch semantisch inhaltsleer ist. Die Nomenklatur der Visualisierung von Prüfmerkmalen im QVM erfolgt somit nicht über die Angabe der Vektoren \vec{v} , sondern vereinfacht über $e_{k,j,i}$. Ebenso werden Grenzvektoren vereinfacht als Grenzen bezeichnet und über $g_{k,j,i}$ dargestellt.

Werden alle Endpunkte der Vektoren \vec{v} miteinander verbunden, spannen diese eine gemeinsame Fläche auf – es entsteht ein Polygon. Aufgrund der unterschiedlichen Längen $\lambda(w(e_{k,j,i}))$ der Prüfmerkmalsvektoren $\vec{v}(w(e_{k,j,i}))$ kann die entstehende Istfläche $A(w(o_k))$ von der Sollfläche $A(z(o_k))$ abweichen. Abbildung 9.3 zeigt eine Sollfläche $A(z(o_k))$ und Abbildung 9.4 eine Istfläche $A(w(o_k))$ mit exemplarisch jeweils 16 Vektoren.



Legende

$g_{k,j,i}$:= Grenze

$z(e_{k,j,i})$:= Sollwert des Prüfmerkmals

Abbildung 9.3: Exemplarische Sollfläche $A(z(o_k))$ mit 16 Vektoren

Zur Berechnung der Sollfläche $A(z(o_k))$ wird zunächst die Dreiecksfläche $A(z(e_{k,j,1}))$ zwischen dem ersten Grenzvektor $\vec{v}(g_{k,j,1})$ und dem ersten Prüfmerkmalsvektor $\vec{v}(z(e_{k,j,1}))$ berechnet. Benötigt werden dazu die jeweiligen xy-Koordinaten der beiden Vektoren über Formel 9.16 und Formel 9.17, welche mit in die Berechnung von $A(z(e_{k,j,1}))$ in Formel 9.18 einfließen.

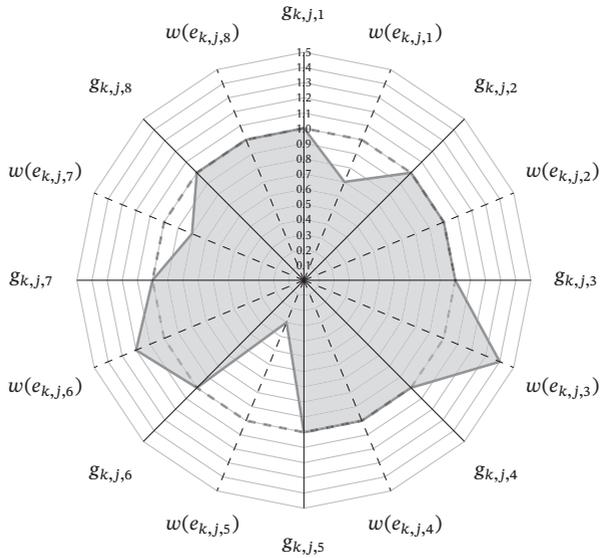
$A(z(o_k))$:= Sollfläche eines Betrachtungsobjektes

$A(z(m_{k,j}))$:= Sollfläche eines Qualitätsmerkmals

$A(z(e_{k,j,i}))$:= Sollfläche eines Prüfmerkmals

$a_{1/2}$:= Temporärer Flächenwert

$$a_1 = x(\vec{v}(z(g_{k,j,1}))) \cdot y(\vec{v}(z(e_{k,j,1}))) \quad (9.16)$$

**Legende** $g_{k,j,i}$:= Grenze $w(e_{k,j,i})$:= Istwert des Prüfmerkmals**Abbildung 9.4:** Exemplarische Istfläche $A(w(o_k))$ mit 16 Vektoren

$$a_2 = y(\vec{v}(z(g_{k,j,1}))) \cdot x(\vec{v}(z(e_{k,j,1}))) \quad (9.17)$$

$$A(z(e_{k,j,1})) = a_1 - a_2 \quad (9.18)$$

Die Sollfläche $A(z(m_{k,j}))$ des zugehörigen Qualitätsmerkmals $m_{k,j}$ sowie die Sollfläche $A(z(o_k))$ des gesamten Betrachtungsobjektes o_k lässt sich nun durch Formel 9.19 bzw. Formel 9.20 ermitteln.

$$A(z(m_{k,j})) = \sum_{i=1}^n A(z(e_{k,j,i})) \quad (9.19)$$

$$A(z(o_k)) = \sum_{j=1}^n A(z(m_{k,j})) \quad (9.20)$$

Zur vereinfachten Berechnung der Sollfläche $A(z(o_k))$ dient Formel 9.21.

$$A(z(o_k)) = \max(i) \cdot x(\vec{v}(z(g_{k,j,1}))) \cdot y(\vec{v}(z(e_{k,j,1}))) \quad (9.21)$$

Die Istfläche $A(w(o_k))$ berechnet sich über die Differenzfläche $A(\Delta(o_k))$. Zunächst wird die Istfläche $A(w(e_{k,j,i}))$ über Formel 9.22 ermittelt. Darauf folgend wird die Flächenabweichung pro Prüfmerkmal $A(\Delta(e_{k,j,i}))$ über Formel 9.23 als Betrag ermittelt und die Abweichung pro Qualitätsmerkmal $A(\Delta(m_{k,j}))$ über Formel 9.22 zu einer Summe erfasst. Die Flächenabweichung des Betrachtungsobjektes $A(\Delta(o_k))$ wird anschließend über Formel 9.25 ermittelt und abschließend von der Sollfläche $A(z(o_k))$ über Formel 9.26 subtrahiert.

$A(w(o_k))$:= Istfläche eines Betrachtungsobjektes
 $A(w(m_{k,j}))$:= Istfläche eines Qualitätsmerkmals
 $A(w(e_{k,j,i}))$:= Istfläche eines Prüfmerkmals

$A(\Delta(o_k))$:= Differenzfläche eines Betrachtungsobjektes
 $A(\Delta(m_{k,j}))$:= Differenzfläche eines Qualitätsmerkmals
 $A(\Delta(e_{k,j,i}))$:= Differenzfläche eines Prüfmerkmals

$$A(w(e_{k,j,i})) = A(z(g_{k,j,i+1})) \cdot \lambda(w(e_{k,j,i})) \quad (9.22)$$

$$A(\Delta(e_{k,j,i})) = |A(z(g_{k,j,i+1})) - A(w(e_{k,j,i}))| \quad (9.23)$$

$$A(\Delta(m_{k,j})) = \sum_{i=1}^n A(\Delta(e_{k,j,i})) \quad (9.24)$$

$$A(\Delta(o_k)) = \sum_{j=1}^n A(\Delta(m_{k,j})) \quad (9.25)$$

$$A(w(o_k)) = A(z(o_k)) - A(\Delta(o_k)) \quad (9.26)$$

Die aufgespannte Fläche $A(w(o_k))$ ist folglich abhängig von der Länge der Vektoren sowie der Abweichung zur Sollfläche $A(z(o_k))$ und steht repräsentativ für die Qualität des Betrachtungsobjektes $q_Q(o_k)$. Je höher die Abweichung bzw. größer die konkaven Einschnitte und konvexen Ausschreitungen im Polygon, desto geringer ist die Qualität des Bauteils. Die Qualitätsbewertung erfolgt hierbei durch prozentualer Abweichungsermittlung über Formel 9.27.

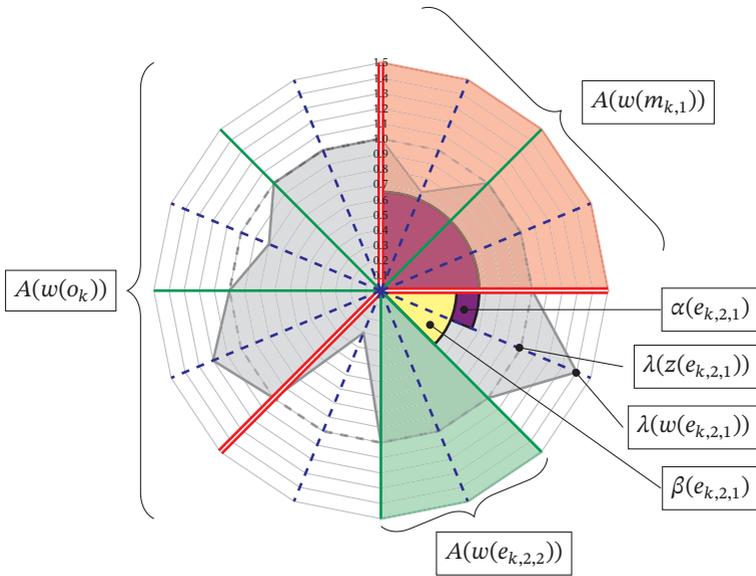
$$q_Q(o_k) = 1 - \frac{A(\Delta(o_k))}{A(z(o_k))} \quad (9.27)$$

$$q_Q(o_k) = \begin{cases} q_Q(o_k) & \text{für } q_Q(o_k) > 0 \\ 0 & \text{für } q_Q(o_k) \leq 0 \end{cases} \quad (9.28a)$$

$$(9.28b)$$

Abbildung 9.5 zeigt eine Schicht $A(w(o_k))$ mit Grenzvektoren zur Trennung der Qualitätsmerkmale (rote Doppellinien) und der Prüfmerkmale (grüne Linien) sowie die Prüfmerkmalsvektoren (blaue Strichlinien) zur Darstellung der relativen Werte der Prüfmerkmale. Weiterhin sind der Winkel $\alpha(e_{k,j,i})$ (violetter Winkel) und der Gewichtungsfaktor $\beta(e_{k,j,i})$ (gelber Winkel) eines Prüfmerkmals $e_{k,j,i}$ beispielhaft für $e_{k,2,1}$ visualisiert. Deutlich zu erkennen sind die unterschiedlichen Zielerreichungsgrade der einzelnen Prüfmerkmale.

Durch die veränderten xy-Koordinaten der Prüfmerkmalsvektoren $\vec{v}(w(e_{k,j,i}))$ ergibt sich eine gestauchte bzw. gestreckte Fläche $A(w(o_k))$, die von der Sollfläche $A(z(o_k))$ abweicht. Je höher die Abweichung $A(\Delta(o_k))$, desto geringer ist der quantitative Qualitätswert $q_Q(o_k)$. Eine Aussage zur binären Qualitätserreichung $q_B(o_k)$ liefert diese Betrachtung aufgrund der



Legende

- - - Solllänge
- Istlänge
- Qualitätsmerkmalsgrenze
- Prüfmerkmalsgrenze
- - - Prüfmerkmal

Abbildung 9.5: Aufbau des QVM

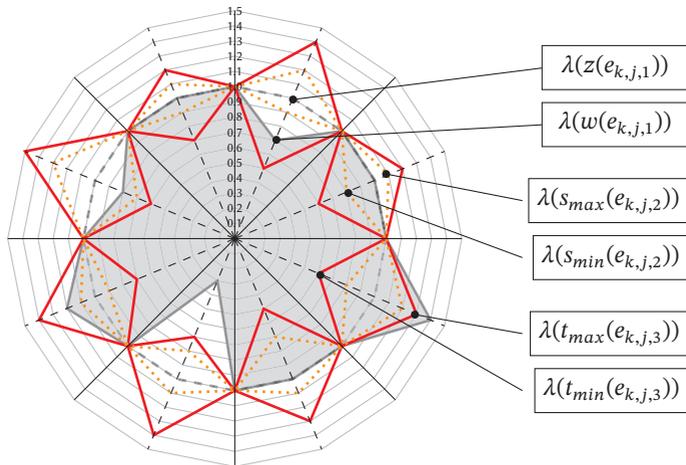
fehlenden Toleranzbänder zu den einzelnen Prüf- und Qualitätsmerkmalen jedoch nicht.

9.1.4 Implementierung der Toleranzbänder

Damit q_B festgelegt werden kann, erfolgt die Erweiterung der Schicht durch Sicherheits- und Toleranzgrenzen über die Methode der Qualitätsregelkarte (vgl. Unterabschnitt 3.3.4). Die Solllänge $\lambda(z(e_{k,j,i}))$ eines Vektors definiert dabei die Mittellinie des Prüfmerkmals und visualisiert den Sollwert $z(e_{k,j,i})$. Durch die Implementierung der unteren und oberen Warngrenzen als Sicherheitsgrenzen s_{min} und s_{max} sowie der unteren und oberen

Eingriffsgrenzen als Toleranzgrenzen t_{min} und t_{max} lässt sich der Werteverlauf pro Prüfmerkmal überwachen. Abbildung 9.6 zeigt eine Schicht mit Sicherheitsgrenzen (orange gepunktete Linien) und Toleranzgrenzen (rote Linien). Diese Darstellung kann über eingefärbte Flächen der Prüfmerkmale ergänzt werden:⁴

- **Grün:** $w(e_{k,j,i}) \in S(e_{k,j,i})$
- **Gelb:** $w(e_{k,j,i}) \notin S(e_{k,j,i}) \cap w(e_{k,j,i}) \in T(e_{k,j,i})$
- **Rot:** $w(e_{k,j,i}) \notin T(e_{k,j,i})$



Legende

- | | |
|---------------|-------------------------|
| --- Solllänge | Sicherheitsgrenze |
| — Istlänge | — Toleranzgrenze |

Abbildung 9.6: Schicht mit Toleranz- und Sicherheitsbändern

⁴ Die Einfärbung wird im Rahmen der Evaluation in Abschnitt 10.4 dargestellt.

Eine Sicherheitsgrenze dient als Indikator für eine Überschreitung eines bestimmten qualitativen Wertebereiches. Dabei wird zwischen der unteren Sicherheitsgrenze s_{min} und oberen Sicherheitsgrenze s_{max} unterschieden. Die Sicherheitsgrenzen müssen individuell für jedes Prüfmerkmal $e_{k,j,i}$ festgelegt werden. Diese definieren für jedes Prüfmerkmal die spezifische Sicherheitsmenge $S(e_{k,j,i})$, dessen Werte die Qualitätsanforderung an das Prüfmerkmal erfüllen. Sofern der Istwert $w(e_{k,j,i})$ eines Prüfmerkmals außerhalb seiner Sicherheitsmenge $S(e_{k,j,i})$ liegt und somit eine Überschreitung der s_{max} oder Unterschreitung der s_{min} vorliegt, führt dies nicht zwingend zur Nichterfüllung der Qualitätsanforderungen. Die Sicherheitsgrenzen dienen primär zur Sensibilisierung bzgl. der Qualitätsabweichungen d und zur Identifikation von systematischen Abweichungen. Die Einhaltung der geforderten Qualitätskriterien wird durch die spezifische Toleranzmenge $T(e_{k,j,i})$ definiert.

$D(e_{k,j,i})$:= Definitionsmenge eines Prüfmerkmals
 $T(e_{k,j,i})$:= Toleranzmenge eines Prüfmerkmals
 $S(e_{k,j,i})$:= Sicherheitsmenge eines Prüfmerkmals

$s_{min}(e_{k,j,i})$:= Untere Sicherheitsgrenze eines Prüfmerkmals
 $s_{max}(e_{k,j,i})$:= Obere Sicherheitsgrenze eines Prüfmerkmals

$$D(e_{k,j,i}) \subseteq \mathbb{R} \tag{9.29}$$

$$T(e_{k,j,i}) \subseteq D(e_{k,j,i}) \tag{9.30}$$

$$S(e_{k,j,i}) \subseteq T(e_{k,j,i}) \tag{9.31}$$

$$w(e_{k,j,i}) \in D(e_{k,j,i}) \tag{9.32}$$

$$z(e_{k,j,i}), s_{min}(e_{k,j,i}), s_{max}(e_{k,j,i}) \in S(e_{k,j,i}) \tag{9.33}$$

$$\forall_{k,j,i} : w(e_{k,j,i}) \in S(e_{k,j,i}) \Rightarrow q_B(e_{k,j,i}) = true \quad (9.34)$$

Die Toleranzgrenze definiert den Punkt im Qualitätsmodell, an dem eine Qualitätsabweichung außerhalb des Toleranzbereiches liegt, somit keine Qualitätserfüllung mehr vorliegt bzw. bestätigt werden kann und zwangsläufig nachgearbeitet werden muss. Es wird zwischen der unteren Toleranzgrenze t_{min} und oberen Toleranzgrenze t_{max} unterschieden. Auch diese Grenzen müssen individuell für jedes Prüfmerkmal $e_{k,j,i}$ festgelegt werden. Die Toleranzgrenzen definieren für jedes Prüfmerkmal $e_{k,j,i}$ die spezifische Toleranzmenge $T(e_{k,j,i})$, dessen Werte die Qualitätsanforderung an das Prüfmerkmal erfüllen. Falls der Istwert $w(e_{k,j,i})$ eines Prüfmerkmals außerhalb seiner Toleranzmenge $T(e_{k,j,i})$ liegt, sind die Qualitätsanforderungen nicht erfüllt.

$$\begin{aligned} t_{min}(e_{k,j,i}) & := \text{Untere Toleranzgrenze eines Prüfmerkmals} \\ t_{max}(e_{k,j,i}) & := \text{Obere Toleranzgrenze eines Prüfmerkmals} \\ t_{min}(e_{k,j,i}), t_{max}(e_{k,j,i}) & \in T(e_{k,j,i}) \end{aligned} \quad (9.35)$$

$$\forall_{k,j,i} : w(e_{k,j,i}) \in T(e_{k,j,i}) \Leftrightarrow q_B(e_{k,j,i}) = true \quad (9.36)$$

$$\forall_{k,j,i} : w(e_{k,j,i}) \notin T(e_{k,j,i}) \Leftrightarrow q_B(e_{k,j,i}) = false \quad (9.37)$$

Innerhalb des Modells werden jedoch nicht die absoluten Grenzwerte implementiert, sondern auch hier die relativen Werte über die Länge λ .

$$\begin{aligned} \lambda(s_{min}(e_{k,j,i})) & := \text{Länge der unteren Sicherheitsgrenze} \\ \lambda(s_{max}(e_{k,j,i})) & := \text{Länge der oberen Sicherheitsgrenze} \\ \lambda(t_{min}(e_{k,j,i})) & := \text{Länge der unteren Toleranzgrenze} \\ \lambda(t_{max}(e_{k,j,i})) & := \text{Länge der oberen Toleranzgrenze} \end{aligned}$$

9.1.5 Gewichtung der Qualitätsmerkmale

Bisher wurden im QVM gleichgewichtete Merkmale betrachtet. Dabei wurde der Gewichtungsfaktor für jedes Prüfmerkmal gleichwertig über Formel 9.2 ermittelt. Dennoch ist eine individuelle Gewichtung der Prüf- bzw. Qualitätsmerkmale möglich und ggf. aufgrund der individuellen Priorität notwendig (vgl. Abschnitt 5.3).

Es existieren bereits Ansätze zur Gewichtung der einzelnen Segmente in einem Netzdiagramm. Die Gewichtung im QVM ähnelt gewichteten Kiviat-Diagrammen. Die Größe der einzelnen Segmente kann dabei durch ihre Gewichtung mittels eines Gewichtungsfaktors proportional zu deren Bedeutung gewählt werden. [HOF13]

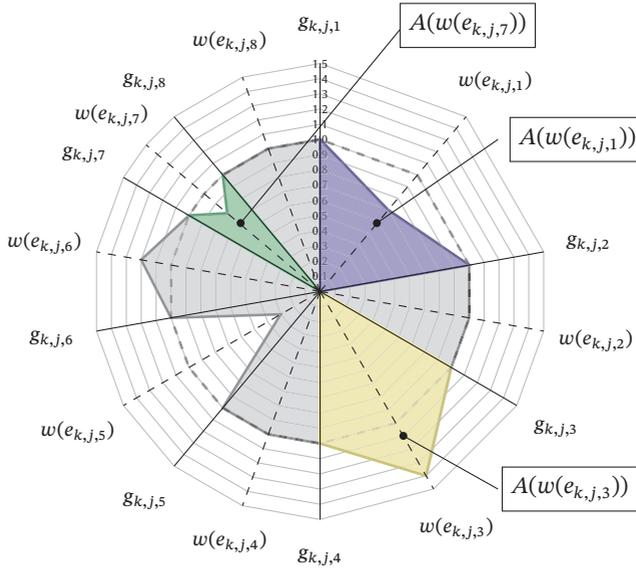
Im QVM repräsentiert der Gewichtungsfaktor eines Prüfmerkmals den Winkel $\beta(e_{k,j,i})$. Dieser Gewichtungsfaktor repräsentiert den doppelten Winkel zwischen dem Grenzvektor $\vec{v}(g_{k,j,i})$ und dem Prüfmerkmalsvektor $\vec{v}(e_{k,j,i})$ bzw. den Winkel zwischen den Grenzvektoren $\vec{v}(g_{k,j,i})$ und $\vec{v}(g_{k,j,i+1})$.

Je nach Anwendung kann der Gewichtungsfaktor individuell oder auf Basis einer Berechnungsgrundlage definiert werden. Jedoch müssen alle Gewichtungsfaktoren $\beta(e_{k,j,i})$ der Prüfmerkmale $e_{k,j,i}$ in Summe 360° betragen – der Vollwinkel teilt sich somit in Abhängigkeit der Priorität der Prüfmerkmale $e_{k,j,i}$ auf die Prüfmerkmalsvektoren $\vec{v}(e_{k,j,i})$ auf. Jedoch muss die Bedingung des Vollwinkels nach Formel 9.38 gewährleistet sein.

$$\sum_{i=1}^{\max(i)} \beta(e_{k,j,i}) = 360^\circ \quad (9.38)$$

In Abbildung 9.7 sind im Vergleich zu den anderen fünf Prüfmerkmalen (graue Flächen) das Prüfmerkmal $e_{k,j,1}$ (blaue Fläche) doppelt, das Prüfmerkmal $e_{k,j,3}$ (gelbe Fläche) 1,5-fach und das Prüfmerkmal $e_{k,j,7}$ (grüne Fläche) halbgewichtet. Somit betragen der Gewichtungsfaktor $\beta(e_{k,j,1}) = 80^\circ$, der Gewichtungsfaktor $\beta(e_{k,j,3}) = 60^\circ$ und der Gewichtungsfaktor

$\beta(e_{k,j,7}) = 20^\circ$, während die verbleibenden fünf Gewichtungsfaktoren $\beta(e_{k,j,2/4/5/6/8}) = 40^\circ$ betragen.



Legende

- - - Solllänge
- Istlänge
- $g_{k,j,i} :=$ Grenze
- $w(e_{k,j,i}) :=$ Istwert des Prüfmerkmals

Abbildung 9.7: Gewichtung von Merkmalen

9.2 Analysefähigkeit des Modells

Das QVM bietet aufgrund der anwenderorientierten Visualisierung unterschiedliche Analysepotenziale. Zum einen ermöglicht es die Darstellung einer Clusteranalyse zur Gruppierung einzelner Merkmalsausprägungen, zum

anderen die Darstellung einer Benchmarkanalyse zum Vergleich mehrerer Betrachtungsobjekte auf einer Schicht im QVM.

9.2.1 Clusteranalyse der Merkmalswerte

Das QVM ermöglicht über die Sicherheits- und Toleranzgrenzen in Unterabschnitt 9.1.4 eine Einordnung der Merkmalsausprägungen in definierte Qualitätsgruppen (Cluster). Unter Berücksichtigung der unteren bzw. oberen Sicherheits- bzw. Toleranzgrenze ergeben sich folgende Cluster:

- **Cluster C+:** $\lambda(w(e_{k,j,i})) > \lambda(t_{max}(e_{k,j,i}))$
- **Cluster B+:** $\lambda(s_{max}(e_{k,j,i})) \leq \lambda(w(e_{k,j,i})) \leq \lambda(t_{max}(e_{k,j,i}))$
- **Cluster A:** $\lambda(s_{min}(e_{k,j,i})) < \lambda(w(e_{k,j,i})) < \lambda(s_{max}(e_{k,j,i}))$
- **Cluster B-:** $\lambda(t_{min}(e_{k,j,i})) \leq \lambda(w(e_{k,j,i})) \leq \lambda(s_{min}(e_{k,j,i}))$
- **Cluster C-:** $\lambda(w(e_{k,j,i})) < \lambda(t_{min}(e_{k,j,i}))$

Das Ziel eines Montagesystems ist die Erfüllung der Qualitätsanforderungen. Wie bereits in Kapitel 5 erläutert, ist eine punktgenaue Erreichung des Sollwertes zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen nicht erforderlich. Das Ziel besteht folglich in der Positionierung des Istwertes innerhalb des Clusters A, zumindest jedoch innerhalb der Cluster B \pm . Abbildung 9.8 zeigt die Fläche eines Prüfmerkmals innerhalb einer Schicht mit farblicher Kennzeichnung der fünf Cluster.

Das QVM ermöglicht sowohl die Betrachtung eines Zeitpunktes h als auch eines Zeitraumes H .

h := Zeitpunkt

H := Zeitraum

$$h \in H \quad (9.39)$$

Bei der *Betrachtung eines Zeitpunktes* h existiert pro Merkmal lediglich eine Merkmalsausprägung. Die *Betrachtung eines Zeitraumes* H umfasst hingegen mehrere Merkmalsausprägungen. Insgesamt können drei Varianten der Visualisierung der Merkmalsausprägungen im QVM erfolgen:

1. Einzelwerte
2. Mittelwert
3. Clusterwerte

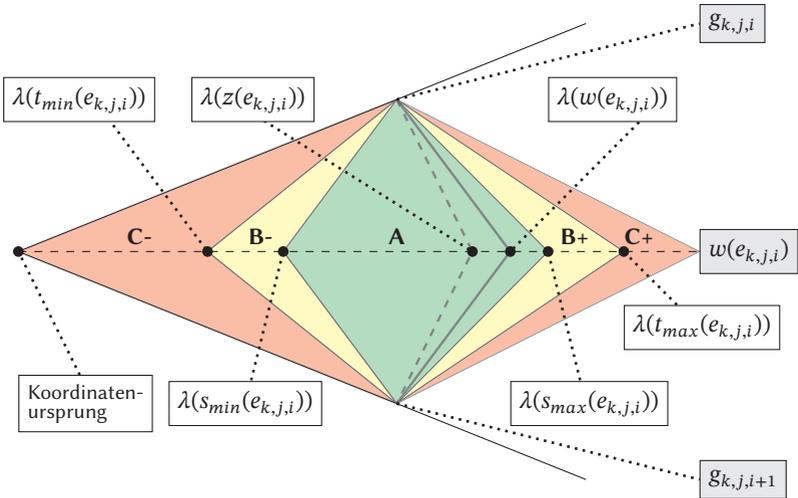


Abbildung 9.8: Clusteranalyse der Merkmalswerte

Eine *Visualisierung als Einzelwerte* zeigt innerhalb einer Schicht die Einzelwerte der Merkmalsausprägungen an. Jedoch enthält eine Schicht mit einer Vielzahl an Merkmalsausprägungen ein hohes Risiko der Intransparenz und mangelhaften Darstellbarkeit. So würde z. B. die Visualisierung der Qualitätsrate pro Tag einer Großserienproduktion mehrere hundert Ausprägungen umfassen. Dadurch leidet die anwenderorientierte Darstellbarkeit.

Die *Visualisierung als Mittelwert* erfolgt über das arithmetische Mittel \bar{w} bzw. über die Länge $\lambda(\bar{w}(e_{k,j,i}))$ des Mittelwertes. Es existiert somit nur ein Wert zu allen Merkmalsausprägungen zum betrachteten Merkmal innerhalb des Zeitraumes H – die Länge $\lambda(\bar{w}(e_{k,j,i}^H))$ des Mittelwertes.

$\bar{w} \quad := \quad$ Istwert (Mittelwert)

$$\bar{w}(e_{k,j,i}^H) = \frac{\sum_{h=\min(h)}^{\max(h)} w(e_{k,j,i}^h)}{\max(h)} \quad (9.40)$$

Aufgrund der Gefahr der mangelnden Darstellbarkeit aller Einzelwerte und des fehlenden Detailgrades durch den Mittelwert bietet die *Visualisierung als Clusterwerte* einen Kompromiss. Dabei werden die bestehenden fünf Cluster mit absoluten bzw. relativen Anteilswerten angereichert. So kann der Anwender direkt ermitteln, welcher Anteil der Betrachtungsobjekte o_k sich bzgl. des Prüfmerkmals $e_{k,j,i}$ innerhalb des Betrachtungszeitraumes H in dem jeweiligen Cluster befindet. Diese Form der Visualisierung ist stark an die Methode des Boxplots angelehnt. Abbildung 9.9 zeigt eine Visualisierung als Einzelwerte, Mittelwert und Clusterwerte eines Merkmals.

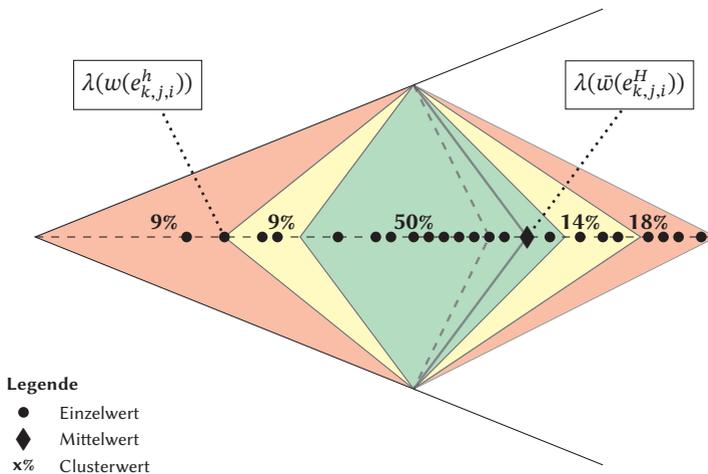


Abbildung 9.9: Visualisierung der Merkmalsausprägungen

Diese Form der Visualisierung liefert jedoch nur einen zusammenfassenden Überblick über das Prozess- bzw. Qualitätsverhalten. Konkrete Prozessverläufe können in dieser Form nicht dargestellt werden. Zur Verbesserung des Informationsgehaltes müssen folglich detaillierte Informationen bereitgestellt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit, Les- und Interpretierbarkeit eignet sich die Netzansicht des QVM je nach Informationsumfang

nur bedingt. Es soll deshalb möglich sein aus der Netzansicht in eine Detailansicht für ein bestimmtes Merkmal zu wechseln. So lassen sich detailliertere Informationen zu einem Merkmal anzeigen, während weniger relevante Informationen ausgeblendet werden.

Für die detaillierte Darstellung des Prozessverhaltens über den Zeitraum H eignet sich die Qualitätsregelkarte (vgl. Unterabschnitt 3.3.4). In Anwendung innerhalb des QVM werden darüber die Merkmalswerte für ein bestimmtes Merkmal über einen definierten Betrachtungszeitraum in einer Qualitätsregelkarte aufgetragen. Diese wird im QVM als detailliertere Kartenansicht bezeichnet. Abbildung 9.10 zeigt den Übergang von der Netzansicht der Clusteranalyse zur detaillierteren Kartenansicht in Form der Qualitätsregelkarte.

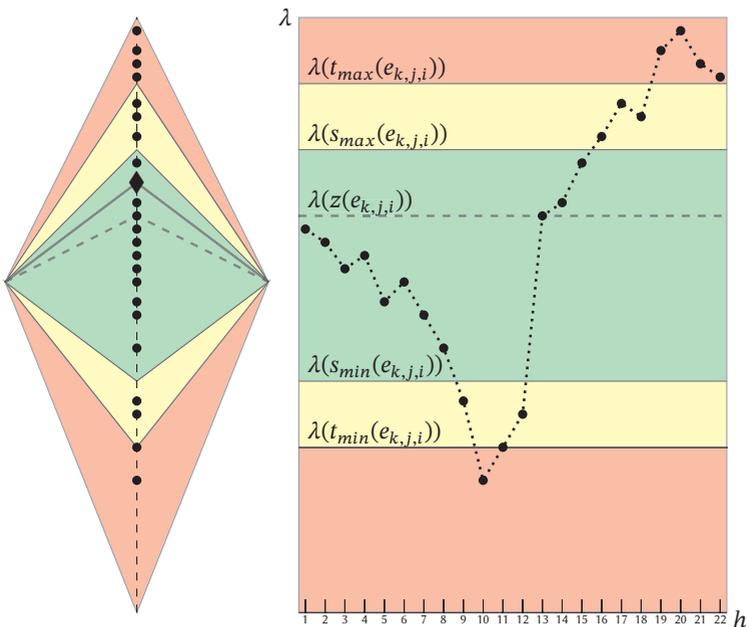


Abbildung 9.10: Wechsel von Netzansicht zu Kartenansicht im QVM

Die Einbindung von Toleranzgrenzen ermöglicht eine schnelle Überprüfung der Qualitätsanforderungen sowie eine Analyse der Qualität der betrachteten Merkmalswerte. Über die Zeitachse lassen sich Veränderungen im Prozessverhalten analysieren. Die Qualitätsregelkarte lässt einen frei wählbaren Betrachtungszeitraum H zu. Die Kombination der Netzansicht und der detaillierteren Kartenansicht ermöglicht eine schnelle Identifikation von Qualitätsabweichungen und trägt zur Regelung der Produktionsqualität bei.

9.2.2 Benchmark mit anderen Betrachtungsobjekten

Eine Besonderheit ist die Anwendung des QVM im Rahmen eines objektbezogenen Benchmarks, also einer vergleichenden Analyse mehrerer Betrachtungsobjekte anhand gleicher Kriterien. Mehrere Schichten werden dazu mit ihren Ausprägungen im QVM zum Zweck einer Vergleichsanalyse überlagert. Abbildung 9.11 zeigt die Fläche eines Prüfmerkmals als Ausschnitt einer Schicht mit den drei vergleichbaren Istwerten in blau, grün und rot.

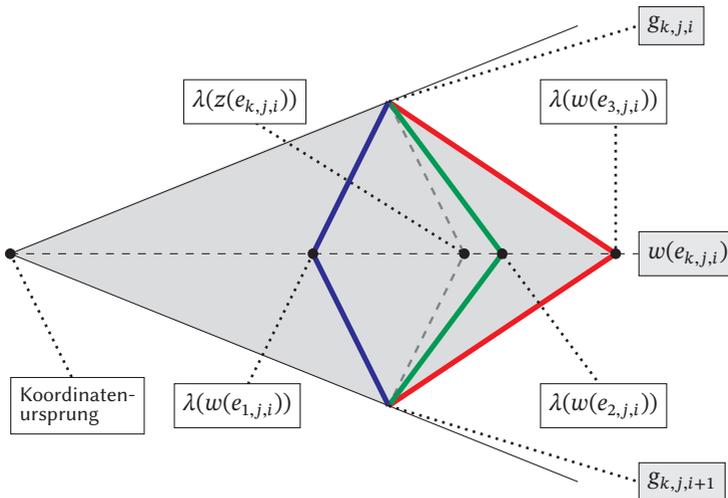


Abbildung 9.11: Benchmark mit gleichen Betrachtungsobjekten

Ein konkreter Anwendungsfall ist der Vergleich der Produktion einer Baureihe an unterschiedlichen Produktionsstandorten. Eine Schicht o_k stellt eine Baureihe (z. B. Baureihe 4711) mit ihren Baugruppen (Baugruppe 1 – 6) als Vektoren $\vec{v}(w(e_{k,j,i}))$ dar. Die Ausprägung bzw. Istlänge $\lambda(w(e_{k,j,i}))$ repräsentiert die Qualitätsrate. Über drei Istlängen (blau, grün und rot) werden die Qualitätsraten von drei Produktionswerken (z. B. USA, China und Deutschland) dargestellt. Über die Ermittlung des quantitativen Qualitätswertes q_Q kann folglich eine quantitative Aussage über die Zielerreichung der einzelnen Produktionswerke bzgl. der Baureihe gemacht werden. Dies schafft einen unternehmensinternen Vergleich der Produktion. Abbildung 9.12 zeigt das Anwendungsbeispiel des Benchmarks.

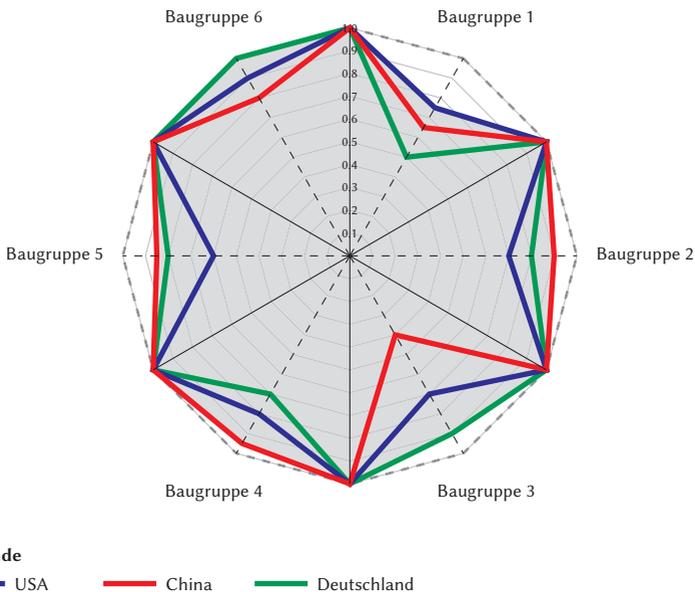


Abbildung 9.12: Anwendungsbeispiel des Benchmarks zur Produktqualität

Eine weitere Anwendung des Benchmarks kann auch im Bereich der APQ erfolgen. So ist es möglich, einzelne Bereiche eines Montagesystems (z. B. die Montageabschnitte) bzgl. der APQ-spezifischen Qualitätsmerkmale aus Abschnitt 6.3 miteinander zu vergleichen. Die Istlänge repräsentiert den quantitativen Qualitätswert q_Q des Qualitätsmerkmals. Anschließend kann über Formel 6.22 der quantitative Wert APQ_Q pro Schicht ermittelt und verglichen werden. Abbildung 9.13 zeigt ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der APQ mit vier Montageabschnitten (rot, gelb, grün und blau) und einer individuellen Gewichtung der Qualitätsmerkmale.

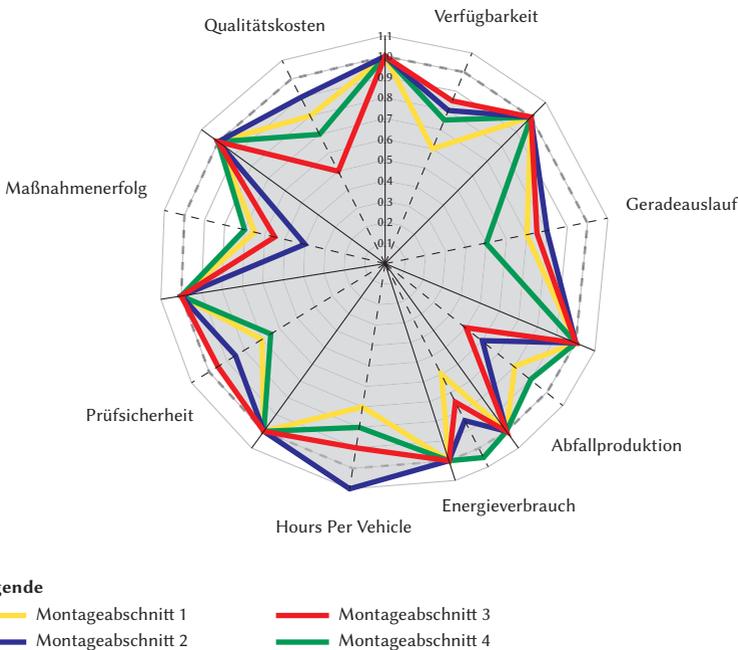


Abbildung 9.13: Anwendungsbeispiel des Benchmarks zur APQ

9.3 Eigenschaften des Modells

Das QVM charakterisiert sich durch Eigenschaften, welche für einen adäquaten Einsatz erforderlich sind. Aufgrund der bestehenden Ansätze zur Qualitätsüberwachung in Unterabschnitt 3.3.4 wurden in Tabelle 4.4 bzw. Anhang G die erforderlichen Anforderungen an ein adäquates Qualitätsmodell beschrieben.

Zunächst orientiert sich das QVM durch seine vektorielle Struktur stark am hierarchischen Aufbau der Qualität eines Betrachtungsobjektes (vgl. Abbildung 5.1). Die einzelnen Vektoren repräsentieren Prüf- oder Qualitätsmerkmale (je nach Anwendungsfall) und können ggf. mehrere Merkmale gruppieren sowie diese zu höheren Einheiten aggregieren (merkmalsbasiert). Zudem ist eine Gewichtung der Merkmale innerhalb des Modells möglich, sodass wichtigere Merkmale für die Qualitätsbewertung im QVM eine höhere Priorität bekommen (asymmetrisch). Durch die Implementierung von merkmalspezifischen Sicherheits- und Toleranzgrenzen werden vorhandene Toleranzbänder analog des CQD berücksichtigt (toleranzbasiert). Das QVM besitzt keine festgelegte Form, sondern passt sich dem individuellen Betrachtungsobjekt in Abhängigkeit der Anzahl der Merkmale und deren Ausprägungen an (generisch). Wie in Unterabschnitt 2.1.2 beschrieben, können Merkmale unterschiedliche Größen und Dimensionen sowie Einheiten besitzen. Die Ausprägungen der Merkmale werden im QVM über den relativen Zielerreichungsgrad (vgl. Formel 9.10) dargestellt und folglich auf den Einheitsvektor normiert. Dies schafft eine Vergleichbarkeit und gemeinsame Darstellung aller unterschiedlichen Merkmale eines Betrachtungsobjektes (homomorph).

Weiterhin kann das QVM zur Qualitätsüberwachung eines beliebigen Betrachtungsobjektes angewendet werden (objektunabhängig). Es müssen lediglich Qualitätsmerkmale zum Betrachtungsobjekt vorliegen, welche über das QVM dargestellt werden können. Zudem ermöglicht das Modell eine Darstellung der Qualität einer Kombination mehrerer typunabhängiger Betrachtungsobjekte (multiobjektiv), sodass auch außerordentliche und kombinatorische Anwendungsfälle visualisiert werden können. Das

QVM ermöglicht außerdem die Darstellung und Qualitätsüberwachung verketteter Modulgruppen. Innerhalb der Fahrzeugmontage ist ein Betrachtungsobjekt z. T. durch einen modularen Aufbau charakterisiert. Über das Modell ist es möglich, die einzelnen darunterliegenden Objekte eines Betrachtungsobjektes über Vektoren darzustellen, welche wiederum über eine eigene Schicht repräsentiert werden.⁵ Somit berücksichtigt das Modell eine hierarchische Struktur und einen modularen Aufbau des Betrachtungsobjektes (hierarchisch).

Des Weiteren ist das QVM durch seine modellbasierte und grafische Darstellung einfach und verständlich zu lesen (grafisch). Trotz der vereinfachten grafischen Darstellung ist weiterhin eine Analyse der Qualitätssituation und eine Identifikation von systematischen Qualitätsabweichungen möglich (analytisch). Somit erhält der Anwender in rollen-, sach- und zeitgerechter Form bzw. einfach und schnell die relevanten Qualitätsinformationen. Zudem lässt sich die Qualität des Betrachtungsobjektes über die Fläche des QVM (vgl. Formel 9.27) schnell und einfach berechnen bzw. messbar bewerten (quantifizierbar). Dadurch lassen sich Qualitätsmängel des Betrachtungsobjektes schnell identifizieren. Die Struktur des QVM und die Darstellung der Qualitätssituation wird anwenderunabhängig in leicht verständlicher Form präsentiert. Der Anwenderkreis wird dadurch nicht auf ausgewählte und im Detail geschulte Fachexperten eingeschränkt, sondern ist ebenso durch ungeschulte Anwender intuitiv benutzbar (anwenderunabhängig).

⁵ Die hierarchische Eigenschaft des QVM wird in Abschnitt 9.4 im Rahmen der organisations- und objektbezogenen Betrachtung erläutert.

9.4 Anwendungspotenzial in der Fahrzeugmontage

Das QVM kann aufgrund seiner generischen und objektunabhängigen Eigenschaft beliebige Betrachtungsobjekte darstellen. Dies erfordert zunächst die Auswahl der zu betrachtenden Qualitätsart – die Produktionsqualität oder die Produktqualität. Anschließend kann das Betrachtungsobjekt als Instanz gewählt werden. Für eine alternative hierarchische Sicht kann das Betrachtungsobjekt in weitere Betrachtungsebenen, bestehend aus den darunterliegenden Betrachtungsobjekten, unterteilt werden. Im Bereich der Fahrzeugmontage eignet sich eine Unterteilung nach Abbildung 3.3. Aufgrund der Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten des QVM sind diverse Anwendungsbeispiele in Anhang P tabellarisch aufgezeigt.

9.4.1 Visualisierung der APQ

Ein Anwendungsbereich des QVM innerhalb der Fahrzeugmontage stellt die Visualisierung der APQ aus Kapitel 6 dar. Zunächst muss das Betrachtungsobjekt der APQ als Instanz gewählt werden. Auf hoher Managementebene eignet sich das Montagesystem als Betrachtungsobjekt, während sich für einen Montagemeister die entsprechende Montagemeisterei als Betrachtungsobjekt eignet. Weiterhin sind durch den Anwender zwei Betrachtungsvarianten zu wählen, welche in Abbildung 9.14 dargestellt sind.

Eine *isolierte Betrachtung* der APQ zeigt dem Anwender das gewählte Betrachtungsobjekt (z. B. einen Montageabschnitt) mit den acht APQ-spezifischen Qualitätsmerkmalen aus Abschnitt 6.3 auf einer Schicht. Da die Qualitätsmerkmale der APQ bereits quantifizierbar gestaltet sind, ist eine weitere Untergliederung der Qualitätsmerkmale in Prüfmerkmale obsolet – es existieren in dieser Betrachtung lediglich Qualitätsmerkmalsvektoren $\vec{v}(w(m_{k,j}))$. Die Istlänge $\lambda(w(m_{k,j}))$ des Qualitätsmerkmalsvektors ergibt sich aus der Berechnung der jeweiligen Kennzahl. Die Gewichtungsfaktoren der Qualitätsmerkmale betragen in dieser Anwendung bei einer Gleichgewichtung $\beta(m_{k,j}) = 45^\circ$. Bei einer individuellen Gewichtung muss

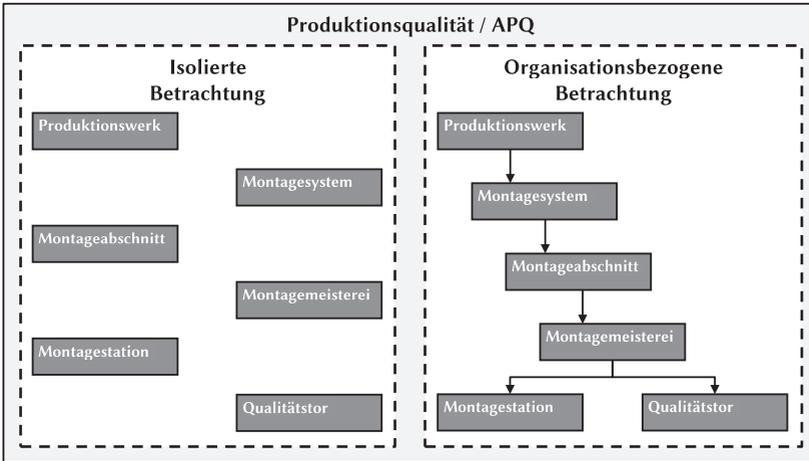


Abbildung 9.14: Betrachtungsvarianten der Produktionsqualität

hingegen die Anforderung des Vollwinkels nach Formel 9.38 erfüllt werden. Je nach Qualitätssituation oder Bedeutung der Qualitätsmerkmale können die Sicherheits- und Toleranzgrenzen festgelegt werden. Der Anwender erhält so eine individuelle bzw. isolierte Sicht der APQ für sein gewähltes Betrachtungsobjekt mit Fokus auf die APQ-spezifischen Qualitätsmerkmale. Abbildung 9.15 zeigt eine isolierte Betrachtung der APQ für ein Montagesystem mit individuell gewichteten Qualitätsmerkmalen.

Eine *organisationsbezogene Betrachtung* der APQ zeigt dem Anwender hingegen das gewählte Betrachtungsobjekt (z. B. eine Montagemeisterei) als Schicht mit den darunterliegenden Betrachtungsobjekten (i. d. F. die zugehörigen Montagestationen) als Vektoren. Im Falle einer Montagemeisterei mit n Montagestationen besitzt die Schicht entsprechend n Qualitätsmerkmalsvektoren. Die Istlänge $\lambda(w(m_{k,j}))$ des Qualitätsmerkmalsvektors ergibt sich aus dem quantitativen Qualitätswert des entsprechenden Betrachtungsobjekt. Eine Gewichtung kann ebenfalls erfolgen. Durch die organisationsbezogene Betrachtung ist es möglich, den Zielerreichungsgrad bzw. quantitativen Qualitätswert der APQ mit Fokus auf die organisatorischen Einheiten zu

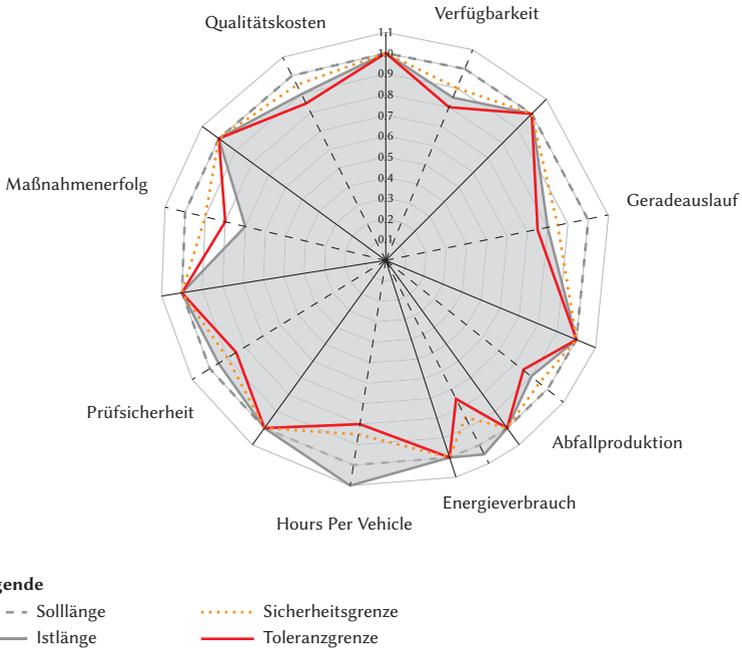


Abbildung 9.15: Isolierte Betrachtung der APQ

ermitteln. Abbildung 9.16 zeigt eine organisationsbezogene Betrachtung der APQ für eine Montagemeisteri mit gleichgewichteten Montagestationen.

Charakteristisch sind bei beiden Betrachtungsweisen die fehlende obere Sicherheits- und Toleranzgrenze. Die APQ repräsentiert in quantitativer Form einen Zielerreichungsgrad, dessen Definitionsbereich zwischen 0 und 1 bzw. 0% und 100% liegt (vgl. Formel 6.21 und 6.22). Folglich sind eine obere Sicherheits- und Toleranzgrenze obsolet.

Anschließend können die Qualitätsinformationen zur APQ unterschiedlichen Rollen (z. B. einem Prozess- bzw. Qualitätsingenieur oder einem Montagemeister) oder Orten (z. B. an einer digitalen Informationstafel einer Montagestation oder eines Q-Tors) zugänglich gemacht werden. So lassen sich Informationen zur APQ anwenderorientiert zurückmelden.

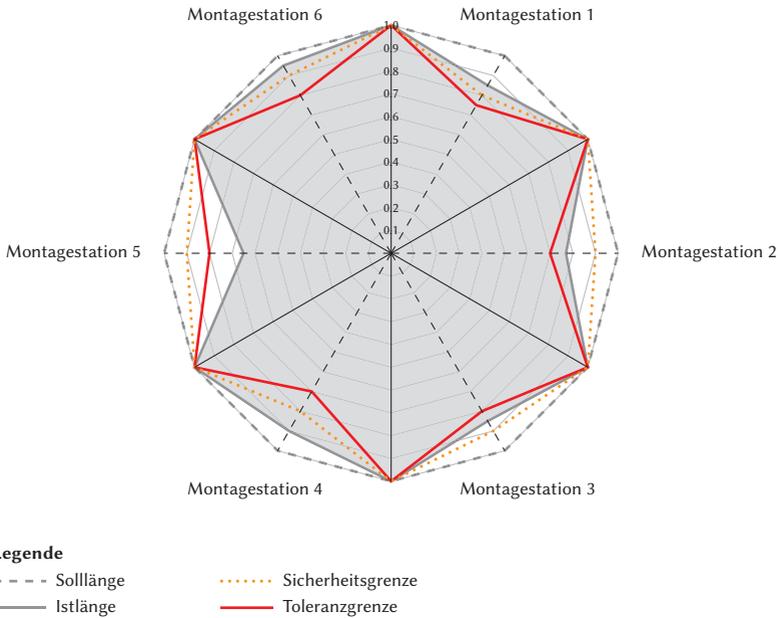


Abbildung 9.16: Organisationsbezogene Betrachtung der APQ

9.4.2 Visualisierung der Produktqualität

Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Darstellung der Produktqualität eines Betrachtungsobjektes. Dies kann ein Bauteil oder eine Baugruppe sowie ein Fahrzeug oder eine Baureihe sein. Auf Ebene einer Nacharbeitungsstation eignet sich die Visualisierung eines nachzuarbeitenden Bauteils als Schicht, für ein Q-Tor die Anzeige einer zu prüfenden Baugruppe.

Die Darstellung eines Betrachtungsobjektes mit vielen Merkmalen (z. B. eine Baureihe oder ein Fahrzeug) als Schicht ist lediglich für eine Auswahl an Qualitäts- und Prüfmerkmalen sinnvoll, da eine Vielzahl aufgrund der vektoriellen Darstellung die Lesbarkeit des QVM negativ beeinträchtigen würde. Eine Visualisierung auf Fahrzeugebene würde z. B. für Spaltmaßprüfungen der Karosserie geeignet sein, da die Anzahl der relevanten Spaltmesspunkte

zählbar klein und so über Vektoren darstellbar sind. Im Anwendungsbereich der Produktqualität muss der Anwender zwischen drei Betrachtungsvarianten wählen, welche in Abbildung 9.17 dargestellt sind.

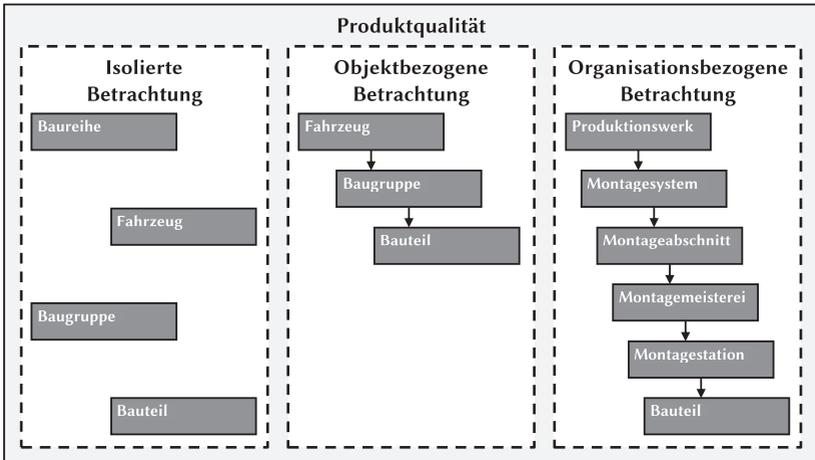


Abbildung 9.17: Betrachtungsvarianten der Produktqualität

Eine *isolierte Betrachtung* der Produktqualität zeigt dem Anwender das gewählte Betrachtungsobjekt (z. B. ein Kotflügel) mit seinen individuellen Qualitäts- und Prüfmerkmalen auf einer Schicht. Dabei werden die Prüfmerkmale in bekannter Form über die Prüfmerkmalsvektoren dargestellt. Die Darstellung der Produktqualität eines Betrachtungsobjektes über das QVM kann als digitale Meta-Information dem Fahrzeug während seines Montageprozesses mitgegeben werden. An informationsrelevanten Orten (z. B. einem Q-Tor oder einer Nacharbeitsstation), können die Informationen zur Qualität situationsgerecht angezeigt werden. Abbildung 9.18 zeigt eine isolierte Betrachtung der Produktqualität für ein Bauteil mit gleichgewichteten Prüfmerkmalen.

Eine *objektbezogene Betrachtung* der Produktqualität zeigt dem Anwender das gewählte Betrachtungsobjekt (z. B. eine Baugruppe) als Schicht mit den

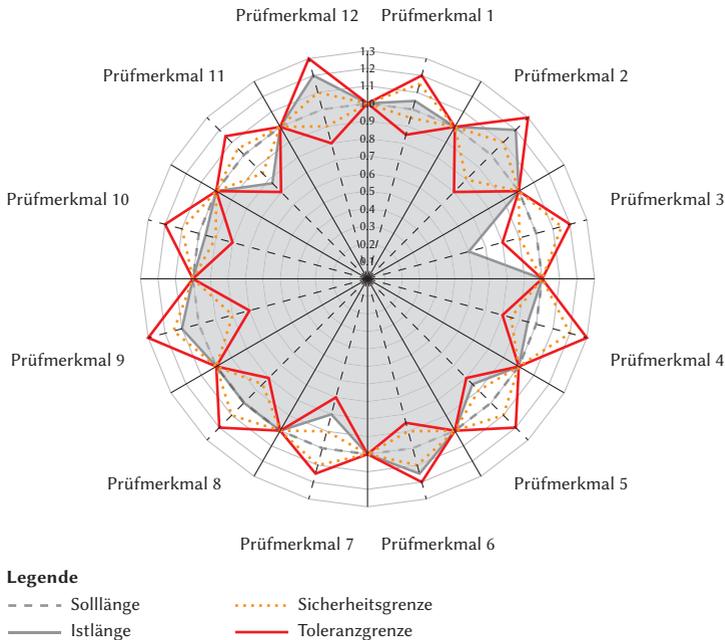


Abbildung 9.18: Isolierte Betrachtung der Produktqualität

darunterliegenden Betrachtungsobjekten (i. d. F. die zugehörigen Bauteile) als Vektoren. Innerhalb der Betrachtung ermöglichen zwei weitere Sichtweisen einen Mehrwert für den Anwender:

1. Vektoren auf Basis der Qualitätsrate
2. Vektoren auf Basis des Fehleranteils

Bei einer Darstellung auf *Basis der Qualitätsrate bzw. des quantitativen Qualitätswertes* stellt die Istlänge $\lambda(w(m_{k,j}))$ der Vektoren den Wert q_Q eines Merkmals dar. Es existieren keine oberen Sicherheits- und Toleranzgrenzen, da lediglich ein Wert zwischen 0 und 1 bzw. 0% und 100% erreicht werden

kann. Die Gewichtung eines Qualitätsmerkmals über $\beta(m_{k,j})$ kann gleichgewichtet oder individuell gewichtet erfolgen. Anschließend können die Flächen der Qualitätsmerkmale berechnet werden. Die drei kleinsten Istflächen werden gekennzeichnet. Durch die Auswahl des Qualitätsmerkmals mit der kleinsten Istfläche wird die nachfolgende Betrachtungsebene mit den entsprechenden Betrachtungsobjekten visualisiert. Dieses Vorgehen kann iterativ bis auf Bauteilebene durchgeführt werden. Abschließend lässt sich das Bauteil mit der höchsten Priorität analysieren. Abbildung 9.19 zeigt eine objektbezogene Betrachtung der Produktqualität auf Basis der Qualitätsrate für eine Baugruppe.

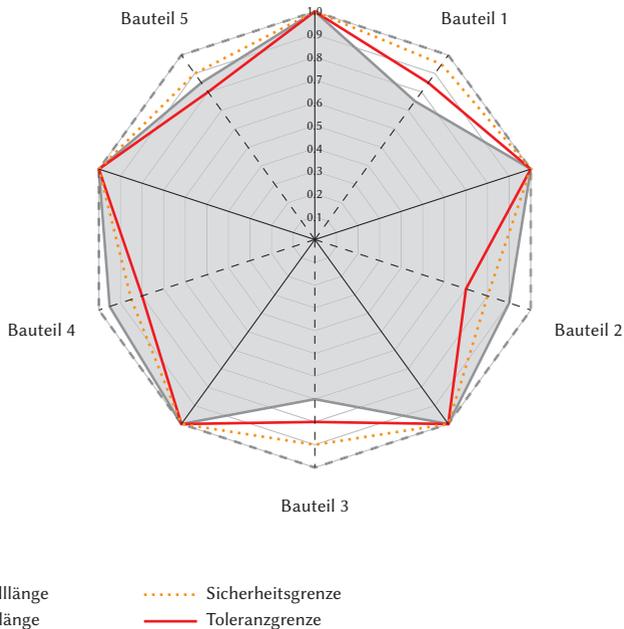


Abbildung 9.19: Objektbezogene Betrachtung der Produktqualität auf Basis der Qualitätsrate

Innerhalb der Darstellung auf *Basis des Fehleranteils* repräsentiert die Ausprägung der Istlänge $\lambda(w(m_{k,j}))$ der Vektoren den Fehleranteil des Qualitätsmerkmals. Weiterhin kann in diesem Ansatz die Gewichtung eines Qualitätsmerkmals bzw. der Winkel $\beta(m_{k,j})$ den Nacharbeitskostenanteil des Qualitätsmerkmals darstellen.

$\lambda(w(m_{k,j}))$:= Fehleranteil

f := Fehleranzahl

$\beta(m_{k,j})$:= Nacharbeitskostenanteil

c_r := Nacharbeitskostensatz pro Stunde

C_r := Nacharbeitskosten

r := Nacharbeitszeit in Minuten⁶

$$f, r \in \mathbb{N} \quad (9.41)$$

$$c_r, C_r \in \mathbb{R}_0^+ \quad (9.42)$$

$$A(z(m_{k,j})), A(z(o_k)) = 0 \quad (9.43)$$

$$\lambda(w(m_{k,j})) = \frac{f(m_{k,j})}{f(o_k)} \quad (9.44)$$

$$C_r = c_r \cdot \frac{r}{60 \text{ Min.}} \quad (9.45)$$

$$\beta(m_{k,j}) = \frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ \quad (9.46)$$

⁶ Die Nacharbeitszeiten werden auf volle Minuten gerundet.

Anschließend kann die Flächenberechnung der einzelnen Qualitätsmerkmale erfolgen, bei der eine minimale Sollfläche anzustreben ist. Bei einer minimalen Sollfläche weist das Qualitätsmerkmal keinen Fehleranteil aus und verursacht somit auch keine Nacharbeitskosten. Die drei größten Istflächen und folglich in absteigender Reihenfolge zu regelnden Qualitätsmerkmale werden im QVM gekennzeichnet. Durch die Auswahl des Qualitätsmerkmals mit der größten Istfläche wird die nachfolgende Betrachtungsebene mit den entsprechenden Betrachtungsobjekten visualisiert. Auch dieses Vorgehen kann iterativ bis auf Bauteilebene durchgeführt werden. Abschließend lässt sich das Bauteil mit der höchsten Priorität (hoher Fehler- und Nacharbeitskostenanteil) analysieren. Abbildung 9.20 zeigt eine objektbezogene Betrachtung der Produktqualität auf Basis des Fehleranteils für eine Baugruppe.

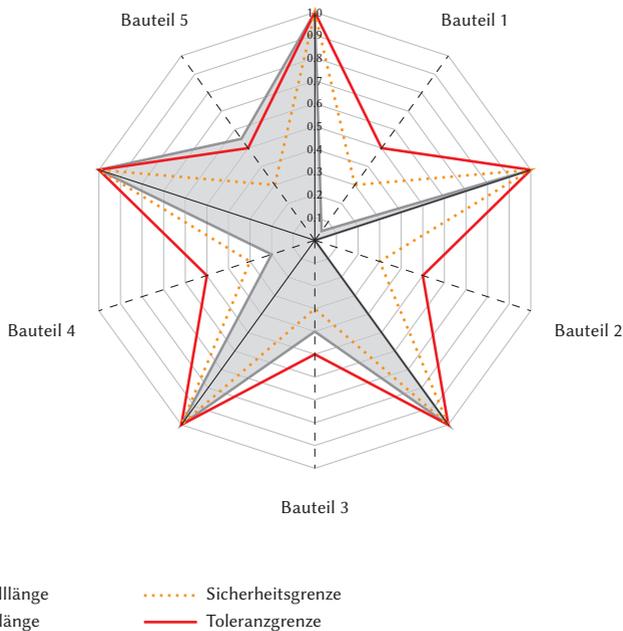


Abbildung 9.20: Objektbezogene Betrachtung der Produktqualität auf Basis des Fehleranteils

Durch die Visualisierung der Produktqualität über das QVM können systematische Qualitätsabweichungen identifiziert und Regelungsbedarfe ermittelt werden. Zur effizienten Qualitätsregelung ist es notwendig, systematische Fehler schnellstmöglich zu identifizieren und nach dem Pareto-Prinzip zu priorisieren. Aufgrund der Visualisierung der Produktqualität können systematische Fehler der einzelnen Bauteile identifiziert werden. Um systematische Fehler zu priorisieren, müssen die jeweiligen Nacharbeitskosten sowie die Fehleranzahl berücksichtigt werden. Dementsprechend wird die Visualisierung der Produktqualität ergänzt, sodass neben der fünften Betrachtungsebene auch die übrigen Betrachtungsebenen untersucht werden.

Eine *organisationsbezogene Betrachtung* der Produktqualität zeigt äquivalent zu Unterabschnitt 9.4.1 das gewählte Betrachtungsobjekt (z. B. einen Montageabschnitt) als Schicht mit den darunterliegenden Betrachtungsobjekten (i. d. F. die zugehörigen Montagemeistereien) in Form von Qualitätsmerkmalen als Vektoren. Ebenso kann im Rahmen dieser Betrachtung diese, analog zur objektbezogenen Betrachtung, weiter untergliedert werden:

1. Vektoren auf Basis der Qualitätsrate
2. Vektoren auf Basis des Fehleranteils

Eine Darstellung auf *Basis der Qualitätsrate bzw. des quantitativen Qualitätswertes* innerhalb der organisationsbezogenen Betrachtung erfolgt analog zur objektbezogenen Betrachtung. Die Istlänge $\lambda(w(m_{k,j}))$ der Vektoren stellt den Wert q_Q eines Merkmals bei fehlenden oberen Sicherheits- und Toleranzgrenzen dar. Abbildung 9.21 zeigt eine organisationsbezogene Betrachtung der Produktqualität auf Basis der Qualitätsrate für einen Montageabschnitt.

Die Darstellung auf *Basis des Fehleranteils* zeigt als Ausprägung eines Vektors den individuellen Fehleranteil des Qualitätsmerkmals sowie den Nacharbeitskostenanteil als Gewichtungsfaktor bzw. Winkel. Die Anwendung erfolgt hier in analoger Form zur objektbezogenen Betrachtung der Produktqualität. Abbildung 9.22 zeigt eine organisationsbezogene Betrachtung der Produktqualität auf Basis des Fehleranteils für einen Montageabschnitt.

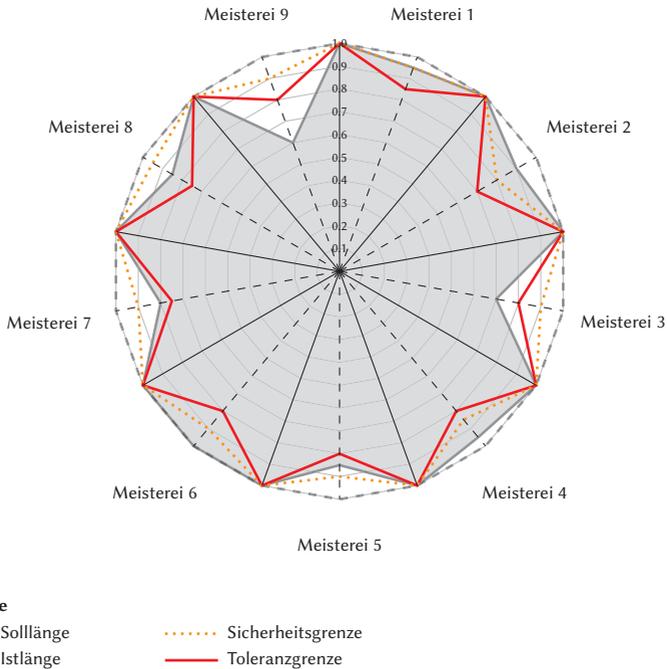


Abbildung 9.21: Organisationsbezogene Betrachtung der Produktqualität auf Basis der Qualitätsrate

Anhang P präsentiert in tabellarischer Form exemplarische Anwendungsfälle innerhalb der Fahrzeugmontage und zeigt die generische Eigenschaft sowie hohe Wandlungsfähigkeit des QVM. Ebenso die Objektunabhängigkeit, mit der jedes Betrachtungsobjekt bzw. eine Kombination mehrerer Betrachtungsobjekte (z. B. Baureihe A und Produktionswerk II) auf Merkmalsbasis abgebildet werden kann.

9.4.3 Rückkopplung in die hybride Qualitätsregelung

Damit eine Qualitätsregelung auf Basis der Informationen und Erkenntnisse aus dem QVM erfolgen kann, ist eine Rückkopplung in das Montagesystem

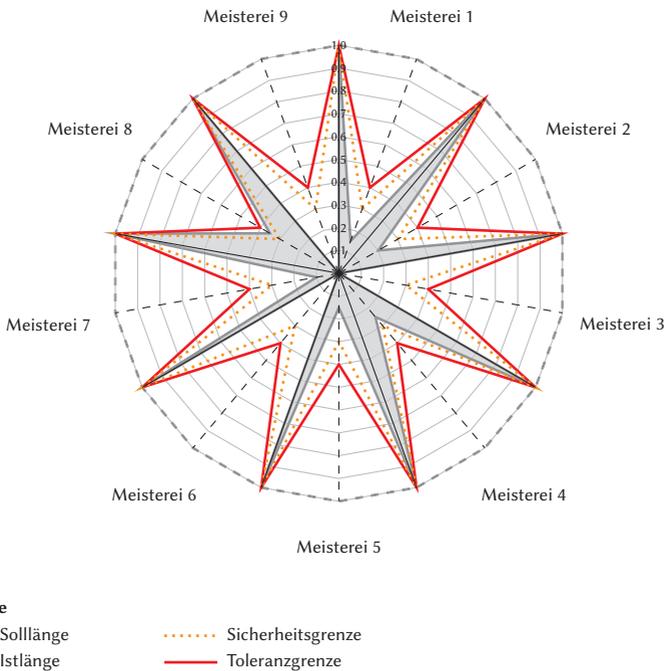


Abbildung 9.22: Organisationsbezogene Betrachtung der Produktqualität auf Basis des Fehleranteils

bzw. zu den Rollen erforderlich. Es müssen aus den Erkenntnissen konkrete Handlungsoptionen zur hybriden Qualitätsregelung abgeleitet, weitergeleitet und umgesetzt werden.

Der entscheidende Faktor im Kontext der hybriden Qualitätsregelung ist der Mensch. Die Anwender des QVM (z. B. der Qualitätsmanager oder der Qualitätsingenieur) agieren nach dem Blockschaltbild (vgl. Anhang N) als Regler der kaskadierten Qualitätsregelung. Sie erlangen über das QVM einen informativen Mehrwert bzgl. der Qualitätssituation, systematischer Qualitätsabweichungen und qualitätsbezogenen Schwerpunkten eines Betrachtungsobjektes mit seinen Qualitäts- und Prüfmerkmalen. Folglich werden

für eine Rückkopplung die persönlichen Fähigkeiten der Anwender des QVM genutzt.

Eine Ursachenanalyse kann über das QVM nicht erfolgen, da die Einflussgrößen eine hohe Varianz aufweisen und eine detaillierte Ursachenanalyse vor Ort durchgeführt werden muss. Ohne dies können keine effizienten Handlungsoptionen abgeleitet werden. Das QVM dient somit als unterstützendes Qualitätswerkzeug zur Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualitätssituation innerhalb der hybriden Qualitätsregelung.

9.5 Zielsetzungen des Modells

Das QVM verfolgt sowohl kurzfristige als auch langfristige Zielsetzungen. Beide Zielausrichtungen fokussieren sich auf die Bereiche Qualität der Produkte sowie Effizienz der Produktion und münden direkt in die Regelung der APQ.

Die *kurzfristige Zielsetzung* des QVM umfasst die Identifikation qualitätskritischer Schwerpunkte und systematischer Fehler. Auf Basis dieser Qualitätsinformationen können schnellstmöglich Sofortmaßnahmen zur Fehlervermeidung im Rahmen einer Qualitätsregelung generiert werden. Dies ermöglicht es, weitere gleichartige Fehlerbilder und zusätzliche Nacharbeitskosten schnellstmöglich zu vermeiden.

Die *langfristige Zielsetzung* des QVM fokussiert die Steigerung der APQ. Das QVM agiert als Überwachungs- und Regelungsinstrument innerhalb eines Montagesystems zur Schaffung einer Echtzeittransparenz. Langfristig sollen über die Realisierung der kurzfristigen Ziele die Qualitätskosten reduziert werden. Dies wirkt sich positiv auf die Steigerung der APQ aus. Zusätzlich liefern die Informationen des QVM Indikatoren zu qualitätssteigernden Investitionsmöglichkeiten im Hinblick auf die übergeordnete Forschungsfrage.

9.6 Zwischenfazit: Überwachung der Produktionsqualität

Das „Quality Visualization Model“ (QVM) liefert ein generisches Qualitätswerkzeug zur kontinuierlichen Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes (Ergebnis 5). Die Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes (z. B. die Produktqualität oder APQ) bzw. einer Kombination mehrerer Betrachtungsobjekte wird als o_k auf Basis einer vektoriellen Darstellung im zweidimensionalen Raum grafisch visualisiert. Diese Vektoren $\vec{v}(w(e_{k,j,i}))$ repräsentieren die zugehörigen Prüfmerkmale $e_{k,j,i}$, sodass über die Länge $\lambda(w(e_{k,j,i}))$ die relativen Zielerreichungsgrade abgebildet werden und eine homomorphe Struktur sichergestellt wird.

Eine *binäre Qualitätsbewertung* durch q_B liefert das QVM durch die Implementierung der individuellen Sicherheits- und Toleranzgrenzen. Es kann direkt ermittelt werden, ob ein Prüfmerkmal innerhalb seiner Toleranzgrenzen liegt und ob für dieses Prüfmerkmal, Qualitätsmerkmal und Betrachtungsobjekt die Qualitätsanforderungen erfüllt sind. Durch die Anwendung von Sicherheits- und Toleranzgrenzen lässt sich das Prozessverhalten visualisieren und überwachen sowie Fehlerschwerpunkte und systematische Qualitätsabweichungen aufdecken. Der Anwender des QVM erhält ein methodisches Instrument zur Bestätigung der Qualität und Überwachung des Prozessverhaltens.

Eine *quantitative Qualitätsbewertung* durch q_Q kann ebenso durch das QVM erfolgen und visuell dargestellt werden. Durch die Verbindung der Vektorenden ist über die aufgespannte Fläche eine Berechnung des quantitativen Qualitätswertes möglich (vgl. Formel 9.27). Dieser kann für ein Prüfmerkmal, für ein Qualitätsmerkmal oder für das Betrachtungsobjekt ermittelt werden.

Aufgrund der Eigenschaften lässt sich das QVM für unterschiedliche Anwendungsfällen zur Qualitätsüberwachung einsetzen. Das QVM erfüllt durch die spezifischen Eigenschaften die gesetzten Anforderungen an ein

Qualitätsmodell (vgl. Tabelle 4.4 bzw. Anhang G). Die Erfüllung liefert einen konkreten Beitrag zur anforderungsgerechten Visualisierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes (Leitfrage 6). Folglich ermöglicht das QVM eine anwenderorientierte Visualisierung von objektbezogenen Qualitätsinformationen, schafft Transparenz und dient als Instrument zur Qualitätsregelung.

10 Evaluation des Konzeptes

„Es ist nicht genug zu wissen, man muss es auch anwenden. Es ist nicht genug zu wollen, man muss es auch tun.“

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE (1749 – 1832)

In diesem Kapitel werden die Module des Konzeptes evaluiert. Dazu wurde ein Montagesystem eines deutschen Automobilherstellers als industrielles Umfeld gewählt. Die Evaluation des QCS, konkret der QBS-1 und QBS-2 sowie der QFS-2c, erfolgt mittels Kennzahlenanalyse. Darüber hinaus wird das WII über Experteninterviews evaluiert. Ebenso erfolgt eine Evaluation des QVM durch zwei Simulationen auf Basis fiktiver Daten. Abschließend werden weitere Anwendungsmöglichkeiten beschrieben.

10.1 Evaluation des QBS-1 und QBS-2

Der QBS wurde im September 2016 als Prototyp innerhalb eines Montagesystems eingesetzt. In der Pilotphase wurden lediglich Q-Tore mit der QBS-Methode ausgestattet. Dies umfasste die Rückmeldung und Visualisierung des eigenen Fehleraufkommens (QBS-1) und Fehlerschlupfes (QBS-2). Die Streams QBS-3 und QBS-4 bestehen noch im konzeptuellen Stadium und sind weder implementiert noch mittels Prototypen getestet.

10.1.1 Darstellung der Ausgangssituation

Vor der Einführung des Prototypen wurden Qualitätsprüfer in den Q-Toren mittels analoger Fehlersammellisten unregelmäßig über den eigenen Fehlerschlupf informiert. Diese wurden ggf. durch Beschreibungen und Fotos zum Fehlerbild (i. d. R. in schwarz/weiß) ergänzt. Während des Produktionsprozesses wurden die Qualitätsprüfer über aktuelle Top-Themen durch ihren Qualitätsmanager mündlich informiert, sofern dieser einen telefonischen Hinweis von nachgelagerten Qualitätsprüfern erhalten hat. Die Rückmeldung erfolgte sporadisch und war abhängig von den freien Kapazitäten des meldenden Qualitätsprüfers. Eine Rückmeldung über das eigene Fehleraufkommen fand lediglich in wöchentlichen Gruppenrunden mündlich statt. Der bisherige rückwärtsgerichtete Informationsstrom war somit weder automatisiert noch transparent, sodass auch die Qualitätsregelung nur bedingt effizient war.

10.1.2 Anwendung der Methode

Der Prototyp etabliert ein System, das durch eine Anbindung an die Fehlerdatenbank das zugehörige Fehleraufkommen und den Fehlerschlupf in Echtzeit auf einem Touchscreen anzeigt. Mit Implementierung des QBS-1 und QBS-2 wurden sechs Q-Tore mit 40-Zoll Touchscreens inkl. integrierem Industrierechner ausgestattet. Im Vorfeld wurde das GUI über das agile Vorgehensmodell „Scrum“ in einem Zeitraum von sechs Monaten entwickelt und mit den Qualitätsprüfern iterativ abgestimmt. Abbildung 8.4 zeigt das schematische GUI des Prototypen aus dem WII. Zusätzlich wurden die Qualitätsprüfer im Umgang mit dem Prototypen geschult. Abbildung 10.1 zeigt ein Q-Tor mit dem Prototypen.

Im Rahmen der Evaluation wird ein Zeitraum von Juli 2015 bis Mai 2018 untersucht, sodass sich Daten von 14 Monaten vor und 20 Monaten nach der Einführung des Prototypen ergeben. Für diesen Zeitraum wird die Entwicklung verschiedener Kennzahlen auf Monatsbasis ausgewertet, welche

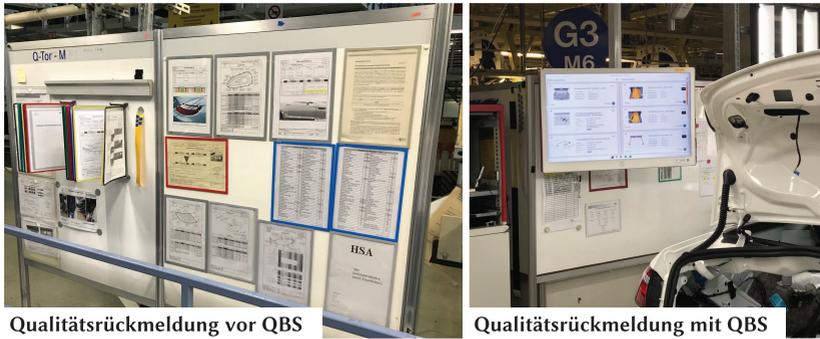


Abbildung 10.1: Implementierung des QBS im Q-Tor

sowohl direkt als auch indirekt einige Qualitätsmerkmale der APQ widerspiegeln. Tabelle 10.1 zeigt die zur Verfügung stehenden Kennzahlen aus dem bestehenden IS sowie die zu bewertenden Qualitätsmerkmale der APQ.

Tabelle 10.1: Kennzahlen zur Evaluation des QBS-1 und QBS-2

| Kennzahlen aus dem IS | Qualitätsmerkmale der APQ |
|---|---------------------------|
| 1. Stückzahl (n) | a. Geradeauslauf (GAL) |
| 2. Geradeauslauf (GAL) | b. Prüfsicherheit |
| 3. Fehleranzahl (f) | c. Qualitätskosten |
| 4. Fehleranzahl pro 100 Fahrzeuge ($f/100$) | |
| 5. Nacharbeitszeit in Minuten (r) | |
| 6. Nacharbeitszeit in Minuten pro 100 Fahrzeuge ($r/100$) | |

10.1.3 Ergebnisse der Evaluation

Zur Evaluation werden die erwähnten Kennzahlen über den betrachteten Zeitraum ausgewertet. Tabelle 10.2 zeigt die Mittelwerte der Kennzahlen auf

Monatsbasis. Dabei wird zwischen einem Zeitraum vor und nach der Einführung des Prototypen unterschieden. Zusätzlich wird die Differenz der Mittelwerte der beiden Zeiträume in absoluter und prozentualer Form angegeben.¹ Die relevante Datenbasis befindet sich in Anhang Q.

Tabelle 10.2: Übersicht der Kennzahlen des Montagesystems

| Montagesystem (Obligatorische Qualitätsprüfung) | | | | | |
|---|---------|---------------|---------------|-----------|---------|
| Kennzahl | Einheit | vor QBS | | Differenz | |
| | | 07/15 – 08/16 | 10/16 – 05/18 | absolut | relativ |
| n | Stück | 22.840 | 23.421 | +581 | +2,55 |
| GAL | Prozent | 78,96 | 81,21 | – | +2,25 |
| f | Stück | 38.300 | 43.901 | +5.601 | +14,62 |
| $f/100$ | Stück | 167 | 187 | +20 | +12,19 |
| r | Minuten | 16.210 | 13.862 | -2.348 | -14,49 |
| $r/100$ | Minuten | 71 | 59 | -12 | -16,64 |

| Montagesystem (Optionale Qualitätsprüfung) | | | | | |
|--|---------|---------------|---------------|-----------|---------|
| Kennzahl | Einheit | vor QBS | | Differenz | |
| | | 07/15 – 08/16 | 10/16 – 05/18 | absolut | relativ |
| n | Stück | 956 | 820 | -136 | -14,26 |
| f | Stück | 805 | 644 | -161 | -20,05 |
| $f/100$ | Stück | 84 | 79 | -5 | -6,12 |
| r | Minuten | 387 | 279 | -108 | -27,87 |
| $r/100$ | Minuten | 41 | 35 | -6 | -15,08 |

Die Kennzahlen für die obligatorische Qualitätsprüfung zeigen eine Steigerung der n um 2,55% bei gleichzeitiger Steigerung des GAL um 2,25%. Trotz des gestiegenen GAL sind dennoch die f um 14,62% und die $f/100$ um 12,19% gestiegen. Zugleich sind jedoch die r um 14,49% und die $r/100$ um 16,64% reduziert. In der optionalen Qualitätsprüfung sind die n um 14,26% zurückgegangen. Ebenfalls rückläufig sind die f um 20,05% und die $f/100$ um 6,12%. Die r für Fehler, die in der optionalen Qualitätsprüfung gefunden wurden, ist dabei um 27,87% und die $r/100$ um 15,08% reduziert.

¹ Die absoluten Werte r wurden auf volle Minuten gerundet. Die relativen Werte $f/100$ und $r/100$ sind ganzzahlig und die relativen Differenzen auf zwei Nachkommastellen gerundet.

Die Evaluation zeigt einen positiven Beitrag zur Qualitätsregelung innerhalb des Montagesystems. Dies drücken vor allem die relativen Kennzahlen GAL, $f/100$ und $r/100$ aus. Zunächst ist der gestiegene GAL des Montagesystems ein Indiz für einen positiven Beitrag des QBS-1 und QBS-2. Jedoch ist der Anstieg der $f/100$ in der obligatorischen Qualitätsprüfung negativ zu bewerten. Dies kann u. a. durch die gestiegene Transparenz bzgl. erforderlicher Qualitätsinformationen im Q-Tor und der folglich gestiegenen Sensibilisierung der Qualitätsprüfer begründet werden. Die Hypothese wird zudem durch die gesunkene $f/100$ in der nachgelagerten optionalen Qualitätsprüfung bestätigt und zeigt so eine Reduzierung des Fehlerschlupfes. Dies ist ein Indiz für eine gestiegene Prüfsicherheit in den Q-Toren der obligatorischen Qualitätsprüfung.

Dennoch wirkt sich ein reduzierter Fehlerschlupf zunächst negativ auf die internen Fehlerkosten aus, da die Fahrzeuge mit entsprechendem Qualitätsmangel nach Montageende ausgeschleust und nachgearbeitet werden. Jedoch reduzieren sich dadurch die externen Fehlerkosten, die nach Auslieferung der Fahrzeuge bei Fehlerentdeckung durch den Kunden entstehen. Folglich werden die Qualitätskosten auf langfristiger Sicht reduziert, da eine schnelle Rückmeldung von Qualitätsinformationen, insbesondere über QBS-3 und QBS-4, das entsprechende Fehlerbild am Entstehungsort isoliert und aufgrund der vorhandenen Transparenz abgestellt. Ebenso fördert dies das Qualitätsempfinden des Kunden und dessen Zufriedenheit mit dem Produkt.

Die Ergebnisse der Evaluation zeigen, dass Indizien für einen positiven Beitrag der Streams QBS-1 und QBS-2 zur Regelung der Produktionsqualität bzw. der APQ vorliegen. Insbesondere die Verbesserung des GAL (+2,55%), der Prüfsicherheit durch den reduzierten Fehlerschlupf (-20,05% bzw. -6,12%) und der Qualitätskosten durch die reduzierten Nacharbeitszeiten (-14,49% bzw. -27,87%) konnten im Rahmen dieser Evaluation nachgewiesen werden.

10.2 Evaluation des QFS-2c

Zur Überwachung der Produktqualität in der Montagelinie wurde im April 2018 ein (technisches) QIS in Form einer kamerabasierten Überprüfung definierter Prüfmerkmale implementiert. Dieses QIS agiert als technisches System im Q-Tor und meldet unzulässige Qualitätsabweichungen an den Qualitätsprüfer. Folglich verkörpert das QIS die technische Implementierung des QFS-2c.

10.2.1 Darstellung der Ausgangssituation

Die Hochzeit² repräsentiert innerhalb des Montageprozesses einen Vorgang mit hohem qualitätskritischen Einfluss. Dabei stellt das Q-Tor der Aggregatevormontage vor der Hochzeit einen entscheidenden Qualitätspunkt dar. Zielsetzung ist es, eine hohe Produktqualität des Antriebsstrangs sicherzustellen, um Störungen bei der Zusammenführung von Karosserie und Antriebsstrang zu vermeiden. Montagefehler führen zu Störungen bei der Hochzeit mit negativen Auswirkungen auf den Geradeauslauf und die Verfügbarkeit sowie auf die Prüfsicherheit und die Qualitätskosten des Montagebands.

Zur Qualitätssicherung wurde die bisherige Qualitätsprüfung dabei ausschließlich durch einen Qualitätsprüfer über den klassischen Qualitätsprüfprozess umgesetzt. Die Qualitätsprüfung des Antriebsstrangs umfasst verschiedene Prüfmerkmale, welche auf Anwesenheit, Varianz und Position zu überprüfen sind. Dabei sind zwei wesentliche Kritikpunkte erkennbar. Erstens ist die Qualitätsprüfung des Antriebsstrangs durch einen stark monotonen Prüfprozess gekennzeichnet. Jeder Antriebsstrang besitzt die identischen Prüfumfänge, Prüfmerkmale und Prüfschritte. Eine Varianz der Bauteile ist nur selten bei besonderen Fahrzeugen (z. B. Sportedition) zu erwarten. Zweitens lässt sich aus den historischen Kennzahlen ein

² Der Begriff „Hochzeit“ bezeichnet den Verbund von Karosserie und Antriebsstrang.

nennenswerter Fehlerschlupf erkennen, der in der Vergangenheit zu Störungen in der Hochzeit und Bandstopps führte. Beides trägt negativ zur Produktionsqualität und Effizienz der Montage bei.

10.2.2 Anwendung der Methode

Zur Vermeidung monotoner Arbeit und Gewährleistung einer hohen Prüfsicherheit wurde der QFS-2c im Q-Tor der Aggregatevormontage implementiert. Es wurde ein QIS mit sechs Kameras zur Abdeckung möglichst vieler Bereiche des zu prüfenden Antriebsstrangs verwendet. Das System wurde über das Montageband innerhalb des Q-Tors installiert und durch einen Touchscreen zur Ergebnisvisualisierung neben dem Montageband ergänzt. Über den Touchscreen quittiert der Qualitätsprüfer die Prüfergebnisse des QIS.

Als Bildverarbeitungsverfahren wird das CAD-basierte Tracking³ eingesetzt (vgl. Abbildung 7.4). Die zur Qualitätsprüfung relevante Referenz kann dabei dem virtuellen Zwilling des Antriebsstrangs entnommen werden – virtuelle Referenzen stellen somit den Ankerpunkt der Qualitätsprüfung dar. Das virtuelle CAD-Modell wird mit dem realen Betrachtungsobjekt über deren Kanten verglichen und dadurch qualitätskritische Abweichungen identifiziert. Ein direkter Vergleich der CAD-Komponenten mit dem realen Antriebsstrang ermöglicht dabei eine schnelle Reaktion auf identifizierte Qualitätsabweichungen.

Abbildung 10.2 zeigt die Implementierung des QIS. Eine identifizierte Qualitätsabweichung wird durch das QIS (Bild a) über ein Lichtsignal am Q-Tor und einer CAD-Visualisierung (Bild b) gemeldet. Zugleich wird die Abweichung auf dem Touchscreen visualisiert (Bild c). Dort wird der Fehler durch den Qualitätsprüfer entweder als „n. i. O.“ quittiert oder als „i. O.“ korrigiert.

³ Vgl. [PIE17; TAM10; YES05].

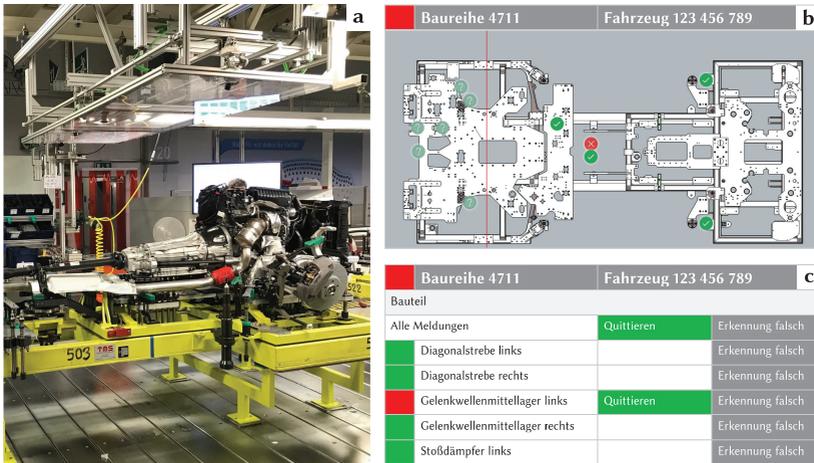


Abbildung 10.2: Implementierung des QFS-2c im Q-Tor

Für den Zeitraum von April 2017 bis August 2018 werden im Rahmen dieser Evaluation diverse Kennzahlen für das relevante Montageband zur Aggregatevormontage überprüft. Tabelle 10.3 zeigt die zur Verfügung stehenden Kennzahlen aus dem bestehenden IS sowie die zu bewertenden Qualitätsmerkmale der APQ.

Tabelle 10.3: Kennzahlen zur Evaluation des QFS-2c

| Kennzahlen aus dem IS | Qualitätsmerkmale der APQ |
|---|----------------------------|
| 1. Stückzahl (n) | a. Geradeauslauf (GAL) |
| 2. Geradeauslauf (GAL) | b. Verfügbarkeit |
| 3. Fehleranzahl in Hochzeit (f) | c. Prüfsicherheit |
| 4. Fehleranzahl in Hochzeit pro 100 Fahrzeuge ($f/100$) | d. Hours Per Vehicle (HPV) |
| 5. Störungsdauer in Hochzeit in Sekunden (STD) | e. Qualitätskosten |
| 6. Anzahl der Qualitätsprüfer pro Schicht (PRÜ) | |

10.2.3 Ergebnisse der Evaluation

Die Auswertung der Kennzahlen über den betrachteten Zeitraum liefert konkrete Indizien für einen positiven Beitrag des QFS-2c zur APQ. Tabelle 10.4 zeigt die Mittelwerte der Kennzahlen auf Monatsbasis für das relevante Montageband der Aggregatevormontage. Dabei wird zwischen einem Zeitraum vor und nach der Einführung des QIS unterschieden. Zusätzlich wird die Differenz der Mittelwerte der beiden Zeiträume in absoluter und prozentualer Form angegeben.⁴ Eine detaillierte Datenbasis befindet sich in Anhang R.

Tabelle 10.4: Übersicht der Kennzahlen des Montagesystems

| Montageband | | | | | |
|-------------|----------|---------------|---------------------------|-----------|---------------|
| Kennzahl | Einheit | vor QFS | | Differenz | |
| | | 04/17 – 03/18 | nach QFS 04/18 – 07/18 | absolut | relativ |
| n | Stück | 23.442 | 22.963 | -479 | -2,05 |
| GAL | Prozent | 81,67 | 85,52 | - | +3,86 |
| PRÜ | Personen | 1 | 0 | -1 | -100 |
| Hochzeit | | | | | |
| Kennzahl | Einheit | vor QFS | | Differenz | |
| | | 04/17 – 03/18 | nach QFS 04/18 – 07/18 | absolut | relativ |
| f | Stück | 2.125 | 1.549 | -576 | -27,12 |
| $f/100$ | Stück | 9 | 7 | -2 | -25,87 |
| STD | Sekunden | 428 | 233 | -195 | -45,64 |

Die Auswertung zeigt eine Reduzierung der n um 2,05%⁵ bei gleichzeitiger Steigerung des GAL um 3,86% innerhalb des Montagebands. Zudem sind die f und die $f/100$ in der nachgelagerten Hochzeit um 27,12% bzw. 25,87% zurückgegangen. Ebenso wurde die STD in der Hochzeit mit einer Reduzierung um 45,64% fast halbiert. Eine Besonderheit stellt insbesondere die Substitution des bisherigen Qualitätsprüfers durch das QIS und die Reduzierung des Einsatzes menschlicher Qualitätsprüfschritte um 100% dar.

⁴ Die relativen Werte $f/100$ sind ganzzahlig und die relativen Differenzen auf zwei Nachkommastellen gerundet.

⁵ Die Stückzahl des Montagebands ist identisch mit der Stückzahl des Montagesystems.

Die Ergebnisse der Evaluation zeigen einen deutlichen Mehrwert des QFS-2c zur Qualitätsregelung. Erkennbar ist dies am gesteigerten GAL, welcher u. a. auf die Einführung der QBS-1 und QBS-2 zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 10.1). Der positive Beitrag wird insbesondere durch die reduzierten f und $f/100$ in der Hochzeit deutlich. Gemeinsam mit der Reduzierung der STD in der Hochzeit liefern die Ergebnisse konkrete Indizien zur Regelung APQ. Folglich steigert der QFS-2c neben dem Geradeauslauf auch die Prüfsicherheit des Q-Tors und somit die Verfügbarkeit der nachgelagerten Hochzeit.

Durch die Einsparung eines Qualitätsprüfers kann zudem eine Reduzierung der HPV festgestellt werden. Bereits in der zweiten Woche nach Einführung des Systems war eine Qualitätsprüfung des Antriebsstrangs durch einen Qualitätsprüfer nicht mehr notwendig. Die Zuverlässigkeit des QIS lag bzw. liegt auf einem sehr hohen Niveau. Die (monotone) Qualitätsprüfung wurde somit vollständig an das QIS verlagert und der bisherige Qualitätsprüfer zum Unterstützer bzw. Nacharbeiter qualifiziert. Im Falle einer Qualitätsmeldung durch das QIS wurde der Unterstützer rechtzeitig informiert, um den Qualitätsmangel zu beheben. Anhand der Kennzahlen lässt sich auch hier die Zuverlässigkeit dieses Prozesses erkennen. Ein konkreter Wert zu den HPV auf Bandebene liegt im Rahmen dieser Evaluation jedoch nicht vor und kann auch nicht zuverlässig über die bestehenden Daten abgeleitet werden. Weiterhin ergibt sich durch die Einsparung eines Qualitätsprüfers eine Reduzierung der Prüfkosten und folglich der Qualitätskosten.

Insgesamt ist ein positiver Beitrag zur Qualitätsregelung durch den QFS-2c zu erkennen. Die Vermeidung bzw. schnelle Identifikation und Nacharbeit von Fehlern in der Aggregatevormontage verhindert Störungen im qualitätskritischen Prozess der Hochzeit. In dieser Evaluation konnte eine Verbesserung der Qualitätsmerkmale der APQ nachgewiesen werden.

10.3 Evaluation des WII

Zur Evaluation des WII wurden simulierbare Prototypen zu den einzelnen Sichten entwickelt. Zur Montagesicht und Nacharbeitssicht wurden funktionsfähige Prototypen auf PowerPoint-Basis mit Beispieldaten entwickelt. Die Qualitätsprüfsicht besteht jedoch bereits in Anwendung durch die Implementierung des QBS-1 und QBS-2 (vgl. Abschnitt 10.1) sowie des QFS-2c (vgl. Abschnitt 10.2). Diese Prototypen werden als Grundlage zur Evaluation herangezogen.

Die Evaluation des WII erfolgt mittels Experteninterviews über vordefinierte Thesen bzgl. der Norm ISO/IEC 25030 und der Normenreihe DIN EN ISO 9241. Die theoretische Basis des Experteninterview wurde bereits in Abschnitt 6.2 erläutert, sodass ausschließlich neue Grundlagen beschrieben werden.

10.3.1 Methodischer Ansatz

Experteninterviews können der qualitativen oder der quantitativen Forschung zugeordnet werden. Der Begriff „quantitativ“ definiert die Abbildung des empirischen Relativs auf ein numerisches Relativ [RAI08]. Quantitative Interviews zeichnen sich u. a. durch die Verwendung standardisierter Fragebögen aus, die auf eine Quantifizierung und Repräsentativität abzielen [BOG14].

Zu Beginn des Experteninterviews werden den Experten die Problemstellung und das Konzept zur Problemlösung vorgestellt. Die Experten sollen die Umsetzbarkeit und den Beitrag zur APQ des WII bewerten. Identische Fragen für alle Experten schaffen dabei einen repräsentativen Konsens mit einer deutlichen Aussagekraft. Durch eine Einschätzung zu definierten Thesen auf einer Intervallskala sollen die Ergebnisse quantifiziert werden. Neben diesem quantitativen Ansatz soll zudem ein qualitativer Ansatz verfolgt werden, indem die Meinung der Experten begründet werden sollen. Die Einschätzung soll zu einem teilweise offenen Gespräch und damit

zu einem Informationsgewinn für die Evaluation und künftige Weiterentwicklung des WII führen. Im Gegensatz zu den geführten qualitativen Experteninterviews zur Erhebung relevanter Qualitätsmerkmale der APQ in Abschnitt 6.2 werden hier sowohl qualitative als auch quantitative Elemente während der Experteninterviews verwendet.

Tabelle 10.5 zeigt Möglichkeiten zur Klassifikation von Interviews in der quantitativen Forschung [RAI08]. Dabei sind die auf diese Evaluation zutreffenden Punkte farblich hinterlegt. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Interviews sind teilstrukturiert, da ein Gesprächsleitfaden verwendet wird. Es werden Einzelgespräche durchgeführt, damit eine unabhängige Meinungsäußerung ermöglicht und eine Repräsentativität der Ergebnisse erreicht wird. Alle Gespräche werden persönlich durchgeführt.

Tabelle 10.5: Klassifikation quantitativer Interviews

| Bereich | Klassifikation |
|--------------------|--|
| Kommunikationsform | Wenig strukturiert / nicht standardisiert (z. B. narratives Interview) |
| | Teilstrukturiert / teilstandardisiert (z. B. Leitfadengespräch) |
| | Stark strukturiert / standardisiert (z. B. Panelbefragung) |
| Kommunikationsart | Schriftlich |
| | Mündlich |
| Befragungssetting | Einzelperson |
| | Gruppe |
| Durchführungsform | Schriftlich (z. B. Fragebogen, Surveys) |
| | Internetgestützt (z. B. Online-/ Email-Befragungen, Web-Surveys) |
| | Mündlich / persönlich („Face-to-face“-Interview) |
| | Telefonisch (Telefoninterview) |

10.3.2 Auswahl der Experten

Damit eine aussagekräftige Bewertung für das WII erfolgen kann, müssen Personen mit entsprechender Expertise in den relevanten Prozessen (vgl. Unterabschnitt 3.2.5) als Experten ausgewählt werden. Idealerweise sind dies Personen, die in Zukunft mit dem WII arbeiten werden. Für die Interviews wurden insgesamt 15 Experten eines deutschen Automobilherstellers ausgewählt und eingeladen. Bei den Experten handelt es sich um Mitarbeiter im Montagesystem. Es wird im Rahmen dieser Evaluation bewusst auf eine Einbindung fachlicher Experten (Montageplaner, IT-Spezialisten) verzichtet, da nach agilem Verständnis der Nutzer des WII das System bestmöglich bzgl. der Anwendbarkeit bewerten kann:

1. Experten des Montageprozesses

- a) Drei erfahrene Monteure (Stammebelegschaft)
- b) Drei weniger erfahrene Monteure (Ferienarbeiter)

2. Experten des Unterstützungsprozesses

- a) Drei erfahrene Unterstützer (Stammebelegschaft)

3. Experten des Qualitätsprüfprozesses

- a) Drei erfahrene Qualitätsprüfer (Stammebelegschaft)
- b) Drei weniger erfahrene Qualitätsprüfer (Ferienarbeiter)

Für den Montageprozess und Qualitätsprüfprozess werden sowohl erfahrene als auch weniger erfahrene Monteure als Experten zum Interview herangezogen, da das WII für alle Mitarbeiter, unabhängig vom Erfahrungsgrad, nutzbar sein soll. Als Unterstützer arbeiten ausschließlich erfahrene Mitarbeiter, sodass für diese Rolle keine unerfahrenen Mitarbeiter befragt werden können.

Sowohl die Nacharbeiter als auch die Qualitätsmanager und -ingenieure wurden im Rahmen dieser Evaluation nicht herangezogen. Hintergrund ist die fehlende Sicht für diese Rollen. Das WII beinhaltet in seiner derzeitigen Form entsprechende Sichten für den Monteur, Unterstützer und Qualitätsprüfer, folglich also für alle Rollen innerhalb der Montagelinie.

Eine adäquate Sicht für den Nacharbeiter sowie Qualitätsmanager bzw. -ingenieur befindet sich aktuell noch in der Konzeptionsphase.

10.3.3 Vorbereitung des Gesprächsleitfadens

Das Interview soll thematisch neben der allgemeinen Darstellung, Funktionen und technischen Ausstattung in die drei Bausteine des WII (vgl. Abschnitt 8.3-8.5) eingeteilt werden. Zu jedem Bereich werden Thesen vorgestellt, die der Experte auf einer Skala von 1 (zutreffend) bis 5 (nicht zutreffend) und X (keine Aussage) bewerten soll. Die Bewertung über sechs Antwortmöglichkeiten soll irrelevante Feinheiten vermeiden und schnelle Antworten ermöglichen. Die Thesen sind positiv formuliert, sodass eine Zustimmung positiv für das WII ist. Anhang S zeigt die Thesen zur Evaluation. Neben der quantitativen Einschätzung wird der Experte im Bedarfsfall gebeten, seine Meinung zu erläutern. Dadurch können zusätzlich wichtige Informationen gewonnen werden.

10.3.4 Ergebnisse der Experteninterviews

Zur Auswertung von Experteninterviews gibt es keine allgemeingültige Methode [BOG14]. Daher ist es üblich, das Auswertungsverfahren auf die eigenen Anforderungen zuzuschneiden. Für die Auswertung qualitativ-informativischer Interviews ist die qualitative Inhaltsanalyse eine geeignete Methode. Diese beinhaltet folgende fünf Schritte [BOG14]:

1. Fragestellung und Materialauswahl
2. Aufbau eines Kategoriensystems
3. Extraktion
4. Aufbereitung der Daten
5. Auswertung

Die Auswertung der Interviews wurde nach dieser Methode vorgenommen. Die Punkte 1 und 2 wurden bereits während der Konstruktion des Gesprächsleitfadens festgelegt. Eine erste Extraktion fand im Laufe der

Interviews statt. Die Aufbereitung der Daten und Auswertung wurde darauffolgend im Anschluss durchgeführt. Anhang S zeigt die quantitativen Ergebnisse der Interviews.

Aufgrund der (im Verhältnis zur Belegschaft) geringen Anzahl von 15 befragten Experten sollen die Ergebnisse lediglich als Orientierung zur Bewertung des WII dienen. Es zeigt sich, dass die deutliche Mehrheit der Thesen eine zustimmende Bewertung seitens der Experten erhalten haben. Lediglich die These 4e „Die bildhafte Darstellung der Bauteile ist eine hilfreiche Unterstützung“ ist mit einem Mittelwert von 3 (weder noch) am schlechtesten bewertet.

Die *allgemeine Darstellung* der Sichten des WII bzgl. Lesbarkeit und Platzierung der Informationen wird von den Experten sehr positiv bewertet. Ebenso werden auch die *allgemeinen Funktionen* in der Mehrheit als wertschöpfend empfunden. Wenige Experten konnten für ihren spezifischen Bereich jedoch weder eine zeitliche Einsparung noch einen Mehraufwand erkennen. Zudem waren sich wenige Experten bzgl. der Zuverlässigkeit und Robustheit unsicher und enthielten sich entsprechend einer Bewertung. Die *technische Ausstattung* wurde ebenfalls positiv bewertet, insbesondere die mobilen Endgeräte. Ein Monteur äußerte den Vorschlag, ein Tablet im Fahrzeug zu platzieren, statt jede Montagestation mit einem Endgerät auszustatten. Dies wird aus verschiedenen Kritikpunkten nicht verfolgt. Weiterhin konnten zwei Experten die Robustheit der Geräte nicht einschätzen und enthielten sich der Bewertung.

Zur Bewertung der *montagebezogenen Bausteine* wurden lediglich die sechs Monteure als Experten hinzugezogen, da Qualitätsprüfer und Unterstützer mit diesen Bausteinen nicht in klassischer Form interagieren. Auch hier zeigt sich mehrheitlich ein positives Bild der Bewertung. Im Rahmen der Experteninterviews wurde deutlich, dass erfahrene und weniger erfahrene Monteure unterschiedliche Informationen benötigen und folglich die Informationsdarstellung unterschiedlich bewerten. So haben erfahrene Monteure signalisiert, dass sie (wenn überhaupt) wenige Basisinformationen benötigen und bereits anhand der Baureihe erkennen, welche Bauteile

sie benötigen und welche Montageschritte notwendig sind. Komplette Fahrzeuginformationen und zusätzliche CAD-Bilder der Bauteile sind für diese Gruppe daher obsolet. Andererseits haben weniger erfahrene Monteure signalisiert, dass strukturiert angeordnete Basisinformationen in Kombination mit Fachinformationen und Bauteilfotos eine hilfreiche Alternative zu den bisherigen Codes des Montageplakats sind. Ebenso verhält sich die Bewertung bzgl. der digitalen Montageanleitung. Erfahrene Monteure sehen keinen Bedarf, während weniger erfahrene Monteure dies als hilfreiche Montageassistenten sehen. Ein weniger erfahrener Monteur berichtet zudem, dass ihm weitere Detailinformationen zu den einzelnen Schritten fehlen und diese weiter ausgebaut werden sollten. Ein Konsens in der Bewertung findet sich allerdings bzgl. der Stempelfunktion, welche alle Monteure uneingeschränkt positiv bewertet haben. Insbesondere die Erinnerungsfunktion, falls ein dokumentationspflichtiger Montageschritt nicht quittiert wurde, bewerteten die Experten sehr positiv.

Die *qualitätsbezogenen Bausteine* betreffen sowohl die Gruppe der Monteure als auch die Gruppe der Qualitätsprüfer. Jedoch beziehen sich die Thesen auf spezifische Sichten des WII, was im Rahmen der Bewertung berücksichtigt werden muss. Die Darstellung der Qualitätsrückmeldung (QBS-3) wurde von den Monteuren im Mittelwert zwar bedingt positiv bewertet, dennoch ist diese für einige Monteure zu detailliert. Ein Monteur kann aufgrund sprachlicher Barrieren die Informationen nicht verarbeiten und enthielt sich der Bewertung. Die Visualisierung von Fehleraufkommen (QBS-1) und Fehlerschlupf (QBS-2) wurde mehrheitlich positiv bewertet. Jedoch berichtet die Hälfte der Qualitätsprüfer, dass sie den Fehlerschlupf nicht berücksichtigen, da die Top-Fehler in den wöchentlichen Gruppengesprächen mitgeteilt werden. Diese Aussage zeigt, dass hier noch intensiv am „Mindset“⁶ bzgl. Echtzeitrückmeldung und Qualität gearbeitet werden muss. Des Weiteren wurde von allen Experten die digitale Nacharbeitssteuerung (QFS-1) positiv bewertet. Hier wurde insbesondere die einfache Nacharbeitsmeldung und

⁶ Der englische Begriff „Mindset“ ist im industriellen Sprachgebrauch etabliert und beschreibt die Denkweise bzw. Mentalität einer Person.

der automatische Versand aller relevanten Informationen an den Unterstützer gelobt.

Abschließend wurden die *nacharbeitsbezogenen Bausteine* von den drei Unterstützern bewertet, da die Funktionen lediglich ihnen zur Verfügung stehen. Auch hier ist eine hohe Übereinstimmung mit der anwenderorientierten Darstellung und den wertschöpfenden Funktionen der Nacharbeitssteuerung vorzufinden. Besonders hervorgehoben wurde die automatisierte Priorisierung offener Nacharbeiten, sofern diese denn auch wegeoptimiert sei, und die einfache Weiterleitung von Nacharbeiten an den Nacharbeiter (QFS-3b). Angemerkt wurde allerdings von einem Unterstützer, dass er einige Informationen (aktuelle Station des Fahrzeugs / Kopfzeile) nicht benötigt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das WII in seiner konzeptuellen Form im Rahmen dieser Evaluation deutlich positiv von den Experten bewertet wurde. Es zeigt sich, dass es unterschiedliche Gruppen der einzelnen Rollen gibt, welche einen unterschiedlichen Informationsbedarf haben. Insbesondere die Erfahrung der Monteure ist ein Kriterium, welches über die erforderliche Informationstiefe bestimmt. Es gilt daher, einen Mittelweg der anwendergerechten Visualisierung von montage- und qualitätsrelevanten Informationen zu finden. Denkbar wäre auch, zwei bis drei unterschiedliche Detailsichten, welche nutzerspezifisch gewählt werden können, den Mitarbeitern anzubieten. So können weniger erfahrene Mitarbeiter einen „Anfängermodus“ wählen, während erfahrene Mitarbeiter einen „Expertenmodus“ nutzen. Dies schafft eine anwenderorientierte Darstellung von Informationen. Dennoch muss neben der technischen Implementierung ebenfalls das Mindset einiger Mitarbeiter weiterentwickelt werden. Wie in Tabelle 4.7 bzw. Anhang G beschrieben, existieren ebenfalls Anforderungen an die Nutzer, um eine effiziente Qualitätsregelung im hybriden Kontext zu erreichen.

10.4 Evaluation des QVM

Die Evaluation des QVM soll anhand von zwei Simulationsbeispielen erfolgen. Zunächst wird die APQ mit den spezifischen acht Qualitätsmerkmalen über das QVM dargestellt. Als Betrachtungsobjekt wird hier eine Montagehalle gewählt. Des Weiteren wird die Produktqualität einer Kombination mehrerer Betrachtungsobjekte visualisiert. Als initiale Betrachtungsobjekte werden eine Baureihe und eine Montagehalle miteinander kombiniert. Die Daten der beiden Simulationen basieren auf fiktiven Werten, welche jedoch praxisnah der Automobilindustrie angelehnt sind.

10.4.1 Visualisierung der APQ durch das QVM

Die Qualitätsmerkmale $m_{k,j}$ der APQ repräsentieren die montagespezifische Produktionsqualität einer Montagehalle einer Großserienproduktion⁷ (isolierte Betrachtung). Die Produktion erfolgt im Dreischicht-Betrieb mit einer Taktzeit von zwei Minuten. Der Betrachtungszeitraum H umfasst eine Woche (sechs Tage, 18 Schichten). Tabelle 10.6 zeigt die Kennzahlen der APQ. Eine detaillierte Berechnung ist in Anhang T dargestellt.

Tabelle 10.6: Werte zur APQ

| $m_{k,j}$ | $\lambda(w(m_{k,j}))$ | $\lambda(s_{min}(m_{k,j}))$ | $\lambda(t_{min}(m_{k,j}))$ | $q_B(m_{k,j})$ |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| Geradeauslauf | 0,8796 | 0,93 | 0,9 | <i>false</i> |
| Verfügbarkeit | 0,8674 | 0,95 | 0,9 | <i>false</i> |
| Hours Per Vehicle | 0,894 | 0,9 | 0,85 | <i>true</i> |
| Energieverbrauch | 1 | 1 | 1 | <i>true</i> |
| Abfallproduktion | 1 | 1 | 1 | <i>true</i> |
| Prüfsicherheit | 0,8323 | 0,93 | 0,9 | <i>false</i> |
| Maßnahmenerfolg | 0,75 | 0,7 | 0,6 | <i>true</i> |
| Qualitätskosten | 0,8848 | 0,93 | 0,9 | <i>false</i> |
| $APQ_B = false \quad APQ_Q = 0,8885$ | | | | |

⁷ Jahresproduktionsplan von 300.000 Fahrzeugen.

Die relativen Zielerreichungsgrade $\lambda(w(m_{k,j}))$ wurden nach Formel 9.10 berechnet. Über die Sicherheits- und Toleranzgrenzen $\lambda(s_{min}(m_{k,j}))$ bzw. $\lambda(t_{min}(m_{k,j}))$ kann eine Qualitätsaussage getroffen werden. Der binäre Qualitätswert $q_B(m_{k,j})$ zeigt die Erfüllung der Qualitätsanforderungen je Qualitätsmerkmal. Diese Aussage je Merkmal nach Formel 6.14 führt in Summe nach Formel 6.16 zu einem binären Qualitätswert APQ_B . Durch die Ermittlung des quantitativen Qualitätswertes APQ_Q über Formel 6.22 wird zudem eine quantitative Qualitätsbewertung ermöglicht.

Die Werte aus Tabelle 10.6 können nun in das QVM übertragen und als Schicht visualisiert werden. Eine individuelle Gewichtung der Qualitätsmerkmale $m_{k,j}$ erfolgt nicht, sodass je Merkmal eine Gleichgewichtung vorliegt:

$$\beta(w(m_{k,j})) = \frac{360^\circ}{8} = 45^\circ \quad (10.1)$$

Abbildung 10.3 zeigt das QVM zur Visualisierung der APQ. Zur direkten Sichtbarkeit von Grenzverletzungen sind die Flächen der Merkmale $A(w(m_{k,j}))$ in Analogie zur Clusteranalyse (vgl. Unterabschnitt 9.2.1) eingefärbt.

Über die Schicht im QVM ist die bestehende Qualitätssituation direkt und deutlich erkennbar. Zum einen stellt die Schicht die Gesamtsituation der APQ in leicht verständlicher Weise und schnell ablesbar dar. Es ist somit anhand der vorhandenen roten Flächen zu erkennen, dass die Qualitätsanforderungen der APQ nicht bzw. nur in Teilen (grün und gelb) erfüllt wurden. Zum anderen ist sofort ersichtlich, welche Qualitätsmerkmale ihre Qualitätsanforderungen

1. vollständig erfüllen (grün),
2. mit Einschränkungen erfüllen und beobachtet werden sollten (gelb) sowie
3. nicht erfüllen und geregelt werden müssen (rot).

Das Qualitätsmerkmal HPV unterschreitet die untere Sicherheitsgrenze. Der Verlauf sollte hier stärker überwacht und ggf. über Maßnahmen geregelt

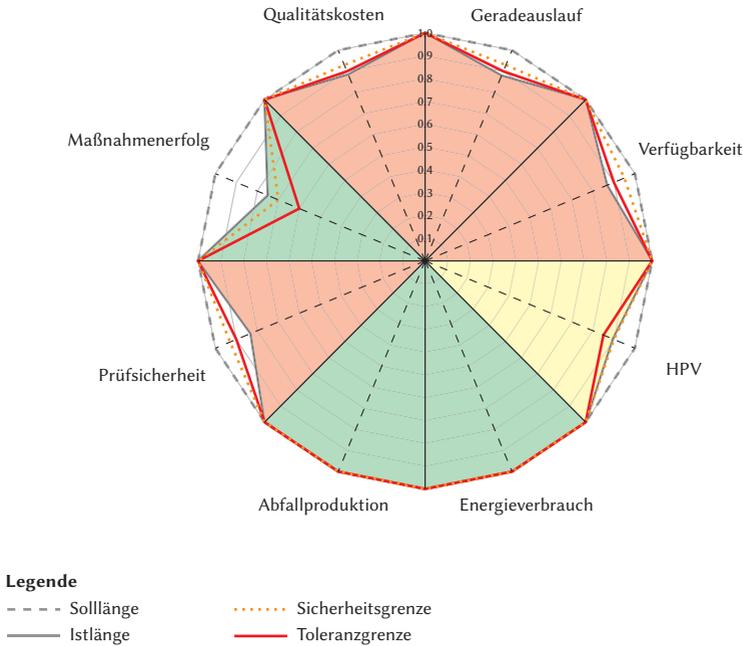


Abbildung 10.3: QVM zur Visualisierung der APQ

werden. Kritisch zu bewerten sind jedoch die Qualitätsmerkmale Geradeauslauf, Verfügbarkeit, Prüfsicherheit und Qualitätskosten. Diese verletzen ihre individuellen Toleranzgrenzen und erfüllen nicht die gesetzten Qualitätsanforderungen. Die weiteren Qualitätsmerkmale Energieverbrauch, Abfallproduktion und Maßnahmenerfolg weisen keine relevanten Abweichungen auf.

Die Qualitätssituation der Montagehalle kann auf dieser Basis bewertet werden. Für die binäre Qualitätsbewertung APQ_B ergibt sich der Wert *false*, da vier Qualitätsmerkmale außerhalb ihrer Toleranzgrenzen liegen. Somit sind vier Qualitätsanforderungen nicht erfüllt und folglich die gesamte Qualität als „n. i. O.“ zu bewerten. Die quantitative Qualitätsbewertung APQ_Q ergibt dabei einen Wert von 0,8885 bzw. einen Zielerreichungsgrad von 88,85%.

Der Anwender des QVM kann über diese Darstellung geeignete Maßnahmen zur Qualitätsregelung der APQ ableiten. Für merkmalspezifische Handlungsmaßnahmen können über die detailliertere Kartenansicht zusätzlich die einzelnen Merkmalsausprägungen je Qualitätsmerkmal betrachtet werden. Dies liefert wichtige Informationen für eine adäquate Qualitätsregelung. Abbildung 10.4 zeigt die Kartenansicht für den Geradeauslauf auf Basis des Mittelwertes⁸ pro Schicht⁹.

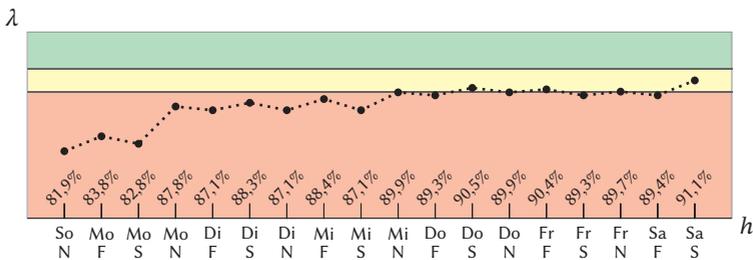


Abbildung 10.4: Kartenansicht zur Visualisierung des Geradeauslaufs

Auf der Netz- und Kartenansicht aufbauend können die darunterliegenden Betrachtungsebenen (Montageabschnitte, Meistereien und Montagestationen) auf einer Schicht visualisiert und analysiert werden (vgl. Abbildung 9.14). Dies ermöglicht es, Probleme präziser im Montagesystem zu lokalisieren und zu beheben. Auf weitere Analysen wird in dieser Evaluation verzichtet.

⁸ Der Mittelwert ist auf eine Nachkommastelle gerundet.

⁹ N = Nachtschicht, F = Frühschicht, S = Spätschicht.

10.4.2 Visualisierung der Produktqualität durch das QVM

Damit Handlungsempfehlungen zur produktspezifischen Qualitätsregelung abgeleitet werden können, empfiehlt sich eine Betrachtung der Produktqualität im QVM. Durch Festlegung der Regelungsprioritäten können systematische Fehler schnell identifiziert und die Montageprozesse effizienter geregelt werden. Analog zu Unterabschnitt 10.4.1 wird auf der höchsten Betrachtungsebene (Montagehalle) begonnen und sukzessiv über die Hierarchien bis auf Bauteilebene analysiert (organisationsbezogene Betrachtung).

Die zwei Objekte „Baureihe“ und „Montagehalle“ werden zu einem Betrachtungsobjekt kombiniert. Zusätzlich wird pro Betrachtungsebene ein weiteres Objekt hinzugefügt, um den Betrachtungsbereich zu konkretisieren. Im Verlauf der einzelnen Betrachtungsebenen verändern sich die Merkmale sowie die Semantik der Ausprägung und des Gewichtungsfaktors. Insgesamt umfasst das Beispiel fünf Betrachtungsebenen. Diese werden durch den Index k repräsentiert und charakterisieren sich nach Tabelle 10.7.

Tabelle 10.7: Betrachtungsebenen zur Produktqualität

| k | o_k | $m_{k,j}$ | $\lambda(w(m_{k,j}))$ | $\beta(m_{k,j})$ |
|-----|--------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | Baureihe & Montagehalle | Montageabschnitte | Fehleranteil | Nacharbeitskostenanteil |
| 2 | o_1 & Montageabschnitt | Montage- meistereien | Fehleranteil | Nacharbeitskostenanteil |
| 3 | o_2 & Montagemeisterei | Montage- stationen | Fehleranteil | Nacharbeitskostenanteil |
| 4 | o_3 & Montagestation | Bauteile | Fehleranteil | Nacharbeitskostenanteil |
| 5 | o_4 & Bauteil | Prüfmerkmale | Zielerreichung | Priorität |

Innerhalb der Betrachtungsebenen 1 - 4 erfolgt die Ausprägung der Merkmale auf Basis des Fehleranteils sowie der Gewichtungsfaktor der Merkmale auf Basis des Nacharbeitskostenanteils. Zielsetzung ist es, Ausprägung und

Winkel pro Merkmal so klein wie möglich zu erreichen. Durch die Verknüpfung von Fehler- und Nacharbeitskostenanteil repräsentieren die Flächen der Merkmale im QVM einen entscheidenden Wert zur Qualitätsregelung. Anhand der Flächengröße werden die Regelungsprioritäten¹⁰ festgelegt.

Diese Methode führt schrittweise zu den Qualitätsabweichungen mit höchster Priorität. In Betrachtungsebene 5 erfolgt die Betrachtung von Qualitäts- und Prüfmerkmalen auf Basis der Zielerreichungsgrade als Ausprägung sowie die individuelle Gewichtung der Merkmale als Winkel. Im Fokus dieser Evaluation steht die Visualisierung der Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes mittels QVM. Somit werden lediglich die Schichten des QVM dargestellt. Die Werte¹¹ der Betrachtungsebenen 1 - 4 sowie die detaillierten Werte der Schichten sind in Anhang U beigefügt. Die Werte der Betrachtungsebene 5 finden sich am Ende des Unterabschnittes.

Betrachtungsebene 1

Im Betrachtungszeitraum H wurden 924 Bruttofehler und 61.250 Euro Nacharbeitskosten bzw. Fehlerkosten in der Montagehalle ermittelt (vgl. Anhang T). Diese lassen sich auf Stationsebene zuordnen. Die Zuordnung auf die nächste Ebene (vgl. Abbildung 3.3) wird durch Tabelle U.1 in Anhang U dargestellt. Anhand der ermittelten Flächen $A(w(m_{1,j}))$ kann eine Priorisierung der Regelungsreihenfolge durchgeführt werden. Folglich besitzt der Montageabschnitt mit der größten Fläche die höchste Priorität. Abbildung 10.5 stellt die Betrachtungsebene 1 auf einer Schicht dar. Die relevanten Werte zur Fläche sind in Tabelle U.5 in Anhang U hinterlegt. Die fünf Montageabschnitte werden als Qualitätsmerkmale abgebildet. Montageabschnitt 3 weist sowohl den höchsten Fehleranteil als auch den höchsten Nacharbeitskostenanteil auf, sodass die aufgespannte Fläche $A(w(m_{1,3}))$ am größten ist. Der Montageabschnitt 3 muss somit über eine eigene Schicht im Detail analysiert werden.

¹⁰ Die Flächen werden nach Priorität in der Farbe petrol (Priorität 1 - 3) oder grau (Priorität >3) eingefärbt.

¹¹ Die Werte bestehen aus der Fehleranzahl bzw. dem -anteil und den Fehlerkosten bzw. dem -anteil sowie der Gewichtung und der Fläche des Merkmals.

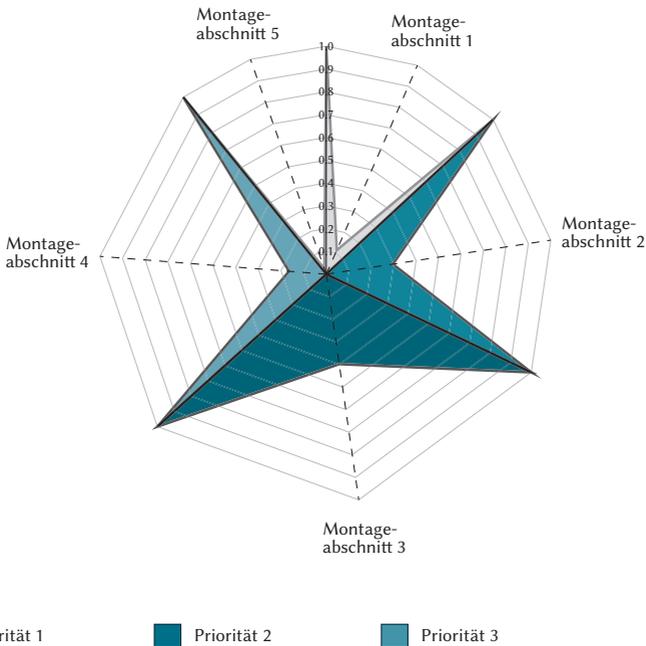


Abbildung 10.5: QVM der Betrachtungsebene 1

Betrachtungsebene 2

In der zweiten Betrachtungsebene wird der Montageabschnitt 3 untersucht und über eine Schicht visualisiert. Dieser gliedert sich in drei Montagemeistereien auf, denen 368 Fehler und 19.150 Euro Nacharbeitskosten zugeordnet werden können. Tabelle U.2 in Anhang U zeigt die Werte der Betrachtungsebene 2. Bei der Visualisierung auf Betrachtungsebene 2 über eine weitere Schicht im QVM werden dem Anwender die drei Meistereien mit jeweiliger Ausprägung (Fehleranteil) und entsprechendem Gewichtungsfaktor (Fehlerkostenanteil) dargestellt. Abbildung 10.6 zeigt die Betrachtungsebene 2 im QVM, deren konkrete Werte in Tabelle U.6 in Anhang U zu finden sind. Die Visualisierung zeigt, dass die Montagemeisterie 7 die größte Fläche aufspannt und im nächsten Schritt im QVM analysiert werden muss.

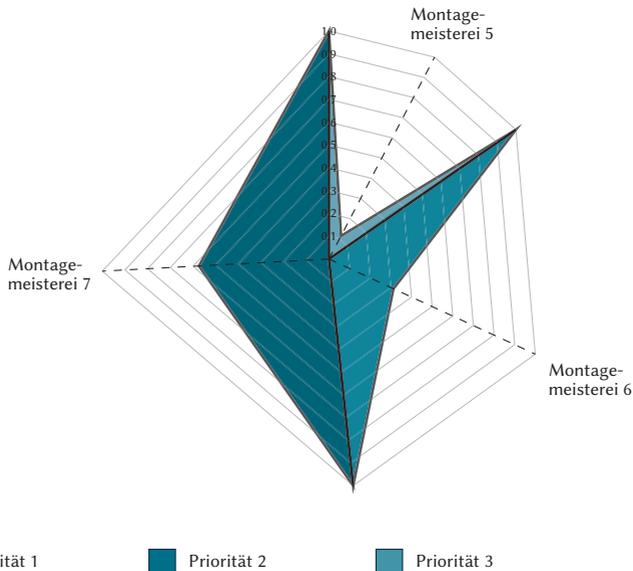


Abbildung 10.6: QVM der Betrachtungsebene 2

Betrachtungsebene 3

In der dritten Betrachtungsebene wird die Meisterei 7 mit ihren zwölf Montagestationen in einer Schicht betrachtet. Diese verursachen zusammen 211 Fehler und 9.900 Euro Nacharbeitskosten. Eine Auflistung gibt Tabelle U.3 in Anhang U. Abbildung 10.7 zeigt die Betrachtungsebene 3 im QVM. Zur Detaillierung sind die spezifischen Werte der Schicht in Tabelle U.7 in Anhang U dargestellt. Die Montagestation 3 besitzt die größte Fläche der Schicht, gefolgt von den Montagestationen 1 und 6. Die Montagestation 3 muss folglich näher über eine eigene Schicht im QVM analysiert werden.

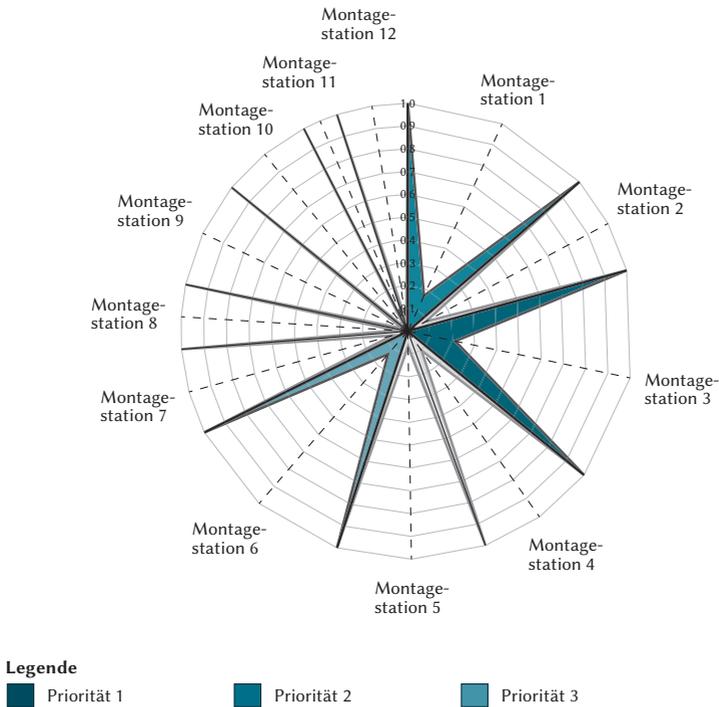


Abbildung 10.7: QVM der Betrachtungsebene 3

Betrachtungsebene 4

In der vierten Betrachtungsebene wird die Montagestation 3 untersucht. Die dort zu montierenden Bauteile repräsentieren die Merkmale. Die Montage umfasst das Setzen von vier Stopfen¹², den Verbau von zwei Luftführungssegmenten und die Anbringung des hinteren Stoßfängers. Den Bauteilen können 45 Fehler und 1.500 Euro Nacharbeitskosten zugeordnet werden. Tabelle U.4 in Anhang U zeigt die Zuordnung zu den Montageumfängen. Abbildung 10.8 zeigt, dass in der betrachteten Montagestation beim Bauteil

¹² Ein Stopfen bezeichnet ein Bauteil (i. d. R. aus Gummi) zum Verschließen anderer Bauteile (z. B. einer kleinen Aussparung an der Karosserie).

„Stoßfänger hinten“ sowohl der Fehleranteil als auch der Nacharbeitskostenanteil am höchsten ist. Die Bauteile „Stopfen 4“ und „Luftführungssegment 1“ sind die beiden nachfolgenden Prioritäten. Es gilt nun, das Bauteil „Stoßfänger hinten“ bzgl. der individuellen Qualitäts- und Prüfmerkmale in einer separaten Schicht im QVM zu analysieren. Die zugehörigen Werte der Schicht findet sich in Tabelle U.8 in Anhang U.

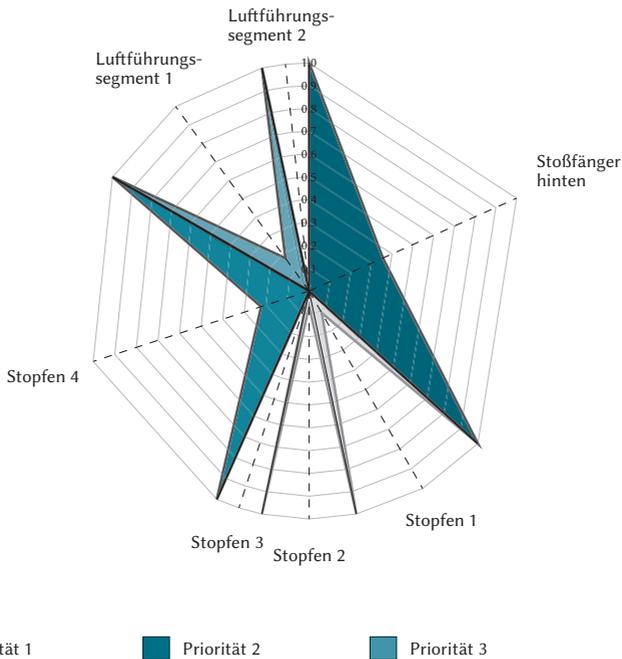


Abbildung 10.8: QVM der Betrachtungsebene 4

Betrachtungsebene 5

In der fünften Betrachtungsebene wird das Bauteil „Stoßfänger hinten“ der Montagestation 3 ausgewertet und über eine Schicht im QVM dargestellt.

Beim Stoßfänger hinten werden drei Qualitätsmerkmale (Spaltmaß, Oberfläche und Verschraubung) überprüft. Die Qualitätsbewertung erfolgt über die individuellen Prüfmerkmale (vgl. Abbildung 5.1). Diese werden innerhalb der Fahrzeugmontage nicht gemessen¹³, sondern über Sichtprüfungen und Prüflern bewertet. Lediglich die Verschraubungen können über intelligente Handwerkzeuge nach dem Schraubprozess gemessen werden und liefern kontinuierliche Werte.

Verschiedene Qualitätsmerkmale des Bauteils wurden bereits durch diverse Qualitätsprüfprozesse der vorgelagerten Gewerke¹⁴ überprüft (z. B. Form und Farbgebung). Somit werden innerhalb der Montage lediglich die Qualitätsmerkmale betrachtet, welche durch das Gewerk beeinflusst werden und relevant sind. Tabelle 10.8 zeigt die Qualitätssituation des Bauteils anhand der Mittelwerte \bar{w} seiner Merkmale über den Betrachtungszeitraum H .

Tabelle 10.8: Werte der Betrachtungsebene 5 (Stoßfänger hinten)

| $m_{5,j}$ | Spaltmaß | | | Fläche | Verschraubung | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|---------------|-------------|
| $e_{5,j,i}$ | MP 1 | MP 2 | MP 3 | Glätte ¹⁵ | DM 1 | DM 2 |
| $\beta(e_{5,j,i})$ | 60° | 60° | 60° | 60° | 60° | 60° |
| f | 2 | 0 | 3 | 4 | 7 | 0 |
| $\lambda(\bar{w}(e_{5,j,i}))$ | 1,625 | 1,248 | 0,7147 | 0,7502 | 1,1513 | 0,989 |
| $\lambda(t_{max}(e_{5,j,i}))$ | 1,8 | 1,8 | 1,8 | - ¹⁶ | 1,1 | 1,1 |
| $\lambda(s_{max}(e_{5,j,i}))$ | 1,5 | 1,5 | 1,5 | - ¹⁶ | 1,05 | 1,05 |
| $\lambda(s_{min}(e_{5,j,i}))$ | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,95 | 0,95 |
| $\lambda(t_{min}(e_{5,j,i}))$ | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 0,9 |
| $q_B(e_{5,j,i})$ | <i>true</i> | <i>true</i> | <i>true</i> | <i>true</i> | <i>false</i> | <i>true</i> |

Abbildung 10.9 zeigt die Schicht im QVM des betrachteten Bauteils „Stoßfänger hinten“ mit den spezifischen Qualitäts- und Prüfmerkmalen sowie

¹³ Vgl. Ausführungen zur Anforderung „messen“ in der Fahrzeugmontage in Abschnitt 7.5 und Unterabschnitt 7.7.3.

¹⁴ Vgl. Unterabschnitt 3.2.1: Presswerk, Rohbau und Lackierung.

¹⁵ Fokus auf Lackbeschädigungen wie bspw. Kratzer, Beulen und Dellen.

¹⁶ Es existieren keine Obergrenzen bei Lackbeschädigungen. Lackbeschädigungen sind zudem diskret durch „i. O.“ und „n. i. O.“ zu bewerten.

den individuellen Sicherheits- und Toleranzgrenzen. Da sich die Werte auf den Betrachtungszeitraum H beziehen, werden folglich die Mittelwerte visualisiert. Durch die Normierung der Werte auf den Einheitsvektor ist eine Vergleichbarkeit der Prüfmerkmale über den Zielerreichungsgrad möglich (vgl. Homomorphismus).

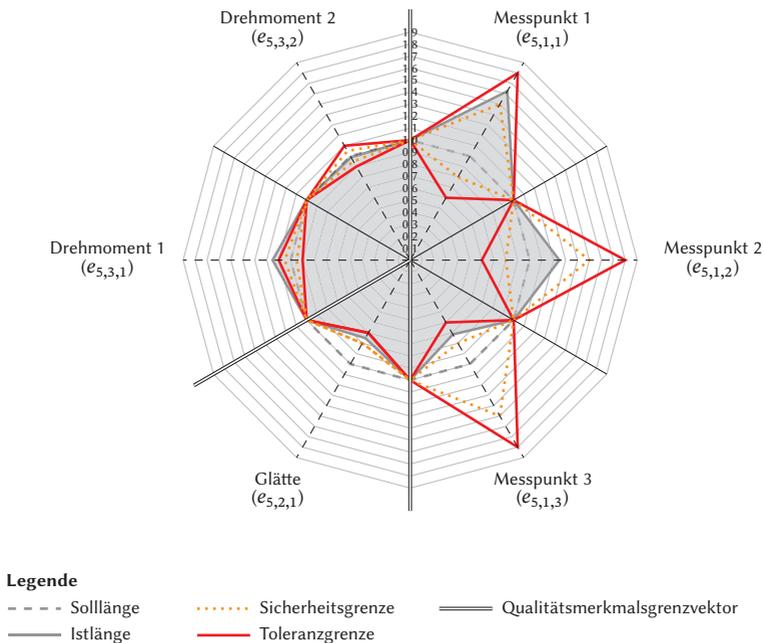


Abbildung 10.9: QVM der Betrachtungsebene 5

Anhand der Visualisierung ist direkt zu erkennen, dass das Prüfmerkmal „Drehmoment 1“ ($e_{5,3,1}$) die obere Toleranzgrenze $t_{max}(e_{5,3,1})$ im Mittelwert verletzt und im Sinne einer effizienten Qualitätsregelung geregelt werden muss. Aufgrund dieser Toleranzverletzung erfüllt das Prüfmerkmal nicht die Qualitätsanforderung, sodass im Rahmen der binären Qualitätsbewertung

nach Formel 5.13 der binäre Qualitätswert $q_B(e_{5,3,1})$ mit *false* bewertet werden muss, was nach Formel 5.14 und Formel 5.15 zum binären Qualitätswert $q_B(o_5) = false$ führt.

Da dieses Prüfmerkmal zugleich das einzige Merkmal mit Toleranzverletzungen ist, liegt hier der Schwerpunkt der effizienten Qualitätsregelung. Weiterhin ist zu erkennen, dass zum einen das Prüfmerkmal „Messpunkt 1“ seine obere Sicherheitsgrenze s_{max} und zum anderen die Prüfmerkmale „Messpunkt 3“ und „Glätte“ ihre unteren Sicherheitsgrenzen s_{min} verletzen. Jedoch befinden diese sich innerhalb ihrer Toleranzbänder und erfüllen daher weiterhin ihre Qualitätsanforderungen mit positiven Beiträgen zu $q_B(o_5)$.

10.4.3 Ergebnisse der Evaluation

Die beiden durchgeführten Simulationen zeigen die Anwendbarkeit des QVM zur anforderungsgerechten Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualität eines Betrachtungsobjektes. Über das QVM und der generischen Darstellung der Betrachtungsobjekte können kritische Qualitätsabweichungen in effizienter Form identifiziert werden. Diese liefern Informationen zur Ableitung adäquater Handlungsmaßnahmen.

Für eine vollständige Beurteilung der systematischen Fehler im Kontext einer optimalen Qualitätsregelung müssten jedoch auch die Qualitätsmerkmale mit Rang 2 und 3 je Betrachtungsebene näher untersucht werden. Dadurch entsteht zunächst ein erhöhter Mehraufwand im Vergleich zur reinen Auswertung auf Tabellenbasis. Jedoch würden die gewonnenen Informationen zusätzliche Hinweise zur Qualitätsregelung liefern.

Ebenso zeigt sich anhand der Simulationen, dass lediglich eine überschaubare Menge an Merkmalen auf einer Schicht im QVM adäquat dargestellt werden kann. Während die Schichten der Betrachtungsebenen 1 und 2 sowie 4 und 5 der zweiten Evaluation ein direkt erkennbares Qualitätsergebnis vermitteln, liefert die Schicht der Betrachtungsebene 3 erst nach

genauerer Analyse die relevanten Qualitätsinformationen. Eine große Menge an Merkmalen (>12 Merkmale) kann folglich nicht mehr adäquat auf einer Schicht dargestellt werden. Eine Lösung wäre die Aggregation von gleichartigen Einzelmerkmalen zu einem aggregierten Gruppenmerkmal (z. B. Betrachtungsebene 4 → vier Stopfen zu einem Merkmal). Diese aggregierten Einzelmerkmale können dann auf einer separaten Schicht dargestellt werden. Dadurch entsteht ein Netz bzw. System aus QVM-Schichten analog zu Abbildung 10.10.

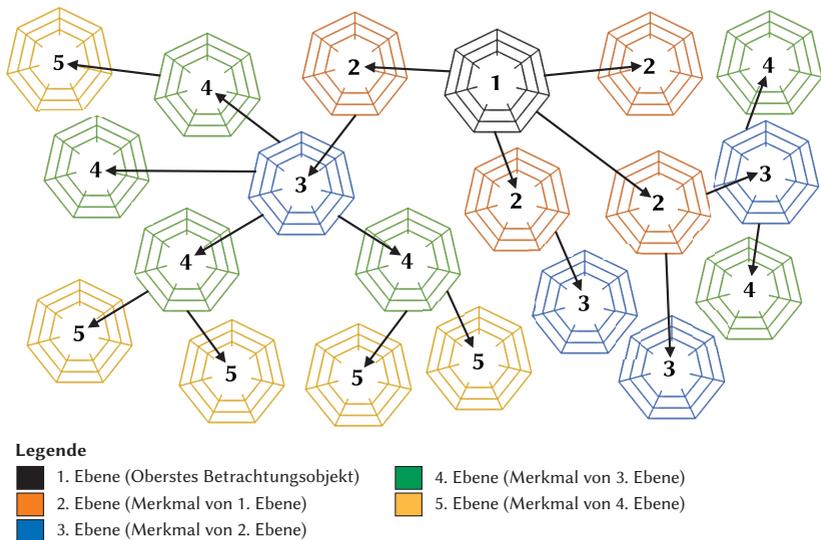


Abbildung 10.10: Netz aus mehreren QVM-Schichten

10.5 Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Konzeptes

Die Konzepte wurden innerhalb der Fahrzeugmontage evaluiert, da diese in erster Linie für einen Einsatz innerhalb dieses Gewerkes der Automobilproduktion konzipiert wurden. Dennoch ist ein Transfer der Module auf weitere Bereiche der industriellen Produktion möglich:

1. Andere Gewerke der Automobilindustrie
2. Allgemeine Fließbandfertigung der industriellen Produktion

Zum einen kann das Konzept mit den jeweiligen Modulen ebenfalls in den anderen drei vorgelagerten Gewerken der Automobilproduktion (Presswerk, Rohbau und Lackierung) eingesetzt werden. Da auch innerhalb dieser Bereiche Qualität messbar und bewertbar gemacht werden muss, ist auch hier das grundlegende Fundament CQD einsetzbar. Die Definition der montagebezogenen Produktionsqualität APQ spezifiziert sich im Rahmen dieser Arbeit auf das Gewerk „Montage“. Jedoch kann die APQ auch zur Definition der Produktionsqualität der anderen Gewerke verwendet werden, da deren Qualitätsmerkmale ähnlich denen der Montage sind. Über den Gewichtungsfaktor $\beta(m_j)$ in Formel 6.22 lassen sich hier spezifische Schwerpunkte setzen. Zusätzlich ist die Definition der APQ generisch aufgebaut, sodass hier weitere Qualitätsmerkmale hinzugenommen und bestehende weggelassen werden können. Des Weiteren sind die drei Säulen WII, QCS und QVM ebenfalls in den anderen Gewerken einsetzbar. Wie in Unterabschnitt 3.2.3 beschrieben, liegt ein besonderer Schwerpunkt der Montage auf dem Faktor Mensch. In den anderen Gewerken finden sich ohne Frage ebenfalls Produktionsmitarbeiter, u. a. zur Qualitätsprüfung der Bauteile und Karosserien oder zur Materialversorgung der Anlagen sowie in der Logistik. Dennoch wird der Fokus in den anderen Gewerken aufgrund des hohen Automatisierungsgrades der Wertschöpfung in erster Linie auf die Regelung von Maschinen und Anlagen gelegt, weniger auf das Management von produktions- und qualitätsbezogenen Informationen zwischen Produktionsmitarbeitern und Systemen. Unabhängig davon sind die Module

auch in diesen Gewerken implementierbar und leisten einen Beitrag zur Qualitätsregelung und der resultierenden Produktionsqualität.

Zum anderen ist eine Adaption auf jede Fließbandfertigung der industriellen Produktion möglich. Das Konzept fokussiert und regelt die Produktionsqualität. Diese besitzt in jeder industriellen Fließbandproduktion einen besonderen Stellenwert. Natürlich müssen die Ausprägungen der Module für jeden Anwendungsfall zugeschnitten werden, sind aber grundsätzlich auch ohne Anpassung adaptierbar. Aufgrund der unterschiedlichen Rollen und Ablaufstrukturen müssen die Streams in der QCS und die Visualisierung im WII ggf. modifiziert werden. Das CQD und das QVM passen sich durch ihre generische Eigenschaft einem Anwendungsfall optimal an. Auch die bestehende Definition der APQ kann für weitere industrielle Produktionsbereiche verwendet werden. Da für jede Produktion die Qualitätsmerkmale individuell definiert werden müssen und eine universale Definition bzw. Menge an relevanten Qualitätsmerkmalen nicht getroffen werden kann, muss die Produktionsqualität ggf. für einen sachgerechten Einsatz außerhalb der Fahrzeugmontage modifiziert werden.

10.6 Zwischenfazit: Evaluation des Konzeptes

In diesem Kapitel wurden die Module zur hybriden Qualitätsregelung anwendungsnah evaluiert. Dabei wurden die rückwärtsgerichteten Informationsströme QBS-1 und QBS-2 sowie der vorwärtsgerichtete Informationsstrom QFS-2c mittels Prototypen im realen Produktionsbetrieb der Fahrzeugmontage über einen langfristigen Zeitraum erprobt. Beide Evaluationen haben einen deutlich positiven Beitrag zur Qualitätsregelung und zur APQ aufgezeigt.

Das WII wurde mittels Experteninterviews auf Basis vordefinierter Thesen zu den einzelnen Bausteinen und Sichten des Systems evaluiert. Dazu wurden bewusst ausschließlich Experten aus der Produktion ausgewählt, die mit dem System künftig arbeiten sollen. Die positiven Ergebnisse der Evaluation

zeigen, dass das WII eine rollen-, sach- und zeitgerechte Visualisierung sowie prozess- und qualitätsrelevante Funktionen zum Informationsmanagement innerhalb der Montagelinie umfasst. Auch dieses Modul liefert folglich einen positiven Beitrag zur hybriden Qualitätsregelung in der Montagelinie.

Das QVM wurde über zwei Simulationen auf Basis fiktiver Daten mittels Darstellung der APQ und der Produktqualität evaluiert. Die Schichten des QVM haben gezeigt, dass die Qualitätssituation des relevanten Betrachtungsobjektes anwenderorientiert visualisiert wird. Insgesamt werden die geforderten Eigenschaften an ein Qualitätsmodell durch das QVM erfüllt. Dennoch bestehen Grenzen in der Menge der adäquat darstellbaren Merkmale, was jedoch über eine Merkmalsaggregation gelöst werden kann. Zudem ist eine detaillierte Analyse der Abweichungen im QVM nicht darstellbar, weshalb das QVM in erster Linie zur allgemeinen Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualität genutzt werden soll. Zusammenfassend liefert jedoch das QVM einen positiven Beitrag zu einer hybriden Qualitätsregelung.

Die Evaluationen haben die Funktionsfähigkeit der Module und deren Beitrag zur hybriden Qualitätsregelung bestätigt. Sowohl die QCS als auch das WII werden Teil einer zukünftigen Referenzfabrik eines deutschen Automobilherstellers.

11 Schlussbetrachtung

„Qualität ist kein Zufall, sie ist immer das Ergebnis angestregten Denkens.“

JOHN RUSKIN (1819 – 1900)

Als abschließendes Kapitel wird zunächst das Konzept der vorliegenden Arbeit zusammengefasst. Zur anwendungsbezogenen Betrachtung des Konzeptes erfolgt außerdem eine Einordnung in die Referenzarchitektur der Industrie 4.0, in die Infrastruktur der intelligenten Fabrik und in die serviceorientierte Architektur des IoT. Abschließend wird eine kritische Würdigung aufgezeigt sowie ein forschungsbezogener Ausblick zum Konzept dieser Arbeit gezogen.

11.1 Zusammenfassung

Steigende Kundenbedürfnisse münden direkt in eine hohe Variantenvielfalt der Produkte. Zur Erfüllung dieser Bedürfnisse bei gleichzeitig effizientem Einsatz der Produktionsfaktoren stellt die Produktion mehrerer Varianten auf einer Linie ein etabliertes Vorgehen dar. Das zuverlässige Management dieser variantenreichen Produktion ist zwar für technische Systeme, Maschinen und Anlagen adäquat konfigurierbar, jedoch für den Faktor Mensch eine bedeutend größere Herausforderung. Insbesondere der Bereich der

Fahrzeugmontage mit dem größten Anteil manueller Tätigkeiten repräsentiert einen qualitätsentscheidenden Bereich. Das Zusammenspiel aller Faktoren führt im Hinblick der Erfüllung gesetzter Qualitätsanforderungen zu einer hohen Komplexität der Produktion. Bestehende Konzepte aus Wissenschaft und Industrie zum Management der Qualität und Informationen innerhalb der Montagelinie können jedoch den wachsenden Herausforderungen nicht mehr anforderungsgerecht begegnen. Dies führt des Öfteren zur Verfehlung der gesetzten Ziele bzgl. der Faktoren Zeit, Kosten und Qualität wie auch Flexibilität und Transparenz (magisches Dreieck der perfekten Produktion).

Als wissenschaftlich-technischer Beitrag betrachtet die Arbeit die Regelung der Produktionsqualität innerhalb der Fahrzeugmontage. Der Fokus liegt dabei auf einer hybriden Struktur bestehend aus Produktionsmitarbeitern und informationstechnischen Systemen in der Montagelinie. Die Aufarbeitung zum Stand der Forschung und Industrie hat verschiedene Defizite aufgezeigt, deren Kern dem vorliegenden Informationsmanagement zugeordnet werden kann. Sowohl der bestehende Status Quo (vgl. Abschnitt 3.2) als auch relevante Lösungsansätze (vgl. Abschnitt 3.3) zeigen Schwachstellen einer effizienten und hybriden Qualitätsregelung im Bereich der Fahrzeugmontage auf. Besondere Aspekte umfassen das fehlende rollen-, sach- und zeitgerechte Management sowie die mangelhafte Visualisierung von montage- und qualitätsrelevanten Informationen. Folglich sind adäquate Konzepte zur Gewährleistung einer effizienten Qualitätsregelung innerhalb eines Montagesystems notwendig.

Als Beitrag zur Lösung der vorhandenen Defizite liefert diese Arbeit ein Konzept zur hybriden Regelung der Produktionsqualität im Bereich der Fahrzeugmontage. Das Konzept umfasst fünf Module. Damit eine Qualitätssituation bewertet und geregelt werden kann, ist zunächst die Gestaltung eines geeigneten Qualitätskonzeptes erforderlich (Leitfrage 1). Das „Characteristic-based Quality Design“ (CQD) in Kapitel 5 liefert dazu ein merkmalsbezogenes Qualitätskonzept mit binärer und zusätzlich quantitativer Bewertung der Qualität eines Betrachtungsobjektes (Ergebnis 1).

Weiterhin ist eine für die Praxis sachgerechte Definition der Produktionsqualität für die Fahrzeugmontage erforderlich (Leitfrage 2). Eine intensive Aufarbeitung zum aktuellen Stand bestehender Definitionen zur Produktionsqualität (vgl. Unterabschnitt 3.3.1) hat gezeigt, dass der Begriff lediglich grob und ohne konkrete (montagespezifische) Qualitätsmerkmale in allgemeiner Form beschrieben ist sowie keine binäre und quantitative Bewertbarkeit über ein Kennzahlensystem aufweist. Als Beitrag ermöglicht die „Assembly-specific Production Quality“ (APQ) in Kapitel 6 auf Basis montagespezifischer Qualitätsmerkmale und eines produktionsorientierten Kennzahlensystems eine sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität (Ergebnis 2). Die ermittelten Qualitätsmerkmale wurden dabei im Rahmen einer empirischen Datenerhebung über Experteninterviews identifiziert (vgl. Abschnitt 6.2).

Nachdem die Basis durch das CQD und die APQ geschaffen wurde, sind technische Module zur Qualitätsregelung und Informationsvisualisierung erforderlich. Es ist zu klären, wie die informationstechnische Struktur und Logik für eine Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage aufgebaut sein muss (Leitfrage 3). Die „Quality Control Structure“ (QCS) in Kapitel 7 beantwortet dies in Form eines informationstechnischen Referenzmodells einer hybriden Qualitätsregelung zum bidirektionalen Management von Qualitätsinformationen (Ergebnis 3). Dieses Referenzmodell wurde zur Qualitätsregelung innerhalb eines Montagesystems entwickelt, ist aber sowohl für andere Gewerke der Automobilproduktion als auch für weitere Fließbandproduktionen einsetzbar.

Im Folgeschritt müssen qualitäts- und montagerrelevante Informationen den unterschiedlichen Rollen im Montagesystem adäquat bereitgestellt werden. Zum einen ist zu klären, wie und mit welchen Hilfsmitteln die Nutzer mit relevanten qualitätsbezogenen Informationen rollen-, sach- und zeitgerecht versorgt werden (Leitfrage 4). Zum anderen ist festzulegen, wie qualitätsbezogene Informationen in Form von Kennzahlen und durch Visualisierung rollengerecht bereitgestellt werden (Leitfrage 5). Das „Worker Interaction Interface“ (WII) in Kapitel 8 liefert dazu ein anwenderorientiertes Modell einer

grafischen Benutzungsoberfläche zur Ein- und Ausgabe von qualitäts- und montagebezogenen Informationen innerhalb der Montagelinie (Ergebnis 4).

Abschließend bleibt offen, wie die Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes anforderungsgerecht visualisiert werden kann (Leitfrage 6). Das „Quality Visualization Model“ (QVM) in Kapitel 9 liefert eine Darstellungsform über ein generisches Qualitätswerkzeug zur kontinuierlichen Visualisierung, Überwachung und Evaluierung der Qualität eines Betrachtungsobjektes (Ergebnis 5). Das Modell nutzt dabei die etablierten Konzepte des Netzdiagramms, der Qualitätsregelkartentechnik und die Methode des Boxplot. Somit bildet das Modell eine hybride Methode zur Visualisierung der Qualitätssituation.

Alle fünf Module des Konzeptes liefern relevante Beiträge zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage, wie ein gegebenes Budget investiert werden muss, um damit die Produktionsqualität maximal zu steigern. Im gemeinsamen Zusammenspiel ermöglichen die Module ein zielgerichtetes Management und eine transparente Gestaltung von Qualitätsinformationen. Dies trägt in hohem Maß zur Synchronität zwischen realer und digital abgebildeter Qualitätssituation sowie daraus folgend zur Echtzeitfähigkeit und Flexibilität der Qualitätsregelung bei. Durch die Vernetzung zwischen Mitarbeitern und informationstechnischen Systemen in der Produktion sind eine schnelle Reaktionsfähigkeit und eine Ableitung von effizienten Handlungsoptionen möglich. Das Konzept liefert somit einen entscheidenden Beitrag zur Effizienz der Produktion durch schnelle Fehlerrückmeldung und langfristige Fehlervermeidung, effiziente Nacharbeit sowie daraus folgend reduzierte Qualitätskosten und eine optimierte APQ. Aufgrund der verbesserten Qualitätssituation durch das Konzept dieser Arbeit können darauf aufbauend kritische Qualitätsabweichungen bzw. Probleme und Handlungsoptionen abgeleitet werden. Diese liefern Indizien im Hinblick zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage.

Insbesondere die Evaluation des Konzeptes über die Anwendung der QCS in der Montagelinie, die empirische Expertenbefragung zum WII und der Simulation des QVM hat den positiven Beitrag zur Qualitätsregelung

bestätigt. Die Anwendungen der rückwärtsgerichteten Informationsströme QBS-1 und QBS-2 sowie des vorwärtsgerichteten Informationsstroms QFS-2c mittels zweier Pilotprojekte haben gezeigt, dass die QCS die relevanten Qualitätsmerkmale der Produktion und folglich die APQ positiv beeinflusst. Weiterhin wurde das WII und dessen Mehrwert zum Informationsmanagement mittels Experteninterviews von künftigen Anwendern der Fahrzeugmontage validiert. Abschließend hat die Simulation des QVM anhand von zwei Fallbeispielen gezeigt, dass das Modell die Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes adäquat darstellt und seinen individuellen positiven Beitrag zur Qualitätsregelung leistet.

11.2 Anwendungsbezogene Einordnung

Die technischen Module des Konzeptes werden in das Referenzarchitekturmodell der Industrie 4.0 (RAMI4.0) und in die Infrastruktur der intelligenten Fabrik anwendungsbezogen eingeordnet. Darüber hinaus erfolgt eine ergänzende Einordnung in die serviceorientierte Architektur (SOA) des IoT. Dies ermöglicht eine wissenschaftliche und industrielle Kategorisierung der Konzeptinhalte sowie eine adäquate Selbstbeschreibung. Die Einordnung des QBS in das RAMI4.0 wurde bereits in [GEW18g] durchgeführt, sodass dieser Ansatz hier entsprechend aufgegriffen und fortgeführt wird.

11.2.1 Referenzarchitekturmodell der Industrie 4.0

Das RAMI4.0 stellt u. a. ein dreidimensionales Framework zur Positionierung von Konzepten, Ideen und Assets¹ der Industrie 4.0 innerhalb von Wertschöpfungsketten sowie der Lebensdauer von Asset-Typen und Instanzen bereit [NOR08d]. Die Qualitätsregelung in der Produktion ist ein Ziel der Industrie 4.0, sodass die Einordnung des Konzeptes berechtigt ist. So können Ansätze, Lösungen und Standards von Industrie 4.0 für die Umsetzung

¹ Ein „Asset“ ist ein „Gegenstand von Wert“ der physischen oder virtuellen Welt [HEI17].

des Konzeptes oder dessen Teile genutzt werden. Abbildung 11.1 zeigt die Einordnung des Konzeptes in das dreidimensionale Framework durch farbliche Markierung.

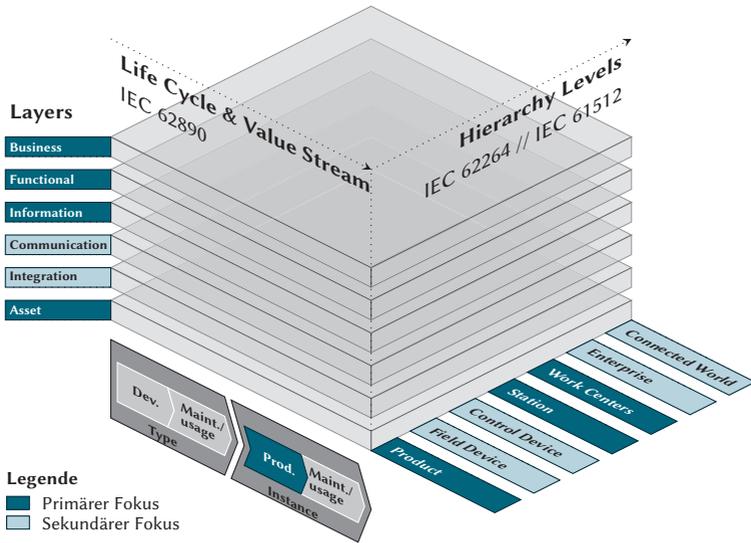


Abbildung 11.1: Einordnung in das RAMI4.0

Die Dimension *Hierarchy Levels* klassifiziert alle Anlagenarten im Anwendungsbereich von Industrie 4.0 auf Basis der IEC 62264 und IEC 61512. Eine Besonderheit liegt hier in der Betrachtung aller Hierarchieebenen vom produzierten Produkt bis hin zur vernetzten Welt als Vermögenswert. Der primäre Fokus des Konzeptes liegt auf der Ebene *Product*. Aufgrund der Beziehungen zwischen dem Produkt und anderen Anlagentypen (vgl. Unterabschnitt 3.2.2) sind auch die Ebenen *Station* und *Work Centers* im primären Fokus. Damit aus produktbezogenen Qualitätsinformationen relevante Ursachen und adäquate Lösungen für Qualitätsmängel gefunden werden können, sind auch Statusinformationen über die Komponenten der Produktionsanlage einschließlich des Materialflusses erforderlich. Folglich sind mit

sekundärem Fokus auch die Ebenen *Field Device* und *Control Device* relevant. Weiterhin kann zum einen über die Einbindung weiterer interner Akteure (z. B. andere Gewerke und Werke der eigenen Produktion) die interne Wertschöpfungskette betrachtet werden. Ein sekundärer Fokus liegt somit auf der Ebene *Enterprise*. Zum anderen kann über die Einbindung externer Akteure (z. B. externe Lieferanten und Dienstleister bzw. Wareneingangsprüfung) ein vollständiges Informationsnetz bzgl. Qualitätsinformationen zur Qualitätsregelung abgebildet werden. Der sekundäre Fokus liegt folglich auch auf der Ebene *Connected World*. Eine ganzheitliche Qualitätsregelung würde daher alle Hierarchieebenen umfassen.

Die Dimension *Life Cycle & Value Stream* basiert auf dem Life-Cycle-Management-Konzept der IEC 62890 und stellt den Lebenszyklus von Asset-Typen und Asset-Instanzen dar. Konkret sind dies die Design- und Entwicklungsphase (Generierung von Asset-Typen, z. B. digitale Fahrzeugmodelle) sowie die Betriebsphase (Generierung von Asset-Instanzen, z. B. Fahrzeugproduktion). Das Konzept dieser Arbeit konzentriert sich auf die *Instanzproduktion*. Grundsätzlich können Qualitätsprobleme aber auch über Änderungen des Produktdesigns, der Produktentwicklung und des Anlagenbaus reduziert werden.

Die Dimension *Layers* deckt die architektonischen Aspekte der IT-Systemlandschaft ab. Sie reicht von der digitalen Darstellung eines Assets, seiner Integration in eine IT-Umgebung über die Kommunikation mit anderen Komponenten bis hin zu den Aspekten der Informations-, Funktions- und Geschäftsmodellierung. Das Konzept dieser Arbeit befasst sich primär mit der Modellierung der Qualitätsaspekte eines Produkt-Assets, sodass primär die Schicht *Asset* fokussiert wird. Sekundär wird hingegen die *Integration* betrachtet. Das Konzept umfasst eine Implementierung in die vorliegende Prozesslandschaft (vgl. Unterabschnitt 3.2.5). Jedoch beschreibt die Arbeit weniger die technische Implementierung in die Systemlandschaft und die Vernetzung mit bestehenden Systemen. Ein Schwerpunkt des Konzeptes ist die Kommunikation zwischen den einzelnen Rollen im Kontext der hybriden Qualitätsregelung. Somit betrachtet das Konzept die

Kommunikationsschicht *Communication*, jedoch keine technischen Aspekte der Kommunikation (z. B. Themen der Speicherung, Algorithmus zur Priorisierung von Nacharbeiten, etc.). Weiterhin liegt der Fokus auf der Informationsschicht *Information* bei der Betrachtung der Montage- und Qualitätsinformationen und auf der Funktionsschicht *Functional* bei Funktionen, die zur Analyse und Nutzung von Qualitätsinformationen verwendet werden. Ebenso steht bei der Betrachtung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen der Fehleridentifikation und Qualitätsregelung in Form von Qualitätskosten auch die betriebswirtschaftliche Schicht *Business* im Fokus.

11.2.2 Infrastruktur der intelligenten Fabrik

Eine intelligente Fabrik basiert auf einer modularen Architektur mit unterschiedlichen Technologiebausteinen. STOCKER ET AL. haben dazu eine „Infrastruktur der intelligenten Fabrik“ entwickelt [STO14]. Je nach Anwendungsfall werden die Technologiebausteine miteinander kombiniert, um den höchstmöglichen Mehrwert für Produktionsarbeiter zu schaffen. Abbildung 11.2 zeigt die Einordnung des Konzeptes in die Infrastruktur der intelligenten Fabrik. Die relevanten Technologiebausteine des Konzeptes sind dabei farblich markiert.

Die *Mensch-System-Interaktion (HCI/HMI)* besitzt eine zentrale Rolle in der hybriden Qualitätsregelung des Konzeptes, da sie den Menschen verstärkt in den Qualitätsregelungsprozess involviert. Im vorliegenden Konzept sind verschiedene Technologien berücksichtigt. Für die Interaktion mit dem IS stehen den Rollen mobile Endgeräte in Form von Tablets (Mobile Devices), Smartwatches (Wearables) oder Bildschirme und Touchscreens (Desktop/-Machine) als Schnittstellen zur Verfügung.

Auf der *Serviceebene* dienen sowohl das WII als auch das QVM zur Visualisierung von montage- und qualitätsrelevanten Informationen (Intelligent Dashboard Visualization). Insbesondere die QCS übernimmt die Entscheidungsfindung zur Qualitätsregelung während des Produktionsprozesses (Decision Support). Gleichmaßen findet eine intensive Zusammenarbeit zwischen den Rollen in Form der automatisierten Qualitätsmeldungen und

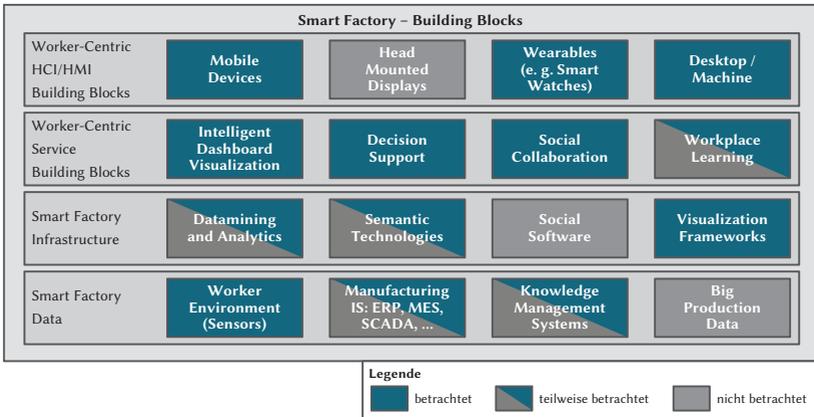


Abbildung 11.2: Einordnung in die Infrastruktur der intelligenten Fabrik

Qualitätsrückmeldungen statt (Social Collaboration). Durch das WII können dem Monteur Montageanleitungen und Qualitätsrückmeldungen zugänglich gemacht werden, um ihn vor Ort zu schulen (Workplace Learning). Jedoch ersetzt dies keine detaillierte Schulung und wird daher nur teilweise betrachtet.

Ebenso liefert das Konzept einen Beitrag in Form einer *intelligenten Infrastruktur*. Es erfolgt eine Datengewinnung durch das Qualitätsprüfsystem im QFS-2c und das WII aufgrund der Dokumentation sowie eine Datenanalyse durch das QVM (Datamining and Analytics). Detaillierte Methoden zu Datamining und Analytics deckt das Konzept jedoch nicht ab. Zu semantischen Technologien zählt das IS, welches Informationen automatisiert abrufbar und jederzeit verfügbar macht (Semantic Technologies). Semantische Technologien sind im Detail jedoch kein Baustein des Konzeptes. Die Gestaltung der Visualisierung hingegen besitzt im WII und QVM einen entscheidenden Stellenwert (Visualization Frameworks).

Abschließend ermöglicht das Konzept eine Erweiterung bzgl. *intelligenter Daten*. Sensoren werden durch den Qualitätsprüfer und das QIS in Form von „Quality Actuators“ abgebildet (Worker Environment). Das IS dient als Produktionssystem (Manufacturing IS) und ermöglicht das

Wissensmanagement für die Bereitstellung von potenziellen Ursachen und Lösungen bzgl. offener Nacharbeiten (Knowledge Management Systems). Die Logik zur Verteilung der Informationen wird über die QCS koordiniert. Beide Systeme liegen jedoch nicht im Kern des Konzeptes.

11.2.3 Serviceorientierte Architektur des Internet of Things

In Unterabschnitt 2.3.5 wurde u. a. das Internet der Dinge (IoT) erläutert. XU ET AL. haben zum IoT eine serviceorientierte Architektur (SOA) vorgestellt. Diese umfasst vier Ebenen, welche zur weiteren Einordnung des Konzeptes dienen. Tabelle 11.1 zeigt die Einordnung in die SOA des IoT [XU14].

Tabelle 11.1: Einordnung in die SOA des IoT

| Ebene | Beschreibung | Module |
|----------------------|---|---------------|
| Sensor-ebene | Diese Ebene wird in die vorhandene Hardware integriert, um die physikalische Welt durch Daten zu erfassen und zu steuern. | QIS WII |
| Netzwerk-ebene | Diese Ebene bietet Netzwerkunterstützung und Datenübertragung über ein drahtloses oder kabelgebundenes Netzwerk. | IS |
| Service-ebene | Diese Ebene erstellt und verwaltet Dienste. Sie bietet Dienstleistungen an, um die Bedürfnisse der Nutzer zu befriedigen. | QCS |
| Schnittstellen-ebene | Diese Ebene stellt den Benutzern und anderen Anwendungen Interaktionsmethoden zur Verfügung. | WII QVM |

Die *Sensorebene* beinhaltet Technologien zur Datensammlung und Informationsgewinnung. Diese umfasst das QIS zur Unterstützung des Qualitätsprüfers sowie die unterschiedlichen Hardware-Komponenten des WII zur Erfassung von Daten und Regelung der physikalischen Produktion. Konkret sind dies das Ortungssystem zur Ermittlung der Fahrzeugposition im Montagesystem, die Tablets und Bildschirme in den Montagestationen bzw. Q-Toren sowie die Smartphones und Smartwatches zur Unterstützung der Rollen.

Die *Netzwerkebene* dient der Verteilung und Speicherung der Daten und Informationen. Dazu werden das IS mit den netzwerktechnischen Komponenten LAN und WLAN zur Datenübertragung zwischen den Endgeräten im WII sowie die UWB-Technologie zur Ortung der Fahrzeugposition verwendet.

Die *Serviceebene* dient zur Verarbeitung der Daten und logischen Verteilung von Informationen. Die QCS stellt den Service der logischen Verteilung von Qualitätsinformationen bereit.

Die *Schnittstellenebene* dient zur Ein- und Ausgabe von Daten und Informationen. Diese werden gesammelt und aufbereitet sowie mittels der beiden GUIs des WII bzw. QVM adäquat visualisiert und den Rollen zugänglich gemacht.

11.3 Kritische Würdigung und forschungsbezogener Ausblick

Das Konzept dieser Arbeit leistet konkrete Beiträge zur hybriden Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage. Trotz adäquater Gestaltung und der positiven Evaluationsergebnisse existieren berechtigte Kritikpunkte zum Konzept. Weiterhin liefert das Konzept diverse Schnittstellen zu weiteren potenziellen Forschungsarbeiten. Sowohl die kritischen Aspekte als auch der weitere Forschungsbedarf sollen nachfolgend aufgezeigt werden.

Zwar fließen die Qualitätskosten sachgerecht in APQ ein, jedoch erfordert die Kennzahl eine detailliertere Ausgestaltung. Die Zielsetzung ist das Erreichen des Wertes 1 (100%) über die Vermeidung der Nacharbeitskosten C_r . Jedoch ist nicht definiert, wie hoch die geplanten Fehlervermeidungskosten C_f^z für ein Optimum der Qualitätskosten sein sollten. Unverhältnismäßig hohe C_f^z vermeiden zwar im Idealfall C_r und führen zu einem Wert 1, sind jedoch nicht effizient eingesetzt. Somit besteht ein Forschungsbedarf zur Festlegung des relativen Optimums von C_f^z .

Auch die QCS besitzt an diversen Stellen im Sinne einer ganzheitlichen Produktionsbetrachtung offene Bereiche. Der Kern der QCS liegt zwar auf einer Kollaboration zwischen Mensch und System, dennoch fehlt für eine vollständige Verknüpfung aller relevanten Produktionsfaktoren eine Einbindung von technischen Systemen wie Maschinen und Anlagen. Ein Forschungsfeld liegt somit in der Einbindung von technischen Komponenten und deren Daten im Hinblick auf eine Qualitätsregelung durch einen Verbund von Mensch, Maschine und System. Darüber hinaus öffnen sich die weiteren Felder des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz zur Regelung der Produktionsqualität auf Basis vorliegender Qualitätsdaten sowie deren adäquater Speicherung. Dazu liefert das Konzept der vorliegenden Arbeit bereits eine Teilmenge der erforderlichen Daten durch die Einbindung der Produktionsmitarbeiter über das WII.

Weiterhin ist zu definieren, wann eine Qualitätsabweichung als kritisch bzw. systematisch eingestuft und von der QCS entsprechend vor- und zurückgeleitet werden muss. Da ein systematischer Fehler durch unterschiedliche Eigenschaften definiert werden kann, besteht hier ein relevantes Forschungsfeld. Außerdem existiert die Problematik der Zuordnung unbestimmter Fehler, welche häufig auftreten und nicht direkt einem Verursacher zugeordnet werden können (z. B. Kratzer, Beulen, Dellen). Die QCS kann diese Qualitätsinformationen zwar über den QFS vorwärtsgerichtet weiterleiten, jedoch über den QBS-3 nicht an den Verursacher zurückmelden – dieser lässt sich aufgrund der Vielzahl potenzieller Verursacher nicht eindeutig bestimmen. Somit liegt auch hier ein wichtiges Forschungsgebiet.

Die QCS fokussiert sich aufgrund des gewählten Betrachtungsbereiches auf eine horizontale Wertschöpfung innerhalb eines Montagesystems. Eine sinnvolle weitere Betrachtung stellt ebenso die Rückmeldung von Qualitätsinformationen an vorgelagerte Produktionsbereiche (Presswerk, Rohbau, Lackierung) und innerhalb der vertikalen Kette (Planung, Instandhaltung) sowie der werksübergreifende Austausch dar. Dadurch lassen sich Qualitätsinformationen bzw. Qualitätsmängel und weitere Probleme auch werke- und funktionsübergreifend zurückmelden (vgl. RAMI4.0 → Hierarchy Level → Enterprise). Ebenso kann eine Rückmeldung an interne und externe

Lieferanten bzw. Dienstleister zur vollständigen Informationsvernetzung bzgl. Qualität positiv zur Transparenz und Reaktionsfähigkeit sowie insgesamt zur Qualitätsregelung beitragen (vgl. RAMI4.0 → Hierarchy Level → Connected World).

Ein weiteres Forschungsfeld liegt in der Automatisierung der Qualitätsprüfprozesse in der Montagelinie. Technische Qualitätsprüfsysteme (QIS) der Fahrzeugmontage umfassen rudimentär teilautomatisierte QIS, welche zur Validierung der Prüfergebnisse die Interaktion eines Qualitätsprüfers erfordern (vgl. Abschnitt 7.5). Bestimmte Merkmale sind durch QIS jedoch nicht prüfbar und müssen in klassischer Form durch Qualitätsprüfer geprüft werden. Folglich besteht ein Forschungsbedarf bzgl. zuverlässiger, vollständiger und automatisierter Qualitätsprüfung durch QIS – wo immer möglich und nötig.

Als kritische Aspekte zum WII dienen die Ergebnisse der Experteninterviews in Abschnitt 10.3. Demnach ist insbesondere die Qualitätsrückmeldung in die Montagestation noch nicht optimal gestaltet und bietet ein offenes Forschungsgebiet. Ebenso bleibt offen, wie die Informationstiefe aufgrund unterschiedlicher Erfahrungen nutzergerecht bereitgestellt werden kann (vgl. Anfänger- und Expertenmodus²). Des Weiteren bleibt der messbare Mehrwert des WII offen, sodass weitere Arbeiten die vollständige Implementierung in die Montagelinie durchführen und anhand messbarer Kennzahlen evaluieren sollten. In diesem Zusammenhang können auch weitere potenzielle Beiträge, wie bspw. die Zeiteinsparung durch Wegfall des Andon-Systems und der Priorisierung der offenen Nacharbeiten in der Montagelinie, ermittelt werden. Zudem liefert eine Forschung zur berührungslosen Interaktion³ zwischen Mensch und System in der Montagelinie ein relevantes Feld.

² Eine individuelle Auswahl des Detaillierungsgrades wurde ebenso von FELDMANN UND LANG vorgeschlagen [FEL05; LAN07].

³ Die Eigenschaft „berührungslos“ bezeichnet eine gestenbasierte oder verbale Informations-eingabe sowie visuelle oder akustische Informationsausgabe.

Das QVM visualisiert in ausreichender Form die Qualitätssituation eines Betrachtungsobjektes auf Basis vorhandener Merkmalswerte. Jedoch ist eine große Menge an Merkmalen durch das Modell nicht adäquat darstellbar, sodass diese ggf. aggregiert werden müssen. Zudem ist der Anwenderkreis in erster Linie auf den Qualitätsmanager und Qualitätsingenieur ausgerichtet. Zielführend wäre jedoch ebenfalls eine adäquate Darstellung für Produktionsmitarbeiter in der Montagelinie. Somit ergibt sich als weiteres Forschungsfeld die rollen-, sach- und zeitgerechte Implementierung des QVM innerhalb des Q-Tores im Verbund mit dem QFS-2 – denkbar wäre insbesondere die Darstellung der Prüfergebnisse des QIS im Rahmen des QFS-2c mittels QVM.

Die notwendige Einbindung des Faktor Mensch in die Qualitätsregelung ist eine Stärke des Konzeptes der vorliegenden Arbeit. Die Produktionsmitarbeiter werden vollständig in den Regelprozess eingebunden und informationstechnisch vernetzt. Der Mensch ist folglich eine tragende Säule der Qualitätsregelung. Jedoch ist der Mensch ebenfalls ein Faktor, welcher weder vollständig mathematisch beschreibbar noch zuverlässig vorhersagbar ist. Die Funktionsfähigkeit des Konzeptes ist gekoppelt an die vollständige Nutzung der Module und der damit verbundenen Prozesse. Somit ist die Eingabe und Nutzung der Informationen durch die Nutzer essentiell für einen positiven Beitrag des Konzeptes zur APQ (vgl. Tabelle 4.5, Tabelle 4.7 und Anhang G). Nur so ist ein Beitrag zur Lösung der übergeordneten Forschungsfrage möglich.

Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

Alle referenzierten Internetquellen wurden am 6. September 2018 zuletzt abgerufen und überprüft.

- AEH14 Aehnelt, M. und Bader, S.: „Mobile Informationsassistentz für die Montage“. In: Weidner, R. und Redlich, T. (Hrsg.). *Erste transdisziplinäre Konferenz zum Thema Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen*. Hamburg, 15.–16. Dezember 2014. Hamburg: Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik, 2014, S. 370–380.
- ALG10 AlGeddawy, T. und ElMaraghy, H. A.: „Design of single assembly line for the delayed differentiation of product variants“. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 22 (3-4 2010), S. 163–182.
- AME01 Ament, C. und Goch, G.: „A Process Oriented Approach to Automated Quality Control“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50 (1 2001), S. 251–254.
- AND15 Anderl, R.: „Industrie 4.0 – technological approaches, use cases, and implementation“. In: *at - Automatisierungstechnik* 63 (10 2015), S. 753–765.
- ARE15 Arens, T.; Hettlich, F.; Karpfinger, C. et al.: *Mathematik*. 3. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer Spektrum, 2015.
- ASH09 Ashton, K.: *That "Internet of Things" Thing. In the real world, things matter more than ideas*. RFID Journal (Hrsg.). 2009. URL: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>.
- ASK08 Askar, G.: *Optimierte Flexibilitätsnutzung in Automobilwerken*. Aachen: Shaker Verlag, 2008.
- BÄC09 Bäckstrand, G.: „Information Flow and Product Quality in Human Based Assembly“. Dissertation. Loughborough: Loughborough University, 2009.

- BÄC14 Bächler, A.; Hörz, T.; Krüll, G. et al.: „Assistenzsysteme für manuelle Industrieprozesse“. In: Weidner, R. und Redlich, T. (Hrsg.). *Erste transdisziplinäre Konferenz zum Thema Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen*. Hamburg, 15.–16. Dezember 2014. Hamburg: Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik, 2014, S. 130–144.
- BÄC16 Bächler, A.; Bächler, L.; Autenrieth, S. et al.: „A Comparative Study of an Assistance System for Manual Order Picking – Called Pick-by-Projection – with the Guiding Systems Pick-by-Paper, Pick-by-Light and Pick-by-Display“. In: *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. Koloa, 5.–8. Januar 2016. IEEE, 2016, S. 523–531.
- BAL01 Balzert, H.: *UML kompakt*. Heidelberg und Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2001.
- BAL11 Balzert, H. und Liggesmeyer, P.: *Lehrbuch der Softwaretechnik. Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb*. 3. Aufl. Lehrbücher der Informatik. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- BAS04 Bastian, M.: „Modelle und Methoden in Problemlösungsprozessen“. In: Luczak, H. und Stich, V. (Hrsg.). *Betriebsorganisation im Unternehmen der Zukunft*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2004, S. 285–289.
- BAU14 Bauer, W.; Schlund, S.; Marrenbach, D. et al.: *Industrie 4.0 - Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*. BITKOM (Hrsg.). Berlin: Fraunhofer IAO, 2014.
- BEA11 Beaujean, P.: *Modular gestaltetes reaktives Qualitätsmanagement auf Grundlage regelungstechnischer Analogien zur Nutzung qualitätsrelevanter Daten*. 1. Aufl. Bd. 13/2011. Edition Wissenschaft Apprimus. Aachen: Apprimus Verlag, 2011.
- BEC04 Becker, J. und Schütte, R.: *Handelsinformationssysteme. Domänenorientierte Einführung in die Wirtschaftsinformatik*. 2., vollst. überarb., erw. u. aktual. Aufl. Redline Wirtschaft. Frankfurt am Main: Redline Wirtschaft, 2004.

- BEE03 Beer, J.: „Systemspezifikation“. In: Siedersleben, J. (Hrsg.). *Softwaretechnik. Praxiswissen für Software-Ingenieure*. 2., überarb. u. aktual. Aufl. Software, Design & Management. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2003, S. 21–48.
- BEN00 Benoît, C.; Martin, J.-C.; Pelachaud, C. et al.: „Audio-visual and multimodal speech-based systems“. In: Gibbon, D., Mertins, I. und Moore, R. K. (Hrsg.). *Handbook of multimodal and spoken dialogue systems. Resources, terminology and product evaluation*. Kluwer international series in engineering and computer science 565. New York: Springer Science+Business Media, 2000, S. 102–203.
- BEN14 Benes, G. M. E. und Groh, P. E.: *Grundlagen des Qualitätsmanagements*. 3., aktual. Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2014.
- BER80 Berens, W.: *Prüfung der Fertigungsqualität. Entscheidungsmodelle zur Planung von Prüfstrategien*. Beiträge zur industriellen Unternehmensforschung. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1980.
- BET04 Bettin, V.: *Ansatz zur übergreifenden Qualitätsregelung von Prozessketten in der Fertigung*. Bd. 9. Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Aachen: Shaker Verlag, 2004.
- BEY15a Beyerer, J.; Jasperneite, J. und Sauer, O.: „Industrie 4.0“. In: *at - Automatisierungstechnik* 63 (10 2015), S. 751–752.
- BEY15b Beyerer, J., Jasperneite, J. und Sauer, O. (Hrsg.): *Special Issue: Industrie 4.0*. Bd. 63.10. *at - Automatisierungstechnik*. 2015.
- BEY16 Beyerer, J. und Usländer, T. (Hrsg.): *Special Issue: Industrial Internet of Things supporting Factory Automation*. Bd. 64.9. *at - Automatisierungstechnik*. 2016.
- BIE97 Bielert, P.: *Gewinnorientierte Planung der Produktqualität*. Bd. 31. Betriebswirtschaftliche Forschung zur Unternehmensführung. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1997.

- BIN96 Binner, H. F.: *Umfassende Unternehmensqualität. Ein Leitfaden zum Qualitätsmanagement*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- BOE63 Boehm, G.: „Reliability Engineering“. In: *Fortune* (April 1963), S. 124–127.
- BOG14 Bogner, A.; Littig, B. und Menz, W.: *Interviews mit Experten. Eine praxisorientierte Einführung*. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer VS, 2014.
- BOR17 Borgmaier, A.; Grohmann, A. und Gross, S. S.: *Smart Services und Internet der Dinge. Geschäftsmodelle, Umsetzung und Best Practices*. München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- BRE11 Brecher, C.: *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- BRE15 Brenner, J. und Brunner, F. J.: *Lean Production. Praktische Umsetzung zur Erhöhung der Wertschöpfung*. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2015.
- BRÜ15 Brüggemann, H. und Bremer, P.: *Grundlagen Qualitätsmanagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*. 2., überarb. u. erw. Aufl. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- BUN18 Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Industrie 4.0*. 2018. URL: <https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>.
- BUR08 Burkert, M.: *Qualität von Kennzahlen, Nutzung und Erfolg von Managern. Direkte, indirekte und moderierende Effekte*. 1. Aufl. Gabler Edition Wissenschaft: Research in Management Accounting & Control. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2008.
- CAM83 Campanella, J. und Corcoran, F. J.: „Principles of Quality Costs“. In: *Quality Progress* 16 (4 1983), S. 16–22.
- CAQ11a CAQ4-Qualitätsmanagement: *(Qualitäts-) Merkmale*. 2011. URL: <http://web.utamet.at/caq4/1%20Markt/4Produktdefinition/3KundennaheQualitaetsmerkmale/Qualitaetsmerkmale1.htm>.

- CAQ11b CAQ4-Qualitätsmanagement: *Qualitätsmerkmale*. 2011. URL: <http://web.utaneet.at/caq4/1%20Markt/4Produktdefinition/4ProduktnaheTechnQualitaetsmerkmale/QMerkmale.htm>.
- CAR97 Carl, H.; Friemuth, U. und Oster, M.: „Qualitätsregelkreise bei Logistik-Dienstleistungen“. In: *Distribution: Logistik in Warenfluß und Verteilung* 28 (9 1997), S. 9–13.
- CAR98 Carl, H.; Friemuth, U. und Oster, M.: „Qualität in Logistik-Dienstleistungen“. In: Franke, H.-J. und Pfeifer, T. (Hrsg.). *Qualitätsinformationssysteme. Aufbau und Einsatz im betrieblichen Umfeld*. München: Carl Hanser Verlag, 1998.
- CHR06 Chryssolouris, G.: *Manufacturing Systems. Theory and Practice*. 2. ed. Mechanical engineering series. New York: Springer Science+Business Media, 2006.
- CHR15 Christ, J. P.: *Intelligentes Prozessmanagement. Marktanteile ausbauen, Qualität steigern, Kosten reduzieren*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2015.
- CIC92 Cichowski, R. R.: *Anwendungsorientierte Qualitätssicherung. Qualitätssicherung und technische Normen in der Elektro- und Energietechnik und ihre Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen unter Berücksichtigung der zunehmenden Bedeutung der Harmonisierung im Hinblick auf einen vereinten europäischen Markt am Beispiel der Energieversorgungsunternehmen*. Berlin: VDE-Verlag, 1992.
- COL14 Colledani, M.; Tolio, T.; Fischer, A. et al.: „Design and management of manufacturing systems for production quality“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2 2014), S. 773–796.
- COL15 Colledani, M.; Horvath, A. und Angius, A.: „Production quality performance in manufacturing systems processing deteriorating products“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (1 2015), S. 431–434.

- COR10 Cormen, T. H. und Molitor, P.: *Algorithmen - Eine Einführung*. 3., überarb. u. erw. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2010.
- CRA10 Cramer, M. und Heck, U.: *Erfolgreiches IT-Management in der Praxis. Ein CIO-Leitfaden*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag und GWV Fachverlage GmbH, 2010.
- CRO79 Crosby, P. B.: *Quality is free. The art of making quality certain*. New York: McGraw-Hill Professional, 1979.
- CZA09 Czaja, L.: *Qualitätsfrühwarnsysteme für die Automobilindustrie*. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Gabler Verlag und GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- DAN04 Dangelmaier, W.; Emmerich, A.; Gajewski, T. et al.: „Ein Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-Sales-Dienstleistungen“. In: Becker, J. und Delfmann, P. (Hrsg.). *Referenzmodellierung. Grundlagen, Techniken und domänenbezogene Anwendung*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2004, S. 73–93.
- DAN95 Danzer, H. H.: *Qualitätsmanagement im Verdrängungswettbewerb. Der Schlüssel zum Überleben im Käufermarkt*. Erfolgswissen für Manager. Wuppertal und Zürich: TAW-Verlag, 1995.
- DEH17 Dehning, P.; Herrmann, C. und Reinhart, G.: *Steigerung der Energieeffizienz von Fabriken der Automobilproduktion*. Bd. 104. AutoUni – Schriftenreihe. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017.
- DEV15 de Vries, J.; de Koster, R. und Stam, D.: „Exploring the role of picker personality in predicting picking performance with pick by voice, pick to light and RF-terminal picking“. In: *International Journal of Production Research* 54 (8 2015), S. 2260–2274.
- DIE07 Dietrich, E.; Schulze, A. und Weber, S.: *Kennzahlensystem für die Qualitätsbeurteilung in der industriellen Produktion. Q-DAS CAMERA Konzept*. 1. Aufl. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2007.

- DIE14a Dietrich, E. und Schulze, A.: *Prüfprozesseignung. Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld*. 4., überarb. Aufl. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2014.
- DIE14b Dietrich, E. und Schulze, A.: *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. 7., aktual. Aufl. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2014.
- DIN08 Dinter, B. und Winter, R.: *Integrierte Informationslogistik*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- DÖG86 Dögl, R.: *Strategisches Qualitätsmanagement im Industriebetrieb. Pragmatischer Ansatz zur Erklärung und methodischen Handhabung des Qualitätsphänomens*. Bd. 14. Innovative Unternehmensführung. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1986.
- DOL99 Dolch, K.: „Rechnergestützte Informationssysteme“. In: Masing, W. und Bläsing, J. P. (Hrsg.). *Handbuch Qualitätsmanagement*. 4., gründlich überarb. u. erw. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 1999, S. 155–174.
- DOM12 Dombrowski, U.; Schmidtchen, K. und Hoesslin, I. von: „Megatrends - Erfolgreiche Unternehmen denken heute schon an morgen“. In: *5. Braunschweiger Symposium für Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS)*. Braunschweig, 26.–27. September 2012. VDI, 2012.
- DOM14 Dombrowski, U.; Riechel, C. und Evers, M.: „Industrie 4.0 - Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution“. In: Kersten, W., Koller, H. und Lödding, H. (Hrsg.). *Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern*. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). Berlin: Gito mbH Verlag, 2014, S. 129–153.
- DÖR09 Dörmann Osuna, H. W.: *Ansatz für ein prozessintegriertes Qualitätsregelungssystem für nicht stabile Prozesse*. Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau, 2009.

- DÖR13 Dörmer, J. und Günther, H.-O.: *Produktionsprogrammplanung bei variantenreicher Fließproduktion. Untersucht am Beispiel der Automobilentmontage*. Springer Gabler Research. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013.
- DUD13 Dudenredaktion (Hrsg.): *Duden - Das Herkunftswörterbuch. Etymologie der deutschen Sprache*. 5. Aufl. Bd. 7. 12 Bde. Der Duden. Berlin: Bibliographisches Institut, 2013.
- DUD17 Dudenredaktion (Hrsg.): *Duden - Die deutsche Rechtschreibung. Auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Rechtschreibregeln*. 27., völlig neu bearb. u. erw. Aufl. Bd. 1. 12 Bde. Der Duden. Berlin: Dudenverlag, 2017.
- ECK13 Eckstein, H. und Eichert, J.: „Konstruktionsintegrierte Arbeitsvorbereitung“. In: Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C. et al. (Hrsg.). *Digitale Produktion*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 201–221.
- EHR17 Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 6., vollst. überarb. u. erw. Aufl. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2017.
- ELM13 ElMaraghy, H. A.; Schuh, G.; ElMaraghy, W. et al.: „Product variety management“. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (2 2013), S. 629–652.
- ELM16 ElMaraghy, H. A. und ElMaraghy, W.: „Smart Adaptable Assembly Systems“. In: *Procedia CIRP* 44 (2016), S. 4–13.
- ENG14 Engroff, B.: *Was sind die wirklich wichtigen Kennzahlen in der Produktion? Führen und Coachen mit Kennzahlen*. AWF Arbeitsgemeinschaft für Wirtschaftliche Fertigung. 2014. URL: <https://docplayer.org/66912453-Was-sind-die-wirklich-wichtigen-kennzahlen-in-der-produktion.html>.
- EOQ72 European Organization for Quality Control: *EOQC Glossary of Terms uses in Quality Control*. 1972.

- FAL14 Falk, B. und Schmitt, R.: „Sensory QFD. Matching Sensation with Measurement“. In: *Procedia CIRP* 17 (2014), S. 248–253.
- FEI61 Feigenbaum, A. V.: *Total Quality Control. Engineering and Management*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1961.
- FEL05 Feldmann, K. und Lang, S.: „Multimediale Informationssysteme an manuellen Arbeitsplätzen. Prozesssicherheit und Effizienzsteigerung durch Bereitstellung und Rückmeldung richtiger sowie aktueller Informationen“. In: *Industrie Management* 21 (1 2005), S. 25–28.
- FIE14 Fiebig, S.; Lehmann, M.; Wonneberger, K.-U. et al.: „Informationen auf dem Shopfloor“. In: Rudow, B. und Heidecke, H.-C. (Hrsg.). *Betriebliche Informationssysteme in der Automobilproduktion. Soziotechnisches System - Nutzerpersönlichkeit - Nutzungserleben - Rollout und Betrieb - Fabriksteuerung - Informationen auf Shopfloor - IT-Nutzen*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2014, S. 231–259.
- FIS14 Fischer, C.; Lušić, M.; Bönig, J. et al.: „Webbasierte Werkerinformationssysteme. Datenaufbereitung und -darstellung für die Werkerführung im Global Cross Enterprise Engineering“. In: *wt Werkstattstechnik online* 104 (9 2014), S. 581–585.
- FIS15 Fischer, C.; Bönig, J.; Franke, J. et al.: „Worker information system to support during complex and exhausting assembly of high-voltage harness“. In: *2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Nürnberg, 15.–16. September 2015. 2015, S. 1–7.
- FIS16 Fischer, C.; Lušić, M.; Faltus, F. et al.: „Enabling Live Data Controlled Manual Assembly Processes by Worker Information System and Nearfield Localization System“. In: *Procedia CIRP* 55 (2016), S. 242–247.
- FOW03 Fowler, M.: *UML Distilled. A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language*. 3. ed. Boston: Addison-Wesley, 2003.

- FOW06 Fowler, M.: *GUI Architectures*. 2006. URL: <http://martinfowler.com/eaadDev/uiArchs.html>.
- FRA09 Franke, J. und Risch, F.: „Effiziente Erstellung, Distribution und Rückmeldung von Werkerinformationen in der Montage“. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF)* 104 (10 2009), S. 822–826.
- GAM03 Gamma, E. und Riehle, D.: *Entwurfsmuster. Elemente wiederverwendbarer objektorientierter Software*. 5., korr. Nachdr. Programmer's choice. München: Addison-Wesley, 2003.
- GAR84 Garvin, D. A.: „What does ”Product Quality” really mean?“ In: *Sloan Management Review* (26 1984), S. 25–43.
- GAR87 Garvin, D. A.: „Competing on the Eight Dimensions of Quality“. In: *Harvard Business Review* 65 (6 1987), S. 101–109.
- GEH04 Gehring, U. W. und Weins, C.: *Grundkurs Statistik für Politologen*. 4., überarb. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2004.
- GEI08 Geiger, W. und Kotte, W.: *Handbuch Qualität. Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme, Perspektiven*. 5., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Praxis und Studium. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag und GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- GEI95 Geiger, W.: „Qualität und Management. Das Ganze und die Teile“. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 40 (8 1995), S. 928–934.
- GEI98 Geiger, W.: *Qualitätslehre. Einführung - Systematik - Terminologie*. 3., neu bearb. u. erg. Aufl. Braunschweig und Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1998.
- GEW16 Gewohn, M. und Grimm, B.: „IIoT in vehicle assembly. Requirements and technologies“. In: *at - Automatisierungstechnik* 64 (9 2016), S. 758–764.

- GEW18a Gewohn, M.: „Man-system collaboration in quality control processes. Approaches and outlook for the automotive industry“. In: *2018 9th International Workshop on Optimization in Logistics and Industrial Applications (IWOLIA)*. Karlsruhe, 3.–4. Mai 2018. Fraunhofer IOSB, 2018.
- GEW18b Gewohn, M.; Beyerer, J.; Usländer, T. et al.: „A Quality Information Management Model for Smart Rework Control within Vehicle Assembly Processes“. In: *2018 International Conference on Information Management and Processing (ICIMP)*. London, 12.–14. Januar 2018. IEEE, 2018, S. 54–60.
- GEW18c Gewohn, M.; Beyerer, J.; Usländer, T. et al.: „A Quality Visualization Model for the Evaluation and Control of Quality in Vehicle Assembly“. In: *2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*. Oxford, 7.–9. März 2018. IEEE, 2018, S. 1–10.
- GEW18d Gewohn, M.; Beyerer, J.; Usländer, T. et al.: „Smart Information Visualization for First-Time Quality within the Automobile Production Assembly Line“. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (11 2018), S. 423–428.
- GEW18e Gewohn, M.; Piero, N.; Beyerer, J. et al.: „Information Technology based Quality Inspection in Vehicle Assembly - A Contribution to Transformation Ability and Production Quality“. In: *Proceedings of the 2018 International Conference on Industrial Internet of Things and Smart Manufacturing (IIoTsm)*. London, 5.–6. September 2018.
- GEW18f Gewohn, M.; Usländer, T. und Beyerer, J.: „Production quality control through a user-oriented and characteristic-based quality visualization model“. In: *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 511–516.
- GEW18g Gewohn, M.; Usländer, T.; Beyerer, J. et al.: „Digital real-time feedback of quality-related information to inspection and installation areas of vehicle assembly“. In: *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 458–463.

- GOL14 Goll, J.: *Architektur- und Entwurfsmuster der Softwaretechnik*. 2., aktual. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- GOR16 Gorecki, P. und Pautsch, P.: *Lean Management*. 4. Aufl. Hanser eLibrary. München: Carl Hanser Verlag, 2016.
- GUO14 Guo, A.; Starner, T.; Raghu, S. et al.: „A comparison of order picking assisted by head-up display (HUD), cart-mounted display (CMD), light, and paper pick list“. In: Dunne, L., Martin, T. und Beigl, M. (Hrsg.). *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2014)*. Seattle, 13.–17. September 2014. New York: ACM Press, 2014, S. 71–78.
- HAB15 Haberbollner, R., de Weck, O., Fricke, E. et al. (Hrsg.): *Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung*. 13., aktual. Aufl. Zürich: Orell Füssli, 2015.
- HAE00 Haese, E. und Scherff, B.: „Statistik in der Automatisierungstechnik. Ein neuer Ansatz zur Qualitätssicherung“. In: Brauer, W. und Holleczeck, P. (Hrsg.). *Pearl 99. Informatik aktuell*. Berlin, Heidelberg und New York: Springer-Verlag, 2000, S. 86–95.
- HAN15 Hansen, H. R.; Neumann, G. und Mendling, J.: *Wirtschaftsinformatik. Grundlagen und anwendungen*. 11. völlig neu bearb. Aufl. Berlin, München und Boston: de Gruyter Verlag, 2015.
- HAN97 Hannen, C. und Schieferdecker, R.: „Qualitätscontrolling mit PPS-Systemen in der technischen Auftragsabwicklung“. In: Eversheim, W. (Hrsg.). *Prozeßorientiertes Qualitätscontrolling. Qualität meßbar machen*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 1997, S. 105–129.
- HAR94 Hars, A.: *Referenzdatenmodelle. Grundlagen effizienter Datenmodellierung*. Schriften zur EDV-orientierten Betriebswirtschaft. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1994.
- HAU98 Hauer, C.: *Kennzahlengestützte Qualitätsregelkreise zur Steigerung der Kundenzufriedenheit bei Serviceprozessen*. Bd. 280. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.

- HEI17 Heidel, R.; Hoffmeister, M.; Hankel, M. et al.: *Industrie4.0 Basiswissen RAMI4.0. Referenzarchitekturmodell mit Industrie4.0-Komponente*. 1. Aufl. Berlin, Wien und Zürich: Beuth Verlag GmbH und VDE Verlag GmbH, 2017.
- HER03 Hering, E.; Triemel, J. und Blank, H.-P.: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. 5. Aufl. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.
- HER12 Herlyn, W.: *PPS im Automobilbau. Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten*. 1. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- HOF13 Hoffmann, D. W.: *Software-Qualität*. 2., aktual. u. korr. Aufl. eXamen.press. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- HUB16 Huber, W.: *Industrie 4.0 in der Automobilproduktion. Ein Praxisbuch*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- HUL11 Hull, B.: *Manufacturing best practices. Optimizing productivity and product quality*. Wiley & SAS business series. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- IHM06 Ihme, J.: *Logistik im Automobilbau. Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau*. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- IMG14 Imgrund, C.: „Ganzheitliche Ansätze und Methoden zur nachhaltigen Neuplanung einer energieeffizienten Fabrik mit besonderem Schwerpunkt auf die Automobilmontage“. Dissertation. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2014.
- JAC12 Jacob, M.: *Informationsorientiertes Management. Ein Überblick für Studierende und Praktiker*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012.
- JAC99 Jacob, U.: *Aufbau von vermaschten Qualitätsregelkreisen durch Integration von wissensbasierten Qualitätssicherungssystemen der Konstruktion und der Fertigung*. Bd. 506. Fortschrittberichte VDI: Reihe 2, Fertigungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.

- JOH16 Johansson, P. E.; Mattsson, S.; Moestam, L. et al.: „Multi-variant Truck Production - Product Variety and its Impact on Production Quality in Manual Assembly“. In: *Procedia CIRP* 54 (2016), S. 245–250.
- JUR80 Juran, J. M. und Gryna, F. M.: *Quality Planning and Analysis. From Product Development through Use*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1980.
- KAG11 Kagermann, H.; Lukas, W.-D. und Wahlster, W.: *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. 2011. URL: http://www.wolfgang-wahlster.de/wordpress/wp-content/uploads/Industrie_4_0_Mit_dem_Internet_der_Dinge_auf_dem_Weg_zur_vierten_industriellen_Revolution_2.pdf.
- KAG13 Kagermann, H., Wahlster, W. und Helbig, J. (Hrsg.): *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Frankfurt am Main: Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft, 2013.
- KAG17 Kagermann, H.: „Chancen von Industrie 4.0 nutzen“. In: Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T. und Hompel, M. ten (Hrsg.). *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4. Allgemeine Grundlagen*. 2. Aufl. Springer Reference Technik 4. Berlin: Springer-Verlag, 2017, S. 235–246.
- KAN84 Kano, N.; Seraku, N.; Takahashi, F. et al.: „Attractive Quality and Must-Be Quality“. In: *Journal of the Japanese Society for Quality Control* 14 (2 1984), S. 147–156.
- KAR18 Karius, A.: *Mercedes zeigt virtuellen Rundgang durch die „Factory 56“*. 2018. URL: <https://www.automobil-produktion.de/veranstaltungen/automobil-produktion-kongress-news/mercedes-zeigt-virtuellen-rundgang-durch-die-factory-56-293.html>.
- KIE16 Kiem, R.: *Qualität 4.0. QM, MES und CAQ in digitalen Geschäftsprozessen der Industrie 4.0*. München: Carl Hanser Verlag, 2016.

- KLA61 Klatt, S.: „Die Qualität als Objekt der Wirtschaftswissenschaften“. In: *Jahrbuch für Sozialwissenschaft* 12 (1961), S. 19–57.
- KLE09 Kleinert, A.: „Der messende Luchs“. In: *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin* 17 (2 2009), S. 199–206.
- KLE14 Kletti, J. und Schumacher, J.: *Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*. 2. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- KOE86 Koether, R.: *Verfahren zur Verringerung von Modell-Mix-Verlusten in Fließmontagen*. Bd. 93. IPA-IAO Forschung und Praxis, Berichte aus dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart, und Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1986.
- KOM98 Komorek, C.: *Integrierte Produktentwicklung. Der Entwicklungsprozess in mittelständischen Unternehmen der metallverarbeitenden Serienfertigung*. Bd. 18. Duisburger betriebswirtschaftliche Schriften. Berlin: S + W Steuer- und Wirtschaftsverlag, 1998.
- KRA13 Krallmann, H.; Bobrik, A. und Levina, O.: *Systemanalyse im Unternehmen. Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik*. 6., überarb. u. erw. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2013.
- KRA17 Kraft, S.: „Entwicklung eines quantifizierbaren Qualitätsmodells zur Visualisierung der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage“. Masterarbeit. Paderborn: Universität Paderborn, 2017.
- KRO09 Kropik, M.: *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- KRO14 Kronthaler, F.: *Statistik angewandt. Datenanalyse ist (k)eine Kunst*. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Spektrum, 2014.

- KRO95 Kromidas, S.: „Qualität und Bio-Logik“. In: Kromidas, S. (Hrsg.). *Qualität im analytischen Labor. Qualitätssicherungssysteme - Maßnahmen zur Qualitätssicherung - Der ganzheitliche Qualitätsgedanke*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1995, S. 321–346.
- LAH18 Lahres, B.; Rayman, G. und Strich, S.: *Objektorientierte Programmierung. Das umfassende Handbuch. Prinzipien guter Objektorientierung auf den Punkt erklärt*. 4., aktual. Aufl. Bonn: Rheinwerk Computing, 2018.
- LAN07 Lang, S.: *Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion*. Bd. 181. Fertigungstechnik - Erlangen. Bamberg: Meisenbach, 2007.
- LAN14 Landherr, M. H.: *Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung*. Bd. 39. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014.
- LEE87 Lee, H. L. und Rosenblatt, M. J.: „Simultaneous Determination of Production Cycle and Inspection Schedules in a Production System“. In: *Management Science* 33 (9 1987), S. 1125–1136.
- LEH08 Lehner, F.; Wildner, S. und Scholz, M.: *Wirtschaftsinformatik. Eine Einführung*. 2. Aufl. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2008.
- LIN11 Linß, G.: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. 3., aktual. u. erw. Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2011.
- LIN93 Lindemann, T. und Reineke, B.: „Unternehmensübergreifende Qualitätsregelkreise in der Automobilindustrie“. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 38 (12 1993), S. 675–680.
- LOR93 Lorenz, E. N.: *The essence of chaos*. London: UCL Press, 1993.
- LUN16 Lunze, J.: *Regelungstechnik 1. Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 11., überarb. u. erg. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.

- LUN74 Lundvall, D. M.: „Quality Costs“. In: Juran, J. M., Gryna, F. M. und Bingham, R. S. (Hrsg.). *Quality Control Handbook*. 3. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1974, S. 5.1–5.22.
- LUŠ13 Lušić, M.; Hornfeck, R.; Fischer, C. et al.: „Lean Information Management of Manual Assembly Processes. Creating IT-Based Information Systems for Assembly Staff Simultaneous to the Product Engineering Process“. In: *Applied Mechanics and Materials* 421 (2013), S. 546–553.
- LUŠ16 Lušić, M.; Fischer, C.; Bönig, J. et al.: „Worker Information Systems. State of the Art and Guideline for Selection under Consideration of Company Specific Boundary Conditions“. In: *Procedia CIRP* 41 (2016), S. 1113–1118.
- MAI99 Maicher, M.: „Informationsmodellierung im Management Consulting“. In: Becker, J., Rosemann, M. und Schütte, R. (Hrsg.). *Referenzmodellierung. State-of-the-Art und Entwicklungsperspektiven*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 1999, S. 166–184.
- MAS14 Masing, W.: „Das Unternehmen im Wettbewerb“. In: Pfeifer, T. und Schmitt, R. (Hrsg.). *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*. 6., überarb. Aufl. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2014, S. 4–14.
- MAS70 Masing, W.: „Qualitätskreis“. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 15 (5 1970), S. 115–116.
- MEH08 Mehlhorn, K. und Sanders, P.: *Algorithms and Data Structures. The Basic Toolbox*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- MEI04 Meißner, J.: *Statistik verstehen und sinnvoll nutzen. Anwendungsorientierte Einführung für Wirtschaftler*. Berlin und Boston: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2004.
- MEY60 Meyer, P. W.: „Qualität als Absatzfaktor“. In: *Jahrbuch der Absatz und Verbrauchsforschung* 6 (Sonderheft 1960), S. 23–41.

- MIC10 Michalos, G.; Makris, S.; Papakostas, N. et al.: „Automotive assembly technologies review. Challenges and outlook for a flexible and adaptive approach“. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2 (2 2010), S. 81–91.
- MIC15 Michalos, G.; Fysikopoulos, A.; Makris, S. et al.: „Multi criteria assembly line design and configuration - An automotive case study“. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9 (2015), S. 69–87.
- MIT16 Mitra, A.: *Fundamentals of quality control and improvement*. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- MOH12 Mohapatra, S.: *Information Theory and Best Practices in the IT Industry*. New York: Springer Science+Business Media, 2012.
- MOS06 Mosler, K. C. und Schmid, F.: *Beschreibende Statistik und Wirtschaftsstatistik*. 3. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- NIG14 Niggemann, O.; Jasperneite, J. und Vodencarevic, A.: „Konzepte und Anwendungsfälle für die intelligente Fabrik“. In: Bauernhansl, T., Hompel, M. ten und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.). *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 173–190.
- NKO06 Nkoa, C. U. M.: *Effiziente Gestaltung bankspezifischer CRM-Prozesse*. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2006.
- NOR00 DIN EN ISO 9241-13: *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 13: Benutzerführung*. August 2000.
- NOR07 ISO/IEC 25030: *Software engineering - Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - Quality requirements*. Juni 2007.
- NOR08a DIN 55350-11: *Begriffe zum Qualitätsmanagement - Teil 11: Ergänzung zu DIN EN ISO 9000:2005*. Mai 2008.

- NOR08b DIN EN ISO 9241-110: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*. September 2008.
- NOR08c VDA-Empfehlung 5010: *Standardbelieferungsformen der Logistik in der Automobilindustrie*. September 2008.
- NOR08d DIN SPEC 91345: *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. April 2016.
- NOR09 VDMA 66412-1: *Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen*. Oktober 2009.
- NOR10a DIN EN ISO 286-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - ISO-Toleranzsystem für Längenmaße - Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen (ISO 286-1:2010)*. November 2010.
- NOR14a DIN IEC 60050-351: *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik*. September 2014.
- NOR15a DIN EN ISO 9000: *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. November 2015.
- NOR16 North, K.: *Wissensorientierte Unternehmensführung. Wissensmanagement gestalten*. 6., aktual. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2016.
- OET05 Oetzmann, A.: *Einsatz wissensbasierter Systeme in Qualitätsmanagement von Produktionsverbänden*. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig. Essen: Vulkan-Verlag, 2005.
- OHL17 Ohlgs, M. M. K.: „Entwicklung und Implementierung eines Qualitätsregelkreises zur Optimierung der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage bei der Daimler AG“. Masterarbeit. Aachen: RWTH Aachen, 2017.
- PAE14 Paelke, V.: „Augmented reality in the smart factory. Supporting workers in an industry 4.0. environment“. In: *2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. Barcelona, 16.–19. September 2014. IEEE, 2014, S. 1–4.

- PFE01 Pfeifer, T.: *Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken*. 3., völlig überarb. u. erw. Aufl. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2001.
- PIC09 Pickel, G. und Pickel, S.: „Qualitative Interviews als Verfahren des Ländervergleichs“. In: Pickel, S., Pickel, G., Lauth, H.-J. et al. (Hrsg.). *Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft. Neue Entwicklungen und Anwendungen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften und GWV Fachverlage GmbH, 2009, S. 441–479.
- PIE17 Piero, N. und Schmitt, M.: „Virtual Commissioning of Camera-based Quality Assurance Systems for Mixed Model Assembly Lines“. In: *Procedia Manufacturing* 11 (2017), S. 914–921.
- PIE18 Piero, N. und Gewohn, M.: „Design of demand-oriented camera-based quality assurance systems within the framework of the Digital Twin“. In: *Proceedings of the 2018 International Conference on Industrial Internet of Things and Smart Manufacturing (IoTsm)*. London, 5.–6. September 2018.
- PRI14 PricewaterhouseCoopers International (Hrsg.): *How to be No. 1. Facing future challenges in the automotive industry*. 2014. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/automotive/industry-publication-s-and-thought-leadership/assets/pwc-how-to-be-no1-facing-future-challenges-in-the-automotive-industry.pdf>.
- PUE11 Puente León, F. und Kiencke, U.: *Messtechnik. Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker*. 8., gründlich überarb. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- QUA00 Quasthoff, U.: *Genetisches Programmieren (2)*. Universität Leipzig. 2000. URL: <https://www.informatik.uni-leipzig.de/lehre/Heyer0001/AD2-Vorl5/tsld013.htm>.
- RAI08 Raithel, J.: *Quantitative Forschung. Ein Praxiskurs*. 2., durchges. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften und GWV Fachverlage GmbH, 2008.

- REI17 Reinhart, G.: *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- REI99 Reiter, C.: „Toolbasierte Referenzmodellierung - State-of-the-Art und Entwicklungstrends“. In: Becker, J., Rosemann, M. und Schütte, R. (Hrsg.). *Referenzmodellierung. State-of-the-Art und Entwicklungsperspektiven*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 1999, S. 45–68.
- REM01 Remmert, J.: *Referenzmodellierung für die Handelslogistik*. 1. Aufl. Gabler Edition Wissenschaft: Integrierte Logistik und Unternehmensführung. Wiesbaden: Springer Fachmedien und Deutscher Universitäts-Verlag, 2001.
- RIE62 Rieger, H. R. W.: *Der Güterbegriff in der Theorie des Qualitätswettbewerbs. Ein Beitrag zur Reduktion der subjektiven Qualität auf ihre psychologischen Grundlagen*. 1. Aufl. Bd. 67. Volkswirtschaftliche Schriften. Berlin: Duncker & Humblot, 1962.
- ROL16 Roland Berger und Lazard (Hrsg.): *Global Automotive Supplier Study 2016. Being prepared for uncertainties*. 2016. URL: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_global_automotive_supplier_2016_final.pdf.
- ROL92 Roller, D.: „Technical Information System for Assembly, Test and Service Documentation“. In: Brödner, P. und Karwowski, W. (Hrsg.). *Ergonomics of Hybrid Automated Systems III. Proceedings of the Third International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing and Hybrid Automation*. Amsterdam, 26.–28. August 1992. Elsevier Science Publishers B. V., 1992, S. 273–278.
- ROS08 Roscher, J.: „Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2008.
- ROS12 Rosemann, M.; Schwegmann, A. und Delfmann, P.: „Vorbereitung der Prozessmodellierung“. In: Becker, J., Kugeler, M. und Rosemann, M. (Hrsg.). *Prozessmanagement. Ein Leitfaden*

- zur *prozessorientierten Organisationsgestaltung*. 7., korr. u. erw. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, 2012, S. 47–111.
- RUD14 Rudow, B.: „Betriebliche Informationssysteme in der Automobilproduktion als soziotechnische Systeme - psychologische Aspekte“. In: Rudow, B. und Heidecke, H.-C. (Hrsg.). *Betriebliche Informationssysteme in der Automobilproduktion. Soziotechnisches System - Nutzerpersönlichkeit - Nutzungserleben - Roll-out und Betrieb - Fabriksteuerung - Informationen auf Shopfloor - IT-Nutzen*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2014, S. 57–94.
- RUP12 Rupp, C. und Queins, S.: *UML2 glasklar. Praxiswissen für die UML-Modellierung*. 4., aktual. u. erw. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- SCH02a Scheer, A.-W.: *ARIS - Vom Geschäftsprozess zum Anwendungssystem*. 4., durchges. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
- SCH02b Schukraft, D.: „Fehlerbeseitigungsmanagement im Rahmen der Plattformstrategie am Beispiel der Automobilindustrie“. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2002.
- SCH08 Schneider, G.; Geiger, I. K. und Scheuring, J.: *Prozess- und Qualitätsmanagement. Grundlagen der Prozessgestaltung und Qualitätsverbesserung mit zahlreichen Beispielen, Repetitionsfragen und Antworten*. 1. Aufl. Betriebswirtschaftslehre. Zürich: Compendio Bildungsmedien, 2008.
- SCH09a Schick, M.; Haueis, M. und Schneider, F.: „Lernregelkreise zur Unterstützung der Qualitätsregelung in der manuellen Montage“. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF)* 104 (6 2009), S. 463–467.
- SCH09b Schröder, A.-K. und Nebl, T.: „Qualität - Einflussfaktor auf die Produktivität“. In: Specht, D. (Hrsg.). *Weiterentwicklung der Produktion. Tagungsband der Herbsttagung 2008 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB*.

- München, 29. September 2008. Wiesbaden: Gabler und GWV Fachverlage GmbH, 2009, S. 117–141.
- SCH11a Schmitt, R. und Glöckner, H.: „Effizienter mit Sensor, Regler und Aktor. Verbesserung von Qualitätsregelkreisen durch Regelungstechnik“. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 56 (2 2011), S. 56–57.
- SCH11b Schmitt, R.; Monostori, L.; Glöckner, H. et al.: „Designing Closed Quality Control Loops for Stable Production Systems“. In: *55th EOQ Congress*. Budapest, 20.–23. Juni 2011. Budapest: European Organization for Quality, 2011.
- SCH15 Schmitt, R. und Pfeifer, T.: *Qualitätsmanagement. Strategien - Methoden - Techniken*. 5., aktual. Aufl. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2015.
- SCH16 Schmitt, R.; Ngo, Q. H.; Groggert, S. et al.: „Datenbasierte Qualitätsregelung“. In: Refflinghaus, R., Kern, C. und Klute-Wenig, S. (Hrsg.). *Qualitätsmanagement 4.0 - Status quo! Quo vadis? Bericht zur GQW-Jahrestagung 2016 in Kassel*. Kasseler Schriftenreihe Qualitätsmanagement 6. Kassel: Kassel University Press, 2016, S. 23–42.
- SCH18 Schwalbach, J.: „Entwicklung und konzeptionelle Evaluierung einer hybriden Qualitätsregelung in der Fahrzeugmontage im Kontext des Industrial Internet of Things“. Masterarbeit. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2018.
- SCH94a Scheer, A.-W.; Hoffmann, W. und Wein, R.: „Customizing von Standardsoftware mit Referenzmodellen“. In: *HMD* 31 (180 1994), S. 92–103.
- SCH94b Schmelzer, H. J.: „Qualitätscontrolling in der Produktplanung und Produktentwicklung Teil 1“. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 39 (2 1994), S. 117–125.
- SCH94c Schmelzer, H. J.: „Qualitätscontrolling in der Produktplanung und Produktentwicklung Teil 2“. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 39 (3 1994), S. 260–267.

- SCH95a Schmid, J.: „Expertenbefragung und Informationsgespräch in der Parteienforschung. Wie föderalistisch ist die CDU?“ In: Alemann, U. von (Hrsg.). *Politikwissenschaftliche Methoden*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1995, S. 293–326.
- SCH95b Schmidt, J. und Leithner, R.: *Automobilrecycling. Stoffliche, rohstoffliche und thermische Verwertung bei Automobilproduktion und Altaggregatrecycling*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.
- SCH96 Scheer, A.-W. und Trimpold, H.: *Qualitätsinformationssysteme. Modell und technische Implementierung*. Qualitätsmanagement. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- SCH98 Schütte, R.: *Grundsätze ordnungsmäßiger Referenzmodellierung. Konstruktion konfigurations- und anpassungsorientierter Modelle*. Bd. 233. Neue Betriebswirtschaftliche Forschung. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1998.
- SEG13 Seghezzi, H. D.; Fahrni, F. und Friedli, T.: *Integriertes Qualitätsmanagement. Das St. Galler Konzept*. 4., vollst. überarb. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- SEL01 Sellig, U.: *Die Revision eines Qualitätsmanagement-Systems nach DIN 9000:2000. Am Beispiel einer Lackfabrik*. Hamburg: Diplomica Verlag, 2001.
- SIE17 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. (Hrsg.): *Produktionsqualität*. 2017. URL: <http://camstar.industrysoftware.automation.siemens.com/de/resources/glossary/manufacturing-quality/>.
- SIM62 Simon, H. A.: „The Architecture of Complexity“. In: *Proceedings of the American Philosophical Society* 106 (6 1962), S. 467–482.
- SOL17 Soley, R.: „Das Ökosystem des Industrial Internet“. In: Schulz, T. (Hrsg.). *Industrie 4.0. Potenziale erkennen und umsetzen*. 1. Aufl. Würzburg: Vogel Business Media, 2017, S. 47–50.

- STA06 Staud, J. L.: *Geschäftsprozessanalyse. Ereignisgesteuerte Prozessketten und objektorientierte Geschäftsprozessmodellierung für Betriebswirtschaftliche Standardsoftware*. 3. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- STA17 Statistisches Bundesamt, Statista, IMF et al. (Hrsg.): *Branchenreport - Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen 2017*. 2017. URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/248362/umfrage/prognose-zum-umsatz-in-der-automobilindustrie-in-deutschland>.
- STA73 Stachowiak, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer-Verlag, 1973.
- STO14 Stocker, A.; Brandl, P.; Michalczuk, R. et al.: „Mensch-zentrierte IKT-Lösungen in einer Smart Factory“. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 131 (7 2014), S. 207–211.
- TAG04 Taguchi, G.; Chowdhury, S. und Wu, Y.: *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.
- TAK09 Takeda, H.: *Qualität im Prozess. Leitfaden zur Qualitätssteigerung in der Produktion*. 1. Aufl. München: mi-Wirtschaftsbuch FinanzBuch Verlag, 2009.
- TAM10 Tamadazte, B.; Marchand, E.; Dembélé, S. et al.: „CAD Model-based Tracking and 3D Visual-based Control for MEMS Micro-assembly“. In: *The International Journal of Robotics Research* 29 (11 2010), S. 1416–1434.
- TAN08 Tan, J. T. C.; Duan, F.; Zhang, Y. et al.: „Assembly Information System for Operational Support in Cell Production“. In: Mitsui-shi, M., Ueda, K. und Kimura, F. (Hrsg.). *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. Tokyo, 26.–28. Mai 2008. London: Springer-Verlag, 2008, S. 209–212.
- THE13 Theden, P. und Colmsan, H.: *Qualitätstechniken. Werkzeuge zur Problemlösung und ständigen Verbesserung*. 5. Aufl. Bd. 2. Pocket-Power. München: Carl Hanser Verlag, 2013.

- TOL09 Tolk, A. und Jain, L. C.: „An Introduction to Complex Systems in the Knowledge-Based Environment“. In: Jain, L. C. und Tolk, A. (Hrsg.). *Complex Systems in Knowledge-based Environments. Theory, Models and Applications*. Studies in Computational Intelligence 168. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, S. 1–6.
- TOU09 Toutenburg, H.; Schomaker, M.; Wißmann, M. et al.: *Arbeitsbuch zur deskriptiven und induktiven Statistik*. 2., aktual. u. erw. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- TRÖ15 Tröster, F.: *Regelungs- und Steuerungstechnik für Ingenieure*. 4. Aufl. Bd. 1. De Gruyter Studium. Berlin und Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2015.
- TSC14 Tschohl, C.: „Industrie 4.0 aus rechtlicher Perspektive“. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 131 (7 2014), S. 219–222.
- TUK77 Tukey, J. W.: *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley series in behavioral science Quantitative methods. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1977.
- ULR76 Ulrich, P. und Hill, W.: „Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I)“. In: Dichtl, E. und Issing, O. (Hrsg.). *WiSt Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt*. Bd. 7. 5 Bde. 1976, S. 304–309.
- ULR84 Ulrich, H.: „Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft“. In: Ulrich, H., Dyllick, T. und Probst, G. J. B. (Hrsg.). *Management*. Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmungsführung 13. Bern: Haupt Verlag, 1984.
- VIE15 Vieritz, H.: *Barrierefreiheit im virtuellen Raum. Benutzungszentrierte und modellgetriebene Entwicklung von Weboberflächen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- VOE74 Voegtlen, H.: „New-Product Quality“. In: Juran, J. M., Gryna, F. M. und Bingham, R. S. (Hrsg.). *Quality Control Handbook*. 3. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1974, S. 8.1–8.65.

- VOM15 vom Brocke, J.: *Referenzmodellierung. Gestaltung und Verteilung von Konstruktionsprozessen*. 2., unver. Aufl. Bd. 4. *Advances in information systems and management science*. Berlin: Logos Verlag, 2015.
- VON01 von Mühlendahl, C.: *Strukturmodelle und Informationssysteme für Qualitätsregelkreise in Industrieunternehmen*. Bd. 12. Reihe Management Research. Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 2001.
- VON10 von Nitzsch, R. und Mersmann, C.: „Wert von Messungen in Qualitätsregelkreisen. Ein Modell für den wirtschaftlichen Einsatz fertigungsintegrierter Messtechnik“. In: *Industrie Management* (4 2010), S. 21–24.
- VON84 von Bertalanffy, L.: *General System Theory. Foundations, Development, Applications*. 9. ed. The international library of systems theory and philosophy. New York: George Braziller, 1984.
- WAL93 Walther, J.: *Rechnergestützte Qualitätssicherung und CIM*. Bd. 7. Beiträge zur Wirtschaftsinformatik. Heidelberg: Physica-Verlag, 1993.
- WAN13 Wang, Q.; Sowden, M. und Mileham, A. R.: „Modelling human performance within an automotive engine assembly line“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68 (1-4 2013), S. 141–148.
- WAN17 Wang, Q. und Abubakar, M. I.: „Human Factors and Their Effects on Human-Centred Assembly Systems - A Literature Review-Based Study“. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 239 (2017), S. 1–7.
- WAR96 Warnecke, H.-J.: *Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb. Technik, Organisation, Betriebswirtschaft*. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.
- WEI78 Weinberg, P. und Behrens, G.: „Produktqualität“. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 7 (1 1978), S. 15–18.

- WEI96 Weidmann, A.: *Situationssensitives Qualitätsmanagement für Hersteller komplexer Investitionsgüter. Ein Beitrag zur Etablierung von Qualitätsregelkreisen in den technischen Planungsfunktionen*. Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung. Aachen: Shaker Verlag, 1996.
- WES13 Westkämper, E.: „Integration in der digitalen Produktion“. In: Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C. et al. (Hrsg.). *Digitale Produktion*. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, S. 133–144.
- WEY11 Weyer, M.: „Hours-per-vehicle controlling - the renaissance of staff productivity“. In: *International Journal of Production Research* 49 (11 2011), S. 3271–3284.
- WIL00 Willnecker, U.: „Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen“. Dissertation. München: Technische Universität München, 2000.
- WIL06 Wilhelm, S.: „Verfahren zur Einführung eines internetbasierten Content Management für Qualitätsregelkreise in der Produktion“. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2006.
- WIT94 Wittig, K.-J.: *Qualitätsmanagement in der Praxis. DIN ISO 9000, Lean Production, Total-Quality-Management: Einführung eines QM-Systems im Unternehmen*. 2., überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Teubner Verlag, 1994.
- WÖH16 Wöhe, G.; Döring, U. und Brösel, G.: *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 26., überarb. u. aktual. Aufl. Vahle's Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Franz Vahlen Verlag, 2016.
- XU14 Xu, L. D.; He, W. und Li, S.: „Internet of Things in Industries. A Survey“. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10 (4 2014), S. 2233–2243.
- YES05 Yesin, K. B. und Nelson, B. J.: „A CAD model based tracking system for visually guided microassembly“. In: *Robotica* 23 (4 2005), S. 409–418.

- ZIE12 Ziegler, D.: *Die Industrielle Revolution*. 3. Aufl. Geschichte kompakt. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2012.

Eigene Publikationen

Folgende wissenschaftliche Beiträge wurden im Rahmen der Promotions-tätigkeit über Konferenzen und Journals veröffentlicht:

- GEW16 Gewohn, M. und Grimm, B.: „IIoT in vehicle assembly. Requirements and technologies“. In: *at - Automatisierungstechnik* 64 (9 2016), S. 758–764.
- GEW18a Gewohn, M.: „Man-system collaboration in quality control processes. Approaches and outlook for the automotive industry“. In: *2018 9th International Workshop on Optimization in Logistics and Industrial Applications (IWOLIA)*. Karlsruhe, 3.–4. Mai 2018. Fraunhofer IOSB, 2018.
- GEW18b Gewohn, M.; Beyerer, J.; Usländer, T. et al.: „A Quality Information Management Model for Smart Rework Control within Vehicle Assembly Processes“. In: *2018 International Conference on Information Management and Processing (ICIMP)*. London, 12.–14. Januar 2018. IEEE, 2018, S. 54–60.
- GEW18c Gewohn, M.; Beyerer, J.; Usländer, T. et al.: „A Quality Visualization Model for the Evaluation and Control of Quality in Vehicle Assembly“. In: *2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*. Oxford, 7.–9. März 2018. IEEE, 2018, S. 1–10.
- GEW18d Gewohn, M.; Beyerer, J.; Usländer, T. et al.: „Smart Information Visualization for First-Time Quality within the Automobile Production Assembly Line“. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (11 2018), S. 423–428.
- GEW18e Gewohn, M.; Piero, N.; Beyerer, J. et al.: „Information Technology based Quality Inspection in Vehicle Assembly - A Contribution to Transformation Ability and Production Quality“. In: *Proceedings of the 2018 International Conference on Industrial Internet of Things and Smart Manufacturing (IoTsm)*. London, 5.–6. September 2018.

- GEW18f Gewohn, M.; Usländer, T. und Beyerer, J.: „Production quality control through a user-oriented and characteristic-based quality visualization model“. In: *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 511–516.
- GEW18g Gewohn, M.; Usländer, T.; Beyerer, J. et al.: „Digital real-time feedback of quality-related information to inspection and installation areas of vehicle assembly“. In: *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 458–463.
- PIE18 Piero, N. und Gewohn, M.: „Design of demand-oriented camera-based quality assurance systems within the framework of the Digital Twin“. In: *Proceedings of the 2018 International Conference on Industrial Internet of Things and Smart Manufacturing (IoTsm)*. London, 5.–6. September 2018.

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|---|
| aktual. | aktualisierte |
| APQ | Assembly-specific Production Quality (dt.: montagespezifische Produktionsqualität) |
| Aufl. | Auflage |
| AWF | Arbeitsgemeinschaft für Wirtschaftliche Fertigung |
| Bd. | Band |
| Bde. | Bände |
| bearb. | bearbeitet |
| bspw. | beispielsweise |
| bzgl. | bezüglich |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| CAQ | Computer-Aided Quality (dt.: computergestützte Qualität) |
| CPS | Cyber-Physical System (dt.: cyber-physisches System) |
| CQD | Characteristic-based Quality Design (dt.: merkmalsbezogenes Qualitätskonzept) |
| d. h. | das heißt |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e. V. |
| DM | Drehmoment |
| dt. | deutsch |
| durchges. | durchgesehene |
| e. V. | eingetragener Verein |
| ed. | edition |
| EN | Europäische Norm |
| EOL | End of Line (dt.: Montageende) |
| EPK | Ereignisgesteuerte Prozesskette |

| | |
|-----------------|---|
| erg. | ergänzte |
| erw. | erweiterte |
| et al. | et alii (dt.: und andere) |
| etc. | et cetera (dt.: und so weiter) |
| EUR | Euro |
| evtl. | eventuell |
| f. | folgende Seite |
| ff. | fortfolgende Seiten |
| Fzg. | Fahrzeug(e) |
| ggf. | gegebenenfalls |
| GUI | Graphical User Interface (dt.: grafische Benutzeroberfläche) |
| HPV | Hours Per Vehicle (dt.: Arbeitsstunden pro Fahrzeug) |
| Hrsg. | Herausgeber |
| i. d. F. | in diesem Fall |
| i. d. R. | in der Regel |
| i. e. S. | im engeren Sinne |
| i. O. | in Ordnung |
| IEC | International Electrotechnical Commission (dt.: Internationale Elektrotechnische Kommission) |
| IIoT | Industrial Internet of Things (dt.: Industrielles Internet der Dinge) |
| IKT | Informations- und Kommunikationstechnologie |
| inkl. | inklusive |
| IOSB | Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung |
| IoT | Internet of Things (dt.: Internet der Dinge) |
| IS | Informationssystem |

| | |
|-----------------|--|
| ISO | International Organization for Standardization (dt.: Internationale Organisation für Normung) |
| IT | Informationstechnologie |
| JIS | Just-in-Sequence (dt.: Reihenfolgesynchronität) |
| korr. | korrigierte(r) |
| KPI | Key Performance Indicator (dt.: Leistungskennzahl) |
| KVP | Kontinuierlicher Verbesserungsprozess |
| LZ | Liegezeit |
| MES | Manufacturing Execution System (dt.: Produktionsleitsystem) |
| Min. | Minute(n) |
| MOE | Montageende |
| MP | Messpunkt |
| n. i. O. | nicht in Ordnung |
| NA | Nacharbeit |
| Nachdr. | Nachdruck |
| Nr. | Nummer |
| o. g. | oben genannten |
| OEE | Overall Equipment Effectiveness (dt.: Gesamtanlageneffektivität) |
| PDA | Personal Digital Assistant (dt.: persönlicher digitaler Assistent) |
| Q- | Qualität(s)- |
| Q-Tor | Qualitätstor |
| QCS | Quality Control Structure (dt.: Qualitätsregelungsstruktur) |
| QE | Qualitätselement |

| | |
|----------------|---|
| QF | Qualitätsfähigkeit |
| QIS | Quality Inspection System (dt.: Qualitätsprüfsystem) |
| QM | Qualitätsmanagement |
| QRK | Qualitätsregelkreis |
| QVM | Quality Visualization Model (dt.: Qualitätsvisualisierungsmodell) |
| RAMI4.0 | Referenzarchitekturmodell der Industrie 4.0 |
| RFID | Radio-Frequency Identification (dt.: Identifizierung mittels elektromagnetischer Wellen) |
| RK | Regelkreis |
| S. | Seite |
| s. | siehe |
| Sek. | Sekunde(n) |
| SOA | Serviceorientierte Architektur |
| Std. | Stunde(n) |
| SU | Störungsbedingte Unterbrechung |
| SZ | Stillstandszeit |
| TPS | Toyota Production System |
| TQE | Teil-Qualitätselement |
| TZ | Transportzeit |
| u. | und |
| u. a. | unter anderem |
| u. U. | unter Umständen |
| UML | Unified Modeling Language (dt.: vereinheitlichte Modellierungssprache) |
| unver. | unveränderte |
| usw. | und so weiter |
| UWB | Ultra Wideband (dt.: Ultrabreitband) |
| VDMA | Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. |

| | |
|-----------------|--|
| vgl. | vergleiche |
| vollst. | vollständig |
| WII | Worker Interaction Interface (dt.: Werkerinteraktionsschnittstelle) |
| WIS | Worker Information System (dt.: Werkerinformationssystem) |
| z. B. | zum Beispiel |
| z. T. | zum Teil |
| ZNA | Zentraler Nacharbeitsbereich |
| überarb. | überarbeitete |

Symbolverzeichnis

| | |
|------------------|--|
| A | Fläche |
| APQ_B | Montagespezifische Produktionsqualität (binär) |
| APQ_Q | Montagespezifische Produktionsqualität (quantitativ) |
| C_f | Fehlerverhütungskosten |
| C_f^w | Eingetretene Fehlerverhütungskosten |
| C_f^z | Geplante Fehlerverhütungskosten |
| C_p | Prüfkosten |
| C_p^w | Eingetretene Prüfkosten |
| C_p^z | Geplante Prüfkosten |
| C_q | Qualitätskosten |
| C_r | Nacharbeitskosten |
| D | Definitionsmenge |
| E | Einflussgrößen |
| H | Zeitraum |
| S | Sicherheitsmenge |
| T | Toleranzmenge |
| α | Winkel |
| \bar{w} | Istwert (Mittelwert) |
| β | Gewichtungsfaktor |
| λ | Länge eines Vektors |
| \mathbb{R} | Menge der reellen Zahlen |
| \mathbb{R}_0^+ | Menge der positiven reellen Zahlen inkl. Null |
| \vec{v} | Vektor |
| a | Temporärer Flächenwert |
| c_r | Nacharbeitskostensatz pro Stunde |
| d | Abweichung |
| e | Prüfmerkmal |
| f | Fehleranzahl |
| $f/100$ | Fehleranzahl pro 100 Fahrzeuge |
| g | Grenze |
| h | Zeitpunkt |

| | |
|-----------|--|
| m | Qualitätsmerkmal |
| n | Stückzahl |
| o | Betrachtungsobjekt |
| q_B | Binärer Qualitätswert |
| q_Q | Quantitativer Qualitätswert |
| r | Nacharbeitszeit in Minuten |
| $r/100$ | Nacharbeitszeit in Minuten pro 100 Fahrzeuge |
| s_{max} | Obere Sicherheitsgrenze |
| s_{min} | Untere Sicherheitsgrenze |
| t_{max} | Obere Toleranzgrenze |
| t_{min} | Untere Toleranzgrenze |
| u | Stellwert |
| w | Istwert |
| x | x-Koordinate |
| y | y-Koordinate |
| z | Sollwert |

Glossar

Asset

Ein Asset bezeichnet einen „Gegenstand von Wert“ der physischen oder virtuellen Welt [HEI17].

Betrachtungsobjekt

Ein Betrachtungsobjekt bezeichnet ein materielles Produkt, einen immateriellen Prozess oder ein materielles bzw. immaterielles System.

Bruttofehler

Die Bruttofehler repräsentieren die Gesamtheit aller vorhandenen Fehler. Diese setzen sich zusammen aus den entdeckten Fehlern (Nettofehler) und nicht entdeckten Fehlern einer Produktion.

Exotenfahrzeug

Ein Exotenfahrzeug besitzt eine außergewöhnliche Ausstattung. Dies könnte z. B. eine seltene Ausstattung oder eine Vollausrüstung sein. Die Deklaration eines Fahrzeugs als Exotenfahrzeug erfolgt i. d. R. nur für Montagestationen mit hoher Produktvarianz. Klassische Exotenfahrzeuge sind z. B. Taxen, Einsatzfahrzeuge (Polizei, Notarzt, etc.) oder weitere Sonderanfertigungen.

Fehlerbild

Ein Fehlerbild beschreibt die Ausprägung einer Qualitätsabweichung. Im informationstechnischen Kontext umfasst ein Fehlerbild einen Datensatz mit den folgenden drei Attributen: Die Baureihe, das fehlerhafte Bauteil als Fehlerort und den Fehlertyp als Fehlerart.

Fehlerschlupf

Ein Fehlerschlupf bezeichnet eine Menge von unentdeckten Fehlern. Diese wurden im Rahmen einer Qualitätsprüfung gefunden, jedoch bereits zuvor (z. B. von einem vorgelagerten Q-Tor) überprüft und dabei nicht entdeckt. Folglich ist diese Fehlermenge bei der ersten Qualitätsprüfung (z. B. beim Q-Tor) durchgeschlupft.

Geradeauslauf

Der Geradeauslauf bezeichnet den Zielerreichungsgrad der effektiven Produktion. Diese Kennzahl berücksichtigt Einheiten, die ohne Korrekturprozesse die Qualitätsanforderungen einhalten und die Produktqualität erfüllt. Der Geradeauslauf wird über den Quotienten aus der Anzahl fehlerfreier Fahrzeuge und der Anzahl produzierter Fahrzeuge ermittelt. Folglich repräsentiert die Kennzahl die produzierte Qualität und ist der Qualitätsrate bzw. invertierten Fehlerrate identisch.

Hochzeit

Als Hochzeit wird innerhalb der Fahrzeugmontage die Fügeoperation zwischen dem Antriebsstrang und der Fahrzeugkarosserie bezeichnet.

Hours Per Vehicle

Die Kennzahl „Hours Per Vehicle“ (HPV) ist eine Personalproduktivitätskennzahl und setzt alle bezahlten Anwesenheitsstunden der produktionsbezogenen Mitarbeiter in Relation zu den produzierten Fahrzeugen im gleichen Betrachtungszeitraum [WEY11]. Außerhalb der Automobilindustrie wird diese Kennzahl auch als „Hours Per Unit“ oder „Hours Per Job“ bezeichnet.

Hybride Qualitätsregelung

Die hybride Qualitätsregelung bezeichnet die effektive und effiziente Kollaboration zwischen den Faktoren Mensch und System im Kontext einer Regelung der Produkt- und Produktionsqualität innerhalb des Produktionsprozesses.

Just-In-Sequence

Eine Just-In-Sequence-Produktion (JIS) bezeichnet die Reihenfolgesynchronität bzgl. der Beschaffungslogistik sowie der Produktionsplanung und -steuerung innerhalb der Automobilproduktion. Die Anlieferung der erforderlichen Bauteile, Baugruppen und Aggregate erfolgt dabei als lagerlose, kurzzyklische Direktbelieferung in Sequenz. Maßgeblich für eine Einführung von JIS über längere Transportdistanzen ist eine hohe Perlenkettengüte über einen definierten Zeitraum, der u. a. die längeren Transportzeiten und Distanzen berücksichtigt. [NOR08c]

Nettofehler

Die Nettofehler repräsentieren die erkannten bzw. dokumentierten Fehler einer Produktion. Diese verkörpern eine Teilmenge der Bruttofehler.

Perlenkette

Die Perlenkette bezeichnet in der Automobilproduktion die festgelegte Reihenfolge der zu produzierenden Fahrzeuge auf der Produktionslinie. Diese Reihenfolge ist ab Montagebeginn festgeschrieben. Änderungen sind bis zum Montageende nur durch manuelles Ausschleusen des Fahrzeugs an definierten Punkten der Montagelinie möglich.

Qualitätstor

Ein Qualitätstor (Q-Tor) ist eine Sonderstation im Montageablauf und befindet sich am Ende eines Montageabschnittes oder außerordentlich innerhalb der Montagelinie. In einem Q-Tor werden ausschließlich Qualitätsprüfungen am Produkt auf Basis allgemeiner Montageumfänge und spezifischer Schwerpunkte durchgeführt sowie Fehleraufkommen dokumentiert.

Anhang

A Beispiele für Qualitätsmerkmale

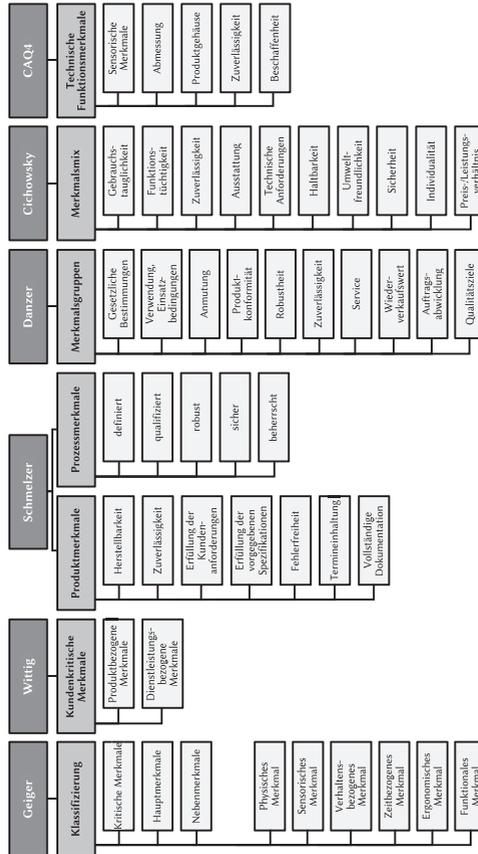


Abbildung A.1: Produktbezogene Qualitätsmerkmale¹

¹ Quelle: [GEI08; GEI98; GEI95; WIT94; SCH94b; SCH94c; DAN95; CIC92; CAQ11b; CAQ11a].

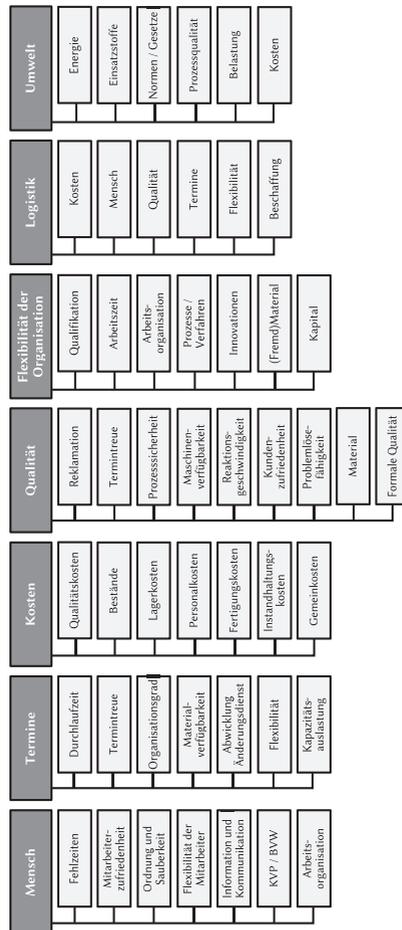


Abbildung A.2: Produktionsbezogene Qualitätsmerkmale²

² Quelle: „Arbeitsgemeinschaft für Wirtschaftliche Fertigung“ (AWF) nach ENGRÖFF [ENG14].

B Zeitmodell für Produktionseinheiten nach VDMA

Folgendes Zeitmodell gibt das VDMA-Einheitsblatt 66412-1 wieder [NOR09]:

- **Betriebszeit (BZ):** Zeit, in der eine Produktionseinheit betrieblich und personell für die Produktion und Instandhaltung genutzt werden kann. Die Betriebszeit ist eine geplante Zeit.
- **Planbelegungszeit (PBZ):** Betriebszeit abzüglich der geplanten Stillstände. Die geplanten Stillstände können für geplante Wartungsarbeiten genutzt werden.
- **Belegungszeit (BLZ):** Zeit, mit der eine Produktionseinheit für die Ausführung eines Auftrages belegt wird.
- **Bearbeitungszeit (BAZ):** Zeit für das Rüsten und für die Hauptnutzung.
- **Hauptnutzungszeit (HNZ):** Zeit, in der die Maschine produziert.

Abbildung B.1 zeigt Zeitachsen für Produktionseinheiten nach dem VDMA-Einheitsblatt 66412-1 [NOR09].

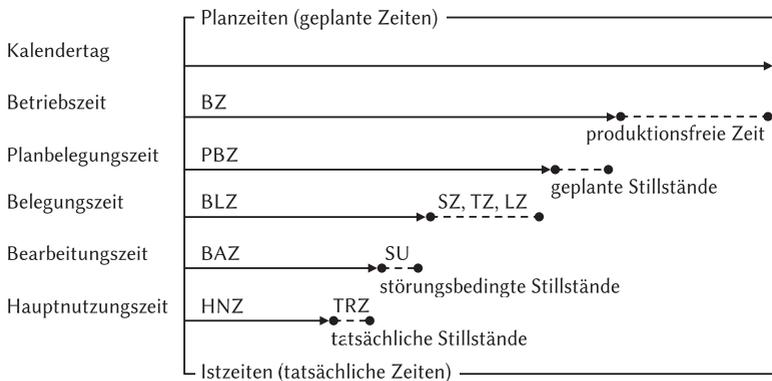


Abbildung B.1: Zeitachsen für Produktionseinheiten

Der Fokus des Zeitmodells liegt auf einer Produktionseinheit, wobei die ersten vier Definitionen diese nicht spezifizieren. Die HNZ spezifiziert die Produktionseinheit als Maschine und stellt eine inkonsistente Fortführung der Definitionen dar. Für eine logische Fortsetzung muss die HNZ neu definiert werden:

Hauptnutzungszeit: Zeit, in der die Produktionseinheit produziert.

Eine Produktionseinheit in der Fahrzeugmontage ist vom Betrachtungsbereich abhängig. Die Betrachtung des Menschen als Produktionseinheit ist jedoch wenig sinnvoll. Die HNZ des Montagebands hat einen direkten Einfluss auf die produzierte Stückzahl. Die Bandgeschwindigkeit und Stationslänge sowie die daraus resultierende Taktzeit sind die maßgeblichen Faktoren. Für einen Bezug zur Fahrzeugmontage wird die HNZ erneut umdefiniert:

Hauptnutzungszeit: Zeit, in der das Montageband Fahrzeuge fördert.

Dabei beeinflussen folgende Zeiten die HNZ [NOR09]:

- **Stillstandszeit (SZ):** Zeit, in der die Maschine nicht mit Aufträgen belegt ist, obwohl sie dafür zur Verfügung steht.
- **Transportzeit (TZ):** Zeit, die für den Transport zwischen Produktionseinheiten oder zum bzw. vom Lager für Material verwendet wird.
- **Liegezeit (LZ):** Zeit, in der das Material im Fertigungsprozess nicht in Bearbeitung ist und sich nicht im Transport befindet.
- **Störungsbedingte Unterbrechung (SU):** Zeit, die während der Auftragsbearbeitung ungeplant auftritt und die Belegungszeiten verlängert.

C Technischer Regelkreis nach DIN IEC 60050-351

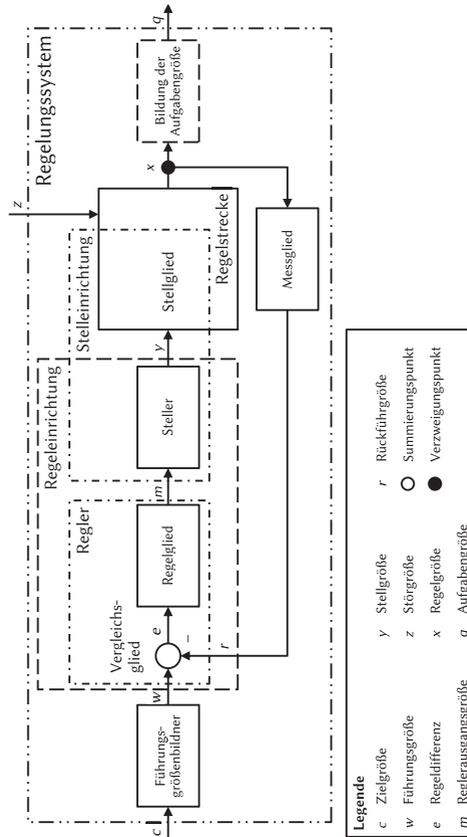


Abbildung C.1: Technischer Regelkreis nach DIN IEC 60050-351³

³ Quelle: [NOR14a].

D Erläuterungen zur Industrie 4.0

Der Begriff *Industrie 4.0* beschreibt die vierte industrielle Revolution und wurde erstmals auf der Hannover Messe 2011 im Zusammenhang des gleichnamigen Projektes in der Hightech-Strategie der Forschungsunion der Bundesregierung erwähnt. ACATECH (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften) hat 2013 eine Forschungsagenda und Umsetzungsempfehlungen vorgestellt, die auf Betreiben des Bundesforschungsministeriums (BMBF) ausgearbeitet wurde. Dies baute auf der „Nationale Roadmap Embedded Systems“ auf. [BUN18; KAG11] Internationale Pendanten zur Industrie 4.0 repräsentieren das „Industrial Internet Consortium“ (USA), die „Industrial Value-Chain Initiative“ (Japan), „Made in China 2025“ (China) und „Industrie du futur“ (Frankreich). Eine historische Übersicht zur Entwicklung von Industrie 4.0 wird in [DOM14; ZIE12; DOM12; KAG13; KIE16; BOR17; TSC14] gegeben.

Strategisch zielt Industrie 4.0 darauf ab, das hohe Innovations- und Wirtschaftspotenzial zu nutzen, das sich aus dem anhaltenden Einfluss der sich rasch entwickelnden Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) in der Industrie ergibt. Hauptziele sind die Verbesserung der Wertschöpfungsketten über alle Phasen des Produktlebenszyklus sowie die Optimierung von Produktionssystemen und Geschäftsmodellen. Die Organisation und Steuerung von Wertschöpfungsprozessen, die Verbesserung von Wertschöpfungsnetzwerken sowie Ansätze zur Schaffung neuer Geschäftsmodelle sind wesentliche Ziele zur Verbesserung der industriellen Wettbewerbsfähigkeit. Herausforderungen für die Verbesserung der Wertschöpfungsketten sind im Kern nahtlose digitale Workflows über den gesamten Produktlebenszyklus, hochflexible und adaptive Prozesse, insbesondere Fertigungsprozesse, die Fähigkeit, individualisierte Produkte zu erstellen und zu produzieren sowie neue Geschäftsmodelle zur Steigerung der Attraktivität von Unternehmen. [AND15; BEY15a]

Zur Realisierung adäquater Konzepte der Industrie 4.0 müssen mehrere Technologieansätze kombiniert werden. Diese umfassen vernetzte

und kommunizierende „cyber-physische Systeme“ (CPS), eine sachgerechte Internetstruktur, Komponenten als Informationsträger sowie ein ganzheitliches Konzept bzgl. Sicherung und Sicherheit sowie Daten- und Wissensschutz [AND15]. CPS gelten dabei als Quelle eines bedeutenden Innovationsschubs [AND15] und sollen zeitkritisch eine flexible und effiziente Produktion gewährleisten [TSC14]. Dies sind Systeme kollaborierender Recheneinheiten, die in intensiver Verbindung mit der umgebenden physikalischen Welt und ihren laufenden Prozessen stehen und gleichzeitig Datenzugriffs- und Datenverarbeitungsdienste im Internet bereitstellen und nutzen [BEY15a]. In Anlehnung an BORGMAIER ET AL. besteht Industrie 4.0 im Kern aus fünf Technologiefelder [BOR17]. Abbildung D.1 zeigt die Technologiefelder nach BAUER ET AL. und KAGERMANN [BAU14; KAG17].

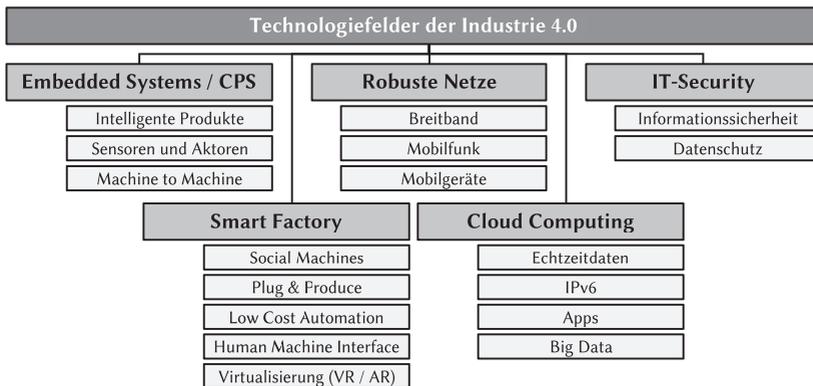


Abbildung D.1: Technologiefelder von Industrie 4.0

Im Gegensatz zur klassischen Automatisierung setzt Industrie 4.0 auf intelligente Systeme. Der Experte formuliert hierbei lediglich seine Ziele über eine deklarative Formulierung des Wissens (z. B. eine Beschreibung des finalen Produktes, der Durchsatzziele oder den maximalen Energieverbrauch). Bei diesen intelligenten Assistenzsystemen verfügt die Automatisierungslösung über formalisiertes Wissen bzgl. der Anlage und über formalisiertes

Problemlösungswissen. Dieser neue Ansatz gibt den intelligenten Systemen genügend Handlungsfreiräume zwischen deklarativen Zielen und der späteren Umsetzung, die später im Betrieb für Adaption und Anpassungsfähigkeit genutzt werden. Hierdurch verringert sich auch der menschliche Aufwand in der Automatisierung (z. B. bei der Inbetriebnahme und beim Anlagenumbau). Um eine solche deskriptive Automatisierung im Rahmen einer modernen Fabrik umzusetzen, bedarf es einer neuen IT für die Automatisierung und einer neuen Referenzarchitektur für die Automatisierungssoftware. [NIG14]

E Analoge Informationsträger in der Montagelinie

3 C205

| | | | | |
|-----------|---|------------------------------|--|--------------------|
| USA RL V6 | | | 17 T123 | |
| C | CDI | 182 XXXX 6 | M01 | |
| | | C 205 456-12 PA1 | | |
| 1 | Spoiler | NOT | Abdaempf. Paket | AMG |
| 2 | C43 | 2 | Sound | A |
| 3 | Serie | 881 |  6700 | |
| 4 | RE | Stan | EDW | LI |
| 5 | 1500 | 1R/1L | DWRS Vertikal | 1400 |
| 6 | 9827 | NOX | 3302 | 2704 8004 |
| 7 | RDK | 6230 | WEICHE 5000 | AHV 3900 |
| 8 | STECKEN | Beschl.Sensor 1300 | 0130 | 1100 |
| 9 | LOESCH | NOX | Aktor | AMG LL |
| 10 | Hermes | N | 48VRL | |
| 11 |  | | | |

Abbildung E.1: Montageplakat

Standardarbeitsblatt (SAB)

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------|--|----------------|----------------------|--|------------------|----------------------|--|-----------------|----------------------|------------|---------------------|---|--|--|
| Werk | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | BKV | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | Quelle | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | Planungsbereich | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | Krossensprache (KA) | <input type="checkbox"/> BL <input type="checkbox"/> BM <input type="checkbox"/> VM <input type="checkbox"/> VR <input type="checkbox"/> BR <input type="checkbox"/> BV <input type="checkbox"/> VR <input type="checkbox"/> BR <input type="checkbox"/> BV <input type="checkbox"/> VR | | |
| Center/Abteilung | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | Bereiche | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | Station | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | | | | | | | |
| Kostenstelle | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | Ausbringungart | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | Arbeitsplatz Nr. | 4.32.60 | | gültig ab | | 2016-11-01 | | | | |
| Meisterer | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | | | | | | | | | | | | | |
| Gruppe | XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX | | | | | | | | | | | | | | |

| Nr. | Arbeitsvorgang (AVO) | Plan-Nr. AVO-Nr. | TE [minisse] | MV [%] | BR | AA | LK | Code | Kenn- ung) | KA | WT | ASB |
|-----|--|-------------------------------|--------------|--------|----|----|----|------|-------------------|----|----|-----|
| 26 | LL - Brennleistung zum Vordernd rechts setzen und Rändelmautter 2 Turmüsse an- fädeln. ^ | PN172.001700 DPE 001700 | 0:38:05 | 26,00 | X | FR | L | : | NR | X | - | - |
| 27 | LL - Brennleistung zum Vordernd rechts an ESP-HE mit 10 Turmüssen einziehen | PN172.106682 DPE 106682 | 0:04:12 | 0,00 | X | FR | L | : | VL | - | - | - |
| 28 | Für lange Brennleistung auf SHI stützen | PN172.101745 DPE 101745 | 0:01:18 | 100,00 | X | FR | - | : | NR | - | - | - |
| 29 | RL - 1. Brennleistung aufzeichnen, an HE und BKV anfädeln und mit je 2 Turmüssen anziehen. | PN172.004155 DPE 004155 | 0:29:28 | 21,00 | X | FR | R | : | VM | X | - | - |
| 30 | RL - 1. Brennleistung an HE und BKV mit je 10 Turmüssen einziehen | PN172.101250 DPE 101250 | 0:10:00 | 0,00 | X | FR | R | : | VM | - | - | - |
| 31 | RL - 2. Brennleistung aufzeichnen, an HE und BKV anfädeln und mit je 2 Turmüssen anziehen. | PN172.007470 DPE 007470 | 0:30:46 | 20,00 | X | FR | R | : | VM | X | - | - |
| 32 | RL - 2. Brennleistung an HE mit je 10 Tur- müssen einziehen | PN172.101252 DPE 101252 | 0:10:00 | 0,00 | X | FR | R | : | VM | - | - | - |
| 33 | R 172 Rotationsstempelblatt B4, 11 St. 09-3 vorn | PN000015326 DPE 015326 | 0:01:41 | 100,00 | X | FR | - | : | VM | - | - | - |
| 34 | R 231 - Stationsanfang mit MoWa inkl. Code lesen - Stut. 9.3 ^ | PN000015345 DPE 015345 | 0:12:00 | 100,00 | X | FR | - | : | VML | - | - | - |
| 35 | ZB 2*1 Brennleistung von HE zu Adapter Hinternd lt u. re vorbereiten | PN000005319 DPE | 0:17:10 | 100,00 | X | FR | - | : | HM | - | - | - |

(*) ^ = Arbeitsicherheit; ● = Produktsicherheit; ▼ = Zertifizierungsdevant; ▲ = Effizienz; ▼ = Umwelt; * = Maschinell erstellt. Ohne Unterschrift gültig; *** = Werkzeug/Teilrelevanz (siehe WTB)

| | | | |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Fregabe Planung | Gedruckt am | Bestellgang Produktion (**) | Fregabe ES (Kurz-/Datum) |
| Fregabe am 2016-10-24 | 2016-11-09 | Bestellgang am | A-Schicht |
| durch XXXXXXXXXXXXXXX | durch XXXXXXXXXXXXXXX | durch | B-Schicht |
| Telefon XXXXXXXXXXXXXXX | Telefon XXXXXXXXXXXXXXX | Telefon | C-Schicht |
| | | | Schleifwort |

Abbildung E.2: Montageanleitung

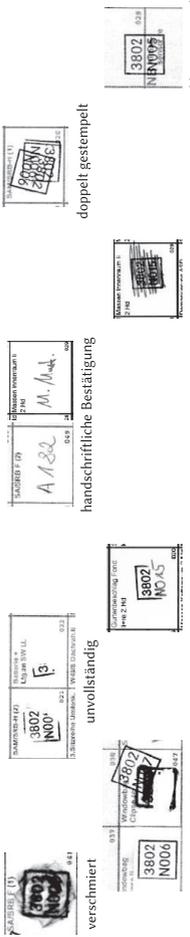
| | |
|--|--|
| <p>Guter Stempel</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erst nach durchgeführtem Arbeitsgang stempeln ▪ Stempel muss in schwarzer Farbe, lesbar und im richtigen Feld sein ▪ Stempel gelten analog einer Unterschrift als Bestätigung der vorschriftsmäßigen Ausführung des Arbeitsgangs ▪ Felder, die aufgrund der Ausstattung nicht gestempelt werden, sind auf der Wagenbegleitkarte mit einem „X“ befüllt ▪ Ausschließlich der Stempelaufbau rechts ist zur Dokumentation gültig  |
| <p>Beispiele schlechter Stempel</p> |  <p>verschmiert</p> <p>unvollständig</p> <p>handschriftliche Bestätigung</p> <p>doppelt gestempelt</p> <p>manuell korrigiert</p> <p>unklar gestempelt</p> |
| <p>Korrektur schlechter Stempel</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schlechten Stempel mit „X“ entwerfen ▪ Korrektur im Stempelfeld (1) wenn möglich oder als Klartextfehler-Eingabe (2) <p>(1)</p>  <p>(2)</p>  |

Abbildung E.4: Gute und schlechte Dokumentation durch Stempel

F Beschreibung der bestehenden Ansätze aus Abschnitt 3.3

Definitionen zur Produktionsqualität

Sowohl in der Literatur als auch im industriellen Umfeld lässt sich eine unpräzise Verwendung des Begriffes finden. Der Begriff „Produktionsqualität“ ist kein einheitlicher Terminus und folglich nicht konkret spezifiziert. Folgende Synonyme werden für den Begriff der Produktionsqualität verwendet:

- Fertigungsqualität
- Ausführungsqualität
- Prozessqualität der Produktion
- Production Quality
- Manufacturing Quality
- Manufacturing-related Quality
- Manufacturing-based Quality

Jedoch haben diverse wissenschaftliche und industrielle Beiträge eine Definition des Begriffes abgeleitet. Diese werden nachfolgend kompakt dargestellt.

BERENS definiert den Begriff der Produktionsqualität über die Qualitätsarten der Entwurfsqualität und der Fertigungsqualität. Als *Entwurfsqualität* soll das Ausmaß verstanden werden, in dem der Entwurf eines industriellen Erzeugnisses die Anforderungen des Marktes an ein Erzeugnis dieser Art erfüllt. Die *Fertigungsqualität* umfasst das Ausmaß, in dem das Erzeugnis mit dem Entwurf übereinstimmt bzw. die festgelegten Anforderungen erfüllt [BER80]. Eine nähere Beschreibung der Produktionsqualität erfolgt jedoch nicht. Abbildung F.1 zeigt den Zusammenhang der Entwurfs- und Fertigungsqualität nach BERENS und verdeutlicht die Produktqualität als Schnittmenge zwischen Erzeugnis und Marktanforderungen [BER80].

In Unterabschnitt 2.1.1 wurden die fünf Definitionsansätze nach GARVIN genannt. Stellvertretend für die Qualität der Produktion steht der *produktionsbasierte Ansatz* bzw. die *Manufacturing-based Definition* der Qualität. Diese

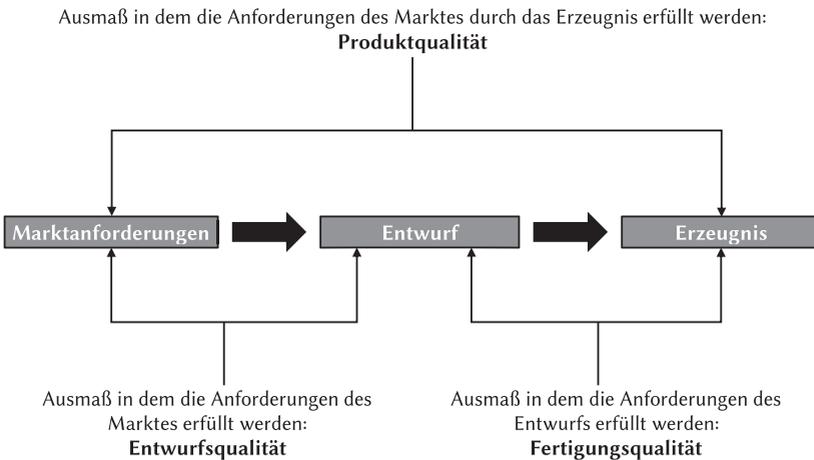


Abbildung F.1: Zusammenhang zwischen Entwurfs- und Fertigungsqualität

bezeichnet die Konformität zu den Anforderungen⁴ und umfasst die Produktionsexzellenz mit direktem Qualitätsverbau nach dem Leitsatz „making it right the first time“. Dieser Ansatz erhöht sowohl die Relevanz einer zuverlässigen Entwicklung auf der Entwicklungsseite [BOE63; FEI61; VOE74] als auch die Bedeutung der Qualitätsregelung auf der Produktionsseite [FEI61; JUR80]. Beide Aspekte dienen zur frühen Aussonderung von Abweichung mittels Analyse der grundlegenden Produktkomponenten, der Identifikation möglicher Fehlerbilder und der Entwicklung alternativer Designs zur Zuverlässigkeitssteigerung sowie der anschließenden Nutzung statistischer Instrumente zur Identifikation von Prozessen außerhalb der akzeptablen Grenzen. Jede dieser Techniken fokussiert sich auf die Kostenreduzierung. Nach dem produktionsbasierten Ansatz führen Qualitätsverbesserungen zu geringeren Kosten durch Fehlervermeidung anstelle der Fehlernachbearbeitung [CAM83]. Daher handeln Unternehmen nach GARVIN i. d. R. suboptimal und würden durch einen stärkeren Fokus auf Fehlervermeidung

⁴ Im Original als „conformance to requirements“ bezeichnet [CRO79].

und -prüfung deutlich geringere Aufwendungen für Nacharbeit, Ausschuss und Garantieleistungen verzeichnen. [GAR84]

WALTHER greift die Definition nach BERENS auf, bezeichnet jedoch die Fertigungsqualität als *Ausführungsqualität*. Diese gibt das Ausmaß an, in dem die Entwurfsqualität erfüllt wird [WAL93]. Darüber hinaus wird eine weitere Sichtweise eröffnet, indem er die Produktionsqualität zusätzlich über die Produktqualität und die Qualitätsfähigkeit einer Organisation definiert. Die Produktionsqualität bezeichnet nach WALTHER einerseits die *Produktqualität*, d. h. die Beschaffenheit eines industriellen Produktes bezüglich seiner Eignung, die Qualitätsforderung zu erfüllen, und andererseits die *Qualitätsfähigkeit einer Organisation*, d. h. die Eignung der in einer Organisation vorhandenen Qualitätselemente, ein solches Produkt zu realisieren [WAL93]. WALTHER hat die Definition von BERENS zum Begriff der Produktionsqualität weiter spezifiziert. Jedoch bleibt auch hier eine detaillierte Festlegung der Inhalte aus. Abbildung F.2 zeigt die Komponenten der Produktionsqualität nach WALTHER mit dem Ursprung im Qualitätskreis aus Unterabschnitt 2.1.3 [WAL93].

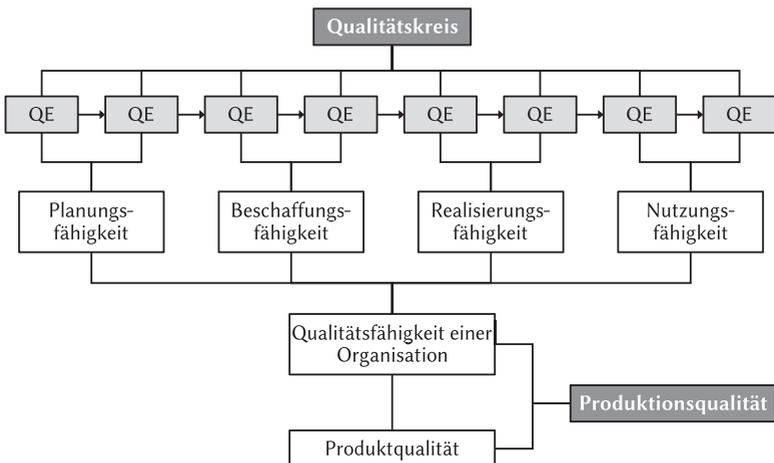


Abbildung F.2: Komponenten der Produktionsqualität

Eine deutliche Trennung von Produktqualität und Produktionsqualität nimmt ebenfalls KROMIDAS vor. Er unterscheidet zwischen der Qualität des Erzeugnisses als *Produktqualität* im primären Interesse des Kunden und der Qualität des Herstellungsprozesses als *Produktionsqualität* primären Interesse des Produzenten [KRO95]. Diese Differenzierung von Produkt- und Produktionsqualität soll innerhalb dieser Arbeit fortgeführt werden.

HANNEN UND SCHIEFERDECKER beschreiben den Begriff der *Prozessqualität* und der sich daraus ergebenden *Prozessergebnisqualität*. Die Separation ist somit synonym zu den bisherigen Begriffen „Produktqualität“ und „Produktionsqualität“. Die Qualität der Prozesse lässt sich zudem in technische und wirtschaftliche Qualität unterteilen. Nach DÖGL zeigt die *technische Qualität* über Fehlerhäufigkeiten die Effektivität eines Prozesses, während die *wirtschaftliche Qualität* über fehlerbezogene Qualitätskosten die Kosten eines Prozesses darstellt [DÖG86]. Zudem beschreiben HANNEN UND SCHIEFERDECKER die Qualität des Prozessergebnisses als Grad der Abweichung von der Vorgabe. Zusätzlich nennen HANNEN UND SCHIEFERDECKER beispielhafte Qualitätsmerkmale zum Prozess und Prozessergebnis. [HAN97]

Die Definitionen der Planungs- und Ausführungsqualität von KOMOREK weisen eine große Ähnlichkeit zu den Definitionen der Entwurfs- und Fertigungsqualität von BERENS sowie der Entwurfs- und Ausführungsqualität von WALTHER auf. KOMOREK spezifiziert, dass die Produktionsqualität im Wesentlichen von der Planungsqualität und der Ausführungsqualität der Produktion abhängt. Weiterhin bezeichnet er die Produktionsqualität als Qualitätsdimension. Die *Planungsqualität* stellt das Ergebnis der Planungsgenauigkeit des Produktionsprozesses dar, während die *Ausführungsqualität* das Ergebnis der produktiven Tätigkeitskombination aller am Produktionsprozess beteiligten Einflussfaktoren widerspiegelt. Für KOMOREK ist die Ausführungsqualität der Produktion ein unabhängiger Teil der Tätigkeit und Leistung der Produktentwicklung. Die beeinflussenden Faktoren sind dabei Wartung und Instandhaltung, qualifiziertes Personal, Tätigkeitsanzahl pro Arbeitsvorgang sowie Einsatz von Hilfswerkzeugen. [KOM98] Zwar nennt KOMOREK diverse Einflussgrößen, konkrete Qualitätsmerkmale der Produktionsqualität bleiben jedoch aus.

SELLIG zeigt auf, dass eine qualitätsgerechte Produktion eine Übereinstimmung von Produkthanforderungen und realisiertem Qualitätsniveau sicherstellen muss. Das Ergebnis dieser qualitätsgerechten Produktion ist die Produktionsqualität. Dabei reiht SELIG die Produktionsqualität in eine Kette weiterer Qualitätsarten auf horizontaler Ebene mit Bezug zum Produktionslebenszyklus ein. Der Produktionsqualität vorgelagerten Qualitätsarten sind die Entwicklungs- bzw. Konstruktions- und Beschaffungsqualität. Die nachgelagerte Qualitätsart ist folglich die Absatzqualität. [SEL01]

TAKEDA unterscheidet in Anlehnung an die drei großen Unternehmensfunktionen Entwicklung, Produktion und Vertrieb zwischen der Konstruktions-, Produktions- und Marketingqualität. Dabei zeigt Produktionsqualität auf, wie genau das Produkt mit der Absicht hinter der Konstruktion und der Konstruktionszeichnung übereinstimmt. Daher wird die Produktionsqualität nach TAKEDA gelegentlich auch als Übereinstimmungsqualität bezeichnet. [TAK09]

Einen Beitrag der IT zur Produktionsqualität liefern CRAMERI UND HECK. Damit Effizienzverluste durch arbeitsunfähige Mitarbeiter vermieden werden, müssen die Produktionsqualität und die Verfügbarkeit der IT-Systeme sichergestellt werden. Eine graduelle Verschlechterung der Produktionsqualität gibt Hinweise, wo Maßnahmen zur Erneuerung der Systemarchitektur oder Prozessverbesserungen an den IT-Systemen sinnvoll sind. CRAMERI UND HECK zeigen die Bedeutung der IT zur Regelung der Produktionsqualität auf. [CRA10]

COLLEDANI ET AL. definieren den englischen Begriff der „Production Quality“ als Disziplin zur Kombination von Qualität, Produktionslogistik sowie Instandhaltungsmethoden und -instrumente, um sowohl den Durchsatz und das Leistungsniveau⁵ konformer Bauteile zu regeln als auch diese über die Zeit mit minimaler Verschwendung von Ressourcen und Material zu optimieren [COL14]. In anderer Form wird dieser Begriff als Paradigma zur Erreichung des gewünschten Leistungsniveaus konformer Bauteile

⁵ Im Original als „service level“ bezeichnet.

unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Qualitäts- und Produktivitätsanforderungen innerhalb fortschrittlicher Fertigungssysteme bezeichnet [COL15].

In Ergänzung zum Beitrag der IT zur Produktionsqualität erläutern SCHMITT ET AL., dass die Produktionsqualität über Ergebnisse von Data Mining Methoden geregelt werden kann. So ist aus Prognosen erkennbar, wie sich die Produktionsqualität zeitnah verhalten wird, wenn kein Eingriff in die Produktionsprozesse erfolgt. Ebenso lässt sich der Qualitätsverlauf nach Implementierung diverser Maßnahmen prognostizieren. [SCH16]

JOHANSSON ET AL. nutzen den Begriff der Produktionsqualität zur Beschreibung der Qualität des Produktionsprozesses innerhalb des Montagesystems einer LKW-Produktion. Sie greifen dabei nicht auf eine bestehende Definition zurück, sondern leiten diese aus der allgemeinen Qualitätsdefinition ab. Qualität ist hier nach HULL der Zustand, indem alle definierten Merkmale, Parameter und Spezifikationen innerhalb ihrer festgelegten⁶ Grenzen liegen [HUL11]. Ebenso stellt Qualität das Maß der Übereinstimmung eines Produktes mit seinen Anforderungen und Spezifikationen dar. Jedoch liefert auch diese Beschreibung keine klare Definition des Begriffs der Produktionsqualität mit Angabe konkreter montagespezifischer Qualitätsmerkmale. [JOH16]

Das Unternehmen SIEMENS definiert den Begriff der Produktionsqualität aus industrieller Sicht als Übereinstimmung mit den geforderten Spezifikationen. Zur Gewährleistung sind folgende Aspekte zu berücksichtigen: Qualitätsdesign und -engineering, Qualitätskontrolle und Qualitätsmanagement. [SIE17] Eine konkrete Beschreibung der einzelnen Aspekte wird zwar vorgestellt, jedoch wird der Begriff der Produktionsqualität nicht präzise durch messbare Werte bzw. Qualitätsmerkmale definiert.

⁶ Im Original wird das englische Adjektiv „documented“ verwendet.

Ansätze zur Qualitätsregelung

Der Kern der Arbeit von HAESE UND SCHERFF ist die stochastische Bestimmung von Istwerten verschiedener Qualitätsmerkmale und deren Integration in QRK. Durch eine Abschätzung von Qualitätsmerkmalen aus Messgrößen sollen die Sollwerte eines prozessinternen RK angepasst werden, wodurch eine zweistufige Kaskadenregelung entsteht. Die indirekte Bestimmung von Qualitätsmerkmalen ist für die vorliegende Arbeit weniger relevant. Im Fokus der Arbeit von HAESE UND SCHERFF steht die automatisierte Qualitätsregelung, jedoch keine Berücksichtigung einer hybriden Produktions- und Regelstruktur. Ebenso bleiben relevante Beiträge zur Informationstransparenz und digitaler Informationsbereitstellung aus. [HAE00]

AMENT UND GOCH beschreiben rückwärts- und vorwärtsgerichtete RK innerhalb von Fertigungsprozessketten. Hier liegt der Fokus auf eine weitestgehend automatisierte Qualitätsregelung. Jedoch bleibt ebenfalls der Kontext einer hybriden Qualitätsregelung über mehrere RK-Kaskaden unangetastet. Weiterhin fehlen auch hier Aspekte der Transparenz und Digitalisierung von Informationen zwecks effizienter Qualitätsregelung. [AME01]

Der Ansatz von BETTIN zielt auf die Entwicklung einer prozessübergreifenden QRK-Struktur ab. Damit soll eine Abstimmung aller Prozesskettenelemente zur Optimierung der Produktionsqualität erreicht werden. Innerhalb der Arbeit werden zwei unterschiedlich gerichtete RK-Strukturen beschrieben. Rückwärtsverkettete RK sind Teil des reaktiven QM und nutzen Informationen zur Regelung eines vorhergehenden Prozesses. Vorwärtsverkettete RK besitzen eine präventive Funktion und nutzen Informationen zur Bestimmung von Qualitätskennwerten, um diese in einem nachfolgenden Prozessschritt beeinflussen zu können. Dafür sollen wissensbasierte Systeme als Regler fungieren. Die Grundidee des bidirektionalen Informationsmanagements wird auch in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen. Ein Unterschied liegt dabei in der Art der betrachteten Prozesse. BETTIN arbeitet mit weitestgehend automatisierten Fertigungsprozessen, während der Fokus dieser Arbeit auf Prozesse der manuellen Montage liegt. Dennoch fehlt

in diesem Ansatz eine adaptierbare Methode zur Informationstransparenz in der Fertigung. Zudem ist die Einbindung der unterschiedlichen Rollen zum Zweck der hybriden Qualitätsregelung kaum beschrieben. [BET04]

Der Schwerpunkt der Arbeit von OETZMANN liegt auf dem Einsatz wissensbasierter Systeme zur Unterstützung des QM. Die Arbeit zielt darauf ab, qualitätsrelevantes Wissen standortübergreifend zu verteilen und für das Unternehmen nutzbar zu machen. Dafür werden wissensbasierte Systeme in QRK integriert, die eine ebeneninterne oder -übergreifende Reichweite haben können. Anders als bei BETTIN werden die wissensbasierten Systeme für die Nutzung durch Mitarbeiter ausgelegt, wodurch eine Informationstransparenz gefördert wird. Dies ist ein ebenso wichtiges Ziel der vorliegenden Arbeit. Jedoch fokussiert sich OETZMANN nicht auf eine taktgeführte Produktion der Montage, sodass der Ansatz für den Fokus dieser Arbeit nicht ausreichend ist. [OET05]

Ebenso beschreibt der Ansatz von DÖRMANN OSUNA rückwärts- und vorwärtsverkettete RK. Jedoch betrachtet diese Arbeit einen nicht stabilen Fertigungsprozess. Darunter ist ein Prozess zu verstehen, der weder beherrscht noch fähig ist. Auch hier fehlt eine Berücksichtigung hybrider Qualitätsregelung sowie ein erforderlicher Montagefokus. [DÖR09]

Eine große Schnittmenge hat die Arbeit von SCHICK ET AL. Diese beschäftigt sich ebenfalls mit kaskadierten hybriden QRK in der Montage. Der Fokus liegt auf dem industriellen Lernen mithilfe von Lernregelkreisen. Diese sollen Fehlerinformationen in geeigneter Weise an die Monteure zurückzumelden, damit diese daraus lernen und den Montageprozess verbessern können. Die Lernregelkreise sollen die kleinsten RK einer kaskadierten RK-Struktur sein. Die Rückkopplung von Fehlerinformationen an die Monteure ist ebenfalls ein Kernthema der vorliegenden Arbeit. Aufgrund der geringen Detaillierung wird die Arbeit lediglich als Ansatzpunkt verwendet. [SCH09a]

VON NITZSCH UND MERSMANN stellen ein Modell vor, das Messtechnik zur Prozessverbesserung einsetzt. Es wird gezeigt, dass Messtechnik eine Präventionsleistung erbringen und damit innerhalb von QRK einen Beitrag zur

Wertschöpfung leisten kann. Die Betrachtung von Messtechnikanwendungen zur Prozessverbesserung sowie der Fokus auf eine automatisierte Qualitätsregelung werden auch innerhalb der vorliegenden Arbeit behandelt. Dennoch erfolgt in diesem Ansatz keine hybride Qualitätsregelung durch sachgerechte Einbindung der Rollen. Ebenso wird eine kaskadierte Qualitätsregelung in dieser Arbeit nicht betrachtet. Weiterhin fehlt auch hier ein adäquater Einsatz von Techniken zur Transparenz und Digitalisierung von Informationen. [VON10]

Die Arbeit von BEAUJEAN ist stark mit dem *Aachener Qualitätsmanagement Modell* verbunden und fokussiert die rückwärtsgerichtete *Quality Backward Chain*. Der Kern ist ein Modell für die strukturierte Rückkopplung qualitätsrelevanter Daten über die *Quality Backward Chain* eines Unternehmens. Im Fokus steht eine Betrachtung großer RK über mehrere Unternehmensbereiche. Dabei sind die RK einzelner Unternehmensebenen weniger relevant. Somit unterscheidet sich die Arbeit von BEAUJEAN, da die vorliegende montageinterne RK betrachtet. Eine wesentliche Gemeinsamkeit ist die Intention der Rückkopplung von Qualitätsinformationen, wobei die vorliegende Arbeit sich auf Informationen aus Prüfungen innerhalb der Montage bzw. Prüfungen des QM beschränkt, während die Arbeit von BEAUJEAN diverse Qualitätssensoren (auch unternehmensexterne) als Informationslieferanten betrachtet. [BEA11]

Daher liefert auch das *Aachener Qualitätsmanagement Modell* von SCHMITT UND PFEIFER eine relevante Schnittmenge im Kontext der Qualitätsregelung. Es adaptiert bewusst etablierte und erfolgreiche Elemente bestehender Managementmodelle [SCH15]. Abbildung F.3 zeigt das *Aachener Qualitätsmanagement Modell* nach SCHMITT UND PFEIFER [SCH15].

Das zentrale Element ist der *Quality Stream*. Dieser umfasst alle wertschöpfenden Tätigkeiten eines Unternehmens und ist in mehrere *Quality Forward Chains* und einer *Quality Backward Chain* unterteilt. Eine *Quality Forward Chain* bezieht sich immer auf ein Produkt und orientiert sich am Lebenszyklus eines materiellen oder immateriellen Produkts. Die *Quality Backward Chain* übernimmt hingegen die Rückmeldung von externen und internen

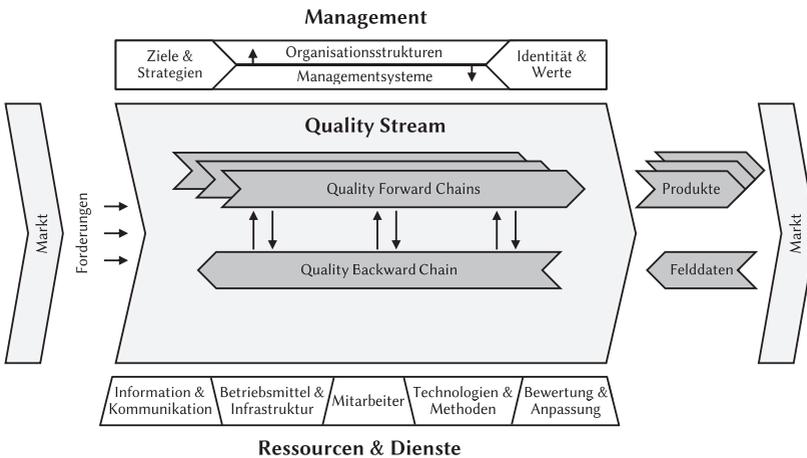


Abbildung F.3: Aachener Qualitätsmanagement Modell

Qualitätsinformationen an die entsprechenden Bereiche im Produktlebenszyklus. Bei externen Informationen handelt es sich in der Regel um Felddaten aus dem Markt, während interne Informationen ihren Ursprung in der Wertschöpfungskette haben. Durch die Schnittstellen zwischen den Quality Forward Chains und der Quality Backward Chain entstehen unterschiedlich große QRK.

Die Grundlage für den Quality Stream sind Ressourcen und Dienste. Das Management ist verantwortlich für Führungsleistungen zur Gestaltung und Koordination des Quality Streams. Zentrale Aufgabe des Modells ist somit die effiziente Koordination der verschiedenen vorwärtsgerichteten Qualitätsflüsse sowie des rückwärtsgerichteten Qualitätsflusses. Die Schnittstellen der lebenszyklusorientierten Qualitätsflüsse bilden die Basis zur Implementierung kleiner und großer QRK. [SCH15]

Als weitere Ansätze zur Qualitätsregelung können u. a. die Arbeiten von LINDEMANN UND REINEKE [LIN93], WEIDMANN [WEI96], CARL ET AL. [CAR97; CAR98], HAUER [HAU98], JACOB [JAC99] und VON MÜHLENDAHL

[VON01] genannt werden. Diese Ansätze stellen jedoch aufgrund mangelnder Berücksichtigung aktueller Digitalisierungsaspekte oder geringer Schnittmenge mit industriellen Produktionsprozessen keine Relevanz zur Berücksichtigung innerhalb dieser Arbeit dar.

Ansätze zur Informationsvisualisierung

Der Ansatz von FELDMANN UND LANG, welcher ebenfalls in der Arbeit von LANG verarbeitet wurde, liefert ein digitales Mitarbeiterinformationssystem (MIS⁷) mit den Zielen der Effizienz- und Kompetenzsteigerung sowie der Prozesssicherheit am Montagearbeitsplatz. Die technische Struktur basiert auf einem Touchscreen, dessen Bedienung über Schaltflächen realisiert wird. Auf eine Eingaben von Text und Zahlen durch Mitarbeiter wird in diesem Ansatz verzichtet. Die Anleitung von Mitarbeitern bei ihren Aufgaben erfolgt hier über produktspezifische Bauanleitungen bzw. Montageanweisungen in Form von Stücklisten, Explosionsdarstellungen und CAD-Zeichnungen. Dabei ist die Informationstiefe frei skalierbar, sodass jeder Mitarbeiter den Detaillierungsgrad entsprechend seiner Qualifikation wählen kann. Weiterhin ist in diesem Ansatz die Erfassung und Dokumentation von Qualitätsdaten möglich. Das System ist frei konfigurierbar und setzt sich aus einem Grundmodul sowie diversen Zusatzmodulen zusammen. Es ist ein offenes System mit der Anbindungsoption an bestehende Systeme und Datenbanken. Dieses Konzept eignet sich zunächst im Ansatz für eine Verwendung zur Informationsvisualisierung in der Montagelinie. Jedoch ist es in der Aufbaustruktur nicht für eine taktgebundene Montage geeignet. Ebenso fehlen rollenspezifische Funktionen und Sichten im Kontext der Qualitätsrückmeldung und Nacharbeitssteuerung. Die Grundstruktur und der modulare Aufbau wird jedoch für das finale Konzept zur Informationsvisualisierung adaptiert. [FEL05; LAN07]

⁷ Die Autoren wählen ein deutsches Akronym für den international etablierten Begriff „Worker Information System“ (WIS).

Das Konzept von TAN ET AL. zeigt eine Darstellung von multimodalen⁸ Montageinformationen auf Basis von Bild-, Video- und Textbausteinen. Dabei sollen auf einer einzigen Oberfläche alle erforderlichen Montageanweisungen in prozessualer Reihenfolge dargestellt werden. Jeder Prozessschritt umfasst Bildinformationen zu den Bauteilen und eine Montageanweisung in kurzer Textform. Optional wird der Montageschritt durch ein Video mit Montagehinweisen ergänzt. Die technische Implementierung wird nicht beschrieben. Dieser Ansatz verfolgt jedoch keine Visualisierung von Qualitätsrückmeldungen und Nacharbeitsinformationen sowie keine Dokumentation von Montageschritten. Weiterhin ermöglicht das Konzept keine rollenspezifischen Sichten, sodass ein adäquater Einsatz innerhalb der Fahrzeugmontage nicht gegeben ist. Die Verknüpfung von Textbausteinen und Bilddarstellungen fließt jedoch in das Zielbild der Informationsvisualisierung mit ein. [TAN08]

Eine Methode zur Visualisierung liefert der Ansatz von PAELKE. Das Konzept beschreibt die Mitarbeiterunterstützung bzw. Visualisierung von Informationen durch „Augmented Reality“, liefert jedoch weiterhin eine allgemeine technologieunabhängige Möglichkeit zur Informationsvisualisierung. Nach PAELKE hat ein Monteur zwei Kernaufgaben – die Kommissionierung und die Montage. Dabei unterscheidet sich der Informationsbedarf bzw. der Detaillierungsgrad von der Qualifikation des Monteurs. Damit eine universale und für alle Monteure adäquate Visualisierung ermöglicht wird, fokussiert sich dieser Ansatz auf die bildhafte Darstellung der Montageumfänge und Prozessschritte über eine Explosionszeichnung in Analogie einer Lego-Bauanleitung des finalen Produktes. Diese Methode der Informationsdarstellung ist einfach gehalten und somit von Mitarbeitern unabhängig ihrer Qualifikation verständlich. Dieser Ansatz kann im Kontext einer grafischen Bauanleitung innerhalb der Montagelinie adaptiert werden. Jedoch ist das Konzept nach PAELKE in erster Linie für Montagearbeitsplätze und nicht für taktgebundene Montagestationen ausgelegt. Außerdem wird auch in diesem

⁸ Lateinisch als „multi“ für „viel“ und „modus“ für „Art“ bzw. „Weise“. Ein Mediensystem wird als multimodal bezeichnet, wenn es Informationen aus verschiedenen menschlichen Kommunikationskanälen auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen verarbeitet [BEN00].

Konzept eine Qualitätsrückmeldung, Dokumentation und Nacharbeitssteuerung nicht betrachtet. Die Methode der Explosionsdarstellung als Bauanleitung wird dennoch für die Entwicklung eines adäquaten Konzeptes berücksichtigt. [PAE14]

LANDHERR beschreibt durch seinen Ansatz eine Kombination von Tabellen, Matrizen und Graphen zur Informationsvisualisierung. Tabellen werden in diesem Ansatz für Stücklisten von Produktkomponenten und allen modellierten Objekten des Montagesystems generiert. Matrizen werden zur Visualisierung der Beziehungen zwischen dem Produkt- und dem Montagesystem genutzt, insbesondere zur Visualisierung der Zuordnung von Produktmodulen zu den in der Montage verwendeten bzw. geeigneten Montagestationen. Die Graphen lassen sich je nach Visualisierungszweck hierarchisch, radial oder gerichtet darstellen und werden vor allem zur Darstellung funktionaler Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen eingesetzt. LANDHERR beschreibt eine alternative Darstellung von quantitativen und hierarchischen Informationen. Der Fokus liegt auf einer ganzheitlichen Betrachtung des Informationsflusses zwischen den beteiligten Disziplinen von der Produktentwicklung über die Produktion bis hin zur Auslieferung und zum Service der Produkte. Dies wird in diesem Konzept über Apps als Funktionsbausteine realisiert. Anhand des Anwendungsbeispiels wird jedoch ersichtlich, dass dieser Ansatz weniger als Montageassistent zur Informationsvisualisierung innerhalb der Montagelinie geeignet ist, sondern den Fokus primär auf zeitunabhängige Montagearbeitsplätze legt. Somit ist dieser Ansatz kein vollständiges Visualisierungskonzept von montage- und qualitätsbezogenen Informationen im Kontext einer taktgeführten Montagelinie und kann nicht adaptiert werden. [LAN14]

AHNELT UND BADER zeigen mit ihrem Ansatz ein intelligentes System zur Informationsunterstützung des Monteurs im Bereich der Kleinserien- und Einzelfertigung von technischen Anlagen. Das Konzept umfasst ein Framework aus intelligenten Komponenten (u. a. mobile Assistenzlösungen), welche die Monteure in ihren Tätigkeiten durch eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Arbeitsanweisungen unterstützen sollen. Zudem überwacht das System die korrekte Durchführung der Montage. In diesem

Ansatz werden die Informationen so visualisiert, dass sie den Arbeitsprozess des Monteurs nicht unterbrechen, aber dennoch eine Einbettung der Darstellung in den Prozess gewährleistet ist. Abhängig von der Art und Größe der Montageumfänge verwenden AEHNELT UND BADER Verfahren der projektiven „Augmented Reality“ bzw. Smartwatches in Kombination mit verteilten Bildschirmen, welche einzelne Informationsbestandteile gemäß der aktuellen Montagesituation verteilen und visualisieren. Die technische Basis bildet dabei ein Montagewagen, der mit den Komponenten bestückt ist. Während der Montage stellt das System kontinuierlich Handlungswissen bezogen auf den aktuellen Arbeitsschritt bereit. Dazu gehören unter anderem die Arbeitsanweisung, Bauteile aus der Stückliste sowie das erforderliche Werkzeug. Gleichzeitig wird dem Monteur der Arbeitsschritt anhand des dreidimensionalen Modells aus der visuellen Perspektive der auszuführenden Handlung dargestellt. Für einen adäquaten Einsatz im Bereich der Fahrzeugmontage fehlen auch hier relevante Visualisierungsbausteine zur Qualitätsrückmeldung, Dokumentation und zu Nacharbeitsinformationen. Jedoch liefert der Einsatz von montierten Bildschirmen am Montagewagen und die Verwendung von Smartwatches einen wichtigen Beitrag zu einem adäquaten Visualisierungskonzept. [AEH14]

Das Konzept von BÄCHLER ET AL. liefert einen Ansatz zur Informationsvisualisierung in Form eines Assistenzsystems mit spezifischem Fokus auf geringqualifizierte und leistungsgeminderte Monteure⁹. Ziele des Konzeptes sind die Reduzierung des Aufwands und der Komplexität für Einarbeitungen sowie die Verbesserung der Arbeitsfähigkeit und Motivation. Weiterhin sollen Montagefehler und -zeiten reduziert sowie die Inklusion und Eingliederung leistungsgeminderter Mitarbeiter ermöglicht werden. Im Kern unterstützt das Konzept die Monteure beim Kommissionier- und Montageprozess. Die erforderlichen Informationen werden über Projektoren und Touchscreens, welche am Kommissionierwagen befestigt sind, dem Monteur visualisiert. Die Entnahme wird über einen Projektor mit Lichtsignalen angeleitet. Mit Hilfe der „Augmented Reality“ werden virtuelle Informationen in Form

⁹ Das Konzept von BÄCHLER ET AL. fokussiert sich in erster Linie auf Mitarbeiter mit begrenzten kognitiven Fähigkeiten und einer eingeschränkten Leistungsfähigkeit.

von Symbolen und Piktogrammen sowie Bildern und Videos als Anleitung direkt in den Arbeitsbereich projiziert. Die Entnahmeposition und -menge wird über Piktogramme auf regaleitig befestigten Projektionswinkeln abgebildet. Nach der korrekten Entnahme eines Bauteils wird dem Monteur über Piktogramme auf dem Monitor ein Verschieben des Kommissionierwagens bis zum nachfolgenden Entnahmeort angezeigt. Die Piktogramme werden als Lichtsignale dargestellt, welche die Objekte (Hand, Behälter, Kommissionierwagen) und die durchzuführenden Handlungen (Entnahme, Ablage, Verschieben) verständlich darstellen. Zugleich werden die Piktogramme aber auch für die Rückmeldung von korrekt oder nicht korrekt ausgeführten Handlungen eingesetzt. Dabei sollen diese möglichst zielgenau auf die Fehlerart hinweisen, um dadurch eine schnelle und sichere Fehlerbehebung durchführen zu können. Das Assistenzsystem soll nicht zu einem Komplexitätsverlust der Arbeit führen und den Monteur unterfordern, ihn aber ebenso nicht durch zu geringe Unterstützung überfordern. Vielmehr dient das Konzept zur situationsgerechten Hilfestellung in den Entscheidungsprozessen. Für Monteure mit geringer Tätigkeitserfahrung (Ferienarbeitskräfte, Zeitarbeiter) stellt diese Anreicherung und Abstraktion von Informationen einen entscheidenden Mehrwert dar. Jedoch ist dieser Ansatz für einen Einsatz in der Fahrzeugmontage nicht ausreichend auf eine taktgeführte Montagelinie spezifiziert. Dennoch liefert es wichtige Bausteine. Insbesondere die Anzeige von Tätigkeiten (Hand, Werkzeug) und Entnahmeorten über Piktogramme kann für eine adäquate Lösung adaptiert werden. [BÄC14]

Im Ansatz von FISCHER ET AL. wird ein webbasiertes WIS zur Informationsvisualisierung über Bildschirme am Montagearbeitsplatz vorgestellt. Die relevanten Informationen umfassen dabei Hinweise bzgl. einer Übersicht von Arbeitsschritten, Arbeitsanweisungen und Hinweisen. Die Darstellung wird dabei über dreidimensionale Bilder aus CAD-Systemen angereichert und Abweichungen¹⁰ über einen Soll-/Ist-Vergleich dargestellt. Zudem bietet das System eine Dokumentation von Messungen. Jedoch liefert das Konzept

¹⁰In [FIS16] wird ein Schraubvorgang und in [FIS15] die Montage einer Kabelverbindung prototypisiert.

keine Möglichkeit zur Visualisierung von Nacharbeitsinformationen und adäquaten Visualisierung unterschiedlicher Sichten für verschiedene Rollen (vgl. Unterabschnitt 3.2.3). Ebenso wird eine anwenderorientierte Rückmeldung von Qualitätsinformationen in die Montagestation und in das Q-Tor nicht unterstützt. Die Darstellung der Bauteile über dreidimensionale Bilder aus CAD-Systemen liefert hingegen eine abstrakte Sicht auf die Montageumfänge und wird im Rahmen der Entwicklung eines Konzeptes zur Informationsvisualisierung in der Montagelinie berücksichtigt. [FIS16; FIS15]

Ansätze zur Qualitätsüberwachung

In Abbildung F.4 werden die grafischen Qualitätswerkzeuge in einer Übersicht dargestellt und nachfolgend im Hinblick einer Qualitätsüberwachung bewertet. [LIN11]

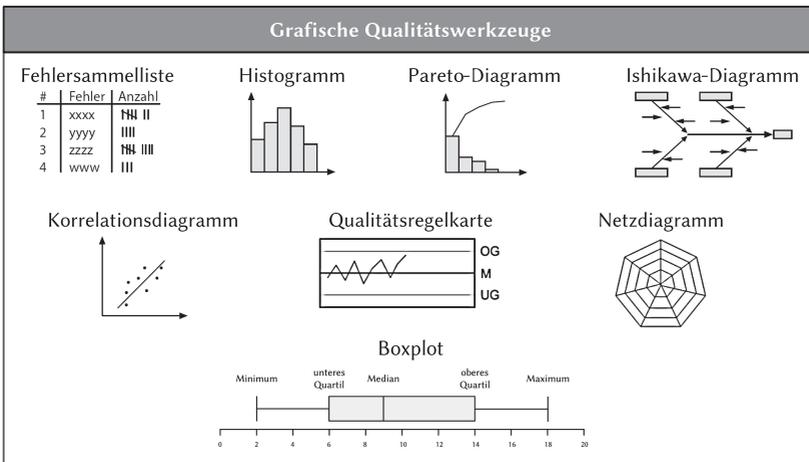


Abbildung F.4: Grafische Qualitätswerkzeuge

Die *Fehlersammelliste* dient zur Erfassung identifizierter Fehler. Zunächst werden das Betrachtungsobjekt und die potenziellen Fehlerarten festgelegt.

Anschließend werden die Fehler zu einer Kategorie zusammengefasst oder aufgrund ihrer Bedeutung einzeln erfasst. Durch eine übersichtliche Darstellung nach Art und Anzahl der Fehler können Schwerpunkte erkannt werden. Zudem kann mit Hilfe der Fehlersammelliste ein einheitlicher Fehlerkatalog festgelegt werden. [SCH15; LIN11; THE13]

Das *Histogramm* ist ein Säulendiagramm zur Verdichtung großer Datenmengen. Diese werden als Häufigkeitsverteilung dargestellt. Zusätzlich werden Zielwerte und Toleranzgrenzen hinterlegt, welche eine Aussage über die Streuung und Verteilung der Daten ermöglichen. [SCH15; LIN11]

Das *Pareto-Diagramm* dient zur grafischen Darstellung der Ursachen eines Problems nach Reihenfolge ihrer Bedeutung in Form eines Säulendiagramms. Es basiert auf dem Pareto-Prinzip, nach dem ca. 80% der Auswirkungen eines Problems auf ca. 20% der möglichen Ursachen und Einflussfaktoren zurückzuführen sind. Das Ziel besteht darin, die Hauptprobleme zu identifizieren und Maßnahmen zur Lösung einzuleiten. Zur Identifikation der Hauptprobleme werden zunächst das Betrachtungsobjekt festgelegt und die Fehlerarten bzw. Ursachen nach eventuellen Gemeinsamkeiten kategorisiert. Zur Erstellung des Pareto-Diagramms muss der prozentuale Anteil jeder Kategorie aus deren absoluten Häufigkeit ermittelt werden, die anschließend absteigend ihrer Bedeutung von links nach rechts auf der Abszisse dargestellt werden. Die Summenkurve kann zur Verdeutlichung ergänzt werden. Dabei wird der prozentuale Anteil jeder einzelnen Kategorie von links nach rechts aufsummiert, bis bei der letzten Kategorie der Wert 100% erreicht wird. [SCH15; LIN11]

Das *Ishikawa-Diagramm* (auch Ursache-Wirkungs- oder Fishbone-Diagramm genannt) ist eine Methode zur Visualisierung des Problemlösungsprozesses. Mögliche Ursachen eines Problems werden gesucht und in Haupt- und Nebenursachen zerlegt. Diese werden in einer grafischen Darstellung strukturiert, wodurch sich positive und negative Einflussgrößen identifizieren und zur Zielgröße ableiten lassen. Dabei wird häufig eine Einteilung gemäß der „7M-Methode“ [BEN14; BRE15; DIE14a] bzw. „5M-Methode“ vorgenommen [BRÜ15; WAL93]. Abschließend werden Lösungsvorschläge für das Problem entwickelt. [SCH15; LIN11]

Im *Korrelationsdiagramm* wird die Beziehung zwischen zwei Faktoren grafisch dargestellt. Dadurch lassen sich Rückschlüsse auf den statistischen Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen gewinnen, um eine Ursache-Wirkungs-Beziehung ggf. zu bestätigen. Die Methode eignet sich insbesondere für lineare Zusammenhänge. Dazu werden die Wertepaare beider Faktoren als Punkte in ein xy -Koordinatensystem eingetragen. Die Punktwolke lässt Rückschlüsse auf die Beziehung zu. Falls sich eine Ausgleichsgerade (Regressionsgerade) durch die Punktwolke zeichnen lässt, deutet eine steigende Gerade auf eine positive bzw. eine fallende Gerade auf eine negative Korrelation hin. Je näher die Punkte an der Ausgleichsgerade liegen, desto stärker ist der Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen. Zur Berechnung der Korrelation und deren Richtung haben BRAVAIS UND PEARSON einen Korrelationskoeffizienten definiert, der die Kovarianz durch die Standardabweichung von x und y teilt. [SCH15; LIN11]

Die *Qualitätsregelkarte* ist ein Werkzeug zur grafischen Darstellung von statistischen Kennwerten für eine Serie von Stichproben. Diese besitzt i. d. R. eine Mittellinie und (obere bzw. untere) Eingriffsgrenzen sowie ggf. Warn Grenzen. Dadurch können Abweichungen der Parameter eines Prozesses erkannt werden und ermöglichen so rechtzeitige Eingriffe in den Prozess. [MIT16; DIE14b] Dabei resultieren ggf. folgende Ereignisse [SCH15; GEI08]:

- Der Stichprobenbefund liegt innerhalb der Warn Grenzen. Es ist kein unmittelbarer Eingriff notwendig.
- Überschreitet der Stichprobenbefund die Warn Grenzen ist eine Abweichung vom idealen Prozessverhalten wahrscheinlich. Der Prozess muss weiter untersucht und ggf. korrigiert werden.
- Sobald der Stichprobenbefund außerhalb der Eingriffsgrenzen liegt, muss der Prozess unterbrochen, analysiert und korrigiert werden.

Mittels Qualitätsregelkarten lassen sich „Trends“ und „Runs“ erkennen. Ein Trend bezeichnet eine Folge von sieben Prozesswerten mit monotoner Steigung oder monotonem Gefälle. Dagegen wird ein Run als Folge von sieben

Prozesswerten definiert, die oberhalb oder unterhalb der Mittellinie liegt. Beide Fälle erfordern einen Eingriff in den Prozess. [SCH15; GEI08]

Ein *Netzdiagramm* (auch Spinnennetz-, Kiviat- oder Radardiagramm genannt) hat die Grundform eines Kreisdiagramms und dient für die kombinierte Darstellung von Maßzahlen, das in Zonen gleicher Größe aufteilt. Dabei werden die einzelnen Zonen durch gleichmäßig verteilte Achsen getrennt, die jeweils im Mittelpunkt entspringen. Je Achse lassen sich drei Segmente definieren. Das innere und äußere Segment beschreibt jeweils Maßzahlen, die einen zu großen bzw. zu geringen Wert aufweisen. Das mittlere Segment stellt den festgelegten Normbereich dar. Die erhobenen Qualitätsparameter werden auf den einzelnen Achsen eingetragen und benachbarte Punkte miteinander verbunden, dadurch entsteht ein geschlossener Linienzug. Im optimalen Fall liegt der Linienzug vollständig im Normbereich. Die durch die verschiedenen Linienzüge eingeschlossene Fläche wird häufig als kumuliertes Qualitätsmaß verwendet. Die Aussagekraft wird durch die starre Einteilung der Kreisscheibe in Segmente gleicher Größe begrenzt, jedoch gibt es Ansätze für ein gewichtetes Netzdiagramm mit variablen Kreissegmenten. Dabei wird die Größe des Kreissegmentes proportional zu dessen Bedeutung gewählt. [HOF13]

Der *Boxplot* (auch Box-Whisker-Plot oder Schachteldiagramm genannt) dient zur vereinfachten Visualisierung metrischer Daten. Dabei werden der Median, das untere und das obere Quartil sowie der Minimal- und Maximalwert der Daten innerhalb dieser Darstellung vereinigt. Gemeinsam bilden der Median sowie das untere und obere Quartil ein Rechteck bzw. eine Box. Diese entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50% der Daten liegen. Ein Strich innerhalb der Box repräsentiert dabei den Median der Verteilung und teilt diese in zwei Bereiche, in denen jeweils 50% der Daten liegen. Durch die Lage des Medians innerhalb der Box wird ein Hinweis zur Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung gegeben. Die Box wird durch zwei Linien (auch Antennen, Fühler oder Whisker genannt) verlängert. Nach TUKEY wird die Länge der Whisker auf maximal das 1,5-Fache des Interquartilsabstands ($1,5 \times IQR$) beschränkt. Dabei endet der Whisker jedoch nicht genau nach dieser Länge, sondern bei dem Wert aus den Daten, der

noch innerhalb dieser Grenze liegt. Die Länge der Whisker wird also durch die Datenwerte und nicht allein durch den Interquartilsabstand bestimmt. Daher müssen die Whisker nicht auf beiden Seiten gleich lang sein. Mittels Boxplot soll einfach und schnell vermittelt werden, in welchem Bereich die Daten liegen und wie sie sich über diesen Bereich verteilen. Der Boxplot ist daher ein beliebtes Instrument zur grafischen Analyse der Streuung von ordinalen und metrischen Variablen. [KRO14; MOS06; TUK77; DIE14b; DIE07]

Zusätzlich existieren weitere Visualisierungsmethoden zur Darstellung der Qualitätssituation, bspw. der Wertestrahle, der dreidimensionalen Werteverlauf und der xy-Plot zur Darstellung von Wertepaaren [DIE14b]. Aufgrund der Vielzahl der Qualitätswerkzeuge und der geringen Schnittmenge zur vorliegenden Arbeit werden diese nicht berücksichtigt.

G Beschreibung der Anforderungen aus Abschnitt 4.1

Anforderungen an die Definition der Produktionsqualität

Für eine sachgerechte Definition der Produktionsqualität im Kontext dieser Arbeit ist ein Bezug zum Montageprozess erforderlich. Dies wird insbesondere durch die prozessbezogene Eingrenzung verdeutlicht (vgl. Abschnitt 3.1). Die Definition soll sich von anderen Produktionsbereichen abgrenzen und einen Beitrag zur Qualitätsregelung der Produktion leisten. Folglich ist durch den Bezug zum Montageprozess eine montagespezifische Definition der Produktionsqualität zu entwickeln.

Zur Bewertbarkeit und Regelung der Produktionsqualität sind eine binäre und eine quantitative Beschreibung erforderlich. Eine binäre Beschreibung legt fest, ob die gesetzten Qualitätsanforderungen an die Produktionsqualität erfüllt oder nicht erfüllt sind. Da eine binäre Aussage für eine Regelung der Produktionsqualität nicht ausreicht, ist eine quantitative Beschreibung mit Angabe des prozentualen Zielerreichungsgrades erforderlich. Dadurch lassen sich Veränderungen der Produktionsqualität messen.

Eine sachgerechte Definition der montagespezifischen Produktionsqualität erfordert außerdem die Berücksichtigung der Qualitätskosten. Auf die Bewertung der Qualität einer Produktion haben diese einen maßgeblichen Einfluss. Somit müssen diese in einer sachgerechten Definition berücksichtigt werden.

Ebenso ist die Ableitung von relevanten Qualitätsmerkmalen der Produktion erforderlich. Diese repräsentieren die Produktionsqualität und liefern Indikatoren zur Qualitätsregelung. Weiterhin muss aus den Qualitätsmerkmalen, welche quantifizierbar sein müssen (vgl. Unterabschnitt 2.1.2), ein aussagekräftiges Kennzahlensystem ableitbar sein. Dies schafft ein einheitliches System zur Quantifizierung der Produktionsqualität und liefert die Basis für eine Bewertbarkeit und Vergleichbarkeit sowie für eine adäquate Regelung.

Anforderungen an die hybride Qualitätsregelung

Eine hybride Qualitätsregelung muss zum einen die drei RK-Anforderungen erfüllen und zum anderen die vier Güteanforderungen gewährleisten (vgl. Unterabschnitt 2.2.1). Weiterhin existieren zusätzliche spezifische Anforderungen an die Qualitätsregelung aufgrund der Eingrenzung.

Eine wesentliche Anforderung stellt die Bereitstellung von rollen-, sach- und zeitgerechten Qualitätsinformationen dar. Ein Mitarbeiter in der Montagelinie benötigt die richtigen Qualitätsinformationen zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der richtigen Form. Somit wird dem Management von Qualitätsinformationen eine bedeutende Stellung innerhalb der Qualitätsregelung zugesprochen.

Ebenso sind vorwärts- und rückwärtsgerichtete Qualitätsinformationsflüsse notwendige Voraussetzungen zur effizienten Qualitätsregelung [SCH96; DOL99]. Qualitätsinformationen müssen zum einen in Rückwärtsrichtung entlang der Wertschöpfungskette geleitet werden. Erst durch eine Rückkopplung von Informationen ist der RK geschlossen und die Anforderung zur Qualitätsregelung erfüllt (vgl. Unterabschnitt 2.2.1). Zum anderen müssen Qualitätsinformationen in Vorwärtsrichtung entlang der Wertschöpfungskette geleitet werden. Vor allem nachgelagerte Bereiche benötigen Informationen zu bestehenden Qualitätsmängeln am Produkt zwecks effizienter Nacharbeit. Folglich sind sowohl eine kontinuierliche Qualitätsrückmeldung als auch eine effiziente Nacharbeitssteuerung zur adäquaten Qualitätsregelung erforderlich.

Außerdem ist eine informationstechnische Entscheidungslogik notwendig, welche die Qualitätsinformationen anhand ihrer Attribute rollen-, sach- und zeitgerecht weiterleitet. Zur schnellen Qualitätsrückmeldung und effizienten Nacharbeitssteuerung sind die Rollen ausschließlich mit den für sie erforderlichen Qualitätsinformationen zu versorgen. Weiterhin ist die Beobachtbarkeit sowie die zeitliche Dynamik des Montagesystems zu gewährleisten. Abschließend muss das Konzept eine Regelbarkeit des Montagesystems ermöglichen.

Anforderungen an die Informationsvisualisierung

Eine rudimentäre Anforderung umfasst die transparente Darstellung von Echtzeitinformationen in der Montagelinie. Unterabschnitt 3.2.6 hat gezeigt, dass die Informationsbereitstellung innerhalb der Montagelinie u. a. durch Ineffizienz und Intransparenz gekennzeichnet ist. Folglich sind alle relevanten Informationen schnellstmöglich in rollen-, sach- und zeitgerechter Form transparent darzustellen. Aufgrund der steigenden Informationsmenge, bedingt durch die Komplexität und der damit einhergehenden fehlenden Transparenz, entstehen zusätzliche kognitive Belastungen für die Mitarbeiter. Um diese entsprechend zu entlasten, müssen Visualisierungen am Arbeitsplatz formal richtige, relevante und aktuelle Informationen zum jeweils richtigen Zeitpunkt und am richtigen Arbeitsplatz in entsprechend skaliertes bzw. aufbereiteter Form bereitstellen. Die Informationen in der Montagelinie müssen didaktisch-psychologisch so aufbereitet sein, dass das eigenverantwortliche Arbeiten unabhängig von der Qualifikation des Monteurs möglich ist. Damit lassen sich u. a. Rüstzeiten minimieren, Erfahrungskurveneffekte schneller realisieren und technische Änderungen sowohl effektiver als auch effizienter kommunizieren.

Das System muss den Benutzern als Basis zunächst alle notwendigen Informationen rollen-, sach- und zeitgerecht sowie stations- und fahrzeugspezifisch aufbereitet zur Verfügung stellen. Dazu müssen diese im Vorfeld aus den vorhandenen Daten sinnvoll extrahiert und aggregiert sowie für eine zielgerichtete Nutzbarkeit anwenderorientiert aufbereitet sein. Der Benutzer soll keine Informationen filtern und übersetzen müssen, sondern sich auf seine Kerntätigkeit (Fahrzeugmontage) fokussieren. Zusätzlich ist eine bildhafte Visualisierung von Montageumfängen in Kombination mit Textinformationen zur vereinfachten anwenderorientierten Darstellung erforderlich [TOL09]. Aufgrund der Rotation der Mitarbeiter, verstärkter Einsatz von teilweise fremdsprachigen Ferienarbeitskräften und Zeitarbeitnehmern in der Fahrzeugmontage wird so die Problematik des Wissensdefizites bei den Montageumfängen reduziert. Um bei Wissensdefiziten des Mitarbeiters direkt unterstützen zu können, muss das IS eine leicht verständliche Bauanleitung bereitstellen. Über die sinnvolle Verknüpfung von Informationen wird

notwendiges Wissen generiert. Zusätzlich sind außerordentliche Montage- und Qualitätshinweise in ebenso rollen-, sach- und zeitgerechter Form erforderlich. U. a. stellt ein fahrzeugbezogener Sonderausstattungshinweis bei Exotenfahrzeugen¹¹ in Form einer visuellen, akustischen oder haptischen Meldung einen adäquaten Hinweis dar.

Weiterhin ist eine hohe Flexibilität der Visualisierungsinhalte erforderlich. Je nach Situation muss die Visualisierung auf veränderte Gegebenheiten reagieren und Informationen anpassen können. Dies sichert eine hohe Dynamik und Schnelligkeit zur Stabilisierung der Produktionsqualität. Außerdem muss die Informationsvisualisierung die Prozesse unterstützen und deren Fähigkeit gewährleisten sowie den Mitarbeitern assistieren, jedoch beide nicht in ihren Abläufen behindern. Diese Anforderungen wurden z. T. bereits in den Arbeiten von FELDMANN UND LANG sowie FRANKE UND RISCH genannt und werden in dieser Arbeit ebenfalls berücksichtigt [FEL05; FRA09].

Des Weiteren muss sich eine Informationsvisualisierung an die aktuelle Norm der ISO/IEC 25030 bzgl. Qualitätskriterien zur Bewertung von Softwareprodukten orientieren. Konkret umfassen diese folgende Kriterien [NOR07]:

1. Funktionalität
2. Benutzbarkeit
3. Zuverlässigkeit
4. Effizienz
5. Änderbarkeit / Wartbarkeit
6. Übertragbarkeit

Weiterhin ist es erforderlich, dass eine Informationsvisualisierung die aktuelle Normenreihe der DIN EN ISO 9241 als Richtlinie zur Ergonomie der Mensch-System-Interaktion berücksichtigt. Konkrete Kriterien finden sich in den Teilen 3, 9, 12, 13, 110, 161 und 303 der Normenreihe. Insbesondere

¹¹ „Exoten“ sind Fahrzeuge, welche eine außergewöhnliche Ausstattung umfassen. Dies könnte z. B. eine seltene Ausstattung oder eine Vollausstattung sein.

der Teil 110 umfasst relevante Grundsätze der Dialoggestaltung und liefert wichtige Anforderungen an die Informationsvisualisierung. Demnach werden folgende Kriterien als Anforderungen berücksichtigt [NOR08b; NOR00]:

1. Aufgabenangemessenheit
2. Selbstbeschreibungsfähigkeit
3. Erwartungskonformität
4. Lernförderlichkeit
5. Steuerbarkeit
6. Fehlertoleranz
7. Individualisierbarkeit
8. Benutzerführung

Der Anforderungspunkt 8 der Normenreihe DIN EN ISO 9241 entstammt nicht dem Teil 110, sondern wurde dem Teil 13 zur Benutzerführung entnommen. Dies stellt ein wichtiges Kriterium zur Informationsvisualisierung innerhalb der Montagelinie dar. Die Anforderungen wurden bereits zur Bewertung der bestehenden Ansätze zur Informationsvisualisierung in Tabelle 3.3 verwendet.

Anforderungen an das Qualitätsmodell

Die Qualität eines Betrachtungsobjektes wird durch objektspezifische Qualitäts- und Prüfmerkmale repräsentiert (vgl. Unterabschnitt 2.1.2). Somit muss das Qualitätsmodell einen merkmalsbasierten Aufbau verfolgen. Durch die unterschiedlichen Prioritäten der Merkmale ist zudem die Fähigkeit einer asymmetrischen bzw. gewichteten Darstellung der Merkmale erforderlich. Weiterhin ist die Berücksichtigung von Toleranzgrenzen im Qualitätsmodell notwendig. Aufgrund der unterschiedlichen Qualitäts- und Prüfmerkmale muss das Qualitätsmodell außerdem einen generischen Aufbau verfolgen.

Ebenso müssen die qualitätsbezogenen Inhalte homomorph gestaltet sein. Wie in Unterabschnitt 2.1.2 beschrieben, können qualitätsbeschreibende Merkmale unterschiedliche Größen und Dimensionen sowie Einheiten besitzen. Damit die Qualität eines Betrachtungsobjektes jedoch über ein

Qualitätsmodell dargestellt werden kann, ist eine Normierung der unterschiedlichen Werte erforderlich. Dies schafft eine homomorphe Struktur.

Zudem muss das Qualitätsmodell objektunabhängig sein, um jegliche Betrachtungsobjekte bzgl. Qualität beschreiben und bewerten zu können. Ebenso müssen sowohl ein einzelnes als auch eine Kombination mehrerer typunabhängiger Objekte über das Qualitätsmodell darstellbar sein. Dies setzt die Fähigkeit zu einer multiobjektiven Darstellung des Qualitätsmodells voraus.

Weiterhin muss das Qualitätsmodell die Abbildung einer hierarchischen Struktur ermöglichen. Innerhalb der Fahrzeugmontage ist ein Betrachtungsobjekt modular aufgebaut (z. B. Fahrzeug → Baugruppe → Bauteil). Somit ist es notwendig, diese Struktur adäquat im Qualitätsmodell abzubilden.

Des Weiteren muss das Qualitätsmodell auf einer grafischen Darstellung basieren. Der Anwender soll in rollen-, sach- und zeitgerechter Form bzw. einfach und schnell die relevanten Qualitätsinformationen erhalten, welche den qualitativen Sachverhalt über das Qualitätsmodell repräsentieren. Trotz der vereinfachten grafischen Darstellung muss das Qualitätsmodell eine analytische Betrachtung der objektspezifischen Qualität ermöglichen und zugleich diese Qualität quantifizierbar ableiten können.

Abschließend ist eine einfache bzw. verständliche Struktur des Qualitätsmodells und Qualitätsdarstellung erforderlich. Der Anwenderkreis soll nicht auf ausgewählte und im Detail geschulte Fachexperten eingeschränkt sein, sondern ebenso durch ungeschulte Anwender intuitiv benutzbar sein.

Anforderungen an die Prozesse des Montagesystems

Die Prozesse müssen zunächst eine vollständige Einbindung der Konzepte ermöglichen. Diese sind dazu durch die Montageplanung adäquat mit den jeweiligen Prozessen zu verknüpfen. Folglich ist ebenso die Funktionsfähigkeit der Konzepte im Kontext einer Mensch-System-Kollaboration durch die Prozesse des Montagesystems zu gewährleisten.

Zudem muss sichergestellt werden, dass innerhalb der Prozesse keine weiteren analogen Dokumente parallel zum digitalen IS existieren. Alle relevanten analogen Dokumente werden durch ein prozesssicheres digitales IS abgelöst, sodass eine zusätzliche Dokumentation außerhalb des Konzeptes nicht erforderlich ist. Dies würde lediglich zum Anstieg nicht-wertschöpfender Tätigkeiten führen und ggf. Missverständnisse aufgrund asynchroner Dokumentationsstände (digital vs. analog) hervorrufen.

Abschließend müssen die Prozesse auf die bereitgestellten Informationen adäquat reagieren. Sofern keine Reaktion erfolgt und der Prozess unverändert weiterläuft, kann eine effiziente Qualitätsregelung nicht erfolgen. Die Missachtung von qualitätsrelevanten Hinweisen und Handlungsmaßnahmen führt u. U. zu kritischen Qualitätsabweichungen, zusätzlichen Qualitätskosten und einer reduzierten Produktionsqualität.

Anforderungen an das Informationssystem

Das IS besitzt zunächst *netzwerkspezifische Anforderungen*. Der geforderte Kern an das IS besteht in der vollständigen Digitalisierung des analogen Informationsaustauschs. Es soll alle bisherigen Kommunikationsmittel und Dokumente über ein integriertes digitales IS bündeln sowie die Qualitätssituation auf Basis von Ereignissen und Bedingungen effizient regeln. Dies soll durch eine Vernetzung aller Rollen über adäquate Endgeräte und anwenderorientiertem GUI erfolgen. Das IS muss dazu in die bestehende digitale Systemlandschaft eingebettet werden, um relevante Daten aus diesen Systemen abrufen und Qualitätsinformationen verarbeiten zu können. Folglich muss das IS standardisierte Schnittstellen und Protokolle verwenden, um eine einfache Vernetzung und Wartung der Systemlandschaft zu ermöglichen. Ebenso muss das IS echtzeitfähig sein, um vorhandene Daten direkt verarbeiten und weiterleiten zu können. Nur durch eine Echtzeitsynchronisation mit anderen Systemen ist eine schnelle Reaktionsfähigkeit und eine effiziente Qualitätsregelung möglich. Des Weiteren muss durch das IS ein Wissensmanagementsystem aufgebaut werden. Aufgrund der potenziellen Reproduzierbarkeit von Fehlerbildern im Montageprozess ist eine schnelle Zuordnung von Lösungsmöglichkeiten notwendig. Dadurch lässt sich das

Fehlerbild zeit- und kosteneffizient nacharbeiten und das Risiko der Reproduzierbarkeit deutlich reduzieren. Ein Wissensmanagement trägt außerdem zum standortübergreifenden Austausch bzgl. Ursachen und Lösungen zu Fehlerbildern bei. Folglich ist eine Vernetzung des IS im Sinne des IIoT notwendig.

Weiterhin bestehen *datenspezifische Anforderungen*. Das IS muss aus den digitalen Informationen zum Montageprozess die zur Qualitätsregelung erforderlichen Daten identifizieren und extrahieren können. Diese Daten müssen im Folgeschritt durch das IS gespeichert und ggf. zu Gruppen aggregiert werden können. Daher ist eine adäquate Speichertechnologie mit schnellem Datenaustausch notwendig. In diesem Zusammenhang ergibt sich außerdem die Anforderung nach vollständiger und einheitlicher Dokumentation des Montageprozesses bzw. zu dokumentierender Tätigkeitsschritte. Das IS muss diese Daten zu qualitäts- und montagerelevanten Informationen aufbereiten sowie sach-, rollen- und zeitgerecht übertragen und visualisieren können. Im Kontext der ISO/IEC 25030 sind sowohl die Sicherung der Daten und Informationen aufgrund unternehmensinterner und gesetzlicher Vorgaben als auch die Sicherheit vor unberechtigtem Zugriff zu gewährleisten.

Des Weiteren sind *prozessspezifische Anforderungen* durch das IS zu erfüllen. Das IS muss eine Möglichkeit zur Informationseingabe und -ausgabe bereitstellen bzw. dem Mitarbeiter kollaborieren können. Das IS muss darüber hinaus ergonomisch gestaltet und intuitiv bedienbar sein. Es soll lediglich eine Basisschulung zur Benutzung des Systems ausreichen, um vollständig mit dem IS in der taktgebundenen Montagelinie arbeiten zu können. Zudem muss das IS die bisherigen manuellen Tätigkeiten bzgl. der Daten- und Informationserfassung, -weiterleitung und des -abrufs weitestgehend vermeiden und diese automatisieren, um die Mitarbeiter zu unterstützen und die nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten zu reduzieren. Ebenso muss das IS die Informationen prozessorientiert verarbeiten und Totzeiten in der Informationsweiterleitung und -bereitstellung vermeiden. Abschließend ist erforderlich, dass der manuelle Pflegeaufwand der Daten und des IS durch Datenbank- und Systemadministratoren so gering wie möglich gehalten wird.

Anforderungen an die Nutzer

Zunächst erfordert eine hybride Qualitätsregelung durch das informationstechnische Konzept die Motivation der Mitarbeiter sowie die Bereitschaft zur Akzeptanz des neuen IS. Das Technologie-Akzeptanz-Modell beschreibt, dass IS bei Nutzern akzeptiert werden, wenn ein konkreter Nutzen ersichtlich und das IS benutzerfreundlich ist [HAN15]. Ohne diese Voraussetzungen kann die Qualitätsregelung nicht effizient gestaltet werden.

Darauf aufbauend müssen die Funktionen des IS konsequent von den Mitarbeitern genutzt werden. Die Nutzer müssen erforderliche Informationen in das IS eintragen, damit eine lückenlose Dokumentation gewährleistet wird. Nur so kann eine konsistente Datenbasis und eine vollständige Transparenz erreicht werden. Wird das IS nicht oder nur teilweise angewendet, verpufft der Mehrwert des Konzeptes und kann nur bedingt zur effizienten Qualitätsregelung beitragen. Sowohl für die Mitarbeiter als auch das Management ist folglich die konsequente Nutzung gefordert – der digitale Prozess muss gelebt werden. Zudem müssen die Mitarbeiter relevante Informationen aus dem IS entnehmen und umsetzen.

Dennoch sollen die Mitarbeiter kritisch mit den bereitgestellten Informationen umgehen. Bei Unklarheiten und Missverständnissen sollen diese Informationen hinterfragt werden, da Fehler prinzipiell nicht auszuschließen sind. Insbesondere während der Pilotphase¹² und zu Beginn des Rollouts des vorliegenden Konzeptes könnten u. U. falsche Informationen aufgrund falscher Datenbasis, mangelhafter Dokumentation oder fehlerhafter Vernetzung angezeigt werden. Ziel ist es, den Informationen nicht bedingungslos zu vertrauen, sondern diese als Assistenz innerhalb der Montagelinie zu nutzen und ggf. kritisch zu hinterfragen.

Weiterhin ist ein konstruktives Feedback seitens der Mitarbeiter zu den Funktionen erwünscht. Als Nutzer des IS muss der Mitarbeiter intensiv mit den Konzepten arbeiten. Folglich können nur die Mitarbeiter das IS

¹² Vgl. agile Entwicklung mit iterativen Funktionserweiterungen von Systemen.

im Produktionsbetrieb realistisch bewerten. Kritische Aspekte und Verbesserungsvorschläge sind positiv und im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) erforderlich. Es gilt es daher alle am Prozess beteiligten Personen intensiv einzubinden, die Rollen und einzelnen Funktionen zu definieren und ihnen so die Verantwortung im Qualitätserstellungsprozess zu übertragen. Dies schafft Vertrauen in die Belegschaft und Motivation zur Fehlerabstellung.

H Gesprächsleitfaden der Experteninterviews zur APQ

Tabelle H.1: Gesprächsleitfaden der Experteninterviews zur APQ

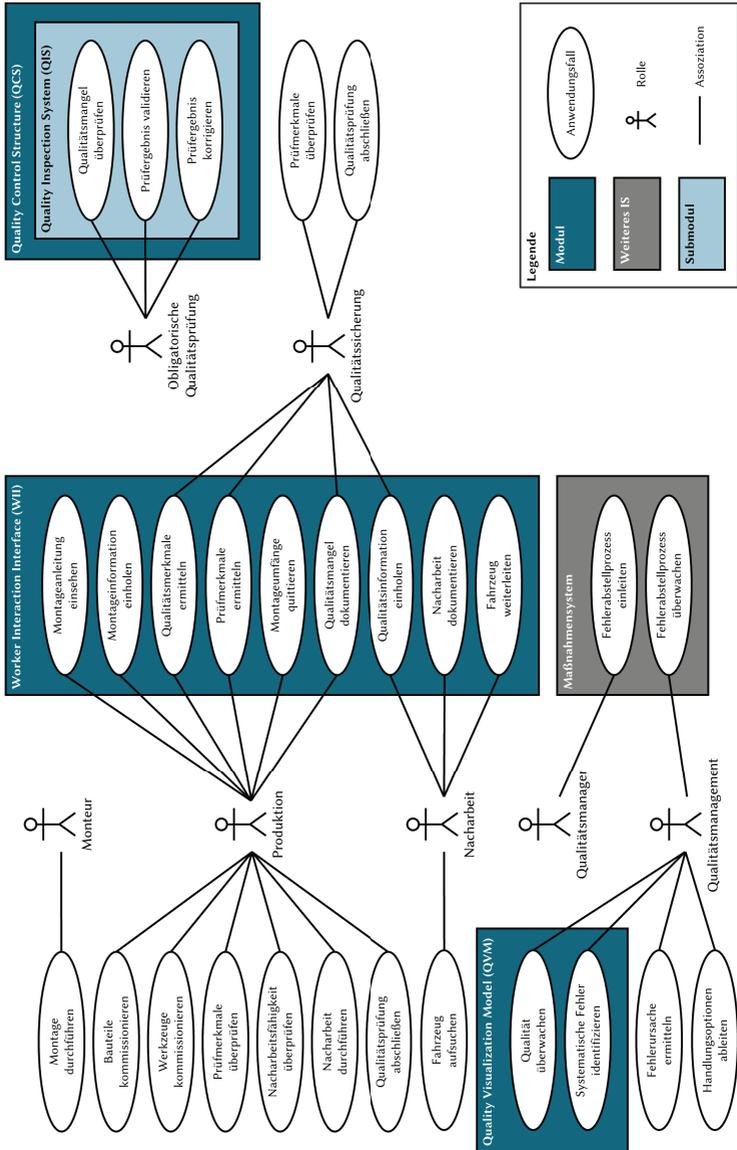
| 1. Fragen zur Person des Experten | |
|---|--|
| 1.1. | Geben Sie bitte einen groben Überblick zu Ihrer Person (inkl. Alter und Interessen). ¹³ |
| 1.2. | Wie zeichnet sich Ihr schulischer und beruflicher Werdegang aus? |
| 1.2.1. | <i>Falls Studium:</i> Was haben Sie studiert? |
| 1.2.2. | <i>Falls Studium:</i> Welche Fachspezifikation haben Sie gewählt? |
| 1.3. | Seit wann sind Sie im Unternehmen tätig? |
| 1.4. | In welchen weiteren Funktionen waren Sie bereits tätig? |
| 1.5. | Sind Sie bereits an anderen Produktionsstandorten tätig gewesen? |
| 2. Fragen zur Tätigkeit des Experten | |
| 2.1. | Beschreiben Sie bitte kurz Ihren aktuellen Fachbereich bzw. Ihre Abteilung. |
| 2.2. | Beschreiben Sie bitte kurz Ihre aktuelle Funktion. |
| 2.3. | Seit wann sind Sie in dieser Funktion tätig? |
| 2.4. | Was ist das „Ziel“ Ihrer Funktion? |
| 2.5. | Was sind Ihre Kernaufgaben zur Zielerreichung? |
| 2.6. | Welchen Beitrag leisten diese Aufgaben zum Produkt (z. B. Fahrzeug, Bauteil)? |
| 2.7. | Welchen Beitrag leisten diese Aufgaben zur Produktion (z. B. Prozess, Montage)? |
| 2.8. | Nennen Sie kritische Parameter, Merkmale oder Kennzahlen Ihres Fachbereiches. |

Fortsetzung der Tabelle H.1 auf der nächsten Seite.

¹³ Diese Frage soll lediglich als Einstieg in das Experteninterview dienen und beide Personen (Interviewer und Experte) in ein persönliches und offenes Gespräch leiten. Zur Definition der APQ haben das Alter und die Interessen der Experten wenig bis keinen Einfluss.

| |
|--|
| 3. Fragen zum Prozess der Fahrzeugmontage |
| 3.1. Haben oder hatten Sie Berührungspunkte mit dem Gewerk der Fahrzeugmontage? |
| 3.1.1. <i>Falls ja:</i> Seit wann? |
| 3.1.2. <i>Falls ja:</i> In welcher Form? |
| 3.1.3. <i>Falls ja:</i> Schätzen Sie die Berührungintensität zur Fahrzeugmontage ein: stark <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> gering |
| 3.1.4. <i>Falls ja:</i> Schätzen Sie Ihre Kenntnisse zur Fahrzeugmontage ein: sehr erfahren <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> unerfahren |
| 3.2. Kennen Sie relevante Kennzahlen der Fahrzeugmontage? |
| 3.3. Wann ist aus Ihrer Sicht das „Ziel“ der Fahrzeugmontage erreicht? |
| 4. Fragen zur Qualität der Produktion bzw. Montage |
| 4.1. Was verstehen Sie unter dem Begriff „Qualität“? |
| 4.2. Was verstehen Sie unter dem Begriff „Produktionsqualität“? |
| 4.3. Welche Parameter, Merkmale oder Kennzahlen haben aus Ihrer Sicht einen (positiven und negativen) Einfluss auf die montagespezifische Produktionsqualität? |
| 4.4. Im Hinblick auf Ihren Fachbereich bzw. Ihre Funktion: Wann liegt eine hohe montagespezifische Produktionsqualität vor? |
| 4.5. Ist aus Ihrer Sicht ein Kennzahlensystem zur Bewertung der montagespezifische Produktionsqualität sinnvoll? |

I Anwendungsfalldiagramm zum Konzept



K Pseudocode zur QCS

Quality Backward Stream

```
1: if  $w(e_{k,j,i}) \notin T(e_{k,j,i})$  then
2: |   if Qualitätsprüfer i dokumentiert Fehler then

3: |   |   procedure QBS-1(Fehlerbild) // QBS-1
4: |   |   |   Füge Fehlerbild zu Fehleraufkommen von Qualitätsprüfer i hinzu
5: |   |   |   Erhöhe „Gefundene Fehler“ von Qualitätsprüfer i um 1
6: |   |   end procedure

7: |   |   procedure QBS-2(Fehlerbild) // QBS-2
8: |   |   |   while Qualitätsprüfer i-1 ist vorhanden do
9: |   |   |   |   if Fehlerbild liegt in Prüfumfang von Qualitätsprüfer i-1 then
10: |   |   |   |   |   Informiere Qualitätsprüfer i-1 über Fehler
11: |   |   |   |   |   Füge Fehlerbild zu Fehlerschlupf von Qualitätsprüfer i-1 hinzu
12: |   |   |   |   |   Erhöhe „Durchgeschlupfte Fehler“ von Qualitätsprüfer i-1 um 1
13: |   |   |   |   |   end if
14: |   |   |   |   |   Reduziere i um 1
15: |   |   |   |   end while
16: |   |   end procedure

17: |   |   procedure QBS-3(Fehlerbild) // QBS-3
18: |   |   |   Füge Fehlerbild zu Fehlerschlupf von Monteur hinzu
19: |   |   |   Erhöhe „Durchgeschlupfte Fehler“ von Monteur um 1
20: |   |   |   if Fehler ist systematisch then
21: |   |   |   |   Informiere Monteur über systematischen Fehler
22: |   |   |   |   end if
23: |   |   end procedure

24: |   |   if Fehler ist systematisch then
25: |   |   |   procedure QBS-4(Fehlerbild) // QBS-4
26: |   |   |   |   Setze Fehlerabstellverantwortlichkeit auf Qualitätsmanager
27: |   |   |   |   Informiere Qualitätsmanager über systematischen Fehler
28: |   |   |   |   Füge Fehlerbild zu Fehlerliste von Qualitätsmanager hinzu
29: |   |   |   |   Erhöhe „Offene systematische Fehler“ von Qualitätsmanager um 1
30: |   |   |   |   end procedure
31: |   |   |   end if

32: |   end if
33: end if
```

Quality Forward Stream

```
1: if  $w(e_{k,j,i}) \notin T(e_{k,j,i})$  then
2:   | if Monteur meldet einfachen Fehler then
3:     | procedure QFS-1(Fehlerbild) // QFS-1
4:     |   Setze Verantwortlichkeit auf Unterstützer
5:     |   Informiere Unterstützer über Fehler
6:     |   Füge Fehler zu Nacharbeitsliste von Unterstützer hinzu
7:     |   Erhöhe „Offene Nacharbeiten“ von Unterstützer um 1
8:     | end procedure
9:   | end if
10: | if Fahrzeug erreicht Qualitätstor then
11:   | | if Monteur meldet Fehler then
12:   | |   procedure QFS-2A(Fehlerbild) // QFS-2a
13:   | |   | Informiere Qualitätsprüfer über offene Fehler
14:   | |   end procedure
15:   | | end if
16:   | | if Unterstützer meldet Fehler then
17:   | |   procedure QFS-2B(Fehlerbild) // QFS-2b
18:   | |   | Reduziere „Offene Nacharbeiten“ von Unterstützer um 1
19:   | |   | Informiere Qualitätsprüfer über offene und nachgearbeitete Fehler
20:   | |   end procedure
21:   | | end if
22:   | | if Qualitätsprüfsystem meldet Fehler then
23:   | |   procedure QFS-2c(Fehlerbild) // QFS-2c
24:   | |   | if Fehler ist einfach then
25:   | |   |   Setze Verantwortlichkeit auf Qualitätsprüfer
26:   | |   |   Erhöhe „Offene Nacharbeiten“ von Qualitätsprüfer um 1
27:   | |   | else
28:   | |   |   | Aktiviere QFS-3b
29:   | |   |   end if
30:   | |   end procedure
31:   | | end if
32: | end if
```

```
33: | if Monteur meldet schwierigen Fehler then
34: |   procedure QFS-3A(Fehlerbild) // QFS-3a
35: |     Setze Verantwortlichkeit auf Nacharbeiter
36: |     Informiere Nacharbeiter über Fehler
37: |     Füge Fehler zu Nacharbeitsliste von Nacharbeiter hinzu
38: |     Erhöhe „Offene Nacharbeiten“ von Nacharbeiter um 1
39: |   end procedure
40: | end if

41: | if Unterstützer meldet schwierigen Fehler or Offener schwieriger Fehler erreicht Qualitätstör then
42: |   procedure QFS-3B(Fehlerbild) // QFS-3b
43: |     Setze Verantwortlichkeit auf Nacharbeiter
44: |     Informiere Nacharbeiter über Fehler
45: |     Füge Fehler zu Nacharbeitsliste von Nacharbeiter hinzu
46: |     Erhöhe „Offene Nacharbeiten“ von Nacharbeiter um 1
47: |     Reduziere „Offene Nacharbeiten“ von Unterstützer um 1
48: |   end procedure
49: | end if

50: | if Qualitätsprüfer dokumentiert schwierigen Fehler then
51: |   procedure QFS-3c(Fehlerbild) // QFS-3c
52: |     Setze Verantwortlichkeit auf Nacharbeiter
53: |     Informiere Nacharbeiter über Fehler
54: |     Füge Fehler zu Nacharbeitsliste von Nacharbeiter hinzu
55: |     Erhöhe „Offene Nacharbeiten“ von Nacharbeiter um 1
56: |     Reduziere „Offene Nacharbeiten“ von Qualitätsprüfer um 1
57: |   end procedure
58: | end if

59: | if Monteur meldet systematischen Fehler then
60: |   procedure QFS-4(Fehlerbild) // QFS-4
61: |     Setze Verantwortlichkeit auf Qualitätsmanager
62: |     Informiere Qualitätsmanager über systematischen Fehler
63: |     Füge Fehlerbild zur Fehlerliste von Qualitätsmanager hinzu
64: |     Erhöhe „Offene systematische Fehler“ von Qualitätsmanager um 1
65: |   end procedure
66: | end if

67: end if
```

L EPK der hybriden Qualitätsregelung

Nachfolgend wird in kompakter Form die Modellierungssprache der „ereignisgesteuerten Prozesskette“ (EPK) beschrieben, um ein grundlegendes Verständnis bzgl. der Syntax zu erhalten. Die Beschreibung der EPK wird dabei in gekürzter Form wörtlich von ROSEMANN ET AL. übernommen [ROS12]:

Eine EPK ermöglicht die Modellierung von Kontrollflüssen für Modellnutzer ohne fundiertes modellierungstechnisches Vorwissen. Bei EPK handelt es sich um gerichtete Graphen, die zur Modellierung die drei Basiselemente „Funktionen“, „Ereignisse“ und „Konnektoren“ sowie „Notationsregeln“ verwenden.

1. Funktionen

Funktionen repräsentieren Tätigkeiten (Aktivitäten), übertragen Input- in Outputdaten und besitzen Entscheidungskompetenz über den Prozessverlauf. Funktionen werden durch abgerundete Rechtecke dargestellt.

2. Ereignisse

Ereignisse repräsentieren ablaufrelevante Zustandsausprägungen. Im Gegensatz zu Funktionen verbrauchen Ereignisse weder Zeit noch Kosten. Es lassen sich vier wesentliche Ereignisarten unterscheiden:

1. Das Ereignis kennzeichnet Start- bzw. Ende eines Prozesses.
2. Das Ereignis betrifft eine Attributänderung des Prozessobjekts.
3. Das Ereignis beschreibt das Eintreffen eines bestimmten Zeitpunkts.
4. Das Ereignis löst einen Prozess aus.

Ereignisse werden als Sechsecke dargestellt und besitzen keine Entscheidungskompetenz. Sie erfüllen potenziell zwei Aufgaben. Zum einen lösen sie Funktionen aus (Auslöseereignisse), zum anderen dokumentieren sie einen erreichten Zustand (Bereitstellungsereignisse).

3. Konnektoren

Zur Modellierung von nicht-linearen Prozessverläufen dienen logische *Konnektoren* (Verknüpfungsooperatoren). Diese werden unterteilt in:

- *AND-Verknüpfung* (a und b)
- *IOR-Verknüpfung*¹⁴ (a oder b oder [a und b]) als inklusives ODER
- *XOR-Verknüpfung* (entweder a oder b) als exklusives ODER

Operatoren können unmittelbar aufeinander folgen. Sofern zu einer Eingangsverknüpfung eine korrespondierende Ausgangsverknüpfung existiert, müssen beide Verknüpfungsooperatoren übereinstimmen.

Notationsregeln

In EPK dürfen, mit Ausnahme der Konnektoren, nur unterschiedliche Knotentypen verbunden werden. Ein oder mehrere Ereignisse stoßen eine Funktion an, sodass wieder ein oder mehrere Ereignisse erzeugt werden. Ebenso muss eine Prozesskette mit einem oder mehreren Ereignissen beginnen und enden. Dadurch wird folgendes sichergestellt:

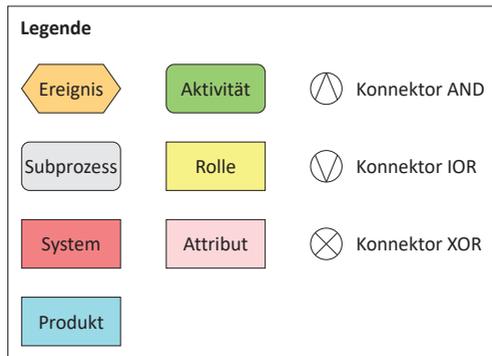
1. Die Anfangs- und Endbedingungen des Prozesses werden spezifiziert.
2. Jeder Funktion geht ein Auslöser voran.
3. Jede Funktion führt zu einer Zustandsveränderung.

Sofern eine EPK einen Teilprozess beschreibt, wird über einen Prozesswegweiser die Verbindung zu vor- bzw. nachgelagerten Prozessen hergestellt.

Über diese Notationsregeln hinaus können EPK um zusätzliche Objekttypen angereichert werden. Dabei besitzen Daten, Organisationseinheiten, Anwendungssysteme und Leistungen eine besondere Relevanz.

¹⁴ Z. T. auch nur als OR-Verknüpfung bezeichnet.

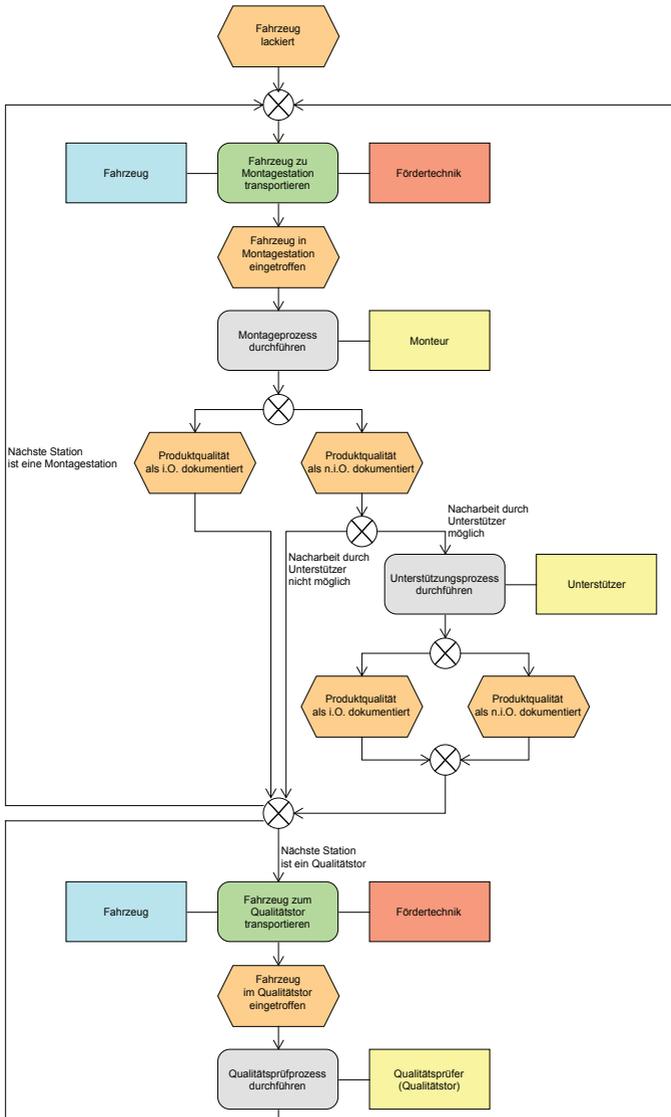
Die nachfolgende Legende zeigt die verwendete Symbolik innerhalb der EPK. Die Formwahl orientiert sich anhand der standardisierten Formen einer eEPK¹⁵, jedoch wurden diese im Rahmen der Anwendung in dieser Arbeit modifiziert. Die Farbwahl der Formen wurde hingegen subjektiv getroffen.



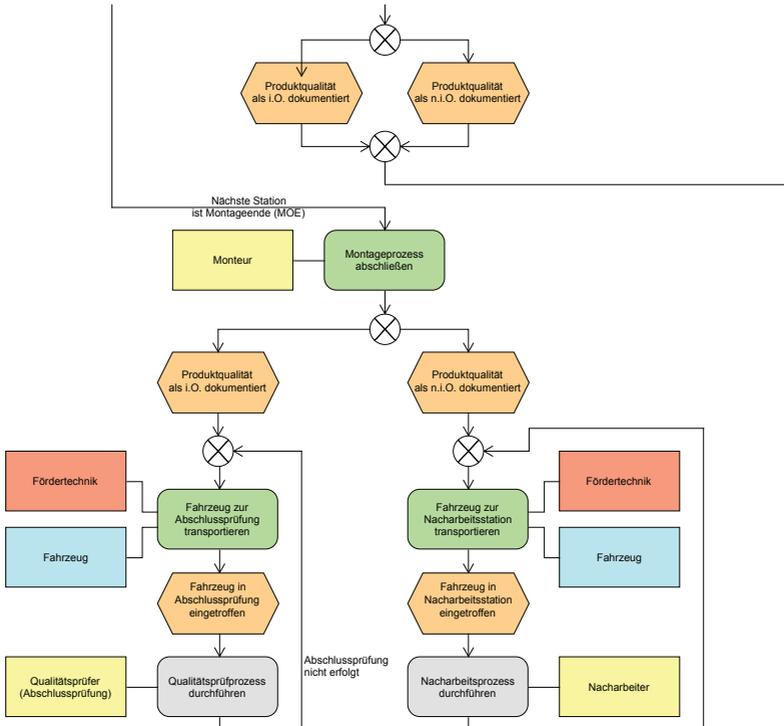
Produktionsprozess durchführen (1/3)

Dieser Hauptprozess stellt den montagespezifischen Ausschnitt aus dem gesamten Produktionsprozess eines Fahrzeugs dar. Die vorgelagerten Gewerke (Presswerk, Rohbau und Lackierung) sowie die nachgelagerten Prozessschritte des Gewerkes Montage werden folglich nicht betrachtet.

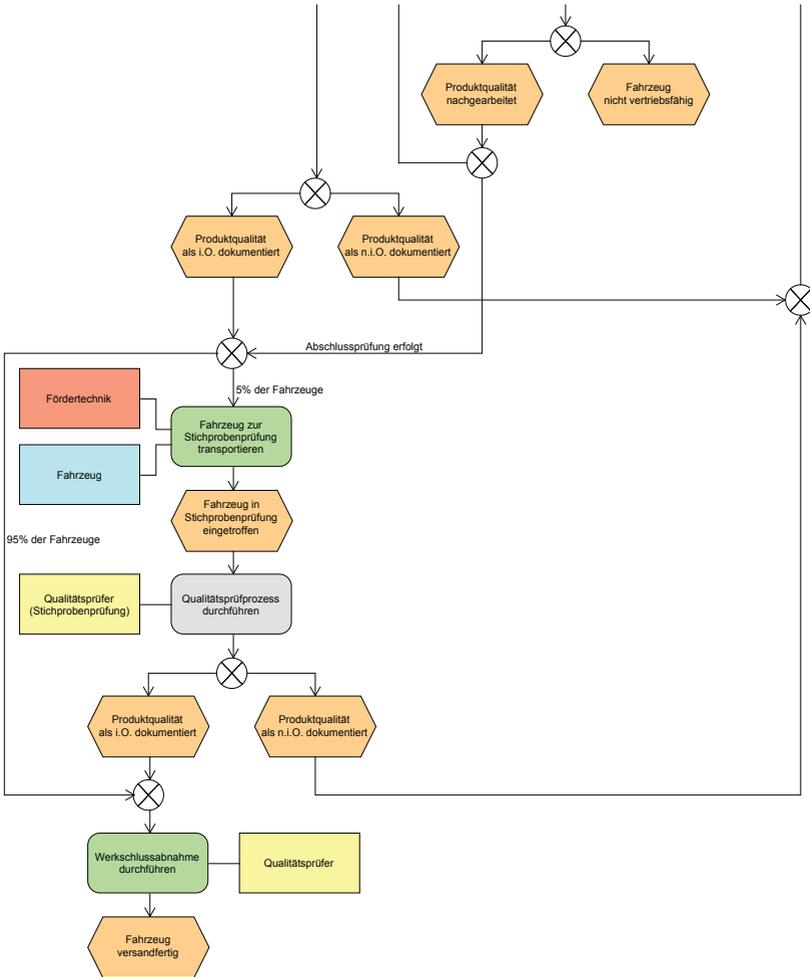
¹⁵ Das Akronym „eEPK“ steht für die „erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskette“.



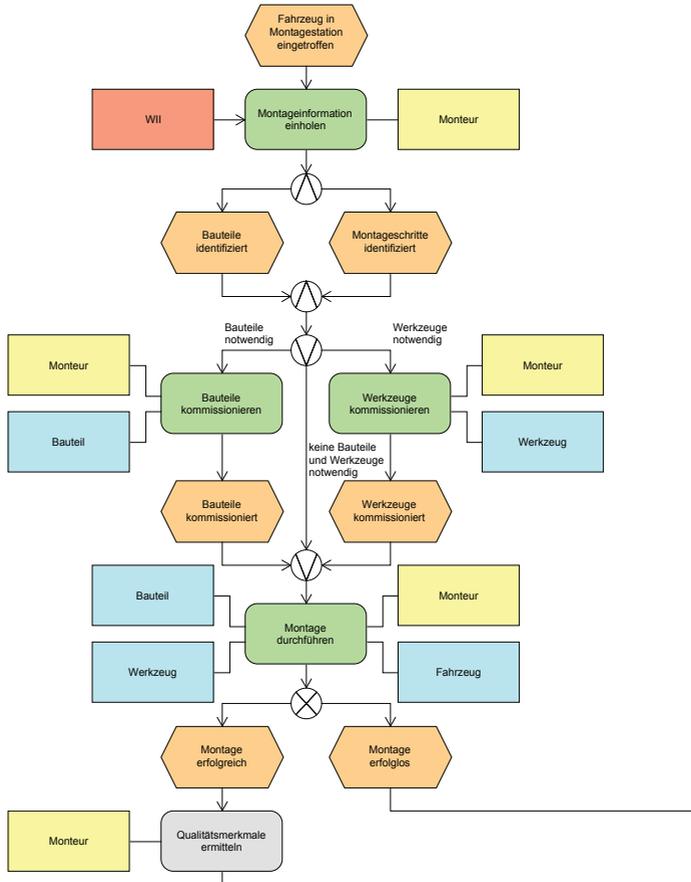
Produktionsprozess durchführen (2/3)



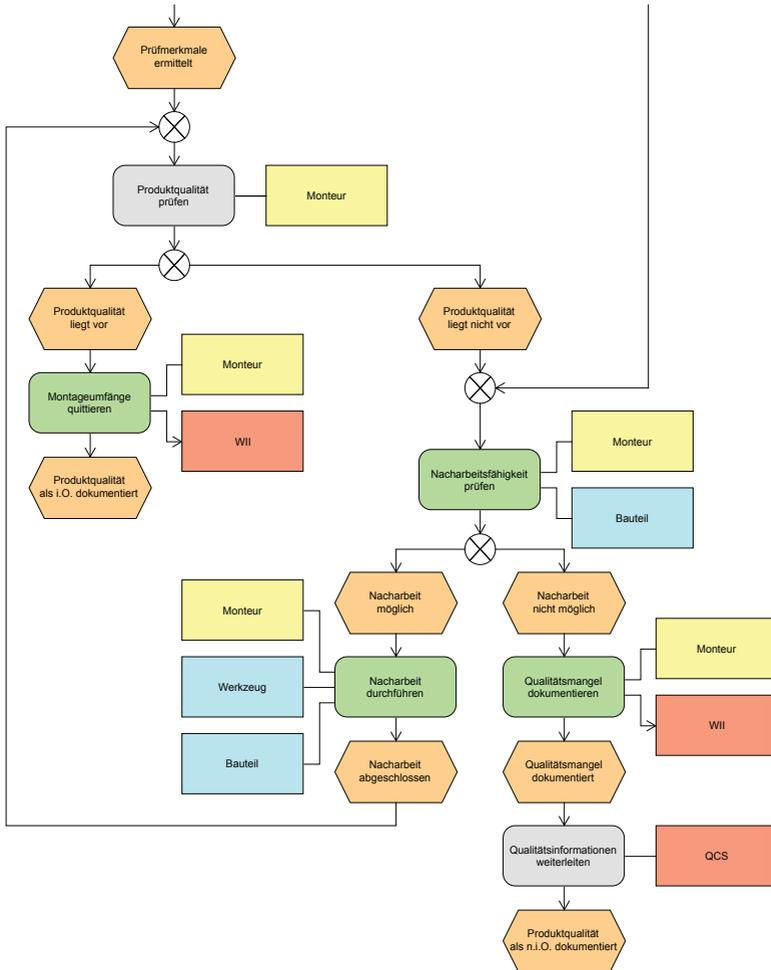
Produktionsprozess durchführen (3/3)



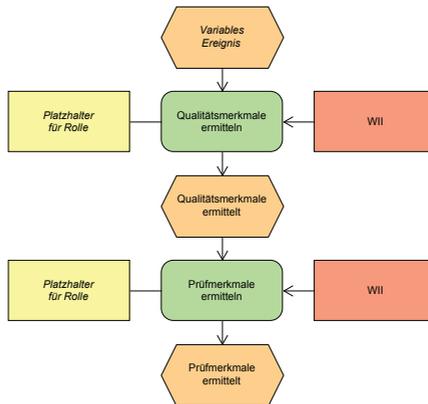
Montageprozess durchführen (1/2)



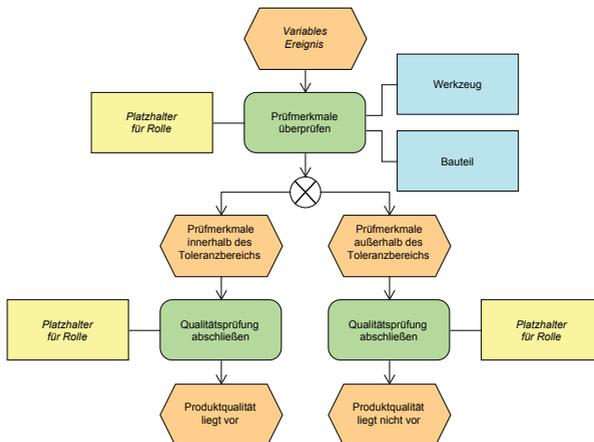
Montageprozess durchführen (2/2)



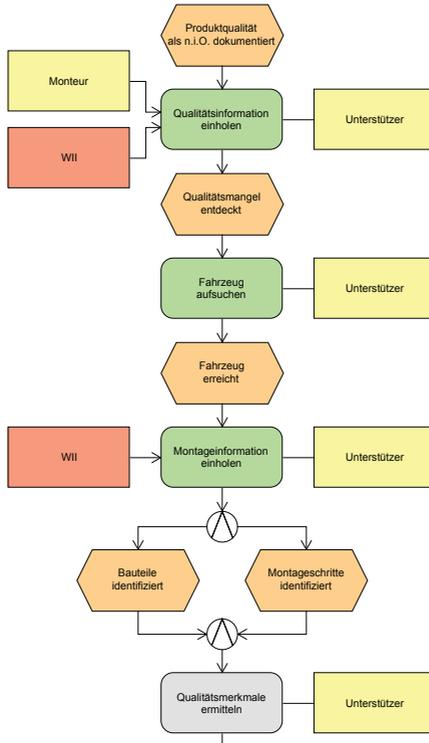
Qualitätsmerkmale ermitteln



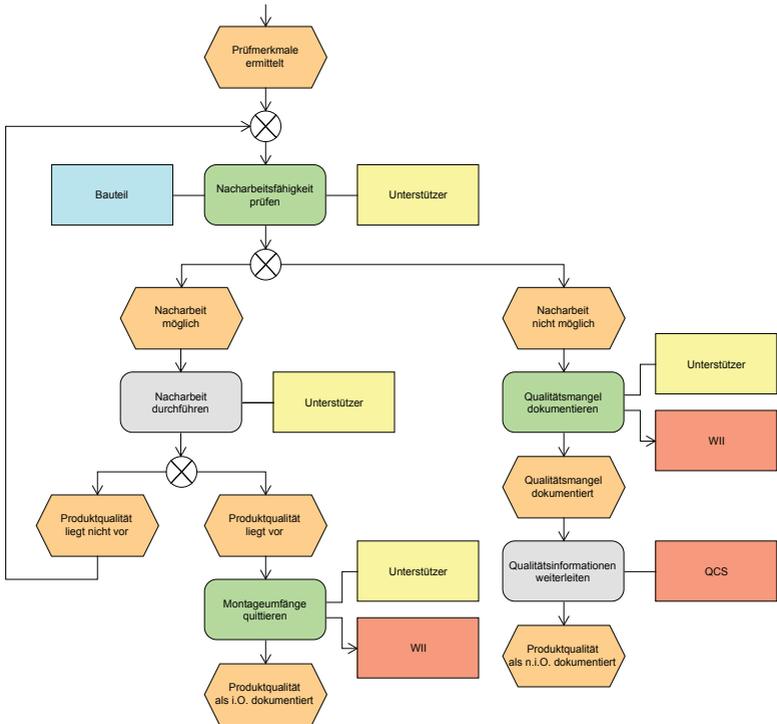
Produktqualität prüfen



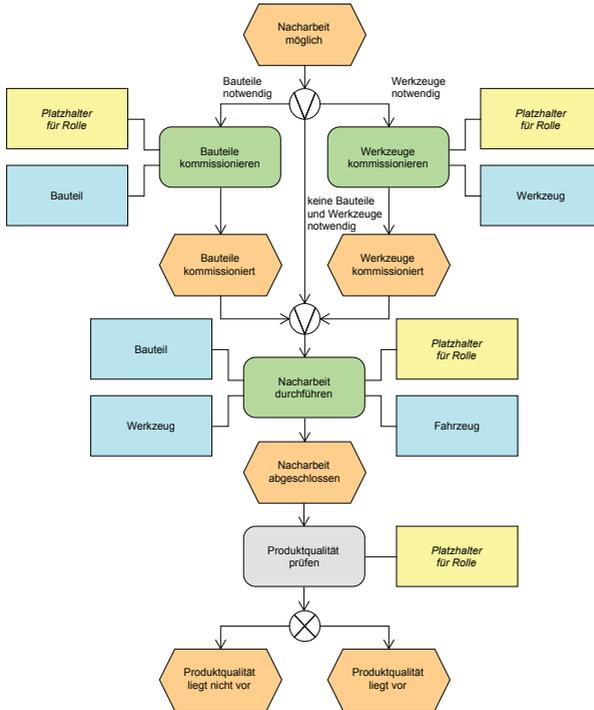
Unterstützungsprozess durchführen (1/2)



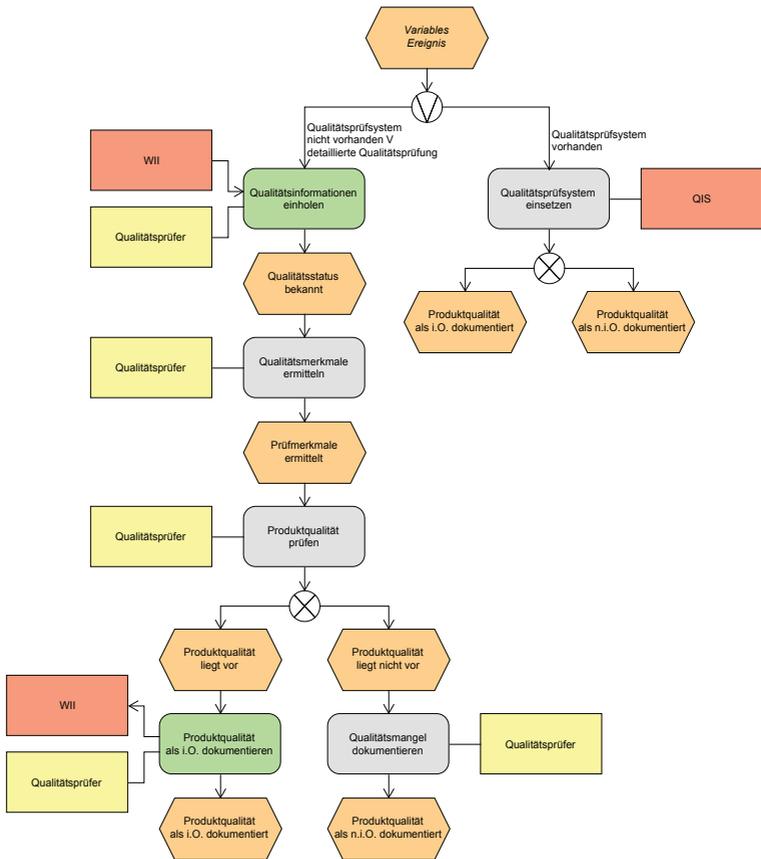
Unterstützungsprozess durchführen (2/2)



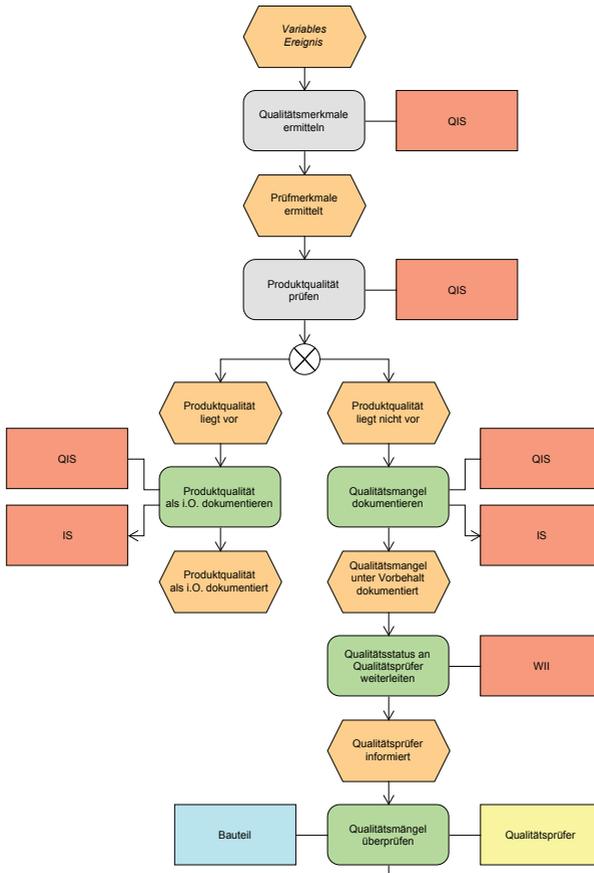
Nacharbeit durchführen



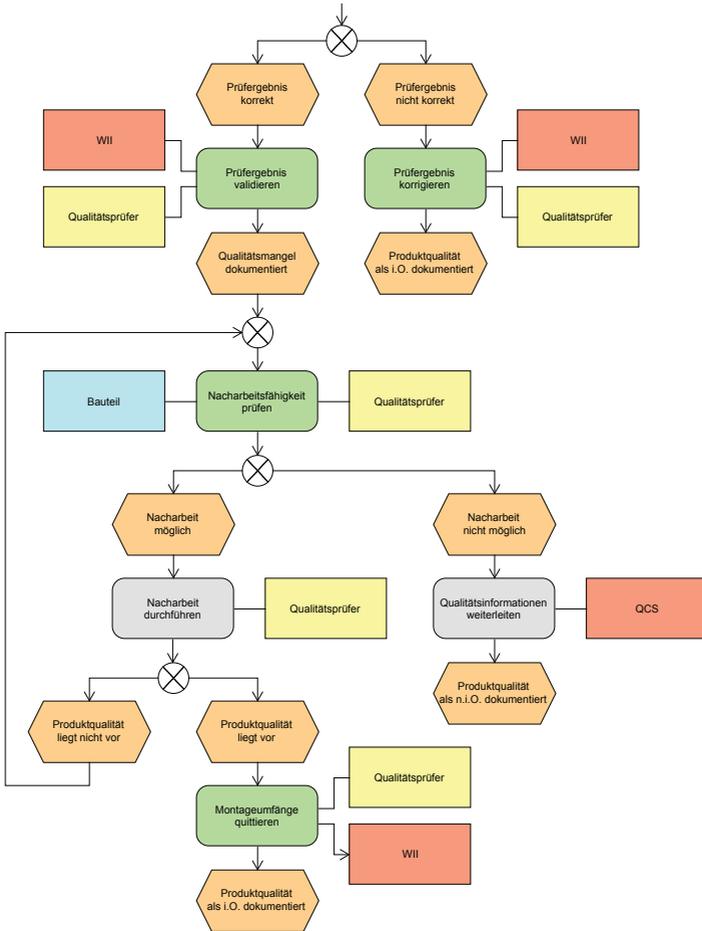
Qualitätsprüfprozess durchführen



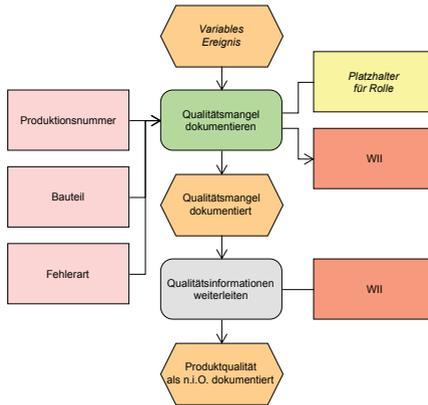
Qualitätsprüfsystem einsetzen (1/2)



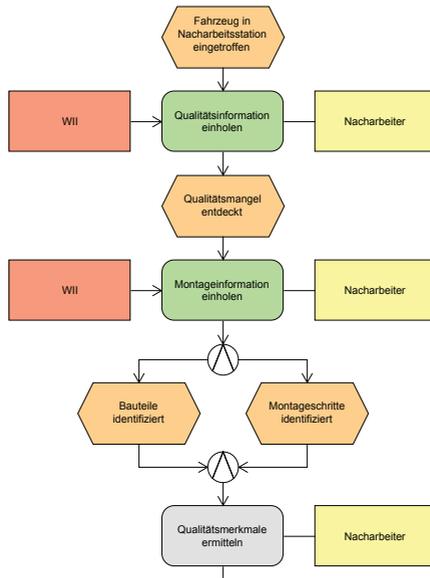
Qualitätsprüfsystem einsetzen (2/2)



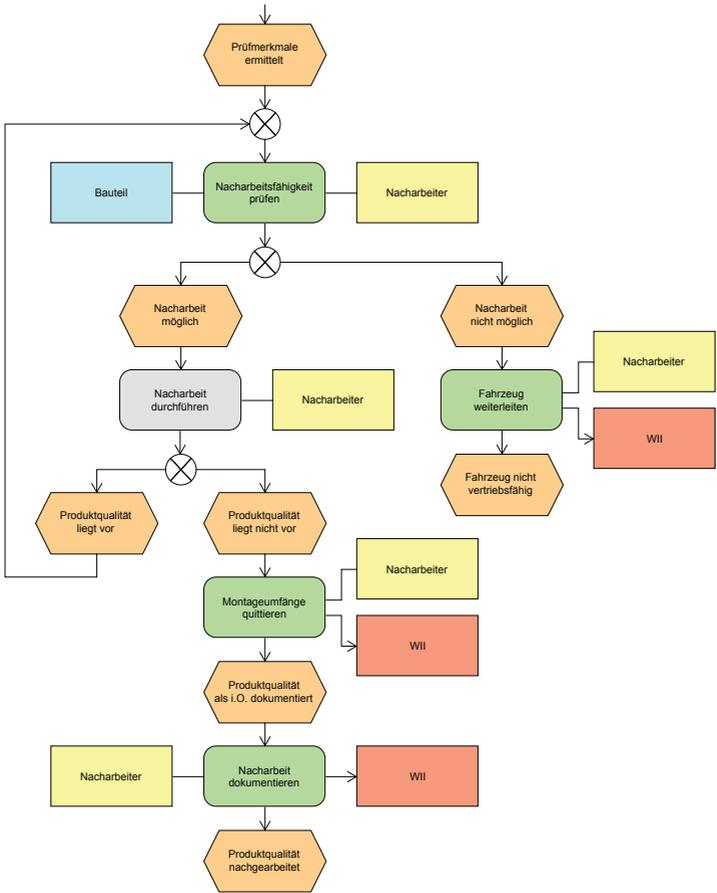
Qualitätsmangel dokumentieren



Nacharbeitsprozess durchführen (1/2)



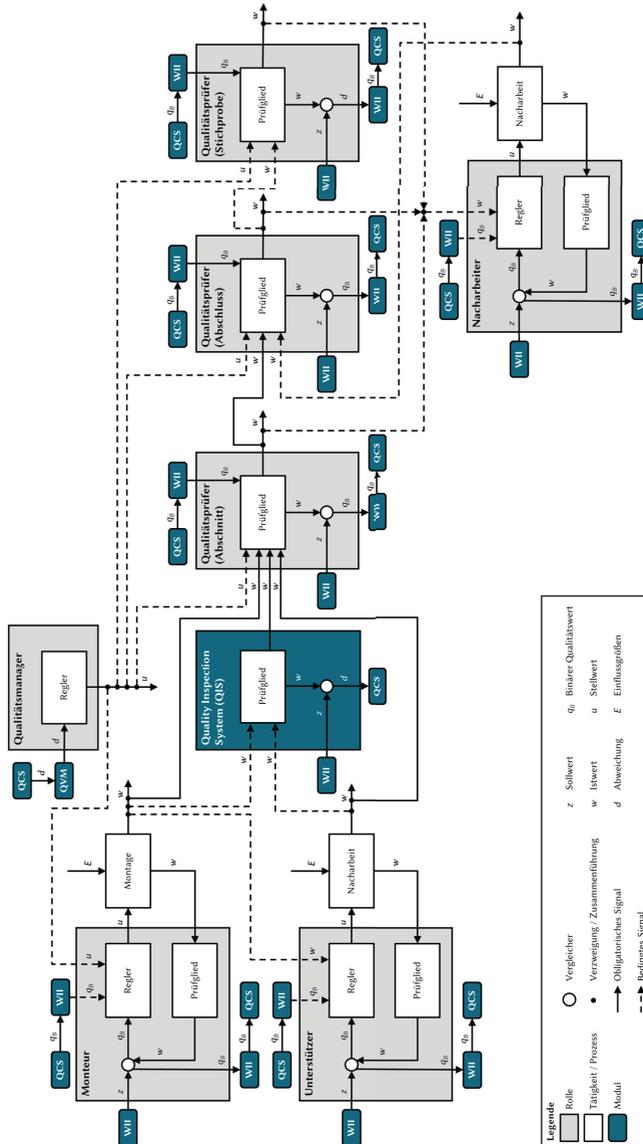
Nacharbeitsprozess durchführen (2/2)



Qualitätsinformationen weiterleiten

Dieser Subprozess wird über die Entscheidungslogik in Anhang M dargestellt.

N Blockschaltbild zum Konzept



O Technische Ausstattung zum WII

Fahrzeugortung in der Montagelinie

Die Basis für eine automatisierte Bereitstellung fahrzeugbezogener Informationen für den Nutzer stellt das Wissen über den Fahrzeugstandort innerhalb der Montagelinie dar. Es muss systemseitig bekannt sein, welches Fahrzeug sich in welcher Montagestation befindet, um dem Monteur fahrzeugspezifische Informationen anzeigen zu können. Eine Zuordnung der Fahrzeuge zu den einzelnen Montagestationen ist bereits über die Fördertechnik des Montagebandes ermittelbar. Jedoch ist für eine automatisierte Informationsbereitstellung ohne manuelle Selektion der Montageinformationen aus dem System eine informationstechnische Kopplung der Endgeräte mit den Fahrzeugen notwendig. Ebenso stellt die Kopplung von Werkzeugen (z. B. Schraubwerkzeugen zur automatisierten Parametrierung des Drehmoments einzelner Verschraubungen) mit dem Fahrzeug bzw. mit einzelnen Bereiche des Fahrzeuges eine wichtige Voraussetzung für einen Montageprozess mit reduzierten Rüstzeiten und automatisierten Informationsflüssen dar.

Diese technische Anforderung wird im WII über ein Ortungssystem realisiert. Die Endgeräte und Werkzeuge sowie Montagestationen und Fahrzeuge werden durch das Ortungssystem mit aktiven Ortungs-Tags unter Anwendung von Ultrabreitband-Funksignalen (UWB) ausgerüstet. Durch eine UWB-Kopplung werden dem Mitarbeiter die notwendigen Montageinformationen automatisiert auf seinem Endgerät angezeigt. Die automatisierte Kopplung garantiert eine hohe Koinzidenz zwischen Montageinformationen und Objekten und schafft die Basis zum richtigen und qualitätsfördernden Verbau.

Identifikation relevanter Bauteile

Ein erhöhtes Fehlerpotenzial im Montageprozess stellen verbaute Bauteile mit fehlender Koinzidenz dar. Aufgrund der hohen Varianz und analogen

Visualisierung durch Montageplakate besteht das Risiko, dass falsche Bauteile aus den Materialzonen abgegriffen und verbaut werden. Die Materialzone, die sich als Zwischenlager der zu montierenden Bauteile direkt neben dem Montageband befindet, wird dazu mit einer Lichtanlage ausgestattet, die den Monteur über abzugreifende und zu verbauende Bauteile informiert. Dazu wird der technische Ansatz nach Pick-by-Light (auch Pick-to-Light oder P2L genannt) verwendet (vgl. [GUO14; DEV15; BÄC16]). Beim Einlauf eines Fahrzeugs in die Montagestation visualisiert die Lichtanlage alle relevanten Fächer in Kombination mit der erforderlichen Anzahl der zu entnehmenden Bauteile für dieses Fahrzeugs.

Dies stellt sicher, dass der Monteur die korrekten Bauteile aus der Materialzone entnimmt und ermöglicht so einen einfachen Abgriff ohne komplexen Teile- und Fachnummernabgleich. Über eine Lichtschranke wird zudem die korrekte Entnahme sichergestellt, während bei einem Falschabgriff eine visuelle Rückmeldung an den Monteur erfolgt. Die Bauteilkoinzidenz und der Qualitätsverbau können somit gewährleistet werden. Lediglich die Anzahl der entnommenen Bauteile kann, insbesondere bei Kleinteilen und Massenwaren (z. B. Schrauben, Stopfen, etc.), nicht gewährleistet werden.

Authentifizierung von Nutzern

Damit ein Monteur die notwendigen Montageinformationen abrufen und mit dem IS interagieren kann, ist eine Authentifizierung notwendig. Da jeder Monteur mit Werksausweisen¹⁶ ausgestattet ist, ergibt sich die logische Schlussfolgerung, den im Ausweis vorhandenen Chip-Datensatz über einen Kartenleser am Tablet bzw. Bildschirm für die Authentifizierung zu nutzen. Sobald ein Monteur bei Schichtbeginn oder Arbeitsplatzrotation eine Montagestation betritt, muss er zunächst seinen Werksausweis in den Kartenleser platzieren, der seine Daten auf Berechtigung hin überprüft. Bei Berechtigung wird der Monteur freigeschaltet und kann mit dem System an der Montagestation interagieren. Gleichzeitig ist der Datensatz des Monteurs im

¹⁶ Werksausweise sind i. d. R. Chipkarten mit integriertem Schaltkreis und Speicherlogik.

IS hinterlegt, sodass dieser Montageeinhalte quittieren und Nacharbeitsmeldungen versenden kann. Dies fördert eine eindeutige Zuordnung des Monteurs zum Verbauumfang eines Fahrzeugs. Beim Verlassen der Montagestation entnimmt der Monteur seinen Werksausweis, wodurch sich das WII für diese Montagestation sperrt. Dies verhindert eine unberechtigte Interaktion durch Dritte mit dem System und sichert das Qualitätskriterium der Datensicherheit nach ISO/IEC 25030 [NOR07].

P Anwendungsbeispiele des QVM

Tabelle P.1: Isolierte Betrachtung (Produktionsqualität)

| Produktionsqualität | | | |
|-----------------------|-------------|------------------|-----------------------------|
| Isolierte Betrachtung | | | |
| o_k | \vec{v} | λ | β |
| Produktionswerk | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagesystem | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montageabschnitt | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagemeisterei | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagestation | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Qualitätstor | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Produktionswerk | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagesystem | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montageabschnitt | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagemeisterei | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagestation | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Qualitätstor | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |

Tabelle P.2: Organisationsbezogene Betrachtung (Produktionsqualität)

| Produktionsqualität | | | |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|
| Organisationsbezogene Betrachtung | | | |
| o_k | \vec{v} | λ | β |
| Produktionswerk | Montagesystem | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagesystem | Montageabschnitt | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montageabschnitt | Montagemeisterei | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagemeisterei | Montagestation | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagemeisterei | Qualitätstor | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagestation | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Qualitätstor | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Produktionswerk | Montagesystem | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagesystem | Montageabschnitt | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montageabschnitt | Montagemeisterei | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagemeisterei | Montagestation | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagemeisterei | Qualitätstor | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagestation | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Qualitätstor | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |

Tabelle P.3: Isolierte Betrachtung (Produktqualität)

| Produktqualität | | | |
|-----------------------|-------------|---|-----------------------------|
| Isolierte Betrachtung | | | |
| O_k | \vec{v} | λ | β |
| Baureihe | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Fahrzeug | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Baugruppe | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Baureihe | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | individuell |
| Fahrzeug | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | individuell |
| Baugruppe | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | individuell |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | individuell |
| Fahrzeug | $e_{k,j,i}$ | $\frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Baugruppe | $e_{k,j,i}$ | $\frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Fahrzeug | $e_{k,j,i}$ | $\frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | individuell |
| Baugruppe | $e_{k,j,i}$ | $\frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | individuell |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | individuell |
| Baureihe | $e_{k,j,i}$ | $qQ(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Fahrzeug | $e_{k,j,i}$ | $qQ(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Baugruppe | $e_{k,j,i}$ | $qQ(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $qQ(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Baureihe | $e_{k,j,i}$ | $qQ(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Fahrzeug | $e_{k,j,i}$ | $qQ(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Baugruppe | $e_{k,j,i}$ | $qQ(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $qQ(e_{k,j,i})$ | individuell |

Tabelle P.4: Objektbezogene Betrachtung (Produktqualität)

| Produktqualität | | | |
|-----------------------------------|-------------|---|---|
| Objektbezogene Betrachtung | | | |
| O_k | \vec{v} | λ | β |
| Fahrzeug | Baugruppe | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Baugruppe | Bauteil | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Fahrzeug | Baugruppe | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Baugruppe | Bauteil | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | individuell |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | individuell |
| Fahrzeug | Baugruppe | $\frac{F(m_{k,j})}{F(o_k)}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |
| Baugruppe | Bauteil | $\frac{F(m_{k,j})}{F(o_k)}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{F(m_{k,j})}{F(o_k)}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{w(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{\bar{w}(e_{k,j,i})}{z(e_{k,j,i})}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |

Tabelle P.5: Organisationsbezogene Betrachtung (Produktqualität)

| Produktqualität | | | |
|--|------------------|-----------------------------|---|
| Organisationsbezogene Betrachtung | | | |
| o_k | \vec{v} | λ | β |
| Produktionswerk | Montagesystem | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagesystem | Montageabschnitt | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montageabschnitt | Montagemeisterei | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagemeisterei | Montagestation | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Montagestation | Bauteil | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | $\frac{360^\circ}{\max(i)}$ |
| Produktionswerk | Montagesystem | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagesystem | Montageabschnitt | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montageabschnitt | Montagemeisterei | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagemeisterei | Montagestation | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Montagestation | Bauteil | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $q_Q(e_{k,j,i})$ | individuell |
| Produktionswerk | Montagesystem | $\frac{F(m_{k,j})}{F(o_k)}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |
| Montagesystem | Montageabschnitt | $\frac{F(m_{k,j})}{F(o_k)}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |
| Montageabschnitt | Montagemeisterei | $\frac{F(m_{k,j})}{F(o_k)}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |
| Montagemeisterei | Montagestation | $\frac{F(m_{k,j})}{F(o_k)}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |
| Montagestation | Bauteil | $\frac{F(m_{k,j})}{F(o_k)}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |
| Bauteil | $e_{k,j,i}$ | $\frac{F(m_{k,j})}{F(o_k)}$ | $\frac{C_r(m_{k,j})}{C_r(o_k)} \cdot 360^\circ$ |

Q Datenbasis zur Evaluation des QBS

Tabelle Q.1: Datenbasis zum Montagesystem (Obligatorische Qualitätsprüfung)

| Jahr | Monat | <i>n</i> | GAL | <i>f</i> | <i>f</i> /100 | <i>r</i> | <i>r</i> /100 |
|------|-----------|----------|-------|----------|---------------|----------|---------------|
| 2015 | Juli | 21.885 | 74,67 | 22.260 | 101,7135 | 17.174 | 78,4738 |
| | August | 21.360 | 75,63 | 33.640 | 157,4906 | 16.798 | 78,6423 |
| | September | 22.321 | 73,68 | 37.610 | 168,4960 | 18.043 | 80,8342 |
| | Oktober | 22.243 | 76,43 | 37.646 | 169,2488 | 16.891 | 75,9385 |
| | November | 22.597 | 80,31 | 38.702 | 171,2705 | 16.704 | 73,9213 |
| | Dezember | 17.486 | 82,01 | 28.802 | 164,7146 | 11.463 | 65,5553 |
| 2016 | Januar | 22.519 | 80,73 | 37.776 | 167,7517 | 15.409 | 68,4267 |
| | Februar | 23.853 | 81,41 | 36.434 | 152,7439 | 16.027 | 67,1907 |
| | März | 22.886 | 80,76 | 40.458 | 176,7806 | 15.559 | 67,9848 |
| | April | 24.331 | 80,28 | 43.269 | 177,8349 | 17.019 | 69,9478 |
| | Mai | 22.549 | 81,7 | 37.738 | 167,36 | 15.224 | 67,5152 |
| | Juni | 24.903 | 77,37 | 48.761 | 195,8037 | 17.566 | 70,5377 |
| | Juli | 24.703 | 78,46 | 48.198 | 195,1099 | 16.694 | 67,5788 |
| | August | 26.121 | 81,93 | 44.906 | 171,9153 | 16.371 | 62,6737 |
| | September | 24.658 | 81,69 | 41.610 | 168,7485 | 15.338 | 62,2029 |
| | Oktober | 23.674 | 83,33 | 37.842 | 159,8462 | 13.377 | 56,5050 |
| | November | 25.302 | 82,09 | 37.385 | 147,7551 | 14.400 | 56,9125 |
| | Dezember | 18.797 | 80,23 | 28.349 | 150,8166 | 11.159 | 59,3659 |
| 2017 | Januar | 24.937 | 80,5 | 37.613 | 150,8321 | 14.624 | 58,6438 |
| | Februar | 23.028 | 82,8 | 32.626 | 141,6797 | 12.836 | 55,7408 |
| | März | 25.664 | 84,09 | 37.719 | 146,9724 | 14.297 | 55,7084 |
| | April | 21.156 | 81,85 | 34.766 | 164,3316 | 12.710 | 60,0775 |
| | Mai | 22.755 | 77,83 | 39.256 | 172,5159 | 14.242 | 62,5884 |
| | Juni | 24.255 | 78,08 | 46.792 | 192,9169 | 16.191 | 66,7532 |
| | Juli | 25.112 | 80,87 | 56.353 | 224,4067 | 16.014 | 63,7703 |
| | August | 26.542 | 82,46 | 51.568 | 194,2883 | 15.315 | 57,7010 |
| | September | 24.159 | 81,67 | 50.171 | 207,67 | 13.862 | 57,3782 |
| | Oktober | 23.409 | 82,76 | 49.267 | 210,4618 | 12.571 | 53,7016 |
| | November | 25.370 | 83,33 | 51.269 | 202,0851 | 13.600 | 53,6066 |
| | Dezember | 18.556 | 81,34 | 37.316 | 201,0994 | 10.768 | 58,0297 |
| 2018 | Januar | 24.778 | 82,68 | 49.793 | 200,9565 | 14.491 | 58,4833 |
| | Februar | 21.529 | 78,12 | 46.553 | 216,2339 | 15.007 | 69,7060 |
| | März | 23.686 | 79,63 | 56.907 | 240,2558 | 14.797 | 62,4715 |
| | April | 23.478 | 81,69 | 47.566 | 202,5982 | 13.521 | 57,5901 |
| | Mai | 22.237 | 78,84 | 48.902 | 219,9128 | 13.452 | 60,4938 |

Tabelle Q.2: Datenbasis zum Montagesystem (Optionale Qualitätsprüfung)

| Jahr | Monat | n | f | $f/100$ | r | $r/100$ |
|------|-----------|-------|-------|---------|-----|---------|
| 2015 | Juli | 977 | 1.011 | 103,48 | 545 | 55,783 |
| | August | 944 | 889 | 94,1737 | 444 | 47,0339 |
| | September | 1.092 | 993 | 90,9341 | 492 | 45,0549 |
| | Oktober | 1.014 | 853 | 84,1223 | 376 | 37,0809 |
| | November | 1.000 | 787 | 78,7 | 408 | 40,8 |
| | Dezember | 684 | 533 | 77,924 | 311 | 45,4678 |
| 2016 | Januar | 1.004 | 667 | 66,4343 | 304 | 30,2789 |
| | Februar | 952 | 685 | 71,9538 | 338 | 35,5042 |
| | März | 983 | 638 | 64,9034 | 356 | 36,2157 |
| | April | 982 | 885 | 90,1222 | 375 | 38,1874 |
| | Mai | 917 | 830 | 90,5125 | 361 | 39,3675 |
| | Juni | 931 | 831 | 89,2589 | 445 | 47,7981 |
| | Juli | 794 | 775 | 97,6071 | 321 | 40,4282 |
| | August | 1.109 | 893 | 80,523 | 340 | 30,6583 |
| | September | 947 | 677 | 71,4889 | 275 | 29,0391 |
| | Oktober | 842 | 641 | 76,1283 | 299 | 35,5107 |
| | November | 918 | 730 | 79,5207 | 350 | 38,1264 |
| | Dezember | 343 | 250 | 72,8863 | 145 | 42,2741 |
| 2017 | Januar | 1.032 | 652 | 63,1783 | 314 | 30,4264 |
| | Februar | 831 | 501 | 60,2888 | 244 | 29,3622 |
| | März | 919 | 578 | 62,8945 | 297 | 32,3177 |
| | April | 605 | 592 | 97,8512 | 256 | 42,314 |
| | Mai | 931 | 764 | 82,0623 | 320 | 34,3716 |
| | Juni | 811 | 635 | 78,2984 | 260 | 32,0592 |
| | Juli | 1.030 | 877 | 85,1456 | 298 | 28,932 |
| | August | 783 | 582 | 74,3295 | 267 | 34,0996 |
| | September | 592 | 585 | 98,8176 | 228 | 38,5135 |
| | Oktober | 765 | 631 | 82,4837 | 282 | 36,8627 |
| | November | 906 | 791 | 87,3068 | 344 | 37,9691 |
| | Dezember | 500 | 423 | 84,6 | 166 | 33,2 |
| 2018 | Januar | 847 | 760 | 89,7285 | 316 | 37,3081 |
| | Februar | 788 | 593 | 75,2538 | 245 | 31,0914 |
| | März | 1.016 | 814 | 80,1181 | 352 | 34,6457 |
| | April | 1.033 | 775 | 75,0242 | 331 | 32,0426 |
| | Mai | 900 | 698 | 77,5556 | 267 | 29,6667 |

R Datenbasis zur Evaluation des QFS-2c

Tabelle R.1: Datenbasis zum Montageband

| Jahr | Monat | <i>n</i> | GAL | PRÜ |
|-------------|--------------|-----------------|------------|------------|
| 2017 | April | 21.156 | 81,68 | 1 |
| | Mai | 22.755 | 82,32 | 1 |
| | Juni | 24.255 | 81,47 | 1 |
| | Juli | 25.112 | 80,22 | 1 |
| | August | 26.542 | 79,85 | 1 |
| | September | 24.159 | 81,1 | 1 |
| | Oktober | 23.409 | 80,69 | 1 |
| | November | 25.370 | 82,24 | 1 |
| | Dezember | 18.556 | 83,74 | 1 |
| | 2018 | Januar | 24.778 | 82,9 |
| Februar | | 21.529 | 81,65 | 1 |
| März | | 23.686 | 82,12 | 1 |
| April | | 23.478 | 83,63 | 1 |
| Mai | | 22.237 | 85,8 | 0 |
| Juni | | 23.154 | 85,54 | 0 |
| Juli | | 22.981 | 85,12 | 0 |

Tabelle R.2: Datenbasis zur Hochzeit

| Jahr | Monat | <i>f</i> | <i>f</i>/100 | STD |
|-------------|--------------|-----------------|---------------------|------------|
| 2017 | April | 2.354 | 11,13 | 409 |
| | Mai | 1.793 | 7,88 | 471 |
| | Juni | 2.185 | 9,01 | 538 |
| | Juli | 2.475 | 9,86 | 556 |
| | August | 2.566 | 9,67 | 367 |
| | September | 2.144 | 8,88 | 417 |
| | Oktober | 2.486 | 10,62 | 344 |
| | November | 1.814 | 7,15 | 365 |
| | Dezember | 1.682 | 9,06 | 444 |
| 2018 | Januar | 1.869 | 7,54 | 346 |
| | Februar | 2.196 | 10,2 | 455 |
| | März | 1.939 | 8,19 | 420 |
| | April | 1.623 | 6,91 | 245 |
| | Mai | 1.486 | 6,68 | 231 |
| | Juni | 1.528 | 6,6 | 253 |
| | Juli | 1.560 | 6,79 | 201 |

S Thesen und Auswertung zur Evaluation des WII

Tabelle S.1: Thesen zur Evaluation des WII

| | |
|-----------|---|
| 1. | Thesen zur allgemeinen Darstellung |
| 1a. | Die Inhalte sind für den erforderlichen Einsatz lesbar dargestellt. |
| 1b. | Die Inhalte sind richtig platziert. |
| 2. | Thesen zu den allgemeinen Funktionen |
| 2a. | Die Bedienung des Systems ist einfach. |
| 2b. | Das System verursacht keinen zeitlichen Mehraufwand. |
| 2c. | Das System ermöglicht eine Zeiteinsparung. |
| 2d. | Die Zuverlässigkeit des Systems ist hoch. |
| 2e. | Die Reaktionsfähigkeit des Systems ist hoch. |
| 3. | Thesen zur technischen Ausstattung |
| 3a. | Die Endgeräte sind für den erforderlichen Einsatz geeignet. |
| 3b. | Die Endgeräte sind korrekt platziert. |
| 3c. | Die Robustheit der Endgeräte ist hoch. |
| 4. | Thesen zu den montagebezogenen Bausteinen |
| 4a. | Das System zeigt alle erforderlichen Informationen für den Montageprozess an. |
| 4b. | Alle dargestellten Informationen werden für den Montageprozess benötigt. |
| 4c. | Die Informationen sind übersichtlich aufbereitet. |
| 4d. | Die Basisinformationen zum Fahrzeug (Kopfzeile) sind eine hilfreiche Unterstützung. |
| 4e. | Die bildhafte Darstellung der Bauteile ist eine hilfreiche Unterstützung. |
| 4f. | Die verwendeten Symbole unterhalb der Bilder sind selbsterklärend. |
| 4g. | Der Sonderausstattungshinweis (Fußzeile) ist eine hilfreiche Unterstützung. |
| 4h. | Die digitale Darstellung ist „besser“ als das papierbasierte Montageplakat. |
| 4i. | Die Montageanleitung ist eine hilfreiche Unterstützung. |
| 4j. | Die Montageanleitung ist verständlich aufbereitet. |
| 4k. | In Sonderfällen würde ich die Montageanleitung nutzen. |
| 4l. | Die digitale Montageanleitung ist „besser“ als die papierbasierte Montageanleitung und Hitlisten. |
| 4m. | Die Stempelfunktion ist verständlich. |
| 4n. | Die Erinnerungsfunktion zum Stempeln ist hilfreich. |
| 4o. | Die digitale Stempelfunktion ist „besser“ als die papierbasierte Wagenbegleitkarte. |

Fortsetzung der Tabelle S.1 auf der nächsten Seite.

| 5. Thesen zu den qualitätsbezogenen Bausteinen | |
|---|---|
| 5a. | Die Darstellung der Qualitätsrückmeldung ist verständlich. |
| 5b. | Die Anzeige zum Fehleraufkommen nehme ich aktiv wahr. |
| 5c. | Die Rückmeldung zum Fehlerschlupf nehme ich aktiv wahr. |
| 5d. | Die digitale Qualitätsrückmeldung ist „besser“ als die papierbasierten Qualitätsberichte. |
| 5e. | Die Funktion zur Nacharbeitsmeldung ist einfach. |
| 5f. | Die digitale Meldung von Nacharbeiten ist „besser“ als das Andon-System. |
| 6. Thesen zu den nacharbeitsbezogenen Bausteinen | |
| 6a. | Das System zeigt alle erforderlichen Informationen für den Unterstützungsprozess an. |
| 6b. | Alle dargestellten Informationen werden für den Unterstützungsprozess benötigt. |
| 6c. | Die Priorisierung von offenen Nacharbeiten ist eine hilfreiche Unterstützung. |
| 6d. | Die Weiterleitung von offenen Nacharbeiten ist eine hilfreiche Unterstützung. |
| 6e. | Die digitale Darstellung der Nacharbeitsmeldung ist „besser“ als das Andon-System. |

Tabelle S.2: Auswertung zur Evaluation des WII

| | Expertenzahl | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | X | σ |
|---|-----------------------|----|---|---|---|---|---|----------|
| 1. Thesen zur allgemeinen Darstellung | | | | | | | | |
| 1a. | 15 (alle Rollen) | 12 | 3 | – | – | – | – | 1,2 |
| 1b. | 15 (alle Rollen) | 15 | – | – | – | – | – | 1 |
| 2. Thesen zu den allgemeinen Funktionen | | | | | | | | |
| 2a. | 15 (alle Rollen) | 15 | – | – | – | – | – | 1 |
| 2b. | 15 (alle Rollen) | 10 | 3 | 2 | – | – | – | 1,47 |
| 2c. | 15 (alle Rollen) | 7 | 4 | 3 | 1 | – | – | 1,87 |
| 2d. | 15 (alle Rollen) | 11 | – | 1 | – | – | 3 | 1,17 |
| 2e. | 15 (alle Rollen) | 12 | – | – | – | – | 3 | 1 |
| 3. Thesen zur technischen Ausstattung | | | | | | | | |
| 3a. | 15 (alle Rollen) | 9 | 3 | 2 | – | – | 1 | 1,5 |
| 3b. | 15 (alle Rollen) | 15 | – | – | – | – | – | 1 |
| 3c. | 15 (alle Rollen) | 6 | 4 | 1 | 2 | – | 2 | 1,92 |
| 4. Thesen zu den montagebezogenen Bausteinen | | | | | | | | |
| 4a. | 6 (MO ¹⁷) | 5 | 1 | – | – | – | – | 1,17 |
| 4b. | 6 (MO) | 4 | 1 | 1 | – | – | – | 1,5 |
| 4c. | 6 (MO) | 6 | – | – | – | – | – | 1 |
| 4d. | 6 (MO) | 5 | – | 1 | – | – | – | 1,33 |
| 4e. | 6 (MO) | 1 | 2 | 1 | – | 2 | – | 3 |
| 4f. | 6 (MO) | 5 | – | – | 1 | – | – | 1,5 |
| 4g. | 6 (MO) | 6 | – | – | – | – | – | 1 |
| 4h. | 6 (MO) | 5 | – | 1 | – | – | – | 1,33 |
| 4i. | 6 (MO) | 3 | – | 3 | – | – | – | 2 |
| 4j. | 6 (MO) | 4 | 2 | – | – | – | – | 1,33 |
| 4k. | 6 (MO) | 4 | – | – | 2 | – | – | 2 |
| 4l. | 6 (MO) | 6 | – | – | – | – | – | 1 |
| 4m. | 6 (MO) | 6 | – | – | – | – | – | 1 |
| 4n. | 6 (MO) | 6 | – | – | – | – | – | 1 |
| 4o. | 6 (MO) | 6 | – | – | – | – | – | 1 |

Fortsetzung der Tabelle S.2 auf der nächsten Seite.

¹⁷ MO = Monteur.

| 5. Thesen zu den qualitätsbezogenen Bausteinen | | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|---|---|---|---|---|------|
| 5a. | 6 (MO) | – | 3 | 2 | – | – | 1 | 2,4 |
| 5b. | 6 (QP ¹⁸) | 4 | – | – | 2 | – | – | 2 |
| 5c. | 6 (QP) | 3 | 3 | – | – | – | – | 1,5 |
| 5d. | 12 (MO & QP) | 5 | 4 | 3 | – | – | – | 1,83 |
| 5e. | 6 (MO) | 4 | 2 | – | – | – | – | 1,33 |
| 5f. | 6 (MO) | 6 | – | – | – | – | – | 1 |
| 6. Thesen zu den nacharbeitsbezogenen Bausteinen | | | | | | | | |
| 6a. | 3 (US ¹⁹) | 3 | – | – | – | – | – | 1 |
| 6b. | 3 (US) | 2 | – | – | 1 | – | – | 2 |
| 6c. | 3 (US) | 3 | – | – | – | – | – | 1 |
| 6d. | 3 (US) | 3 | – | – | – | – | – | 1 |
| 6e. | 3 (US) | 3 | – | – | – | – | – | 1 |

¹⁸ QP = Qualitätsprüfer.

¹⁹ US = Unterstützer.

T Evaluation des QVM über die APQ

Die nachfolgenden Daten sind fiktiv für die Evaluation gewählt, jedoch praxisnah der Automobilindustrie angelehnt.

Geradeauslauf

Im Betrachtungszeitraum von einer Woche wurden 3.164 Fahrzeuge in der Montagehalle produziert. Von der Gesamtproduktion waren 2.783 Fahrzeuge frei von kritischen Qualitätsmängeln, an 381 Fahrzeuge konnten jedoch im Rahmen von Qualitätsprüfungen mindestens ein kritischer Qualitätsmangel festgestellt werden. Dies führt zu folgendem Geradeauslauf:

$$\text{Geradeauslauf} = \frac{2.783 \text{ Fzg.}}{3.164 \text{ Fzg.}} = 0,8796 \equiv 87,96\% \quad (\text{T.1})$$

Die Werte des Geradeauslaufs pro Schicht sind in Tabelle T.1 dargestellt. Diese umfassen lediglich eine Nachkommastelle.

Verfügbarkeit

Im Betrachtungszeitraum von einer Woche wurde montags bis samstags im Dreischicht-Betrieb gearbeitet. Es ergeben sich somit sechs Arbeitstage und 18 Arbeitsschichten. Eine Schicht umfasst acht Arbeitsstunden, allerdings müssen diese um die Pausenzeiten von 45 Minuten reduziert werden. Es ergibt sich eine Planbelegungszeit von 7,25 Stunden pro Schicht, in Summe folglich 130,5 Stunden. Durch die Reduktion der Ausfallzeit von 18,75 Stunden²⁰ von der gesamten Planbelegungszeit ergibt sich eine Hauptnutzungszeit von 111,75 Stunden. Über Formel 6.4 kann die Verfügbarkeit berechnet werden:

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{111,75 \text{ Std.}}{130,5 \text{ Std.}} = 0,8563 \equiv 85,63\% \quad (\text{T.2})$$

²⁰ Der Wert der Ausfallzeiten wurde auf 15 Minuten gerundet.

Tabelle T.1: Geradeauslauf pro Schicht

| Wochentag | Schicht | Fahrzeuge | i. O. | n. i. O. | Geradeauslauf |
|--------------|---------|--------------|--------------|------------|---------------|
| Sonntag | Nacht | 182 | 149 | 33 | 81,9% |
| Montag | Früh | 179 | 150 | 29 | 83,8% |
| | Spät | 174 | 144 | 30 | 82,8% |
| | Nacht | 180 | 158 | 22 | 87,8% |
| Dienstag | Früh | 178 | 155 | 23 | 87,1% |
| | Spät | 179 | 158 | 21 | 88,3% |
| | Nacht | 170 | 148 | 22 | 87,1% |
| Mittwoch | Früh | 173 | 153 | 20 | 88,4% |
| | Spät | 178 | 155 | 23 | 87,1% |
| | Nacht | 169 | 152 | 17 | 89,9% |
| Donnerstag | Früh | 168 | 150 | 18 | 89,3% |
| | Spät | 178 | 161 | 17 | 90,5% |
| | Nacht | 178 | 160 | 18 | 89,9% |
| Freitag | Früh | 177 | 160 | 17 | 90,4% |
| | Spät | 177 | 158 | 19 | 89,3% |
| | Nacht | 175 | 157 | 18 | 89,7% |
| Samstag | Früh | 169 | 151 | 18 | 89,4% |
| | Spät | 180 | 164 | 16 | 91,1% |
| Summe | | 3.164 | 2.783 | 381 | 87,96% |

Hours Per Vehicle

Die bezahlte Anwesenheitszeit lässt sich mit Hilfe der Planbelegungszeit und der Summe aller beteiligten Mitarbeiter in der Montagehalle bestimmen. Bei einer Anzahl von 922 Mitarbeitern kann der HPV für den Betrachtungszeitraum zunächst über Formel 6.5 berechnet werden:

$$\text{Absolute HPV} = \frac{130,5 \text{ Std.} \cdot 922 \text{ Mitarbeiter}}{3.164 \text{ Fzg.}} = 38,03 \text{ Std./Fzg.} \quad (\text{T.3})$$

Der Zielwert der HPV liegt bei 34 Stunden pro Fahrzeug. Der relative Zielerreichungsgrad zu den HPV wird abschließend über Formel 6.6 ermittelt:

$$\text{Relative HPV} = \frac{34 \text{ Std./Fzg.}}{38,03 \text{ Std./Fzg.}} = 0,894 \equiv 89,4\% \quad (\text{T.4})$$

Energieverbrauch

Der Energieverbrauch einer Montagehalle hängt von mehreren Einflussfaktoren ab (z. B. der Jahreszeit) und wird folglich aus unterschiedlichen Bestandteilen zusammengesetzt. Tabelle T.2 zeigt die Energieverbräuche der Montagehalle im Betrachtungszeitraum (Frühjahr) auf.

Tabelle T.2: Energieverbrauch

| Energieart | Monatsverbrauch | Wochenverbrauch |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| Stadtwasser | 554 m ³ | 138,5 m ³ |
| Brauchwasser | 591 m ³ | 147,75 m ³ |
| Vollentsalztes Wasser | 787 m ³ | 196,75 m ³ |
| Wärme | 597 MWh | 149,25 MWh |
| Strom | 793 MWh | 198,25 MWh |
| Industriewasser | 17 m ³ | 4,25 m ³ |
| Abwasser | 1.799 m ³ | 449,75 m ³ |
| Druckluft (6 bar) | 134.157 m ³ | 33.539,25 m ³ |
| Druckluft (10 bar) | 2 m ³ | 0,5 m ³ |
| Kaltwasser | 15.294 m ³ | 3.823,5 m ³ |

Zur Vereinfachung der Evaluation entspricht der Istwert dem Sollwert. Somit kann der Energieverbrauch nach Formel 6.7 bestimmt werden:

$$\text{Energieverbrauch} = 1 \equiv 100\% \quad (\text{T.5})$$

Abfallproduktion

Analog zum Energieverbrauch wird für die Kennzahl der Abfallproduktion ebenfalls der Istwert dem Sollwert gleichgesetzt. Folglich kann über Formel 6.8 der Zielerreichungsgrad zur Abfallproduktion ermittelt werden:

$$\text{Abfallproduktion} = 1 \equiv 100\% \quad (\text{T.6})$$

Prüfsicherheit

Im Betrachtungszeitraum wurden 769 Fehler durch obligatorische Qualitätsprüfungen festgestellt (Nettofehler). Zusätzlich wurden weitere 155 Fehler (durchgeschlufte Fehler) durch optionale Qualitätsprüfungen identifiziert, welche bereits durch die obligatorischen Qualitätsprüfungen hätten entdeckt werden müssen. Somit ergibt sich über Formel 6.9 folgende Prüfsicherheit:

$$\begin{aligned}\text{Prüfsicherheit} &= \frac{769 \text{ Nettofehler}}{769 \text{ Nettofehler} + 155 \text{ weitere Fehler}} && \text{(T.7)} \\ &= \frac{769 \text{ Nettofehler}}{924 \text{ Bruttofehler}} = 0,8323 \equiv 83,23\%\end{aligned}$$

Maßnahmenerfolg

Im Betrachtungszeitraum wurden zum Wochenbeginn acht Qualitätsmaßnahmen eingeleitet. Dabei wurden sechs Qualitätsmaßnahmen zum Ende der Woche als erfolgreich und nachhaltig beendet. Der Maßnahmenerfolg kann nun über Formel 6.10 ermittelt werden:

$$\begin{aligned}\text{Maßnahmenerfolg} &= \frac{6 \text{ erfolgreiche Maßnahmen}}{8 \text{ eingeleitete Maßnahmen}} && \text{(T.8)} \\ &= 0,75 \equiv 75\%\end{aligned}$$

Qualitätskosten

Die Fehlervermeidungskosten ergeben sich aus Mitarbeiterschulungen, der Qualitätsplanung und Qualitätslenkung. Diese werden i. d. R. jährlich ausgewiesen, sodass die Fehlervermeidungskosten anteilig für den Betrachtungszeitraum ermitteln werden müssen. Die geplanten Fehlervermeidungskosten im Betrachtungszeitraum betragen 187.500 Euro²⁰. Die Prüfkosten lassen sich mithilfe der Planbelegungszeit und Anzahl der Prüfer sowie deren Stundensatz berechnen. Dabei sind weitere Prüfkosten (z. B. Instandhaltung und

Prüfmittel) anteilig im Stundensatz enthalten. Die Prüfkosten im Betrachtungszeitraum betragen 282.750 Euro²¹. Die Nacharbeitskosten setzen sich aus den zusätzlichen Materialkosten, der durchschnittlichen Nacharbeitszeit für ein fehlerhaftes Fahrzeug sowie dem Stundensatz eines Nacharbeiters zusammen. Bei 381 Fahrzeugen mit Nacharbeitsaufwendungen wurden Nacharbeitskosten von 61.250 Euro²¹ verursacht. Folgende Qualitätskosten können für den Betrachtungszeitraum über Formel 6.11 ermittelt werden:²²

$$\begin{aligned} \text{Qualitätskosten} &= \frac{187.500 \text{ Euro} + 282.750 \text{ Euro}}{187.500 \text{ Euro} + 282.750 \text{ Euro} + 61.250 \text{ Euro}} & (\text{T.9}) \\ &= 0,8848 \equiv 88,48\% \end{aligned}$$

Ermittlung des quantitativen Qualitätswertes der APQ

Der quantitative Qualitätswert APQ_Q lässt sich auf Basis der ermittelten Kennzahlen $q_Q(m_j)$ berechnen. Im Rahmen dieser Evaluation werden alle acht Qualitätsmerkmale m_j gleichgewichtet, sodass der Gewichtungsfaktor $\beta(m_j)$ bei allen Kennzahlen 45° beträgt. Mittels Formel 6.22 kann nun der quantitative Qualitätswert der APQ ermittelt werden:

$$APQ_Q = 1 - \sum_{j=1}^8 \frac{45^\circ}{360^\circ} \cdot |q_Q(m_j) - 1| \quad (\text{T.10})$$

Durch das Einsetzen der ermittelten Kennzahlen kann folgender quantitativer Wert zur montagespezifischen Produktionsqualität berechnet werden:

$$APQ_Q = 0,8885 \equiv 88,85\% \quad (\text{T.11})$$

²¹ Der Wert wurde auf 50 Euro gerundet.

²² Es wird angenommen, dass die Sollwerte z und Istwerte w sowohl für die Fehlerverhütungskosten C_f als auch für die Prüfkosten C_p identisch sind: $C_f^z = C_f^w$ und $C_p^z = C_p^w$.

U Evaluation des QVM über die Produktqualität

Werte der Betrachtungsebenen 1 - 4

Tabelle U.1: Werte der Betrachtungsebene 1 (Montagehalle)

| Montageabschnitt | Fehleranzahl (Anteil) | Fehlerkosten (Anteil) | $\beta(m_{1,j})$ | $A(w(m_{1,j}))$ |
|--------------------|-----------------------|------------------------|------------------|-----------------|
| Montageabschnitt 1 | 106 (11,47%) | 8.050 EUR (13,14%) | 47,304° | 0,046 |
| Montageabschnitt 2 | 274 (29,65%) | 11.600 EUR (18,94%) | 68,184° | 0,1662 |
| Montageabschnitt 3 | 368 (39,83%) | 19.150 EUR (31,27%) | 112,572° | 0,3313 |
| Montageabschnitt 4 | 152 (16,45%) | 15.800 EUR (25,8%) | 92,88° | 0,1192 |
| Montageabschnitt 5 | 24 (2,6%) | 6.650 EUR (10,86%) | 39,096° | 0,0087 |
| Summe | 924 (100%) | 61.250 EUR (100%) | 360° | 0,6714 |

Tabelle U.2: Werte der Betrachtungsebene 2 (Montageabschnitt 3)

| Montage-meisterei | Fehleranzahl (Anteil) | Fehlerkosten (Anteil) | $\beta(m_{2,j})$ | $A(w(m_{2,j}))$ |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Montage-meisterei 5 | 42 (11,41%) | 2.950 EUR (15,4%) | 55,44° | 0,0531 |
| Montage-meisterei 6 | 115 (31,25%) | 6.300 EUR (32,9%) | 118,44° | 0,2685 |
| Montage-meisterei 7 | 211 (57,34%) | 9.900 EUR (51,7%) | 186,12° | 0,5726 |
| Summe | 368 (100%) | 19.150 EUR (100%) | 360° | 0,8441 |

Tabelle U.3: Werte der Betrachtungsebene 3 (Montagemeisterei 7)

| Montagestation | Fehleranzahl (Anteil) | Fehlerkosten (Anteil) | $\beta(m_{3,j})$ | $A(w(m_{3,j}))$ |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| Montagestation 1 | 36 (17,06%) | 1.350 EUR (13,64%) | 49,0909° | 0,0709 |
| Montagestation 2 | 19 (9%) | 700 EUR (7,07%) | 25,4545° | 0,0198 |
| Montagestation 3 | 45 (21,33%) | 1.500 EUR (15,15%) | 54,5455° | 0,0977 |
| Montagestation 4 | 22 (10,43%) | 850 EUR (8,59%) | 30,9091° | 0,0278 |
| Montagestation 5 | 14 (6,64%) | 1.050 EUR (10,61%) | 38,1818° | 0,0217 |
| Montagestation 6 | 28 (13,27%) | 1.250 EUR (12,63%) | 45,4545° | 0,0513 |
| Montagestation 7 | 15 (7,11%) | 600 EUR (6,06%) | 21,8182° | 0,0135 |
| Montagestation 8 | 11 (5,21%) | 450 EUR (4,55%) | 16,3636° | 0,0074 |
| Montagestation 9 | 6 (2,84%) | 750 EUR (7,58%) | 27,2727° | 0,0067 |
| Montagestation 10 | 4 (1,9%) | 650 EUR (6,57%) | 23,6364° | 0,0039 |
| Montagestation 11 | 2 (0,95%) | 250 EUR (2,53%) | 9,0909° | 0,0008 |
| Montagestation 12 | 9 (4,27%) | 500 EUR (5,05%) | 18,1818° | 0,0067 |
| Summe | 211 (100%) | 9.900 EUR (100%) | 360° | 0,3282 |

Tabelle U.4: Werte der Betrachtungsebene 4 (Montagestation 3)

| Bauteil | Fehleranzahl (Anteil) | Fehlerkosten (Anteil) | $\beta(m_{4,j})$ | $A(w(m_{4,j}))$ |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|
| Stoßfänger hinten | 16 (35,56%) | 550 EUR (36,67%) | 132° | 0,3249 |
| Stopfen 1 | 5 (11,11%) | 150 EUR (10%) | 36° | 0,0343 |
| Stopfen 2 | 3 (6,67%) | 100 EUR (6,67%) | 24° | 0,0139 |
| Stopfen 3 | 1 (2,22%) | 50 EUR (3,33%) | 12° | 0,0023 |
| Stopfen 4 | 10 (22,22%) | 400 EUR (26,67%) | 96° | 0,1651 |
| Luftführungs- segment 1 | 8 (17,78%) | 200 EUR (13,33%) | 48° | 0,0723 |
| Luftführungs- segment 2 | 2 (4,44%) | 50 EUR (3,33%) | 12° | 0,0046 |
| Summe | 45 (100%) | 1.500 EUR (100%) | 360° | 0,6175 |

Werte der Schichten der Betrachtungsebenen 1 - 4

Tabelle U.5: Werte der Schicht der Betrachtungsebene 1

| \vec{v} | β | α | λ | $x(z)$ | $y(z)$ | $x(w)$ | $y(w)$ | $A(z)$ | $A(w)$ |
|--------------|----------|-------------|-----------|---------|---------|---------------|---------------|--------|--------|
| Formel | – | 9,4, 9,5 | – | 9,6 | 9,7 | 9,12, 9,14 | 9,13, 9,15 | 9,18 | 9,22 |
| $g_{1,1}$ | – | 0° | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | – | – |
| $m_{1,1}$ | 47,304° | 23,652° | 0,1147 | 0,916 | 0,4012 | 0,1051 | 0,046 | 0,4012 | 0,046 |
| $g_{1,2}$ | – | 47,304° | 1 | 0,6781 | 0,735 | 0,6781 | 0,735 | – | – |
| $m_{1,2}$ | 68,184° | 81,396° | 0,2965 | 0,1496 | 0,9887 | 0,0444 | 0,2932 | 0,5605 | 0,1662 |
| $g_{1,3}$ | – | 115,488° | 1 | -0,4303 | 0,9027 | -0,4303 | 0,9027 | – | – |
| $m_{1,3}$ | 112,572° | 171,774° | 0,3983 | -0,9897 | 0,1431 | -0,3942 | 0,057 | 0,8318 | 0,3313 |
| $g_{1,4}$ | – | 228,06° | 1 | -0,6684 | -0,7438 | -0,6684 | -0,7438 | – | – |
| $m_{1,4}$ | 92,88° | 274,5° | 0,1645 | 0,0785 | -0,9969 | 0,0129 | -0,164 | 0,7247 | 0,1192 |
| $g_{1,5}$ | – | 320,94° | 1 | 0,7765 | -0,6301 | 0,7765 | -0,6301 | – | – |
| $m_{1,5}$ | 39,096° | 340,488° | 0,026 | 0,9426 | -0,334 | 0,0245 | -0,0087 | 0,3346 | 0,0087 |
| Summe | 360° | – | – | – | – | – | – | 2,8528 | 0,6714 |

Tabelle U.6: Werte der Schicht der Betrachtungsebene 2

| \vec{v} | β | α | λ | $x(z)$ | $y(z)$ | $x(w)$ | $y(w)$ | $A(z)$ | $A(w)$ |
|--------------|---------|-------------|-----------|---------|---------|---------------|---------------|--------|--------|
| Formel | - | 9,4, 9,5 | - | 9,6 | 9,7 | 9,12, 9,14 | 9,13, 9,15 | 9,18 | 9,22 |
| $g_{2,1}$ | - | 0° | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | - | - |
| $m_{2,1}$ | 55,44° | 27,72° | 0,1141 | 0,8852 | 0,4652 | 0,101 | 0,0531 | 0,4652 | 0,0531 |
| $g_{2,2}$ | - | 55,44° | 1 | 0,5673 | 0,8235 | 0,5673 | 0,8235 | - | - |
| $m_{2,2}$ | 118,44° | 114,66° | 0,3125 | -0,4172 | 0,9088 | -0,1304 | 0,284 | 0,8591 | 0,2685 |
| $g_{2,3}$ | - | 173,88° | 1 | -0,9943 | 0,1066 | -0,9943 | 0,1066 | - | - |
| $m_{2,3}$ | 186,12° | 266,94° | 0,5734 | -0,0534 | -0,9986 | -0,0306 | -0,5726 | 0,9986 | 0,5726 |
| Summe | 360° | - | - | - | - | - | - | 2,3229 | 0,8441 |

Tabelle U.7: Werte der Schicht der Betrachtungsebene 3

| \vec{v} | β | α | λ | $x(z)$ | $y(z)$ | $x(w)$ | $y(w)$ | $A(z)$ | $A(w)$ |
|--------------|----------|-------------|-----------|----------|---------|---------------|---------------|--------|--------|
| Formel | - | 9,4, 9,5 | - | 9,6 | 9,7 | 9,12, 9,14 | 9,13, 9,15 | 9,18 | 9,22 |
| $g_{3,1}$ | - | 0° | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | - | - |
| $m_{3,1}$ | 49,0909° | 24,5455° | 0,1706 | 0,9096 | 0,4154 | 0,1552 | 0,0709 | 0,4154 | 0,0709 |
| $g_{3,2}$ | - | 49,0909° | 1 | 0,6549 | 0,7557 | 0,6549 | 0,7557 | - | - |
| $m_{3,2}$ | 25,4545° | 61,8182° | 0,09 | 0,4723 | 0,8815 | 0,0425 | 0,07933 | 0,2203 | 0,0198 |
| $g_{3,3}$ | - | 74,5454° | 1 | 0,2665 | 0,9638 | 0,2665 | 0,9638 | - | - |
| $m_{3,3}$ | 54,5455° | 101,8182° | 0,2133 | -0,2048 | 0,9788 | -0,0437 | 0,2088 | 0,4582 | 0,0977 |
| $g_{3,4}$ | - | 129,0909° | 1 | -0,63055 | 0,7761 | -0,6306 | 0,7761 | - | - |
| $m_{3,4}$ | 30,9091° | 144,5455° | 0,1043 | -0,8146 | 0,5801 | -0,085 | 0,0605 | 0,2665 | 0,0278 |
| $g_{3,5}$ | - | 160° | 1 | -0,9397 | 0,342 | -0,9397 | 0,342 | - | - |
| $m_{3,5}$ | 38,1818° | 179,0909° | 0,0664 | -0,9999 | 0,0159 | -0,0664 | 0,0011 | 0,3271 | 0,0217 |
| $g_{3,6}$ | - | 198,1818° | 1 | -0,9501 | -0,312 | -0,9501 | -0,312 | - | - |
| $m_{3,6}$ | 45,4545° | 220,9091° | 0,1327 | -0,7558 | -0,6549 | -0,1003 | -0,0869 | 0,3863 | 0,0513 |
| $g_{3,7}$ | - | 243,6363° | 1 | -0,4441 | -0,896 | -0,4441 | -0,896 | - | - |
| $m_{3,7}$ | 21,8182° | 254,5454° | 0,0711 | -0,2665 | -0,9638 | -0,0189 | -0,0685 | 0,1893 | 0,0135 |
| $g_{3,8}$ | - | 265,4545° | 1 | -0,0793 | -0,9969 | -0,0793 | -0,9969 | - | - |
| $m_{3,8}$ | 16,3636° | 273,6363° | 0,0521 | 0,0634 | -0,998 | 0,0033 | -0,052 | 0,1423 | 0,0074 |
| $g_{3,9}$ | - | 281,8181° | 1 | 0,2048 | -0,9788 | 0,2048 | -0,9788 | - | - |
| $m_{3,9}$ | 27,2727° | 295,4545° | 0,0284 | 0,4298 | -0,9029 | 0,0122 | -0,0256 | 0,2358 | 0,0067 |
| $g_{3,10}$ | - | 309,0908° | 1 | 0,6301 | -0,7761 | 0,6306 | -0,7761 | - | - |
| $m_{3,10}$ | 23,6364° | 320,9099° | 0,019 | 0,7761 | -0,6306 | 0,0147 | -0,0112 | 0,2048 | 0,0039 |
| $g_{3,11}$ | - | 332,7272° | 1 | 0,8888 | -0,4582 | 0,8888 | -0,4582 | - | - |
| $m_{3,11}$ | 9,0909° | 337,2727° | 0,0095 | 0,9224 | -0,3863 | 0,0088 | -0,0037 | 0,0792 | 0,0008 |
| $g_{3,12}$ | - | 341,8181° | 1 | 0,9501 | -0,312 | 0,9501 | -0,312 | - | - |
| $m_{3,12}$ | 18,1818° | 350,9099° | 0,0427 | 0,9874 | -0,158 | 0,0422 | -0,0067 | 0,158 | 0,0067 |
| Summe | 360° | - | - | - | - | - | - | 3,0832 | 0,3282 |

Tabelle U.8: Werte der Schicht der Betrachtungsebene 4

| \vec{v} | β | α | λ | $x(z)$ | $y(z)$ | $x(w)$ | $y(w)$ | $A(z)$ | $A(w)$ |
|--------------|---------|-------------|-----------|---------|---------|---------------|---------------|--------|--------|
| Formel | - | 9,4, 9,5 | - | 9,6 | 9,7 | 9,12, 9,14 | 9,13, 9,15 | 9,18 | 9,22 |
| $g_{4,1}$ | - | 0° | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | - | - |
| $m_{4,1}$ | 132° | 66° | 0,3556 | 0,4067 | 0,9135 | 0,1446 | 0,3249 | 0,9135 | 0,3249 |
| $g_{4,2}$ | - | 132° | 1 | -0,6691 | 0,7431 | -0,6691 | 0,7431 | - | - |
| $m_{4,2}$ | 36° | 150° | 0,1111 | -0,866 | 0,5 | -0,0962 | 0,0556 | 0,309 | 0,0343 |
| $g_{4,3}$ | - | 168° | 1 | -0,9781 | 0,2079 | -0,9781 | 0,2079 | - | - |
| $m_{4,3}$ | 24° | 180° | 0,0667 | -1 | 0 | -0,0667 | 0 | 0,2079 | 0,0139 |
| $g_{4,4}$ | - | 192° | 1 | -0,9781 | -0,2079 | -0,9781 | -0,2079 | - | - |
| $m_{4,4}$ | 12° | 198° | 0,0222 | -0,9511 | -0,309 | -0,0211 | -0,0069 | 0,1045 | 0,0023 |
| $g_{4,5}$ | - | 204° | 1 | -0,9135 | -0,4067 | -0,9135 | -0,4067 | - | - |
| $m_{4,5}$ | 96° | 252° | 0,2222 | -0,309 | -0,9511 | -0,0687 | -0,2113 | 0,7431 | 0,1651 |
| $g_{4,6}$ | - | 300° | 1 | 0,5 | -0,866 | 0,5 | -0,866 | - | - |
| $m_{4,6}$ | 48° | 324° | 0,1778 | 0,809 | -0,5878 | 0,1438 | -0,1045 | 0,4067 | 0,0723 |
| $g_{4,7}$ | - | 348° | 1 | 0,9781 | -0,2079 | 0,9781 | -0,2079 | - | - |
| $m_{4,7}$ | 12° | 354° | 0,0444 | 0,9945 | -0,1045 | 0,0442 | -0,0046 | 0,1045 | 0,0046 |
| Summe | 360° | - | - | - | - | - | - | 2,7894 | 0,6175 |

Karlsruher Schriftenreihe zur Anthropomatik (ISSN 1863-6489)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer

- Band 1** Jürgen Geisler
Leistung des Menschen am Bildschirmarbeitsplatz. 2006
ISBN 3-86644-070-7
- Band 2** Elisabeth Peinsipp-Byma
Leistungserhöhung durch Assistenz in interaktiven Systemen zur Szenenanalyse. 2007
ISBN 978-3-86644-149-1
- Band 3** Jürgen Geisler, Jürgen Beyerer (Hrsg.)
Mensch-Maschine-Systeme. 2010
ISBN 978-3-86644-457-7
- Band 4** Jürgen Beyerer, Marco Huber (Hrsg.)
Proceedings of the 2009 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2010
ISBN 978-3-86644-469-0
- Band 5** Thomas Usländer
Service-oriented design of environmental information systems. 2010
ISBN 978-3-86644-499-7
- Band 6** Giulio Milighetti
Multisensorielle diskret-kontinuierliche Überwachung und Regelung humanoider Roboter. 2010
ISBN 978-3-86644-568-0
- Band 7** Jürgen Beyerer, Marco Huber (Hrsg.)
Proceedings of the 2010 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2011
ISBN 978-3-86644-609-0
- Band 8** Eduardo Monari
Dynamische Sensorselektion zur auftragsorientierten Objektverfolgung in Kameranetzwerken. 2011
ISBN 978-3-86644-729-5

- Band 9** Thomas Bader
Multimodale Interaktion in Multi-Display-Umgebungen. 2011
ISBN 3-86644-760-8
- Band 10** Christian Frese
Planung kooperativer Fahrmanöver für kognitive Automobile. 2012
ISBN 978-3-86644-798-1
- Band 11** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
Proceedings of the 2011 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2012
ISBN 978-3-86644-855-1
- Band 12** Miriam Schleipen
Adaptivität und Interoperabilität von Manufacturing Execution Systemen (MES). 2013
ISBN 978-3-86644-955-8
- Band 13** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
Proceedings of the 2012 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2013
ISBN 978-3-86644-988-6
- Band 14** Hauke-Hendrik Vagts
Privatheit und Datenschutz in der intelligenten Überwachung: Ein datenschutzgewährendes System, entworfen nach dem „Privacy by Design“ Prinzip. 2013
ISBN 978-3-7315-0041-4
- Band 15** Christian Kühnert
Data-driven Methods for Fault Localization in Process Technology. 2013
ISBN 978-3-7315-0098-8
- Band 16** Alexander Bauer
Probabilistische Szenenmodelle für die Luftbildauswertung. 2014
ISBN 978-3-7315-0167-1
- Band 17** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
Proceedings of the 2013 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2014
ISBN 978-3-7315-0212-8

- Band 18** Michael Teutsch
Moving Object Detection and Segmentation for Remote Aerial Video Surveillance. 2015
ISBN 978-3-7315-0320-0
- Band 19** Marco Huber
Nonlinear Gaussian Filtering: Theory, Algorithms, and Applications. 2015
ISBN 978-3-7315-0338-5
- Band 20** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
Proceedings of the 2014 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2014
ISBN 978-3-7315-0401-6
- Band 21** Todor Dimitrov
Permanente Optimierung dynamischer Probleme der Fertigungssteuerung unter Einbeziehung von Benutzerinteraktionen. 2015
ISBN 978-3-7315-0426-9
- Band 22** Benjamin Kühn
Interessengetriebene audiovisuelle Szenenexploration. 2016
ISBN 978-3-7315-0457-3
- Band 23** Yvonne Fischer
Wissensbasierte probabilistische Modellierung für die Situationsanalyse am Beispiel der maritimen Überwachung. 2016
ISBN 978-3-7315-0460-3
- Band 24** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
Proceedings of the 2015 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2016
ISBN 978-3-7315-0519-8
- Band 25** Pascal Birnstill
Privacy-Respecting Smart Video Surveillance Based on Usage Control Enforcement. 2016
ISBN 978-3-7315-0538-9
- Band 26** Philipp Woock
Umgebungskartenschätzung aus Sidescan-Sonardaten für ein autonomes Unterwasserfahrzeug. 2016
ISBN 978-3-7315-0541-9

- Band 27** Janko Petereit
Adaptive State × Time Lattices: A Contribution to Mobile Robot Motion Planning in Unstructured Dynamic Environments. 2017
ISBN 978-3-7315-0580-8
- Band 28** Erik Ludwig Krempel
Steigerung der Akzeptanz von intelligenter Videoüberwachung in öffentlichen Räumen. 2017
ISBN 978-3-7315-0598-3
- Band 29** Jürgen Moßgraber
Ein Rahmenwerk für die Architektur von Frühwarnsystemen. 2017
ISBN 978-3-7315-0638-6
- Band 30** Andrey Belkin
World Modeling for Intelligent Autonomous Systems. 2017
ISBN 978-3-7315-0641-6
- Band 31** Chettapong Janya-Anurak
Framework for Analysis and Identification of Nonlinear Distributed Parameter Systems using Bayesian Uncertainty Quantification based on Generalized Polynomial Chaos. 2017
ISBN 978-3-7315-0642-3
- Band 32** David Münch
Begriffliche Situationsanalyse aus Videodaten bei unvollständiger und fehlerhafter Information. 2017
ISBN 978-3-7315-0644-7
- Band 33** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Eds.)
Proceedings of the 2016 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2017
ISBN 978-3-7315-0678-2
- Band 34** Jürgen Beyerer, Alexey Pak and Miro Taphanel (Eds.)
Proceedings of the 2017 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2018
ISBN 978-3-7315-0779-6
- Band 35** Michael Grinberg
Feature-Based Probabilistic Data Association for Video-Based Multi-Object Tracking. 2018
ISBN 978-3-7315-0781-9

- Band 36** Christian Herrmann
Video-to-Video Face Recognition for Low-Quality Surveillance Data. 2018
ISBN 978-3-7315-0799-4
- Band 37** Chengchao Qu
Facial Texture Super-Resolution by Fitting 3D Face Models. 2018
ISBN 978-3-7315-0828-1
- Band 38** Miriam Ruf
Geometrie und Topologie von Trajektorienoptimierung für vollautomatisches Fahren. 2018
ISBN 978-3-7315-0832-8
- Band 39** Angelika Zube
Bewegungsregelung mobiler Manipulatoren für die Mensch-Roboter-Interaktion mittels kartesischer modellprädiktiver Regelung. 2018
ISBN 978-3-7315-0855-7
- Band 40** Jürgen Beyerer and Miro Taphanel (Eds.)
Proceedings of the 2018 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2019
ISBN 978-3-7315-0936-3
- Band 41** Marco Thomas Gewohn
Ein methodischer Beitrag zur hybriden Regelung der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage. 2019
ISBN 978-3-7315-0893-9

Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik
und Bildauswertung IOSB Karlsruhe

Steigende Variantenvielfalt der Produkte und hohe Flexibilitätsanforderungen der Produktionsprozesse resultieren in zunehmender Komplexität der Automobilproduktion. Anforderungen dieser Art beeinflussen maßgeblich sowohl die kundenrelevante Produktqualität als auch die unternehmensrelevante Produktionsqualität. Zwar haben informationstechnische Methoden und Konzepte bereits einen wichtigen Beitrag zur Beherrschbarkeit dieser Herausforderungen geleistet, dennoch existiert trotz des intensivierten Qualitätsbewusstseins und des technologischen Fortschritts weiterhin ein hoher Anteil an Qualitätsmängeln und Ausschüssen innerhalb der Produktion. Zudem ist zur Gewährleistung der Qualitätsanforderungen sowie einer effektiven und effizienten Qualitätsregelung eine intensive Kollaboration zwischen Mensch und System innerhalb der Montagelinie erforderlich. Als Lösungsansätze liefert diese Arbeit dazu fünf methodisch-technische Beiträge zur Regelung der Produktionsqualität in der Fahrzeugmontage.

ISSN 1863-6489
ISBN 978-3-7315-0893-9

