

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Raphael Wagner

**Strategien zur funktionsorientierten
Qualitätsregelung in der Serienproduktion**

Band 238



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 238

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Raphael Simon Wagner, M.Sc.
aus Böblingen

Tag der mündlichen Prüfung: 31.08.2020
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

DOI: 10.5445/IR/1000124008

ISBN 978-3-8440-7654-7

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

„We are moving from a world of problems, which demand speed, analysis, and elimination of uncertainty to solve,

...to a world of dilemmas, which demand patience, sense-making, and an engagement of uncertainty.”

Denise Caron, 2009

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die hervorragende Betreuung meiner Arbeit als Hauptreferentin, das große Vertrauen und die konstruktive Diskussionsbereitschaft, die sie mir in den vergangenen Jahren entgegengebracht hat. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herr Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am wbk, insbesondere im Forschungsbereich Produktionssysteme, möchte ich herzlich für die Kollegialität und den Zusammenhalt während und außerhalb des Institutsalltags danken. Mein besonderer Dank gilt Daniel Gauder und Rainer Silbernagel, die mich durch intensives und kritisches Korrekturlesen meiner Arbeit und durch wertvolle Diskussionen, während meiner Zeit am wbk, unterstützt haben. Großer Dank und höchster Respekt gebührt den vielen Studenten, die wesentlich zum Gelingen dieser wissenschaftlichen Arbeit beigetragen haben.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Eltern und Schwestern bedanken, die mir durch ihre bedingungslose Unterstützung jederzeit ein großer Rückhalt sind und so diesen Weg erst ermöglichen.

Der allergrößte Dank gebührt meiner Frau Becci mit unseren Töchtern, die mich durch ihre Liebe dauerhaft unterstützt und mir den nötigen Freiraum geschaffen haben. Euch widme ich diese Arbeit.

Karlsruhe, im August 2020

Raphael Wagner

Abstract

The complexity of high-precision products increases considerably and the requirements reach technological manufacturing limits. The fulfilment of high quality requirements and thus the assurance of the functionality of manufactured products cannot be guaranteed due to the occurring manufacturing deviations.

A corrective measure is the approach to quality control cycles in production. There are various approaches to quality control cycles, which all are based on the geometric compensation of direct product characteristic pairs. However, if components or sub-assemblies of a product have several functionally relevant product characteristics at the same time, existing quality control strategies reach their limits.

In order to overcome this deficit, a planning and evaluation method of function-oriented quality control cycles is presented. The developed method allows the creation of digital twins of individual products under minimal uncertainty by modelling and calibration. Quantitative, interpretable functional models of the digital twins can be derived using statistical methods. They allow for a real-time prognosis of the product's function with minimal overall uncertainty. By integrating these functional models into production control, function-oriented quality control strategies are developed and analysed in event-oriented material flow simulations. The final selection of adequate strategy alternatives is based on a technical and economic evaluation of the simulation results.

The developed methods of the planning approach are demonstrated in the exemplary industrial application for the serial production of piezo injectors. Results of event-oriented material flow simulations as well as the implementation of the function-oriented quality control strategies in the serial production of the industrial partner show an increased first pass yield. The reduction of the scrap rate results in a reduction of the total costs of conforming products. The use of function-oriented quality control cycles thus serves as measure to reduce the uncertainty which occurs in product specification and production of high-precision products.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | i |
| Abkürzungen | iv |
| Formelverzeichnis | vi |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangssituation und Motivation | 1 |
| 1.2 Zielsetzung | 2 |
| 1.3 Forschungshypothesen | 3 |
| 1.4 Aufbau der Arbeit | 3 |
| 2 Grundlagen | 5 |
| 2.1 Produktentwicklung und Unsicherheiten | 5 |
| 2.1.1 Unsicherheit in Produktentwicklung und Produktion | 7 |
| 2.1.2 Abhilfemaßnahmen zur Risikominimierung | 10 |
| 2.2 Qualitätssicherung in der Produktion | 14 |
| 2.2.1 Statistische Prozessregelung | 17 |
| 2.2.2 Produktionsintegrierte Fertigungsmesstechnik | 19 |
| 2.2.3 Qualitätssicherung hochpräziser Produkte | 20 |
| 2.2.4 Verfahren zur Bewertung der Messprozesseignung | 22 |
| 2.2.5 Qualitätsregelung in der Produktion | 27 |
| 2.3 Modelle und Simulation | 35 |
| 2.3.1 Modellierung und Simulation des Produktverhaltens | 36 |
| 2.3.2 Modellierung von Produktionssystemen unter Unsicherheit | 38 |
| 3 Stand der Forschung und Technik | 39 |
| 3.1 Anforderungen zur funktionsorientierten Qualitätsregelung | 39 |
| 3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze | 40 |
| 3.2.1 Ansätze der Gestalt-Funktion Modellierung | 40 |
| 3.2.2 Ansätze der Qualitätsregelung in der Produktion | 43 |
| 3.2.3 Ansätze der qualitätsbezogenen Kostenbewertung im Produktionssystem | 46 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3 | Forschungsdefizit | 47 |
| 4 | Lösungsansatz | 50 |
| 5 | Funktionsorientierte Qualitätsregelung | 53 |
| 5.1 | Methode zur Entwicklung einer Echtzeit-nahen Funktionsprognose mittels Digitaler Zwillinge | 53 |
| 5.1.1 | Produktbezogene Funktionsanalyse | 53 |
| 5.1.2 | Modellierung Digitaler Zwillinge unter geringer Modellunsicherheit | 55 |
| 5.1.3 | Entwicklung datengetriebener Metamodelle | 59 |
| 5.1.4 | Bewertung der Gesamtunsicherheit und Modellauswahl | 62 |
| 5.2 | Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung | 63 |
| 5.2.1 | Modellierung des Produktionssystems unter Unsicherheit | 63 |
| 5.2.2 | Modellierung von Qualitätsregelkreisen zur Materialflusssimulation | 69 |
| 5.2.3 | Integration produktbezogener Funktionsmodelle zur funktionsorientierten Qualitätsregelung | 77 |
| 5.3 | Methode zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung | 79 |
| 5.3.1 | Entwicklung einer technischen Bewertungsmetrik | 79 |
| 5.3.2 | Bewertung der In-Line Messmittelanforderung und -eignung | 80 |
| 5.3.3 | Entwicklung einer wirtschaftlichen Bewertungsmetrik | 82 |
| 5.3.4 | Gesamtheitliche Strategiebewertung der Qualitätsregelung | 85 |
| 5.3.5 | Methodisches Vorgehen zur Ableitung funktionsorientierter Qualitätsregelungen | 87 |
| 6 | Erprobung und prototypische Realisierung | 91 |
| 6.1 | Analyse des exemplarischen Anwendungsfalls | 91 |
| 6.1.1 | Produktbezogene Analyse: Piezo-Injektoren | 91 |
| 6.1.2 | Analyse des bestehenden Produktionssystems | 95 |
| 6.1.3 | Bewertung der Prozessfähigkeiten | 98 |
| 6.1.4 | Problemidentifikation und Zielformulierung des Status Quo | 103 |
| 6.2 | Exemplarische Durchführung des Vorgehens | 105 |
| 6.2.1 | Produktbezogenes Funktionsmodell zur Echtzeit-nahen Prognose | 105 |
| 6.2.2 | Funktionsorientierte Qualitätsregelung | 128 |

| | | |
|----------|--|-------------|
| 6.2.3 | Technische und wirtschaftliche Bewertung | 140 |
| 7 | Diskussion und Ausblick | 150 |
| 7.1 | Diskussion | 150 |
| 7.2 | Ausblick | 153 |
| 8 | Zusammenfassung | 155 |
| | Publikationsliste | 156 |
| | Literaturverzeichnis | 157 |
| | Abbildungsverzeichnis | I |
| | Tabellenverzeichnis | XVII |
| | Anhang | XIX |
| A1. | Methodisches Vorgehen zur Bestimmung quantitativer Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen | XIX |
| A2. | Methoden der Kostenbewertung im Produktionssystem | XXI |
| A3. | Statistischer Test auf Normalverteilung | XXIII |
| A4. | Prüfung des Langzeitverhaltens | XXXVII |
| A5. | Maßnahmen zur Streuungsreduzierung in der DoE Versuchsdurchführung | LII |
| A6. | Prüfung der Linearität des Zusammenhangs | LV |
| A7. | Prüfung der Homoskedastizität | LXIII |
| A8. | Anpassung Zustandsraummodell des Piezo-Injektors | LXV |
| A9. | Schrittweisenanalyse der zeitlichen Diskretisierung | LXVIII |
| A10. | Statistisches Kalibrierungsverfahren | LXIX |
| A11. | Gesamtunsicherheit und Auswahl der Metamodelle | LXXV |
| A12. | Ereignisgesteuerte Materialflusssimulation in SimEvents | LXXX |
| A13. | Simulationsergebnisse der Strategiealternative $\theta = \mathbf{S1}$ * | LXXXVI |
| A14. | Simulationsergebnisse der Strategiealternative $\theta = \mathbf{S3}$ * | LXXXVII |

Abkürzungen

| Abkürzung | Beschreibung |
|------------------|--|
| C&C ² | Contact & Channel and Connector Modelling |
| CAD | Computer-Aided-Design |
| CAE | Computer-Aided-Engineering |
| CAQ | Computer-Aided-Quality |
| CFD | Continous Fluid Dynamic Simulation |
| CPM | Characteristics-Properties Modelling |
| CPS | Cyberphysische Systeme |
| DES | Discrete Event Simulation |
| DMU | Digital Mock-Up Funktionsanalyse |
| DMC | Data Matrix Code |
| DoE | Statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments) |
| DT | Digitaler Zwilling, engl. Digital Twin |
| EoL | End-of-Line (Funktions-)Prüfung eines Produktes |
| FEM | Finite Elemente Methode |
| FPY | First Pass Yield |
| GPS | Geometrische Produktspezifikation (nach ISO 17450) |
| GUM | Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement |
| ID | Identifikator |
| In-Line | Produktionsintegrierte Fertigungsmesstechnik |
| kNN | Nächste Nachbarn Klassifikation (engl. k-Nearest-Neighbor) |
| KNN | Künstliches Neuronales Netz |
| LASSO | Regression mit Regularisierung nach L1-Norm (engl. Least Absolute Shrinkage and Selector operator) |
| LHS | Latin Hypercube Sampling |
| MARS | Stückweise, multivariate Regression (engl. Multivariate adaptive regression spline) |

| Abkürzung | Beschreibung |
|-----------|---|
| MES | Manufacturing Execution System |
| MKS | Mehrkörper Simulation |
| MLE | Maximum-Likelihood-Estimator |
| MSA | Messsystemanalyse |
| NVH | Noise, Vibration, Harshness Analyse |
| OLS | Klassische, multiple Regression (engl. ordinary least squares regression) |
| PEP | Produktentstehungsprozess |
| QVSM | Qualitäts-Wertstrom Methode (engl. Quality Value Stream Mapping) |
| RFID | Radio Frequency Identification Technology |
| RMSE | Wurzel der Residuen-Quadratsumme (engl. root mean squared error) |
| SPC | Statistische Prozessregelung (engl. Statistical Process Control) |
| SVM | Support Vektor Machine |
| UWB | Ultra Wide Band Identification Technology |

Formelverzeichnis

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|---------------------|--|----------------|
| α | Quotient zwischen L1- und L2-Bestrafung innerhalb der Elastic Net Regularisierung | – |
| α_{error} | Irrtumswahrscheinlichkeit | % |
| β_i | Regressionskoeffizienten der Prädiktoren | – |
| $\hat{\beta}_i$ | Teilmenge der Regressionskoeffizienten β_i mit bester Schätzung | – |
| γ | Konfidenzniveau | % |
| ε_q | Relativer Prognosefehler der statistischen Kalibrierung der DT | – |
| $\varepsilon_{q,n}$ | Modellfehler aus Kreuzvalidierung in der statistischen Kalibrierung der DT | – |
| η | Anzahl der Fertigungsnennwerte in der statistisch adaptiven Fertigung ($F(x_i) = 2$) | – |
| θ | Strategiealternative zur Qualitätsregelung | – |
| λ | Strafterm der Regularisierung | – |
| λ_{max} | Minimaler Strafterm der Regularisierung, für den alle Prädiktoren eliminiert werden | – |
| λ_{min} | Minimaler Strafterm der Regularisierung | – |
| $\mu(X)$ | Erwartungswert der Zufallsvariablen X | <i>versch.</i> |
| μ_i | Fertigungsmittelwert der stat. adaptive Fertigung | <i>versch.</i> |
| ν | Anzahl statistischer Freiheitsgrade | – |
| ξ_l | Realisierungen einer stat. Verteilungen | <i>versch.</i> |
| π_i | Gewichte der statistisch adaptiven Fertigung | – |
| $\sigma(X)$ | Standardabweichung von X | <i>versch.</i> |
| $\sigma^2(X)$ | Varianz von X | <i>versch.</i> |
| a_j | Abweichung eines Produktmerkmals /-eigenschaft $x_{i,j}$ zum Nominalwert $n(x_i)$ | <i>versch.</i> |
| $b(p)$ | Klassenbreite des Paarungsbauteils p | <i>versch.</i> |

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|--------------------------|---|----------------|
| $C(p)$ | Anzahl Merkmalklassen des Paarungsbauteils p | – |
| $c(p)$ | Merkmalklasse des Paarungsbauteils p | – |
| c_i | Sensitivitätskoeffizient einer Eingangsgröße | – |
| $c_{q,i}$ | Sensitivitätskoeffizient einer Eingangsgröße im Betriebspunkt q | – |
| C_p | Prozessfähigkeit, Kennzahl | – |
| C_{pk} | Kritische Prozessfähigkeit, Kennzahl | – |
| $COV(X_i, X_j)$ | Kovarianz der Populationen X_i, X_j | – |
| $CPR(\theta)$ | Kosten-Leistungs-Verhältnis der Strategiealternative θ (engl. Cost Performance Ratio) | – |
| d | Anzahl Datensätze zum statistischen Lernen eines Modells | – |
| e | Funktionsklassen (funktionsorientierte Klassierung) | – |
| \hat{e} | Optimale Funktionsklasse e für das Hauptteil h | – |
| E | Anzahl Funktionsklassen | – |
| $Erw(X_i)$ | Erwartungswert eine Stichprobe der Zufallsvariablen X_i | <i>versch.</i> |
| $f_{E,j}$ | Relativer Funktionsbeitrag des Bauteils E der Ausprägung j über alle Betriebspunkte Q | – |
| $f_{E,q,j}$ | Relativer Funktionsbeitrag des Bauteils E der Ausprägung j im Betriebspunkte q | – |
| $\tilde{f}_{E,q,k,Soll}$ | Funktions-Sollbeitrag des Bauteils E der Ausprägung k im Betriebspunkt q für die stat. adaptive Fertigung | – |
| f_i | Fehlerarten zur Charakterisierung der Prüffehler | – |
| f_q | Mastermodell des DT im Betriebspunkt q | – |
| $f_{q,Kal}$ | Kalibriertes Mastermodell des DT im Betriebspunkt q | – |
| \tilde{f}_q | Metamodell des DT (Funktionszusammenhang) | – |
| $f_{q,Reg}$ | Kalibriertes Modell des DT im Betriebspunkt q | – |
| $F(x_i)$ | Fertigungsstrategie für den vorgelagerten Fertigungsprozess des Montageprozesses h | – |

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|-----------------|---|-------------------|
| FPY | First Pass Yield | % |
| g | Baugruppe nach selektivem/individuellen Montagevorgang | – |
| $g(x_i)$ | Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Eingangsgröße x_i nach GUM | – |
| $g_{Kal,q,n}$ | Statistisches Kalibriermodell (Metamodelle) des Betriebspunktes q und der experimentellen Daten n | – |
| $G(Y)$ | Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Messgröße Y nach GUM | – |
| $G_{1/2}$ | Konfidenzintervall | – |
| h | Hauptbauteil | – |
| i | Produktmerkmal bzw. -eigenschaft, Zählvariable | – |
| I | Anzahl Produktmerkmale und -eigenschaften | – |
| j | Ausprägung eines Produktmerkmals bzw. -eigenschaft, Zählvariable | – |
| J | Anzahl Ausprägungen der Produktmerkmale bzw. -eigenschaften | – |
| k | Anzahl der Wiederholungen in der Kreuzvalidierung | – |
| K_i | Kosten eines Wertschöpfungsprozesses i | € |
| k_{Abschr} | Abschreibungskosten Maschinen und Messmittel | € |
| $K_{Ausschuss}$ | Ausschusskosten | € |
| k_{BEST} | Bestandskostensatz (Lagerprozess) | €/t _L |
| k_{Betr} | Betriebskostensatz | €/t _{Pr} |
| K_{Betr} | Betriebskosten | € |
| k_{cov} | Erweiterungsfaktor Unsicherheitsquantifizierung | – |
| k_E | Energiekostensatz | €/t _{Pr} |
| k_{FL} | Flächenkostensatz (Prozess) | €/t _{Pr} |
| K_{FEK} | Fertigungseinzelkosten | € |
| K_{FGM} | Fertigungsgemeinkosten | € |
| K_G | Gesamtkosten pro konformem Produkt | € |

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|----------------|---|-------------------|
| K_{HK} | Herstellkosten | € |
| $K_{HK}(iO)$ | Herstellkosten eines konformen Produktes | € |
| K_{FL} | Kosten Fläche und Inventar (Lagerprozess) | € |
| $K_{Invest,w}$ | Investitionskosten des Wertschöpfungsprozesses w | € |
| K_L | Lager- und Bestandskosten | € |
| k_{MA} | Maschinenkostensatz | €/t _{pr} |
| K_{MA} | Maschinenkosten | € |
| K_{MAT} | Materialkosten | € |
| K_{MGK} | Materialgemeinkosten | € |
| K_{Per} | Personalkosten | € |
| K_{Pr} | Prüfkosten eines Verifikationsprozesses | € |
| $K_{Reinvest}$ | Wiederbeschaffungskosten | € |
| K_{Rest} | Restwert | € |
| $K_{Taguchi}$ | Fehlerkosten nach Taguchis Verlustfunktion | € |
| K_w | Kosten zum Wertschöpfungszustand w | € |
| k_{Zins} | Kalkulatorische Zinskostensatz | €/t _{ND} |
| l | Ausprägungen eines Merkmals, Zählvariable | – |
| L | Anzahl Ausprägungen eines Merkmals | – |
| $L(\vartheta)$ | Gaußsches Mischverteilungsproblem | – |
| $m_{g,j}$ | Gemessener Merkmalswert der Gesamtbaugruppe g | |
| $m_{h,o}$ | Gemessener Merkmalswert eines Hauptbauteils h | <i>versch.</i> |
| $m_{i,j}$ | Gemessener Merkmalswert des Produktmerkmals $x_{i,j}$ | <i>versch.</i> |
| $m_{i,n}$ | Experimentell gemessenes Produktmerkmal von $x_{i,n}$ | <i>versch.</i> |
| $m_{p,j}$ | Gemessener Merkmalswert des Paarungsbauteils p | <i>versch.</i> |
| M | Anzahl Monte-Carlo Ziehungen der Eingangsgrößen nach GUM Supplement 1 | – |
| $M(x_i)$ | Montagestrategie für den Montageprozess h | – |
| n | Zählvariable der experimentellen Datensätze | <i>versch.</i> |

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|-------------------|--|-----------------------|
| n_i | Nennwert des Produktmerkmals x_i | <i>versch.</i> |
| $n(p)$ | Nennwert des Paarungsbauteils p | <i>versch.</i> |
| N | Anzahl experimenteller Datensätze | – |
| \mathcal{N} | Normalverteilung | – |
| $\tilde{n}(p)$ | Konkrete Verteilung des funktionsorientierten Bedarfs an Paarungsbauteilen zur statistisch adaptiven Fertigung | <i>versch.</i> |
| n_{Repl} | Anzahl Replikationen der Materialflusssimulation | – |
| o | Ausprägung der Hauptbauteils, Zählvariable | – |
| O | Anzahl Hauptbauteilausprägungen | – |
| OSG_{x_i} | Obere Spezifikationsgrenze des Produktmerkmals x_i | <i>versch.</i> |
| OSG_q | Obere funktionsorientierte Spezifikationsgrenze | <i>mm³</i> |
| p | Paarungsbauteil | – |
| p_1 | Anzahl Prüffehler 1. Art | – |
| p_2 | Anzahl Prüffehler 2. Art | – |
| p_A | Hydraulischer Druck am Drosselausgang | <i>bar</i> |
| $p_{Best-Fit}$ | Individuell ermitteltes Paarungsbauteil p nach Optimierungsziel der geringsten Abweichung | – |
| p_E | Hydraulischer Druck am Drosseleingang | <i>bar</i> |
| $p_{FIFO-Fit}$ | Konformes Paarungsbauteil p der individuelle Montagen, mit längster Verweildauer t_{ND} | – |
| p_i | Modellparameter des DT | – |
| p_{i,z_i} | Modellparameter zur Kalibrierung des DT | – |
| Δp | Druckdifferenz hydraulischer Drosseln | <i>bar</i> |
| Δp_{Krit} | Kritische Druckdifferenz hydraulischer Drosseln zur Entstehung von Kavitation | <i>bar</i> |
| P_G | Gesamtanzahl produzierter Produkte | – |
| P_{iO} | Anzahl spezifikationskonformer Produkte | – |
| P_p | Geplante Produktionsmenge pro Jahr | <i>p. a.</i> |

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|----------------------|--|----------------|
| q | Betriebspunkt des Produktes $q = 1, \dots, Q$ | – |
| Q | Anzahl Betriebspunkte des Produktes | – |
| Q_{MP} | Eignungskennwert zur Untersuchung der Messprozesseignung | % |
| Q_{MP^*} | Eignungskennwert zur Untersuchung der Messprozesseignung innerhalb der Qualitätsregelung | % |
| $Q_{MP,max}$ | Kritischer Eignungskennwert zur bedingten Messprozesseignung | % |
| Q_{mGD} | Hydraulische Durchflussrate der Drossel mit Gegen- druck | mm^3/min |
| Q_{oGD} | Hydraulische Durchflussrate der Drossel ohne Ge- gendruck | mm^3/min |
| $Q(\sqrt{\Delta p})$ | Hydraulische Durchflussrate einer Drossel in Abhän- gigkeit der anliegenden Druckdifferenz Δp | mm^3/min |
| r | Anzahl Prädiktoren in Modellgleichung | – |
| R_b | Bestimmtheitsmaß einer Regression b | – |
| RSS | Residuenquadratsumme einer Regression | – |
| s | Zählvariable der virtuellen Ausprägungen des LHS | – |
| S | Anzahl virtueller Ausprägungen des LHS | – |
| s_h | geometrisches Sollspiel/Übermaß der Hauptbau- gruppe h | mm |
| $s^2(X_i)$ | Empirische Standardabweichung der Zufallsvariablen X_i | <i>versch.</i> |
| $s^2(X_i)$ | Empirische Stichprobenvarianz der Zufallsvariablen X_i | <i>versch.</i> |
| t | Unabhängige Testdaten zur Unsicherheitsbewertung, Zählvariable | – |
| T | Anzahl unabhängiger Testdaten t | – |
| t_{sim} | Simulationszeitpunkt | s |
| $t_{Aktivitäten}$ | Aktivitätentreiber des Activity Based Costing | – |
| t_{Kosten} | Kostentreiber des Activity Based Costing | – |

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|---------------------|--|----------------|
| $t_{L,w}$ | Individuelle Verweildauer eines Bauteils in einem Lagerungsprozess w | s |
| t_{ND} | Real geplante Nutzungsdauer | a |
| $t_{Pr,w}$ | Individuelle Prozesszeit eines Bauteils in einem Wertschöpfungsprozess w | s |
| $t_{Ressourcen}$ | Ressourcentreiber des Activity Based Costing | – |
| TOL | Toleranzbreite eines Merkmals/einer Funktion | <i>versch.</i> |
| TOL_q | Funktionstoleranz gemäß Spezifikation | mm^3 |
| TOL_{Fert} | Fertigungstoleranz eines Produktmerkmals | <i>versch.</i> |
| TSS | Totalquadratsumme einer Regression | – |
| $u(Y)$ | Standardmessunsicherheit einer Messgröße Y nach GUM | <i>versch.</i> |
| $U(Y)$ | Erweiterte Messunsicherheit einer Messgröße Y nach GUM | <i>versch.</i> |
| $U_q(f)$ | Erweiterte Messunsicherheit für Funktionsprognose des Modells f , im Betriebszustand q | mm^3 |
| $u_{\varepsilon,q}$ | Standardunsicherheit, bezogen auf die Modellabweichung im Betriebspunkt q | mm^3 . |
| $U_{\varepsilon,q}$ | Erweiterte Modellunsicherheit im Betriebspunkt q | mm^3 |
| u_c | Kombinierte Standardunsicherheit einer Messgröße | <i>versch.</i> |
| $u_{I,q}$ | Standardunsicherheit, bezogen auf die Unsicherheit der Einflussgrößen im Betriebspunkt q | <i>versch.</i> |
| U_{MS} | Erweiterte Unsicherheit des Messsystems | <i>versch.</i> |
| U_{MP} | Erweiterte Unsicherheit des Messprozesses | <i>versch.</i> |
| USG_{x_i} | Untere Spezifikationsgrenze des Produktmerkmals x_i | <i>versch.</i> |
| USG_q | Untere funktionsorientierte Spezifikationsgrenze | mm^3 |
| VIF_b | Varianzinflationsfaktor einer Regression b | – |
| w | Wertschöpfungsschritt | – |
| W | Wertschöpfungszustand | – |
| $x_{i,j}$ | Merkmals- bzw. eigenschaftswert eines Bauteils | <i>versch.</i> |

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|---------------------|---|----------------|
| $x_{i,n}$ | Experimentell bestimmte Produkteigenschaft in der Ausprägung n | <i>versch.</i> |
| $x_{i,s}$ | Produkteigenschaft in der virtuellen Ausprägung s | <i>versch.</i> |
| X_i | Population von $x_{i,j}$ | — |
| $x_{i,q,j}$ | Konkrete Produktmerkmalsausprägung der adaptiven Fertigung mittels funktionsorientierter Berechnung | <i>versch.</i> |
| y | Messergebnis eines Messprozesses nach GUM | <i>versch.</i> |
| Y | Messgröße nach GUM | <i>versch.</i> |
| Y_q | Population von $y_{q,j}$ | — |
| $y_{q,j}$ | EoL Produktfunktion im Betriebspunkt q für die Produktausprägung j | mm^3 |
| $\hat{y}_{q,j}$ | Prognostizierte Produktfunktion des DT in der Ausprägung j | mm^3 |
| $\tilde{y}_{q,j}$ | Funktionsprognose des Metamodells \tilde{f}_q | mm^3 |
| $\tilde{y}_{q,j}^*$ | Funktionsprognose anhand des Funktionsmodells \tilde{f}_q mit $\min(u_{\varepsilon,q}(\tilde{f}_q))$ | mm^3 |
| $y_{q,n}$ | Experimentell ermittelte Produktfunktion in der Ausprägung n | mm^3 |
| $\check{y}_{q,n}$ | Prognostizierte Produktfunktion der Kalibriermodelle g_{Kal} | mm^3 |
| $y_{q,t}$ | EoL Produktfunktion im Betriebspunkt q für die Testausprägung t | mm^3 |
| $\hat{y}_{q,t}$ | Prognostizierte Produktfunktion des DT für den unabhängigen Testdatensatz t | mm^3 |
| $\tilde{y}_{q,t}$ | Funktionsprognose des Metamodells \tilde{f}_q anhand unabhängiger Testdaten t | mm^3 |
| $y_{q,nom}$ | Nominale Produktfunktion im Betriebspunkt q nach Funktionsspezifikation | mm^3 |
| \hat{y}_{q,n,z_i} | Funktionsprognose des statistischen Kalibriermodells $g_{Kal,q,n}$ im Betriebspunkt q für Modellparameterausprägung z_i | mm^3 |
| $\hat{y}_{q,n,rel}$ | Relative, prognostizierte Produktfunktion des DT, bezogen zur Toleranz TOL_q | — |

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|-----------------|---|---------|
| $\hat{y}_{q,s}$ | Prognostizierte Produktfunktion des DT in der virtuellen Ausprägung s | mm^3 |
| z_{Zins} | kalkulatorischer Zinssatz | % |
| z_1, z_2 | Zählvariablen des LHS zur statistischen Kalibrierung | – |
| Z_1, Z_2 | Anzahl gesampelter Ausprägungen im LHS | – |
| $z_{\gamma/2}$ | Statistische t-Verteilung zur Berechnung des Konfidenzintervalls unter Normalverteilungsannahme | |

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Eine hohe Produktqualität ist in zunehmendem Maße eine zentrale Kundenanforderung und für produzierende Unternehmen ein entscheidender Faktor zur Behauptung der Führungsrolle im globalen Wettbewerb (BMBF 2014). Dies gilt in besonderem Maße für Hersteller filigraner Hochpräzisionsprodukten, zu deren Funktionserfüllung Toleranzen von nur wenigen Mikrometern notwendig sind und deren Komponenten oft nur eine Größe von wenigen Millimetern aufweisen.

Trotzdem befinden sich auch diese Unternehmen aufgrund des Wettbewerbs in globalen Märkten meist unter einem starken Kostendruck, sodass neben den hohen Qualitätsanforderungen gleichzeitig auch eine kosteneffiziente Gestaltung der Produktion essentiell ist (Colledani et al. 2014b). In vielen Fällen steigt die Komplexität der Hochpräzisionsprodukte erheblich und die Anforderungen erreichen technologische Fertigungsgrenzen, sodass eine Toleranzvergabe, die auf statistischen Toleranzanalysen basiert, nicht mehr zielführend ist (Heling et al. 2016). Auftretende Fertigungsabweichungen gefährden die Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen und damit die Sicherstellung der Funktionalität hergestellter Produkte. Diese Produkte können in der Folge am Markt nicht abgesetzt werden. (Abele et al. 2003) Die Aufwendungen für Nacharbeit und Wertschöpfung an non-konformen Produkten werden größer, die Produktionskosten steigen. Diese Anforderungen sind in der Herstellung hochpräziser und komplexer Produkte branchenübergreifend (z. B. Automobilindustrie, Medizintechnik, Maschinenbau, Industrieautomation, Elektronikindustrie etc.) so oder in ähnlicher Form zu beobachten. (Kayasa et al. 2012; Mease et al. 2004; Colledani et al. 2014a)

Eine Abhilfemaßnahme stellt der Ansatz der Qualitätsregelung in der Produktion dar. Verschiedene maschinenübergreifende Regelkreise in Fertigung und Montage ermöglichen es die technologische Komplexität durch organisatorische Ansätze im Produktionssystem zu entschärfen (Lanza et al. 2015). Neue Technologien, wie die gesteigerte Datenverfügbarkeit und -verarbeitung, kostengünstige Sensorik oder die individuelle Bauteilidentifikation sind Befähiger für den Einsatz statistisch adaptive Fertigungsanpassungen und der Selektion von Montagebauteilen in Echtzeit. Der Einsatz von Strategien der Qualitätsregelung erreicht bereits heute eine Verbesserung der Produktqualität in der industriellen Serienproduktion (Akansel et al. 2011).

Alle bisherigen Ansätze der Qualitätsregelung basieren auf der Verbesserung geometrischer Merkmale (z. B. eines Passungsspiels, Akansel et al. 2011) bzw. funktionsrelevanter Eigenschaften (z. B. eines konstanten magnetischen Flusses in Elektromotoren, Colledani et al. 2018). Besitzen Bauteile bzw. Teilbaugruppen eines Produktes zudem mehrere funktionsrelevante Produktmerkmale und -eigenschaften, kommen bisherige Strategien der Qualitätsregelung jedoch an ihre Grenzen. Die Regelung und Kompensation mehrerer Produktmerkmale eines Bauteils scheitert mangels der Verfügbarkeit quantitativer Gestalt-Funktion Zusammenhänge in der Produktion.

Zudem erfolgt in den bestehenden wissenschaftlichen Ansätzen eine Optimierung einzelner Strategieaspekte primär auf technischer Basis (Fang et al. 1995; Matsuura et al. 2011). Ein ganzheitlicher Nachweis der Wirtschaftlichkeit organisatorischer Zusatzaufwände wird in der Planungsphase jedoch meist nicht durchgeführt.

1.2 Zielsetzung

Bestehende Ansätze der Qualitätsregelung in der Produktion sollen durch die Integration von Produktwissen der Produktentwicklung erweitert werden.

Das erste Teilziel besteht in der Entwicklung eines Vorgehens zur Modellierung quantitativer Funktionszusammenhänge, unter geringer Unsicherheit, zur Funktionsprognose komplexer Produktsysteme, auf Basis von In-Line Messdaten. Die quantitativen Funktionszusammenhänge sind Input-Output Zusammenhänge auftretender Fertigungsabweichungen einzelner Produktmerkmale und der Produktfunktion. Eine funktionsorientierte Verifikation wird durch diese quantitativen Modelle möglich.

Ein zweites Teilziel ist die Befähigung bestehender Strategien der Qualitätsregelung zu funktionsorientierten Strategien, durch die Integration von Produktwissen. Dabei soll eine generalisierte Modellierung der Strategien zur Qualitätsregelung entwickelt werden, um die Qualität in der Serienproduktion durch geeignete Strategiekombinationen zu steigern. Zuvor abgeleitete Funktionszusammenhänge werden dazu in die jeweilige Strategie integriert. Der Nachweis zur Qualitätssteigerung soll anhand von Materialflusssimulationen und einer Validierung in der Serienproduktion nachgewiesen werden.

Als drittes Teilziel soll eine Metrik entwickelt werden, die den Einsatz funktionsorientierter Strategien der Qualitätsregelung, unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten in der Serienproduktion, bewertbar macht. Auf Basis dieser Bewertungsmetrik soll eine Auswahl der Strategiealternativen durchgeführt werden.

1.3 Forschungshypothesen

Aus der vorgestellten Zielsetzung leiten sich die Forschungshypothesen der nachfolgenden Arbeit ab:

1. Für Produkte mit sehr hohen Qualitätsanforderungen können quantitative, interpretierbare Gestalt-Funktion Zusammenhänge für die Echtzeit-nahe, funktionsorientierte Verifikation, unter geringer Unsicherheit, abgeleitet werden.
2. Durch die Anwendung von Qualitätsregelkreisen mit mehreren, interagierenden funktionsrelevanten Merkmalen kann mittels Integration von Funktionszusammenhängen der First Pass Yield gesteigert werden.
3. Der Einsatz von Qualitätsregelkreisen mittels Funktionsmodellen ermöglicht eine wirtschaftliche Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen.

Die forschungsleitenden Hypothesen sollen in im Rahmen der Arbeit untersucht und nachgewiesen werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel und ist wie folgt strukturiert (siehe Abbildung 1-1): Zur Einleitung in das Thema wurden in Kapitel 1 die Ausgangssituation und Motivation, sowie Zielsetzung und Forschungshypothesen für das Forschungsthema dargestellt. In Kapitel 2 folgen Grundlagen, die das Verständnis der inhaltlichen Zusammenhänge und deren Einordnung in den nachfolgenden Forschungsansatz ermöglichen. Anschließend werden in Kapitel 3 die bestehenden Ansätze anhand der formulierten Anforderungen aus dem Stand der Forschung und Technik dargelegt. Basierend auf den bestehenden Ansätzen im Stand der Forschung wird das Forschungsdefizit abgeleitet. Kapitel 4 stellt den Lösungsansatz und die Grundgedanken des Forschungsansatzes vor, um dem Forschungsdefizit nachzukommen. Kern der Arbeit bildet Kapitel 5, in welchem das methodische Vorgehen für den Einsatz der funktionsorientierten Qualitätsregelung entwickelt wird. Im Rahmen von Kapitel 6 soll der vorgestellte Lösungsansatz erprobt und beispielhaft realisiert werden. In Kapitel 7 erfolgt die Diskussion, gefolgt von einem Ausblick, bevor die Zusammenfassung in Kapitel 8 die Arbeit schließt.

| 1. Einleitung | | | |
|--|---|--|------------------------------|
| 1.1 Ausgangssituation und Motivation | 1.2 Zielsetzung | 1.3 Forschungshypothesen | 1.4 Aufbau der Arbeit |
| 2. Grundlagen | | | |
| 2.1 Produktentwicklung und Unsicherheiten | 2.2 Qualitätssicherung in der Produktion | 2.3 Modelle und Simulationen | |
| 3. Stand der Forschung und Technik | | | |
| 3.1 Anforderungen | 3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze | 3.3 Forschungsdefizit | |
| 4. Lösungsansatz | | | |
| 5. Funktionsorientierte Qualitätsregelkreise | | | |
| 5.1 Modell zur Echtzeitnahen Prognose der Produktfunktion | 5.2 Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung | 5.3 Methoden zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung | |
| 6. Erprobung und prototypische Realisierung | | | |
| 6.1 Analyse des exemplarischen Anwendungsfalls | | 6.2 Funktionsorientierte Qualitätsregelung | |
| 7. Diskussion und Ausblick | | | |
| 8. Zusammenfassung | | | |

Abbildung 1-1: Graphische Darstellung zum Inhalt der Arbeit

2 Grundlagen

Zu Beginn der Arbeit werden Grundlagen dargestellt, die das Verständnis der inhaltlichen Zusammenhänge und deren Einordnung im weiteren Verlauf unterstützen sollen. Dabei wird mit der Aktivität der Produktentwicklung eingeführt und bestehende Ansätze zum Unsicherheitsmanagement im Produktentstehungsprozess (PEP) dargelegt. Eng damit verknüpft ist das darauffolgende Themengebiet der Qualitätssicherung in der Produktion befähigt durch aktuelle Technologien der Bauteilidentifikation im Umfeld von Industrie 4.0. Abschließend erfolgt ein Überblick bestehender Ansätze in der Modellbildung und Simulation zur Optimierung von Produkten und deren Produktion.

2.1 Produktentwicklung und Unsicherheiten

Die Produktentwicklung ist eine Phase des PEP, gefolgt von der Produktionssystementwicklung und Produktion zur Realisierung zuvor entwickelter Produkte. Sie stellt einen interdisziplinären Unternehmensprozess zur Entwicklung eines marktfähigen Produktes dar. Sie hat den Entwurf von Systemen zum Ziel, die einen Kundenbedarf oder -auftrag durch ein funktionsfähiges und wirtschaftlich herstellbares Produkt erfüllen. (VDI 2018) Die Funktion eines Produktes ist dabei ein allgemein und gewollter Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsparametern eines Systems, um eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen (Pahl et al. 2013). Sie ist durch Zustandsänderungen eines Umsatzproduktes (Stoff, Energie, Information) gekennzeichnet (siehe Abbildung 2-1) (Ehrlenspiel et al. 2013).

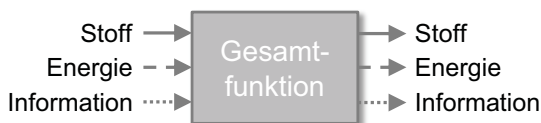


Abbildung 2-1: Funktionsdarstellung eines Produktes mit zugehörigen Umsatzprodukten (nach Ehrlenspiel et al. 2013)

Obwohl die zu erstellenden Informationen für ein funktionsfähiges Produkt in verschiedenen Disziplinen ganz unterschiedlich sind, basieren die Tätigkeiten des PEP im Allgemeinen dennoch alle auf generischen Bestandteilen der Systemtheorie, verschiedenen Modelldarstellungen, sowie Fähigkeiten und Methoden der Problemlösung (Lutters et al. 2014).

Die **Systemtheorie** stellt eine wichtige Grundlage dar, um die Komplexität von Produktentwicklungsaufgaben bewältigen zu können. Ein Produkt kann so beispielsweise als System mit darin enthaltenen Bauteilen in einzelne Elemente unterteilt werden, die im Gesamtsystem zu einer Gesamtfunktion interagieren (siehe Abbildung 2-2). Ebenso kann ein System auch aus darin enthaltenen Produkten bestimmt sein und als System aus Systemen (System of Systems), wie beispielsweise in der Entwicklung von Produkt-Services oder auch cyber-physischer Systeme, betrachtet werden (Ehrlenspiel et al. 2013; Ropohl 2009)

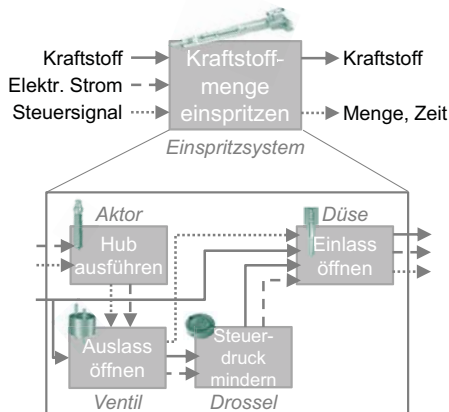


Abbildung 2-2: Vereinfachte Systemdarstellung am Beispiel eines Einspritzsystems mit Elementen, Gesamt- und Teilfunktionen, eigene Darstellung

Eng verknüpft zum Systembegriff ist der Begriff des Modells. Danach ist eine **Modell-darstellung** immer ein Abbild eines Originals (Abbildungsmerkmal) für einen Bestimmten Zweck (pragmatisches Merkmal), wobei das Original jedoch nur in reduziertem oder abstrahiertem Umfang (Verkürzungsmerkmal) wiedergegeben wird (Stachowiak 1973). Modelle erlauben damit die Beschreibung komplexer Systeme und deren Verhalten und reichen von der textuellen, graphischen und zeichnerischen über die mathematische sowie matrixbasierte bis zur virtuellen und digitalen Darstellung (siehe Kapitel 2.3) (VDI 2018; Tao et al. 2018).

Mit Methoden der **Problemlösung** bauen interdisziplinäre Produktentwickler-Teams schrittweise Vorstellungen oder Beschreibungen einer Lösung „undefinierter“ Probleme auf und konkretisieren diese durch Produktspezifikationen (Eastmen 1969). Oftmals

orientieren sich Problemlösungsprozesse an Regelkreisen unseres Denkens, wie beispielsweise im Test-Operate-Test-Exit (TOTE-) Schema von Miller et al. (1960), der Vergleich-Veränderung-Rückkopplung (VVR-) Zyklus von Hacker, sowie der Plan-Do-Check-Act (PDCA-) Zyklus von Deming. Innerhalb der Zyklen werden verschiedene Aktivitäten des Denkens und Handelns iterativ erzeugt (Synthese) und fortlaufend bewusst oder unbewusst mit den Zielen abgeglichen (Analyse), bis die Lösungssuche eine zufriedenstellende Lösungsgüte erreicht hat. (Lindemann 2009; Miller et al. 1960; Hacker et al. 1998; Deming 1998)

Verschiedene **Modelle der Produktentwicklung** bieten eine unterstützende Beschreibung des generischen Vorgehens für die Phasen, Aktivitäten und entstehende Zwischenergebnisse zur Planung und Steuerung des Entwicklungsprojekts (Albers et al. 2016; Lindemann 2009; VDI 2004). Ein allgemeines Modell der Produktentwicklung vereint die Vorteile bestehender Ansätze in einer matrixorientierten Struktur und bezieht Kontextfaktoren und vorhandenes Prozesswissen des Unternehmens im Entwicklungsprojekt mit ein (VDI 2018).

Die Vorgehensweisen der Modellbeschreibungen zeigen zur besseren Lesbarkeit meist einen idealtypischen und sequentiellen Verlauf. In Realität sind die Entwicklungsprozesse durch unvollständiges Wissen und Iterationsschleifen gekennzeichnet, die sich durch ändernde Anforderungen aus Versuchen oder der Parallelisierung von Aktivitäten (Simultaneous Engineering Konzept) ergeben (VDI 2018). Neben Unsicherheiten im Projektverlauf muss sich die Produktentwicklung auch mit auftretenden Schwankungen zur Idealgestalt in der Realisierung von Produkten auseinandersetzen und zulässige Grenzen der Abweichung festlegen, um die Produktfunktion zu gewährleisten (Morse et al. 2018).

2.1.1 Unsicherheit in Produktentwicklung und Produktion

Unsicherheit ist in allen Phasen der Produktentstehung und während des gesamten Lebenszyklus allgegenwärtig. Zur Unsicherheit gehören zum Beispiel auftretende Fertigungsschwankungen von Bauteilen; fehlerhafte Messungen; unvollkommene numerische Näherungen und ungenaue Belastungen während der Produktnutzung. Die Unsicherheit birgt Risiken für die Sicherstellung der Produktfunktion, die Prozessplanung in der Produktion und die Kundenakzeptanz. (Morse et al. 2018) Der falsche Umgang mit entstehenden Unsicherheiten kann zu erheblichen Konstruktionsfehlern, kostspieligen Wartungsarbeiten und sogar katastrophalen Folgen, insbesondere für multidisziplinäre

Systeme und der Systemumwelt, führen. Daher ist es unerlässlich geworden, die Quellen der Unsicherheit zu identifizieren und die Auswirkungen verschiedener Arten der Unsicherheit beim Entwurf multidisziplinärer Systeme zu quantifizieren und zu berücksichtigen. (Thunissen 2005; Roy et al. 2011; Engelhardt et al. 2011; Culley 2011)

Der Unsicherheitsbegriff wird in verschiedene Arten und mögliche Quellen der Unsicherheit klassifiziert. Eine klassische und Disziplin übergreifende Klassifikation ist die Trennung in aleatorische und epistemische Unsicherheit (Hoffman et al. 1994). Die **aleatorische Unsicherheit**, auch als nicht reduzierbare, objektive oder stochastische Unsicherheit bezeichnet, beschreibt die mit einem physikalischen System oder einer Umgebung verbundene Variabilität, beispielsweise die zufällige Abweichung eines Fertigungs- oder Messprozesses (Bedford et al. 2001). **Epistemische Unsicherheit** hingegen wird auf unvollständiges Wissen über ein physikalisches System oder die Umgebung zurückgeführt (Oberkampff et al. 2004).

Thunissen (2005) ergänzt die klassische Einordnung durch Unsicherheiten, die aus Unbestimmtheit und aus Übereinstimmung entspringen und untergliedert die epistemische Unsicherheit in Modellunsicherheit, phänomenologische und verhaltensorientierte Unsicherheit (siehe Abbildung 2-3, links) (Thunissen 2005).

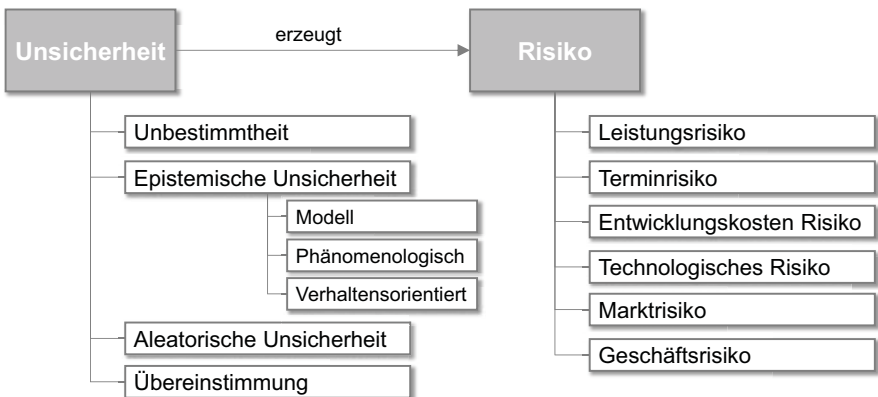


Abbildung 2-3: Unsicherheits- und Risiko Taxonomie (nach Morse et al. 2018; Thunissen 2005)

Unsicherheit durch **Unbestimmtheit** im Sinne der Produktentwicklung beinhaltet die Konstruktions- und Spezifikationsungenauigkeit sowie Mehrdeutigkeit von Konventionen

nen, beispielsweise Interpretationsspielraum in Merkmalspezifikationen einer Bauteilzeichnung (Lu et al. 2008). Die Unsicherheit aus **Übereinstimmung** beschreibt die Kongruenz zwischen funktionalen Anforderungen und der zugehörigen konstruktiven Spezifikation, beispielsweise die falsche/fehlerhafte Formulierung der beabsichtigten Funktionsanforderung (ISO 2011; Dantan et al. 2010).

Die **Modellunsicherheit** beschreibt die Genauigkeit des Modells eines Systems hinsichtlich des tatsächlichen physischen Systems, beispielsweise die Abweichung eines mathematischen Modells zum tatsächlichen Systemverhalten. Die **phänomenologische Unsicherheit** hängt mit dem Verhalten unter verschiedenen Bedingungen zusammen, beispielsweise unbekanntem Umwelteinflüssen oder eingeschränktem Verständnis des Verhaltens von Schlüsselparametern des Phänomens oder deren Wechselwirkung. **Verhaltensorientierte Unsicherheit** steht im Zusammenhang mit ungewissem individuellen oder organisatorischem Verhalten, wie beispielsweise Unsicherheit der Kundenanforderung oder der zukünftigen Nutzung durch den Kunden. (Thunissen 2005)

Die Folgen von Unsicherheit sind daraus resultierende Risiken. Als Risiko wird dabei die Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens und des Schadensausmaßes bezeichnet (DIN 2013). Mögliche Risiken des PEP sind daher mit bestehender Unsicherheit verknüpft und können in sechs Kategorien unterteilt werden (siehe Abbildung 2-3, rechts) (Browning 1999):

- **Leistungsrisiko**, aus Unsicherheit, die geforderten Qualitätsanforderungen einschließlich Preis und Zeitpunkt zu erfüllen.
- **Terminrisiko**, aus Unsicherheit eines Projektes, innerhalb eines Zeitrahmens ein geeignetes Konzept zu entwickeln, dass das Leistungsrisiko ausreichend reduziert.
- **Entwicklungskostenrisiko**, aus Unsicherheit innerhalb eines bestimmten Budgets ein akzeptables Produkt zu entwickeln.
- **Technologisches Risiko**, aus Unsicherheit verfügbarer technologischer Fähigkeit geforderte Leistungsvorteile zu erzielen.
- **Marktrisiko**, aus Unsicherheit über den zu erwartenden Nutzen beziehungsweise Mehrwert gegenüber dem Markt für die gewählten Spezifikationen.
- **Geschäftsrisiko**, aus Unsicherheit in Politik, Wirtschaft, Arbeit, Gesellschaft oder anderen Faktoren des Unternehmensumfelds.

Alle Arten der Unsicherheit bergen demnach Risiken, da sie die Produktentstehung auf verschiedenen Ebenen beeinflussen. Um Risiken zu vermeiden, werden im PEP Strategien und Produktspezifikationen eingesetzt, um mögliche Unsicherheiten zu begrenzen. (Thunissen 2005; ISO 2011)

2.1.2 Abhilfemaßnahmen zur Risikominimierung

Die steigenden Anforderungen an eine hohe Zuverlässigkeit, Robustheit, Vielseitigkeit, Flexibilität, Entwicklungsfähigkeit und Kompatibilität technischer Systeme erfordern, dass Ingenieure verschiedene Unsicherheiten während des PEP verstehen, quantifizieren und begrenzen. Verschiedene Abhilfemaßnahmen bieten Potentiale zur Minderung von Risiken durch das Ausschöpfen technischer Designmöglichkeiten im PEP, um diesen Anforderungen gerecht zu werden (siehe Abbildung 2-4). (Chalupnik et al. 2009; McManus et al. 2005). Die Abhilfemaßnahmen zur Risikominimierung sind oftmals nicht direkt wertschöpfend und mit Mehraufwand verbunden, lassen sich aber durch ihre technisch und wirtschaftlich Auswirkung auf die technischen Systeme rechtfertigen (McManus et al. 2005). Im Folgenden werden die Abhilfemaßnahmen des Toleranzmanagements, der Konstruktionsalternativen sowie der Verifikation (siehe Kapitel 2.2) vertieft.

Das **Toleranzmanagement** ermöglicht es Produktentwicklern, die Unsicherheit in der Produktion einzugrenzen, indem sie Anforderungen an die zulässigen Fertigungs- und Montageabweichungen stellen (Weill et al. 1988). Toleranzen beschreiben die Charakterisierung von Fertigungsabweichungen von Bauteilen (Fritz 2018). Charakterisierungen unterscheiden sich dabei in Produktmerkmale, welche die Form und Struktur eines Produktes beschreiben und direkt beeinflusst werden können (z. B. Maß-, Form- und Lagetoleranzen), sowie Produkteigenschaften, die das Verhalten eines Produktes beschreiben (z. B. Funktion, Gewicht, Herstellbarkeit, Kosten) und nur indirekt durch Veränderungen der abhängigen Merkmale beeinflusst werden können (Köhler et al. 2008). Das Toleranzmanagement unterscheidet sich von anderen Abhilfemaßnahmen, indem es sich rein auf die Begrenzung der, durch Fertigungsprozesse auftretenden, aleatorischen Unsicherheit fokussiert. Diese erzeugt eine Minimierung des Leistungsrisikos durch gesteigerte **Zuverlässigkeit**, **Robustheit**, **Flexibilität** (Austauschbarkeit) und **Kompatibilität** technischer Systeme. (Morse et al. 2018)

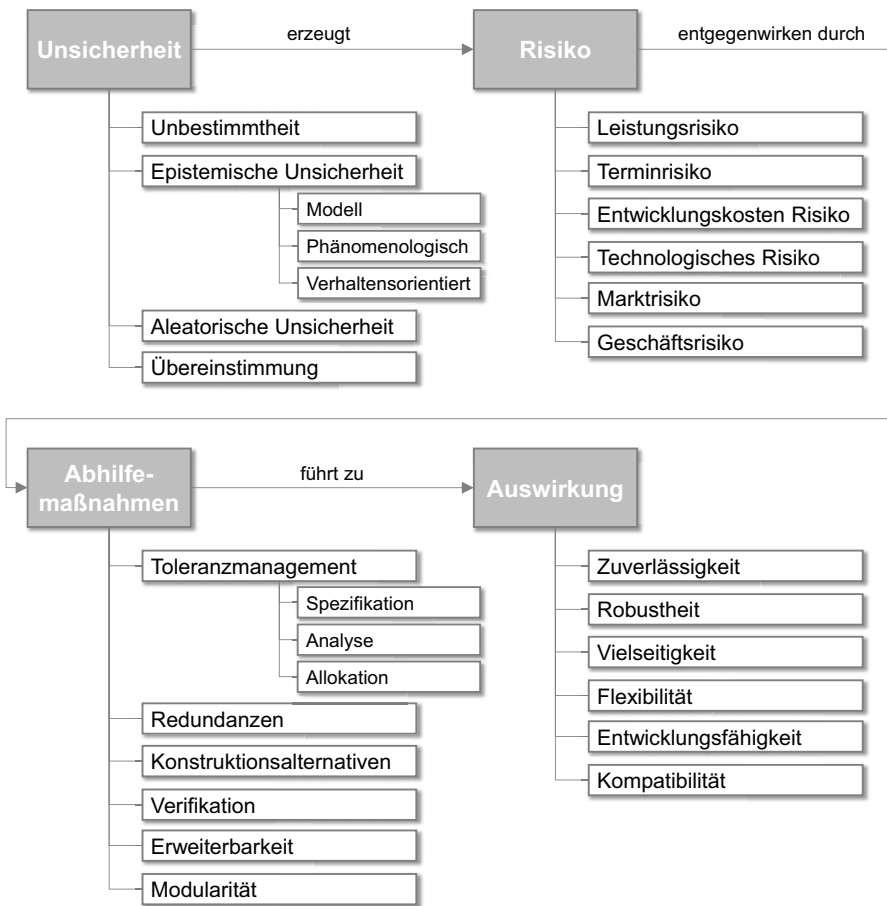


Abbildung 2-4: Unsicherheitsmanagement Taxonomie (nach Morse et al. 2018)

Aktivitäten innerhalb des Toleranzmanagements sind die Toleranzspezifikation, die Toleranzanalyse und die Toleranzoptimierung (Allokation). Sie sind durch Anforderungen an die Produktfunktion, die Auswahl der Fertigungsprozesse, die Montierbarkeit und deren Kosten getrieben, um das Leistungs-, das Markt- und das technologische Risiko zu reduzieren (siehe Abbildung 2-5). (Etienne et al. 2008)

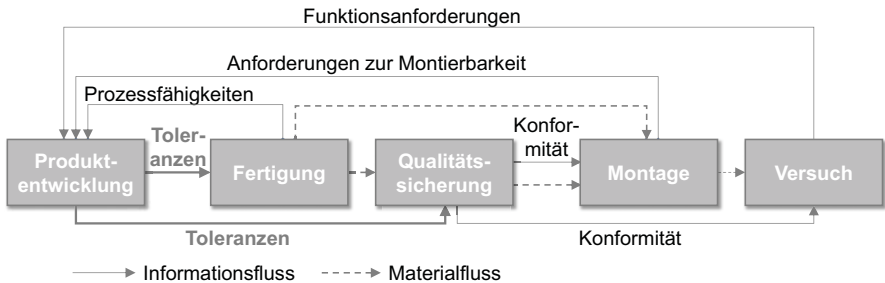


Abbildung 2-5: Wichtigkeit des Toleranzmanagement im PEP (nach Dantan 2014)

Der Fokus der **Toleranzspezifikation** besteht darin, eine Sprache zur Begrenzung von Fertigungsabweichungen (aleatorische Unsicherheit) bereitzustellen (Srinivasan 2008). Das Konzept sieht vor, möglichst spezifische Toleranzen (geringe Unsicherheit der Unbestimmtheit) für beabsichtigte Funktionen (geringe Unsicherheit der Übereinstimmung) zur Verifikation in der Produktion zu bieten (siehe Kapitel 2.2). Die Geometrische Produktspezifikation (GPS, ISO 17450 und folgende) stellt ein Regelwerk zur international standardisierten Beschreibung, Tolerierung und Prüfung technischer Produkte. Darin wird die funktionsgerechte, fertigungsgerechte und prüfgerechte Geometriebeschreibung von Werkstücken festgelegt. (ISO 2011)

Die **Toleranzanalyse** befasst sich mit der Beschreibung und Auswirkungsanalyse von Bauteilen mit Fertigungsabweichungen (Systemsynthese, siehe Kapitel 2.3). Zum einen beinhaltet sie die **Darstellung geometrischer Abweichungen** zur idealen Geometrie individueller Bauteile, beispielsweise mittels mathematischer Parametrisierung der Bauteiloberfläche. (Anwer et al. 2013) Zum anderen werden **Variationsanalysen** mittels arithmetischer (Worst-case Betrachtung) und statistischer Methoden durchgeführt. Monte-Carlo Simulationen ermöglichen beispielsweise die Wahrscheinlichkeitsermittlung funktionierender Baugruppen anhand numerischer Systemmodelle (siehe Kapitel 3.2.1). (Nigam et al. 1995)

Die **Toleranzallokation** hat zum Ziel, die Qualitätsanforderungen an das Produkt mit der produktionstechnischen Umsetzung von Merkmalen in der Prozesskette abzugleichen. Sie beinhaltet die Zuweisung und Verteilung des „Abweichungsbudgets“ und ist somit das inverse Problem der Toleranzanalyse. (Drake 1999) Dabei erfolgt die Optimierung von Toleranzspezifikationen für Schlüsselmerkmale, die signifikanten Einfluss

auf Produktionskosten, Produktfunktion, und/oder -sicherheit haben, nach spezifischen Regeln, Strategien oder Prozessfähigkeiten (Thornton 1999; Karmakar et al. 2012).

Das Toleranzmanagement ist, neben Simulationen zur Fertigbarkeit und Lebensdauer technischer Systeme, ein Hauptbestandteil des Simultaneous Engineering. Die aus der Produktentwicklung gesetzten Anforderungen an Größen-, Form- und Lagetoleranzen werden als Produktspezifikation in die Produktion übertragen.

Die Wahl von **Konstruktionsalternativen** bietet das Potential, durch Gestaltänderung des Produktes, seine **Zuverlässigkeit** zu steigern. Die Konstruktionsanpassung zielt darauf ab, die Unsicherheit des Produktversagens in Bezug auf seine mittlere Lebensdauer zu verringern. Die Zuverlässigkeitsbewertung erfolgt anhand von Änderungen in den Lebensdauermodellen der Produkte für verschiedene Konstruktionsalternativen unter epistemischer Unsicherheit. Zur Prognose der Produktfunktion in Bezug zur Lebensdauer kommen vor allem stochastische Modelle zum Einsatz (siehe Kapitel 3.2.1). Die Konstruktionsparameter werden hinsichtlich der Zuverlässigkeit (Leistungsrisiko) optimiert, bis technologische, Markt- und Geschäftsrisiken hinreichend abgedeckt sind. (Morse et al. 2018)

Weiterhin können **Konstruktionsalternativen** eines technischen Systems zur Steigerung seiner **Robustheit** führen. Die Änderung von Konstruktionsparametern soll die Sensitivität der Produktfunktion gegenüber Störfaktoren, wie beispielsweise eine veränderliche Nutzungsumgebung, Fertigungsabweichungen oder Verschleiß eines Systems über die Zeit, mindern. (McManus et al. 2005) Das Ziel von „Robust Design“ ist es, die Konstruktionsalternativen, unter der Berücksichtigung der Produktfunktion, so zu wählen, dass Leistungsschwankungen im nominalen Betriebspunkt minimiert werden (Morse et al. 2018). Der Einfluss primär epistemischer Unsicherheit (Umwelteinflüsse, Modellierungsfehler,...) auf die Produktfunktion wird in vielen Ansätzen mittels analytischer und numerischer Modelle untersucht (siehe Kapitel 3.2.1). Dadurch kann in erster Linie das Leistungsrisiko und das Entwicklungskostenrisiko reduziert werden, das sich wiederum auf das Markt- und Geschäftsrisiko auswirkt. (Brugnach et al. 2008)

Weitere Abhilfemaßnahmen sind (McManus et al. 2005):

- Das Vorsehen von **Redundanzen** (mehrere Kopien von Subsystemen oder ganzen Systemen), um die Funktionalität mindestens eines Systems sicherzustellen, falls ein weiteres System ausfällt.

- Die **Erweiterbarkeit** von Sub-/Systemen, die modifiziert werden können, um die Funktion zu verbessern oder zu ändern (beispielsweise die Kombination allgemeiner Hardware mit aufrüstbarer Software)
- Die Gestaltung modularer Systeme (**Modularität**), die durch Standardschnittstellen so verbunden sind, dass ein Austausch von Subsystemen per "Plug and Play" möglich ist.

Der Einsatz von Abhilfemaßnahmen führt neben einer höheren Zuverlässigkeit und Robustheit ebenfalls zur Steigerung der (McManus et al. 2005):

- **Vielseitigkeit**, durch Erfüllung von Funktionen, die ursprünglich nicht in der Anforderungsdefinition enthalten waren.
- **Flexibilität**, als Fähigkeit des Systems, für Aufgaben, die ursprünglich nicht in der Anforderungsdefinition enthalten waren, modifiziert zu werden.
- **Entwicklungsfähigkeit** eines Systems, als Grundlage für neue Systeme / Generationen zu dienen, um neue Bedürfnisse zu erfüllen und/oder neue Fähigkeitsniveaus zu erreichen.
- **Kompatibilität** des Systems, "gut mit anderen zu interagieren", sowohl mit Systemen, für die es ursprünglich konzipiert wurde, als auch mit zukünftigen Systemen.

2.2 Qualitätssicherung in der Produktion

Aufgrund der mit dem Herstellungsprozess verbundenen Fertigungsabweichungen gefertigter Bauteile (aleatorischen Unsicherheit), ist es nicht möglich die theoretische Nenngeometrie des Produktes in der Produktion wiederholt herzustellen. Das Konzept der GPS wurde daher, neben der Toleranzspezifikation in der Produktentwicklung, zur Dualität mit der Qualitätssicherung in der Produktion erweitert. (ISO 2011) Durch die **Verifikation** individueller Bauteile wird es möglich, bestehende Unsicherheiten maßgeblich auf die Unsicherheit des Messprozesses zu reduzieren, vorausgesetzt die Spezifikationsunsicherheiten der Übereinstimmung und der Unbestimmtheit sind ausreichend gering (vgl. Kapitel 2.1.1) (Morse et al. 2018).

Ist diese Voraussetzung nicht gegeben reicht es in komplexen Fällen nicht mehr aus, nur die Konformität des Bauteils zur Spezifikation zu überprüfen, um die Funktionsfähigkeit des späteren Produktes zu beurteilen. Für einen funktionsorientierten Verifikationsprozess ist der Vergleich der gemessenen Merkmale im Zusammenhang mit der

geforderten Funktion erforderlich (siehe Abbildung 2-6). Die Gesamtunsicherheit lässt sich durch die funktionsorientierte Verifikation um die Unsicherheiten der Übereinstimmung und Spezifikation reduzieren. Insbesondere für Produktfunktionen, die stark von Merkmalen und Eigenschaften im Mikro- und Nanobereich beeinflusst werden, hat die Fokussierung auf eine funktionale Verifikation Vorteile. Um eine funktionsorientierte Bewertung zu ermöglichen, muss ein mathematisch-physikalisches Modell der Funktion, im Folgenden **Funktionsmodell** genannt, erstellt und in die gesamte Prozesskette integriert werden. (Weckenmann et al. 2013) Die Messung von Merkmalen unter geringer Messunsicherheit ist, neben einer hohen Modellgüte, maßgeblicher Faktor zur Reduzierung der Unsicherheit.

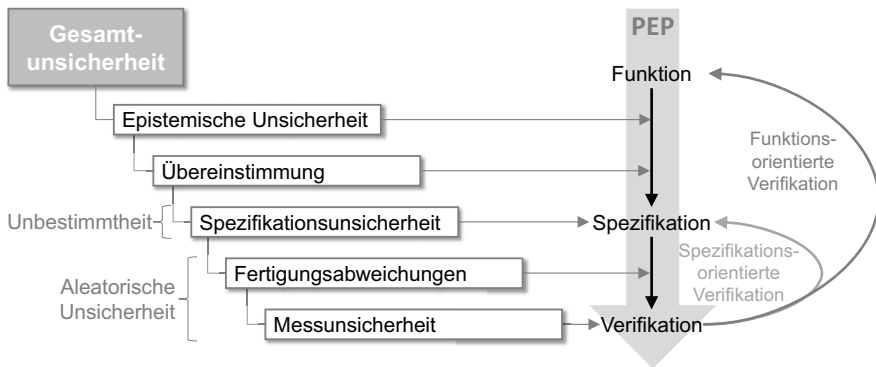


Abbildung 2-6: Unsicherheit und Verifikation der GPS im Produktentstehungsprozess (nach Weckenmann et al. 2013; ISO 2011)

Die Qualitätssicherung hat daher die essentielle Bedeutung, Daten und Informationen aus Messungen zu generieren, die eine Konformitätsbewertung der durchgeführten Prozessabschnitte mit den spezifizierten Qualitätsanforderungen zulässt (siehe Abbildung 2-5). Durch eine integrierte Qualitätsbewertung der Prozessergebnisse können Verbesserungsmaßnahmen der Prozessleistung (siehe Kapitel 2.2.1) mittels Qualitätsmanagementmethoden abgeleitet und an die Produktionssteuerung im Sinne eines Closed-Loop im Produktionssystem rückgeführt werden (siehe Abbildung 2-7). (DIN 2015; Weckenmann et al. 2014; Lanza et al. 2019)

Die Tätigkeit einer jeden Messung ist als experimentelles Aufnehmen eines oder mehrerer Werte durch einen Sensor festgelegt, denen durch Datenanalyse eine Messgröße zugeordnet wird (JCGM 2012). Die Messgröße besteht dabei aus einem Schätzwert,

der die Messgröße am besten repräsentiert, einer Einheit und einer zugeordneten Messunsicherheit, als halbe Spannweite eines zuvor festgelegten Konfidenzniveaus (JCGM 2008). Die Messunsicherheit ist dabei ein Parameter, der die Streuung der Werte charakterisiert, die auf Basis bekannter Informationen über den Messprozess der Messgröße zugeordnet werden können (JCGM 2012).

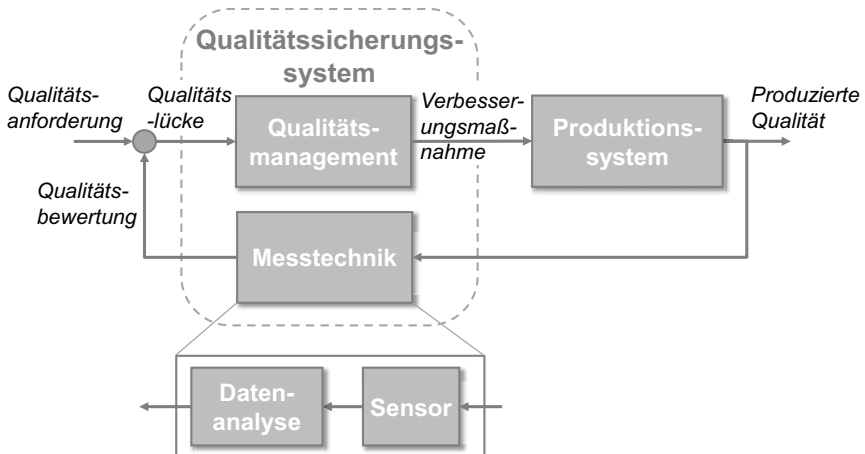


Abbildung 2-7: Systematisches Modell einer Closed-Loop Qualitätssicherung im Produktionssystemen (nach Lanza et al. 2019)

In dieser Arbeit werden prognostizierte Produktfunktionen nach dem erweiterten Verständnis des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) wie eine klassische, indirekt bestimmte Messgröße behandelt (JCGM 2008; Häfner 2017). Somit wird die Quantifizierung der Messunsicherheit für produktbezogene Funktionsprognosen im Rahmen der Bewertung zur Messprozesseignung möglich (siehe Kapitel 2.2.4).

Die in der Produktion anfallenden Prüf- und Messaufgaben lassen sich nach Geometrie-, Werkstoff- und Funktionsprüfung untergliedern (Imkamp et al. 2012). Funktionsprüfungen dienen als notwendige End-of-Line (EoL) Verifikation, wenn die Funktion nur schwer durch Produktspezifikationen (aus Spezifikationsunsicherheit, vgl. Kapitel 2.1.1) oder Funktionsmodellen zu definieren oder prognostizieren ist (Weckenmann et al. 2014).

2.2.1 Statistische Prozessregelung

Mit dem Konzept der statistischen Prozessregelung (engl. Statistical Process Control, SPC) wird es möglich eine laufende Serienproduktion anhand von Stichprobenmessungen durch Qualitäts- und Prozessmerkmale zu überwachen. Zunächst muss jedoch eine Prozessanalyse erfolgen, um die Voraussetzungen zu prüfen. Dazu wird das statistische Verhalten betrachteter Prozesse analysiert und einem Prozessmodell zugeordnet (siehe Tabelle 2-1). (DIN 2019)

Tabelle 2-1: Klassifizierung der zeitabhängigen Verteilungsmodelle (DIN 2019)

| Prozess- standard- abweichung $\sigma(x)$ | Prozessmittelwert $\mu(x)$ | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|--|
| | konstant | | | | nicht konstant | | | | |
| konstant | Kurzzzeitfähigkeit | A | | Lage | C | | | | |
| | | A1 | A2 | | C1 | C2 | C3 | C4 | |
| | | normal - verteilt | nicht normal - verteilt | | Kurzzeit- verteilung | zufällig | zufällig | systematisch (z.B. Trend) | systematisch und zufällig (z.B. los- weise) |
| | | | | | Resultierende Verteilung | normal- verteilt | normal- verteilt | normal- verteilt | normal- verteilt |
| Resultierende Verteilung | Resultierende Verteilung | B | | D | | | | | |
| | | Beliebige Form - eingipflig | | Beliebige Form | | | | | |

Voraussetzung für die Eignung von Prozessen ist der Nachweis der Stabilität und Fähigkeit des Fertigungsprozess, gemäß dem beschreibenden Prozessmodell (siehe Abbildung 2-8) (Morgenstern et al. 2009). Um die Leistung von Maschinen und Prozessen quantitativ bewerten zu können, werden Kennzahlen berechnet. Für die Prozessmodelle A1 und C1 geben die Fähigkeitskennzahlen Aufschluss darüber, in welchem Verhältnis die Prozessstreuung der Merkmalsverteilung zur Toleranz steht (C_p , siehe Formel 2-1) und ob die Maschine oder der Prozess zentriert ist, d.h. der Erwartungswert $\bar{x}_{i,j}$ eines Qualitätsmerkmals sich in der Toleranzmitte befindet (C_{pk} , siehe Formel 2-2).

(DIN 2019) Erfüllen die Fähigkeitskennwerte die Forderung $C_p, C_{pk} \geq 1,33$ in der Langzeituntersuchung, kann die SPC zur Prozesslenkung eingesetzt werden (VDA 2011).

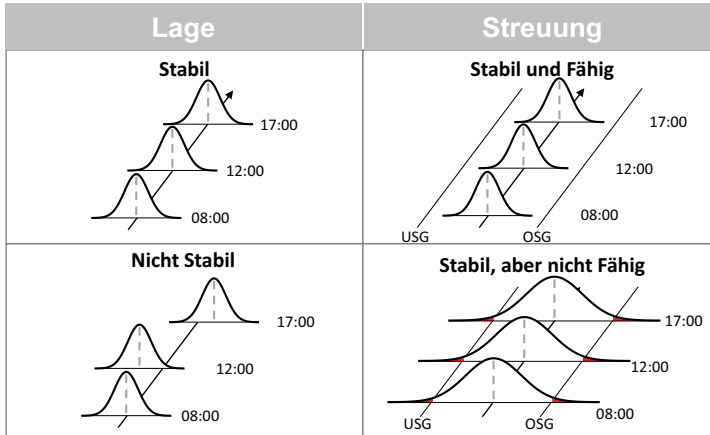


Abbildung 2-8: Klassifizierung der Prozessmodelle in Stabilität und Fähigkeit nach zeitlichem Verhalten von Lage und Streuung (nach Pfeifer 1993)

$$C_p = \frac{OSG - USG}{6s} \quad \text{Formel 2-1}$$

$$C_{pk} = \frac{\min(OSG - \bar{x}, \bar{x} - USG)}{3s} \quad \text{Formel 2-2}$$

Anhand von Qualitätsregelkarten werden Prozessstörungen auf Basis von Stichprobenmessungen erfasst, die beim Auftreten eine Ursachenanalyse und einen Prozessverbesserungsprozess nach sich ziehen. Die Eingriffsgrenzen einer Qualitätsregelkarte dienen während der SPC als Vergleichswert mit dem Merkmale stichprobenartig geprüft werden, ob deren Fertigungsprozess unter statistischer Kontrolle oder als gestört zu betrachten ist. Die Eingriffsgrenzen sind dabei nicht mit den Spezifikationsgrenzen zu verwechseln und werden anhand eines statistischen z-Tests in Abhängigkeit der Prozessstreuung und dem Stichprobenumfang berechnet. Die Irrtumswahrscheinlichkeit α_{error} des statistischen Tests gibt dabei die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Messwert außerhalb dieser Grenzen liegt, obwohl der vorliegende Prozess ungestört ist. Diese „fälschliche Ablehnung“ wird als Fehler 1. Art bezeichnet. Ebenso kann aufgrund des statistischen Charakters einer Stichprobe der gestörte Prozess nicht erkannt werden. Diese „irrtümliche Annahme“ wird als Fehler 2. Art bezeichnet. Diese dient als Ausgangspunkt

für die Bestimmung der Eingriffskennlinie einer Qualitätsregelkarte, anhand von Trennschärfeuntersuchungen (siehe Abbildung 2-10). (VDA 2017)

Mit der gewonnenen Kenntnis kann der Prozess wirksam wirtschaftlich beherrscht werden und damit sichergestellt werden, dass die durch den Prozess realisierten Produkte die geforderten Qualitätsanforderungen erfüllen. Der Einsatz von SPC ist für Merkmale mit hohen Qualitätsanforderungen teilweise nicht möglich, da die Voraussetzung der Prozessfähigkeit für Fertigungsprozesse nicht erfüllt wird (siehe Formel 2-1 und Formel 2-2). Eine Abhilfe bietet die produktionsintegrierte Fertigungsmesstechnik für die 100% Qualitätssicherung von Merkmalen. (Imkamp et al. 2012)

2.2.2 Produktionsintegrierte Fertigungsmesstechnik

Der Einsatz produktionsintegrierter Messtechnik in der Fertigungslinie ermöglicht eine frühe Detektion der Produktqualität und möglicher auftretender Fertigungsabweichungen bereits nahe oder im Wertschöpfungsprozess (Colledani et al. 2006; Lanza et al. 2019).

Die produktionsintegrierte Fertigungsmesstechnik (On-Shopfloor) kann in verschiedene Integrationsgrade unterteilt werden (Schmitt et al. 2008). Dabei wird unterschieden, ob die Messsysteme taktparallel Messungen durchführen und voll mit dem Fertigungsablauf und dem Informationsfluss synchronisiert sind (In-Line) oder für begleitende Stichprobenmessungen, neben der Produktionslinie zur Rückkopplung verwendet werden (Off-Line, siehe Kapitel 2.2.1) (Heizmann et al. 2011). Im Bereich der In-Line Messungen wird nochmals unterschieden, ob die Prüfungen direkt in die Fertigungsmaschine integriert (On-Machine) oder in der Fertigung integriert, aber an separaten Prüfstationen (Off-Machine) stattfinden. In der Fertigungsmaschine können Messungen während (In-Process) oder nach dem eigentlichen Bearbeitungsschritt (Off-Process) durchgeführt werden (siehe Abbildung 2-9). (Schmitt et al. 2011; Lanza et al. 2019)

Die Integration von In-Line Messtechnik ist im Vergleich zur reinen EoL- oder SPC-Prüfung (meist Off-Line) mit Mehraufwand verbunden. Ihr Einsatz vermeidet jedoch Wertschöpfung an fehlerhaften Produkten. Somit sind die In-Line Prüfkosten pro Bauteil für qualitätskritische Merkmale oft geringer als die kumulierten Wertschöpfungskosten nachfolgender Wertschöpfungsprozesse bereits defekter Bauteile. (Schmitt et al. 2008)

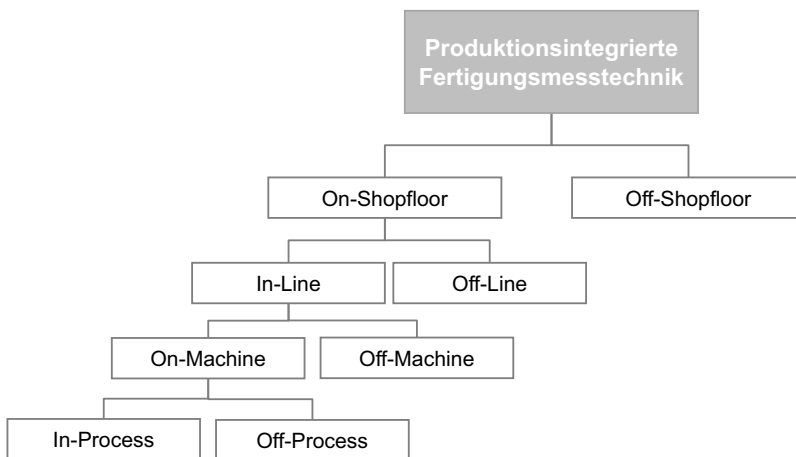


Abbildung 2-9: Integrationsgrade produktionsintegrierter Fertigungsmesstechnik in die Produktionslinie (Lanza et al. 2019)

Ein weiterer Vorteil der In-Line Messtechnik besteht in der Möglichkeit zur 100% Qualitätssicherung von Merkmalen und Eigenschaften aus nicht-fähigen, instabilen und unreifen Prozessen, für welche die Voraussetzungen der SPC nicht erreicht werden (siehe Kapitel 2.2.1) (Imkamp et al. 2012; Lanza et al. 2019). Durch die 100%-Inspektion qualitätskritischer Merkmale im Takt wird ein kontinuierlicher Informationsfluss für die vollständige Rückkopplung und Echtzeit-nahe Qualitätsregelung, mit Verbesserungsmaßnahmen in der Produktion, ermöglicht (siehe Kapitel 3.2.2) (Brunner et al. 2011).

Großes Potential zur Risikominderung ist vor allem dann gegeben, wenn die Produktqualität direkt mit der Produktfunktion (Leistungsrisiko) beziehungsweise dem Markenimage des Unternehmens verknüpft ist (Markt- und Geschäftsrisiken) (Morse et al. 2018). Gleichzeitig bestehen hohe Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit und Messunsicherheit der In-Line Messgeräte, auch in rauer Produktionsumgebung (siehe Kapitel 2.2.3).

2.2.3 Qualitätssicherung hochpräziser Produkte

Die Entstehung von Produkten, die hohen Funktionsanforderungen oder Umgebungsbedingungen unterliegen, bedarf besonderer Beachtung. Abhilfemaßnahmen der Produktentwicklung, wie beispielsweise die robuste Wahl von Konstruktionsparametern und –alternativen („Robust Designs“), besitzen in manchen Fällen nicht ausreichend

Gestaltungsfreiheit, um das Leistungsrisiko, zur Funktionssicherstellung von Produkten, ausreichend abzusichern. Die Sensitivität der Produkte gegenüber Fertigungsabweichungen, veränderlicher Nutzungsumgebung oder Verschleiß (aleatorische Unsicherheit) bleibt daher hoch. Die Folge sind hohe Qualitätsanforderungen, mit geometrischen Spezifikationen im (Sub-) Mikrometerbereich, um die Produktfunktion sicherzustellen (siehe Kapitel 2.1.2). (Morse et al. 2018)

Der Qualitätssicherung hochpräziser Produkte, deren Bauteile sehr hohen Qualitätsanforderungen unterliegen, kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund des hohen Leistungsrisikos ist häufig eine Abhilfemaßnahme zur Risikominderung notwendig (ISO 2011). Die 100% Qualitätssicherung, durch hochgenaue In-Line Messungen, bietet die Möglichkeit zur Risikominderung durch bauteilindividuellen Verifikation. (Imkamp et al. 2012; ISO 2011)

Die Messunsicherheit hat einen besonders hohen Einfluss bei der Qualitätsprüfung von Bauteilen mit engen Toleranzanforderungen (Moroni et al. 2014). Eine Verifikation unter möglichst geringer Unsicherheit ist daher unter technischen Gesichtspunkten erstrebenswert. Technologische Grenzen und Störeinflüsse begrenzen jedoch den prozessintegrierten Einsatz von Sensorik. Für die Messung von Merkmalen mit engen Toleranzanforderungen besteht die Gefahr von Prüf Fehlern (1. Art: zu Unrecht abgelehnte und 2. Art: falsch akzeptierte Merkmale, vgl. Kapitel 2.2.1) aufgrund der auftretenden Messunsicherheit (siehe Abbildung 2-10). (Savio 2012; Mohammadi et al. 2015)

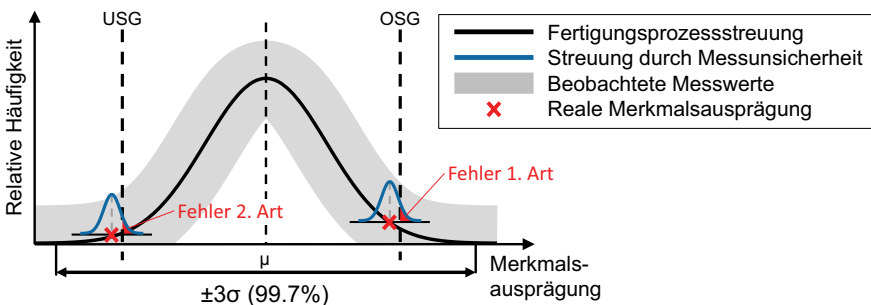


Abbildung 2-10: Beobachtete Fertigungsmesswerte als Überlagerung von Fertigungsabweichung und Messunsicherheit des Messverfahrens (eigene Darstellung)

Mit steigender erweiterter Messunsicherheit U des verwendeten Messprozesses reduziert sich der Übereinstimmungskorridor, der eine eindeutige Konformitätsbewertung der Fertigungsabweichungen des Fertigungsprozesses zulässt (siehe Abbildung 2-11).

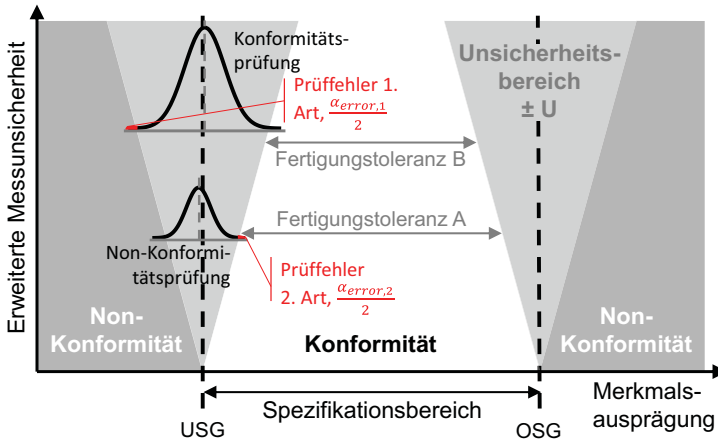


Abbildung 2-11: Auswirkung der Messunsicherheit auf Konformitätsbewertung für Merkmale (nach DIN 2018)

Folglich reduziert sich die verfügbare Produktspezifikation für die Fertigung von Merkmalen um die erweiterte Messunsicherheit zur Fertigungstoleranz TOL_{Fert} (siehe Formel 2-3). (DIN 2018)

$$TOL_{Fert} = (OSG - U) - (USG + U) = OSG - USG - 2U \quad \text{Formel 2-3}$$

Messsysteme mit geringer Messunsicherheit (aleatorische Unsicherheit) können daher für die Verifikation hochpräziser Merkmale in der Serienproduktion, durch Vermeidung von Prüffehlern und der Aufweitung der verfügbaren Fertigungstoleranz, trotz gesteigerter Prüfkosten, wirtschaftlich sein (siehe Kapitel 3.2.3) (Moroni et al. 2014; Savio 2012). Die Bewertung der Messprozesseignung durch Quantifizierung der Messunsicherheit für eingesetzte Messprozesse wird in Kapitel 2.2.4 aufgegriffen.

2.2.4 Verfahren zur Bewertung der Messprozesseignung

In der Produktion eingesetzte Messmittel haben die Anforderung, die jeweilige Messaufgabe mit möglichst geringer Messunsicherheit für die Qualitätsprüfung hochpräziser

Bauteile zu erfüllen (siehe Kapitel 2.2.3) (Moroni et al. 2014). Daher ist die Unsicherheitsquantifizierung zur Bewertung eingesetzter Messprozesse von großer Bedeutung. Eine universell vergleichbare Messunsicherheitsermittlung ist im internationalen Leitfaden „*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*“ (GUM) definiert. Die erweiterte Messunsicherheit U ist dabei der maßgebliche Parameter, um die Streuung der Werte zu charakterisieren, die als Ergebnis einer Messgröße zugeordnet werden können. (JCGM 2008)

In den meisten Fällen wird eine Messgröße Y indirekt aus l anderen Eingangsgrößen X_1, X_2, \dots, X_l über eine mathematische Gleichung f , auch Modellgleichung genannt, bestimmt (siehe Formel 2-4) (JCGM 2008; JCGM 2012).

$$Y = f(X_i) \quad \text{mit } i = 1, 2, \dots, l \quad \text{Formel 2-4}$$

Der Schätzwert y der Messgröße Y ergibt sich aus den Schätzwerten x_i der Eingangsgrößen X_i und der Modellgleichung f . Die Ermittlung der zugehörigen erweiterten Messunsicherheit U kann nach GUM entweder analytisch experimentell erfolgen (siehe Kapitel 2.2.4.1) oder, falls die Modellgleichung nur als Algorithmus vorliegt, auch numerisch simulativ ausgewertet werden (siehe Kapitel 2.2.4.2). (JCGM 2008)

2.2.4.1 Analytische Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM

Jede Eingangsschätzung x_i und die zugehörige Standardunsicherheit $u(x_i)$ ergeben sich aus der Verteilung möglicher Werte der Eingangsgrößen X_i . Diese Wahrscheinlichkeitsverteilung kann auf der Grundlage experimenteller Häufigkeitsverteilungen einer Reihe von Beobachtungen $x_{i,k}$ von X_i , (Typ A) oder durch a priori Verteilung (Typ B) auf Information aus anderer Quelle (beispielsweise Herstellerangaben, Kalibrierchein, Expertenwissen, etc.) basieren (siehe Abbildung 2-12). (JCGM 2008)

Die einzelnen Beobachtungen $x_{i,k}$ zur experimentellen Bestimmung (Typ A) unterscheiden sich im Wert durch zufällige Schwankungen der Einflussgrößen X_i , oder zufällige Effekte (jeweils aleatorische Unsicherheit). Die Varianz σ^2 der Wahrscheinlichkeitsverteilung von X_i wird als experimentelle Varianz der Beobachtungen s^2 geschätzt (siehe Formel 2-5). Die experimentelle Standardabweichung $s(\xi^l)$ ergibt sich aus der positiven Quadratwurzel der experimentellen Varianz s^2 (siehe Formel 2-6).

$$s^2(\xi_i) = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\xi_i - \bar{\xi})^2$$

Formel 2-5

$$s(\xi_i) = \sqrt{s^2(\xi_i)}$$

Formel 2-6

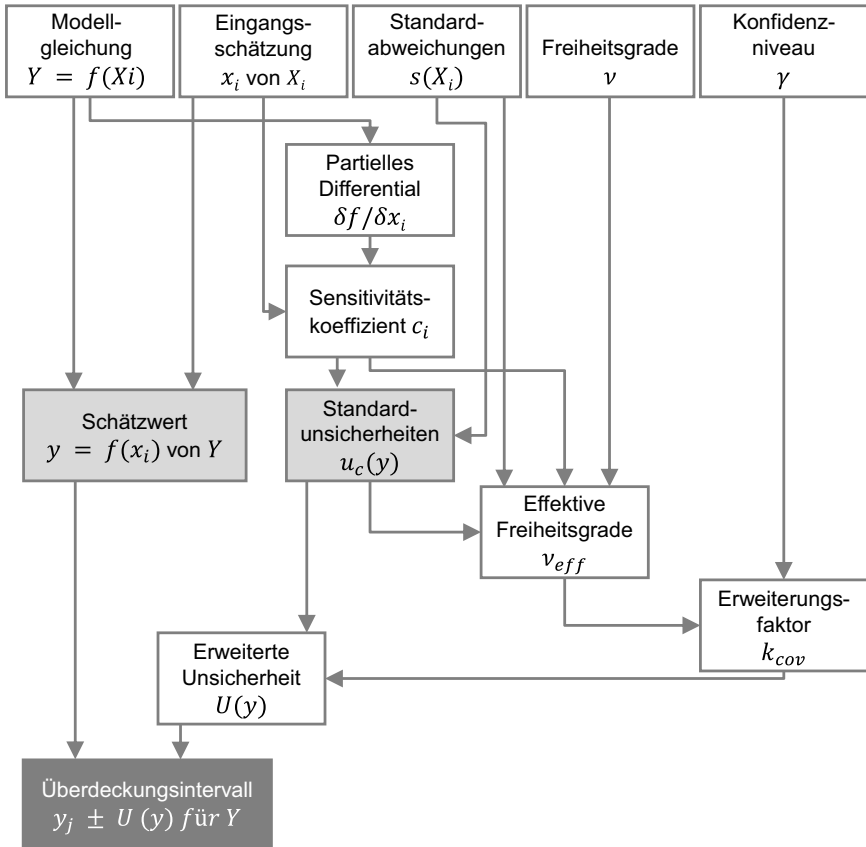


Abbildung 2-12: Unsicherheitsquantifizierung mit dem GUM Framework für eine univariate, reale Modellgleichung mit unabhängigen Eingangsgrößen (nach Cox et al. 2010)

Die experimentell ermittelte Varianz und Standardabweichung quantifizieren, wie gut das Messergebnis y den Erwartungswert $\mu(X_i)$ schätzt und können daher als Maß für die Unsicherheit der Eingangsgrößen verwendet werden. Die experimentelle Ermittlung

basiert auf der Annahme einer angemessenen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und einer ausreichend großen Grundgesamtheit. Auftretende Kovarianzen $COV(X_i, X_j)$ der Eingangsgrößen X_i, X_j müssen ebenfalls berücksichtigt werden. (JCGM 2008)

Mittels einer Taylorreihenentwicklung 1. Ordnung (Sensitivitätskoeffizienten c_i) der Modellgleichung f und der Standardunsicherheiten der Eingangsgrößen $u(X_i)$ kann die kombinierte Messunsicherheit der Messgröße u_c bestimmt werden (siehe Formel 2-7) (JCGM 2008).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N (c_i u(x_i))^2 \quad \text{mit } c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Formel 2-7}$$

Die erweiterte Messunsicherheit U errechnet sich mit dem Erweiterungsfaktor k aus der Standardunsicherheit $u(y)$ (siehe Formel 2-8). Oftmals wird für die Messwerte eine Normalverteilung angenommen und als Konfidenzniveau $\gamma = 95\%$ Überdeckung ($k_{cov} = 2$) gewählt. (JCGM 2008) Abbildung 2-12 visualisiert das analytische Vorgehen zur Unsicherheitsquantifizierung nach GUM.

$$U(y) = k_{cov} u_c(y) \quad \text{Formel 2-8}$$

2.2.4.2 Simulative Messunsicherheitsermittlung nach GUM Supplement 1

Alternativ zur analytischen Messunsicherheitsermittlung kann die Ermittlung auch numerisch simulativ mittels Monte-Carlo Verfahren nach GUM Supplement 1 erfolgen (siehe Abbildung 2-13) (JCGM 2008).

Ebenfalls, wie in der analytischen Vorgehensweise, gehen die Modellgleichung f , die Eingangsgrößen X_i und deren Kovarianzen in das simulative Verfahren ein. Die Ermittlung der erweiterten Unsicherheit erfolgt durch wiederholte Zufallsexperimente. Für die Eingangsgrößen X_i wird für jedes Zufallsexperiment ein Zufallswert nach den hinterlegten Wahrscheinlichkeitsverteilungen $g(X_i)$ erzeugt und anhand der Modellgleichung die Messgröße bestimmt. Aus M Wiederholungen der Zufallsexperimente ergibt sich eine diskrete Häufigkeitsverteilung $G(Y)$. Aus dieser Verteilungsfunktion kann anschließend ein Schätzwert y der Messgröße als Mittelwert, die Standardunsicherheit $u(y)$ als empirische Standardabweichung $s(y)$ sowie das Konfidenzintervall, gemäß vorgegebenem Konfidenzniveau γ , für die Modellgleichung ermittelt werden. (JCGM 2008) Die Anzahl der Ziehungen $M = 10^6$ wird standardmäßig angenommen, kann jedoch auch

mittels eines zweistufigen, adaptiven Verfahrens für eine vorgegebene numerische Genauigkeit bestimmt werden (Wübbeler et al. 2010).

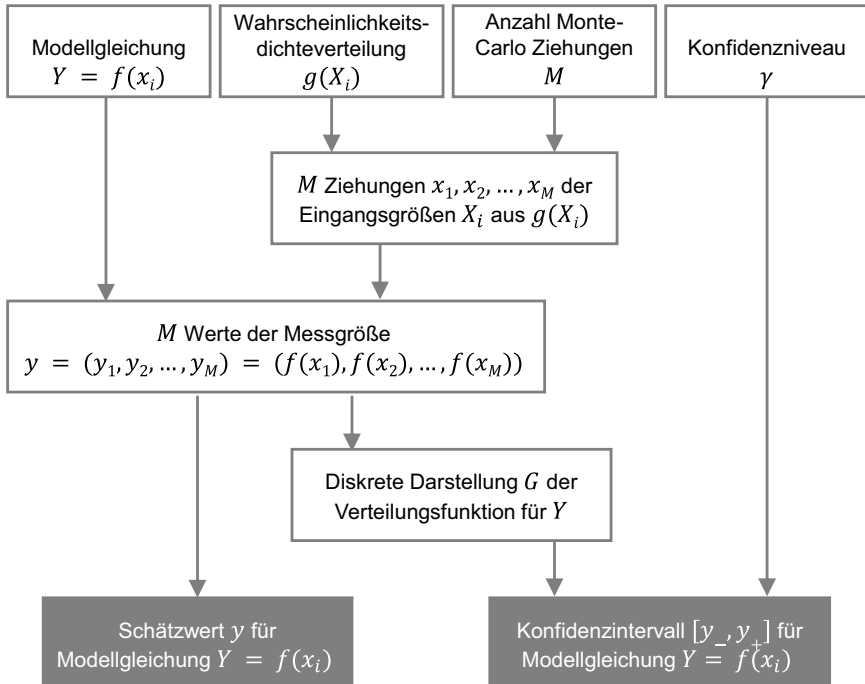


Abbildung 2-13: Unsicherheitsquantifizierung mit der GUM Monte-Carlo Methode für eine univariate, reale Messfunktion (nach Cox et al. 2010)

Vorteil der Methode ist das flexible Vorgehen zur Unsicherheitsermittlung, insbesondere für nichtlineare Modelle und beliebige Verteilungen (Wübbeler et al. 2008). Divergieren die Ergebnisse aus dem analytischen und dem simulativen Verfahren, sollte im Zweifel das Ergebnis der Monte-Carlo Methode vorgezogen werden (JCGM 2008).

2.2.4.3 Messprozesseignung

Im Folgenden wird die Messprozesseignung nach VDA Band 5 vorgestellt. Weitere Vorgehensweisen bieten beispielsweise Firmenrichtlinien und die Messunsicherheitsanalyse nach AIAG (MSA), die allerdings Unsicherheiten aus dem Objekteinfluss, der Temperatur, der Messbeständigkeit sowie weiterer Einflussfaktoren nicht berücksichtigt (AIAG 2010; Dietrich et al. 2017).

Zur Bewertung der Messprozesseignung muss die Qualität des Messergebnisses, wie in den zuvor beschriebenen Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit, bekannt sein. VDA Band 5 orientiert sich dabei am GUM, unterscheidet jedoch die erweiterte Messunsicherheit des Messsystems U_{MS} und des Messprozesses U_{MP} . Die Aufteilung bietet damit die Möglichkeit, den Einfluss des Messsystems unabhängig vom Anwendungsfall zu qualifizieren. Erfüllt das Messsystem die Anforderungen, erfolgt die Beurteilung des gesamten Messprozesses. (Dietrich et al. 2017; VDA 2011)

Der Eignungsnachweis des Messprozesses erfolgt durch den Abgleich des Eignungskennwertes Q_{MP} , der sich aus der erweiterten Unsicherheit U_{MP} und Toleranzspezifikation OSG bzw. USG berechnet (siehe Formel 2-9). Als Grenzwert wird $Q_{MP,Max} = 30\%$ empfohlen, der zur Messprozesseignung nicht überschritten werden sollte (siehe Formel 2-10). (VDA 2011)

$$Q_{MP} = \frac{2 U_{MP}}{OSG - USG} 100\% \quad \text{Formel 2-9}$$

$$Q_{MP} < Q_{MP,Max} = 30\% \quad \text{Formel 2-10}$$

2.2.5 Qualitätsregelung in der Produktion

Steigen die Produktionskosten für die Herstellung hochpräziser Produkte stark an und/oder sind die erforderlichen Toleranzen zur Sicherstellung der Produktfunktion jenseits technologischer Grenzen der Fertigungsprozesse mit ausreichender Produktivität spezifiziert, müssen alternative Maßnahmen ergriffen werden, um die Qualitätsanforderung in der Herstellung hochpräziser Produkte wirtschaftlich sicherzustellen. Ein Ansatz ist der Einsatz von Qualitätsregelkreisen in der Produktion. (Lanza et al. 2015)

Qualitätsregelkreise beschreiben formalisierte, maschinenübergreifende Regeln im Sinne des Closed-Loop auf organisatorischer Ebene eines Produktionssystems, deren Reaktion auf Fertigungsabweichungen (z. B. geometrische Abweichungen zum spezifizierten Merkmal) das Ziel hat, die Produktqualität zu erhöhen.

2.2.5.1 Bauteilidentifikation als Voraussetzung für den Einsatz der Qualitätsregelung

Aktuelle Entwicklungen der Echtzeit-nahen Informationsverarbeitung und Datenkommunikation halten vermehrt Einzug in das industrielle Umfeld der Produktion. Neue Sensoren für die individuelle Bauteilrückverfolgung und kostengünstige Sensorik zur fertigungsintegrierten In-Line Messung im Produktionstakt (siehe Kapitel 2.2.2) ermöglichen die Echtzeit-nahe Erfassung bauteilindividueller Prozess- und Qualitätsdaten über den gesamten Wertstrom hinweg (Colledani et al. 2014b). Ihr Einsatz ist erforderlich, um notwendige Informationen für die Qualitätsregelung bereitzustellen.

Die Bauteilidentifikation schafft die Basis für ein aktuelles Systemabbild in Qualität aber auch in Material, Ressourcen und Prozessständen. Produzierende und logistische Prozesse können durch den Entfall manueller Rückmeldung sicher und fehlerfrei gemacht werden. (Hippenmeyer et al. 2016) Gleichzeitig wird eine eindeutige Zuordnung spezifischer Prozess- und Sensordaten befähigt, die es erlaubt Produkt- und Produktionsdaten zu verknüpfen (Monostori et al. 2009).

In industriellen Bereichen hat sich die Identifikation mittels Erfassung elektronischer Radiofrequenzen (zum Beispiel Radio Frequency Identification-Technology, RFID; und Ultra Wide Band-Technology, UWB) und optischer Merkmale mit eindeutiger Markierungen (zum Beispiel Barcodes und Data Matrix Codes, DMC) durchgesetzt (Huang et al. 2017; Hippenmeyer et al. 2016; Hockauf et al. 2014). Aber auch „natürliche“ Identifizierungsmerkmale, wie beispielsweise die Oberfläche von Produkten, die zuvor technische Bearbeitungsprozesse durchlaufen haben, weisen ohne zusätzliche Markierung einzigartige, zufällige Strukturen zur eindeutigen optischen Wiedererkennung auf (Breidenstein et al. 2016; Hockauf et al. 2014; Hippenmeyer et al. 2016). Dabei wird auf Basis hochauflösender Bilder die Oberflächenstruktur und Farbtextur geschliffener Oberflächen anhand der kontinuierlichen Wavelet-Transformation in ihren spezifischen Wellenlängen charakterisiert und anschließend durch Non-Maxima-Suppression in eine numerische Kennung überführt. Die Kennung kann anschließend gemeinsam mit Prozess- und Qualitätsdaten in einer Datenbank hinterlegt und bei späterer Wiedererkennung mit Random Sample Consensus Algorithmen robust abgeglichen, ergänzt und abgerufen werden. (Breidenstein et al. 2016) Erste Studien für den industriellen Serieneinsatz sind bereits in Demonstration (Breidenstein et al. 2016; Fraunhofer IPM 2019).

Für die Verknüpfung, Aufbereitung und Verarbeitung der Daten ist eine entsprechende IT-Infrastruktur, bspw. ein Manufacturing Execution System (MES) und eine Datenbank zur Datenspeicherung und -verwaltung notwendig. Das MES ist direkt an verteilte Systeme der Prozesssteuerung angebunden und ermöglicht die Datenerfassung von Qualitäts-, Betriebs-, Maschinen-, Personal- und Identifikationsdaten, sowie aller weiteren Prozesse mit Auswirkung auf den Produktionsprozess. Neben der Datenaufbereitung erfolgt durch ein MES die Führung, Steuerung und Kontrolle der Produktion. (Binner 2014) Der Einsatz eines MES (mit Computer-Aided-Quality Modul, CAQ) zur Anbindung und Verarbeitung der erhobenen Daten sowie zur Ausführung maschinenübergreifender Regeln ist ebenfalls Voraussetzung zur Zusammenführung, Verarbeitung und Steuerung der Ansätze zur Qualitätsregelung in der Produktion.

2.2.5.2 Framework zur Qualitätsregelung

Sind die in Kapitel 2.2.5.1 vorgestellten, notwendigen Voraussetzungen gegeben, ist der Einsatz selbstregelnder cyberphysischer Systeme (CPS) mit wissensbasierten Datenanalysen und intelligenter Interaktion physischer Elemente möglich (Monostori et al. 2016; Schmitt et al. 2010). Qualitätsregelkreise werden durch den Einsatz einer adaptiven Steuerung auf technisch-organisatorischer Ebene des Produktionssystems solcher CPS befähigt (Eger et al. 2018; Schmitt et al. 2010). Abweichungen funktionskritischer Produktmerkmale können durch geeignete Anpassung oder Auswahl der geeigneten Partner kompensiert werden (Colledani et al. 2014a). Der Einsatz von Qualitätsregelkreisen ist in Situationen geeignet, in denen die technologischen Grenzen der Fertigungsprozesse erreicht sind oder in denen durch Prozessverbesserung (vgl. SixSigma etc.) keine weitere Streuungsreduzierung zu erwarten ist (Mease et al. 2004). Der Qualitätsregler als Bestandteil eines MES berücksichtigt Prozessparameter, In-Line Messungen und weitere Informationen des Produktionssystems, um eine optimale Reaktion zu ermitteln und rückzuführen (Schmitt et al. 2010). Verschiedene Regelkreis-konzepte zur Steigerung der Produktqualität können in den jeweiligen Stufen der Wertschöpfung implementiert werden (siehe Abbildung 2-14).

Im geschlossenen Regelkreis der Montage werden geeignete Partner justiert bzw. ausgewählt, um Merkmalsabweichungen zu kompensieren (Tsutsumi et al. 2018; Ebrahimi 2014). Im Regelkreise der Fertigung werden Sollwerte in vorgelagerten Fertigungsprozessen einzelner Komponenten statistisch angepasst um Qualitätsanforderungen zu erfüllen (Matsuura et al. 2011; Schmitt et al. 2010).

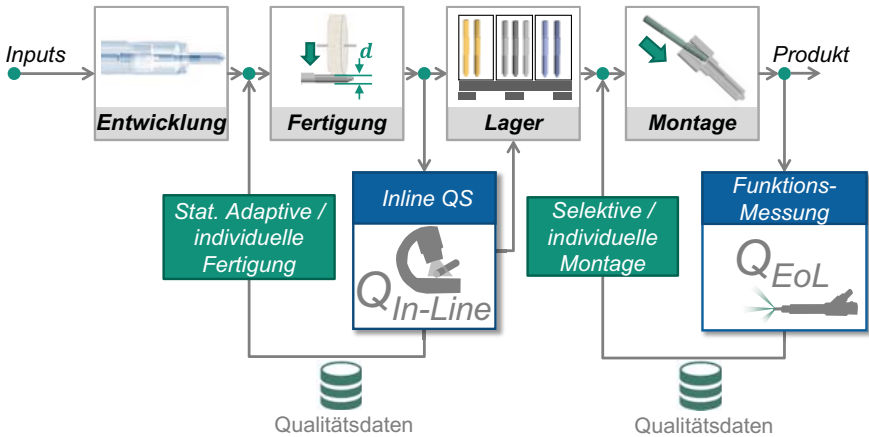


Abbildung 2-14: Qualitätsbasierte Regelkreise zur Sicherstellung der Qualitätsanforderungen hochpräziser Produkte, eigene Darstellung

Für bestehende Regelkreise sind unterschiedliche Auswahl- und Anpassungsstrategien möglich. Im Folgenden wird ein Framework vorgestellt, das die produktionstechnischen Reaktionsmaßnahmen und deren Kombinationsmöglichkeiten zur Qualitätsregelung einordnet. Darin werden bestehende Ansätze in Strategien der Fertigung und Strategien der Montage unterteilt und nach organisatorischer Komplexität (Bauteilrückverfolgung, Logistik, Steuerung) und erreichbarer Individualisierung (erreichbare Qualitätsanforderung) kategorisiert (siehe Abbildung 2-15).

Bereits bei der Planung neuer Produktionslinien können Qualitätsregelkreise für Herstellungsprozesse funktionskritischer Merkmale systematisch geplant werden (Haefner et al. 2014; Tsutsumi et al. 2018).

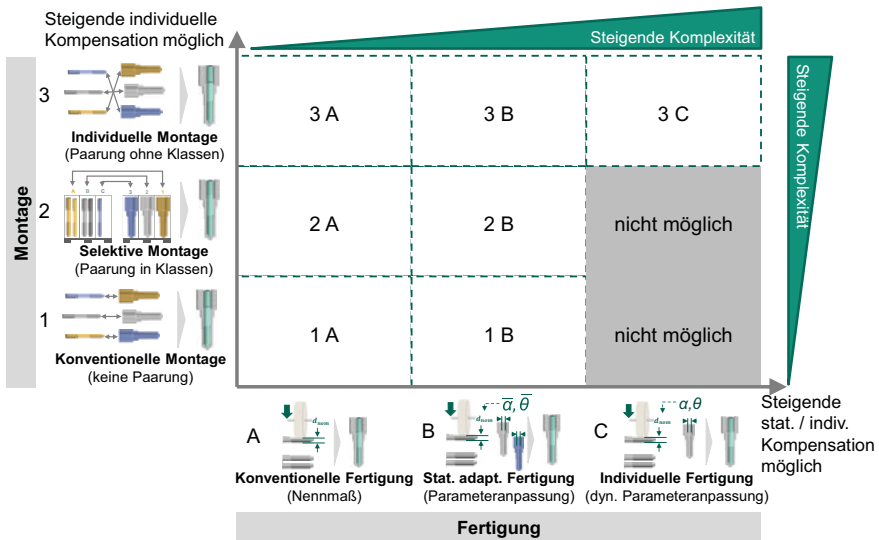


Abbildung 2-15: Framework möglicher Strategien zur Qualitätsregelung, eigene Darstellung

2.2.5.3 Montagestrategien der Qualitätsregelung

Innerhalb der Montagestrategien ist die **konventionelle Montage** (siehe Abbildung 2-15, Montagestrategie $M(x_i) = 1$), das Fügen zweier oder mehr zufällig ausgewählter, zugehöriger Bauteile, am häufigsten in der Industrie vorzufinden. In diesem Szenario sind vorhergehende Fertigungsprozesse stabil und fähig, funktionskritische Qualitätsanforderungen wirtschaftlich herzustellen (siehe 2.2.1). Die Austauschbarkeit der Bauteile in der Montage ist aufgrund geringer Merkmalsabweichungen in der Fertigung für nahezu alle Kombinationen gegeben (Babu et al. 2014). Es sind keine zusätzlichen Ansätze der Qualitätsregelung erforderlich. Die Toleranzstreuung der Montagebaugruppe ergibt sich aus den beiden Fertigungsprozessstreuungen als Ergebnis der Worst-Case Betrachtung (Babu et al. 2014) (siehe Abbildung 2-16).

Können sehr hohe Qualitätsanforderungen dennoch nicht sichergestellt werden ist eine In-Line Qualitätskontrolle notwendig (Colledani et al. 2014c). Abhängig von Produktdesign und verfügbaren Fertigungsprozessen, ist eine zusätzliche Nacharbeit oder auch Justierprozesse zur Sicherstellung der Produktfunktion wirtschaftlich. (Tsutsumi et al. 2018; Peter et al. 2014; Iyama et al. 2013)



Abbildung 2-16: Prinzipdarstellung der konventionellen Montage und resultierenden Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiels im Düsenmodul, eigene Darstellung

Die **selektive Montage** (siehe Abbildung 2-15, Montagestrategie $M(x_i) = 2$) beschreibt ein Verfahren zur Qualitätssteigerung hochpräziser Produkte durch eine gezielte Kompensation der Abweichungen, die in unterschiedlichen Fertigungsprozessen entstehen (Mease et al. 2004). In diesem Szenario ist das Prozessmodell mindestens eines Fertigungsprozess zur Herstellung funktionskritischer Bauteilmerkmale nicht fähig. Die konventionelle Montage von Bauteilen würde in einem zu hohen Anteil fehlerhafter Produkte (Ausschuss) resultieren. Die selektive Montage mindert die auftretende Fertigungsstreuung, indem gefertigte Bauteile zu 100% gemessen (Verifikation) und anschließend anhand ihrer Messergebnisse in Maßklassen eingeteilt werden. Bauteile einer Maßklasse werden anschließend im Montageprozess zu einem oder mehreren zugehörigen Paarungsbauteilen derart zugeordnet, dass die erforderlichen Qualitätsanforderungen möglichst optimal erfüllt werden (Kumar et al. 2007; Asha et al. 2008; Kannan et al. 2009). Der zusätzliche organisatorische Aufwand resultiert in einer engeren Streuung der Merkmalspaare, für die montierten Produkte, durch individuelle Kompensation (siehe Abbildung 2-17) (Mease et al. 2004).

Das Design der Maßklassenaufteilung und -zuordnung spielt dabei eine zentrale Rolle für die Produktqualität, als auch die entstehenden Aufwände und verbleibenden Restkomponenten (Kumar et al. 2007). Gegenstand vieler Forschungsarbeiten ist es daher eine möglichst optimale Aufteilung der Maßklassen zu entwickeln.



Abbildung 2-17: Prinzipdarstellung der selektiven Montage und resultierenden Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiels im Düsenmodul, eigene Darstellung

Die **individuelle Montage** (siehe Abbildung 2-15, Montagestrategie $M(x_i) = 3$) hat zum Ziel, den in der selektiven Montage gegebenen Informationsverlust, durch Klassenbildung, zu reduzieren. Bauteile werden in dieser Montagestrategie nicht in Maßklassen sortiert, sondern ihr genaues Messergebnis in Kombination mit dem Lagerort gespeichert und in der bauteilindividuellen Selektion der Paarungsbauteile weiterverwendet. Im Vergleich zur selektiven Montage ist eine höhere organisatorische Komplexität bei der bauteilindividuellen Rückverfolgung und Lagerung erforderlich, um die individuelle Montage zu realisieren. Der Ansatz resultiert jedoch in deutlich geringeren erreichbaren Merkmalsstreuungen und erfüllt damit höchste Qualitätsanforderungen (siehe Abbildung 2-18). (Meyer et al. 2016)



Abbildung 2-18: Prinzipdarstellung der individuellen Montage und resultierender Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiels im Düsenmodul, eigene Darstellung

2.2.5.4 Fertigungsstrategien der Qualitätsregelung

Innerhalb der Fertigungsstrategien beschreibt die **konventionelle Fertigung** (siehe Abbildung 2-15, Fertigungsstrategie $F(x_i) = A$) den gängigen Ansatz der Fertigung von Bauteilen nach ihrer Spezifikation auf den fest vorgegebenen Sollwert. Mit vielen Fertigungsverfahren wird eine hohe Präzision bei gleichzeitig hoher Produktivität erreicht. Häufig können Merkmale eines Montagepartners jedoch statistisch gesehen mit geringeren Fertigungsabweichungen gefertigt werden, als die Merkmale des zugehörigen Baugruppenpartners. So können beispielsweise Wellen in der Regel mit gleicher Fertigungstechnologie präziser hergestellt werden als Bohrungen (Kumar et al. 2007). Auftretende Merkmalsabweichungen basieren auf technologischen Effekten oder externen Störfaktoren im Herstellungsprozess. Während der Prozessfähigkeitsanalyse werden die Abweichungen in Fähigkeit (vgl. Merkmalstreuung) und Stabilität (z. B. Merkmaltrends) unterschieden (siehe Kapitel 2.2.1).

Mit dem Ansatz der **statistisch adaptiven Fertigung** (siehe Abbildung 2-15, Fertigungsstrategie $F(x_i) = B$) können Stabilitätseffekte qualitätskritischer Merkmale in Prozessen statistisch kompensiert werden. Die statistische Gesamtheit der qualitätskritischen Merkmale, die sich aktuell im Produktionssystem befinden, dient als Grundlage zur Anpassung. Ein zugehöriger Bauteilpartner wird durch Anpassung des Sollwerts im Fertigungsprozess so hergestellt, dass die resultierende Toleranzstreuung im statistischen Mittel reduziert wird (siehe Abbildung 2-19).



Abbildung 2-19: Prinzipdarstellung der statistisch adaptiven Fertigung und resultierenden Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiel im Düsenmodul, eigene Darstellung

Der Ansatz der **individuellen Fertigung** (siehe Abbildung 2-15, Fertigungsstrategie $F(x_i) = C$) stellt das bauteilindividuelle Fertigen eines Bauteils für einen individuellen zugehörigen Bauteilpartner dar. Anhand des In-Line gemessenen Merkmals des Bauteilpartners wird der individuelle Fertigungsnennwert für die zugehörige Instanz ermittelt und gefertigt. Anschließend werden diese beiden Bauteilpartner zusammen montiert (individuelle Montage) (siehe Abbildung 2-20). Voraussetzung zur Umsetzung der individuellen Fertigung ist die individuelle Fertigungsprozesseignung der geforderten Merkmalspezifikation des zu fertigenden Partners. In industriellen Anwendungsfällen eignen sich ausschließlich Feinbearbeitungsprozesse, wie beispielsweise spitzenloses Schleifen.



Abbildung 2-20: Prinzipdarstellung der individuellen Fertigung und resultierenden Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiels im Düsenmodul, eigene Darstellung

2.3 Modelle und Simulation

Modellbildung und deren Simulation dienen dem Zweck der Analyse und Validierung eines Systems, indem sein Verhalten nachgebildet wird, um dieses besser zu verstehen (Shannon 1998). Mit Hilfe digitaler Simulationsstudien lassen sich komplexe Systeme abbilden. Deren Ergebnisse liefern alternativ zu Experimenten eine Entscheidungsgrundlage, um die Planung von Systemen und Prozessen abzusichern und zu verbessern. Die daraus gewonnen Erkenntnisse über Ursachen des dynamischen Systemverhaltens sind in Realität nicht oder nur mit hohem Aufwand experimentell abbildbar und lassen sich auf die Wirklichkeit übertragen (siehe Kapitel 2.1). Die Wirkung von Veränderungen auf ein Produkt/System kann durch Simulationen ermittelt werden, um es bereits in der Planungsphase zu optimieren. Aber auch in der Realisierungs- und Betriebsphase ermöglichen Simulationen einen Beitrag, beispielsweise durch die Charakterisierung des Anlaufverhaltens und die vergleichende Bewertung verschiedener kurzfristiger und situationsabhängiger Ablaufvarianten in der Produktion. (VDI 2014)

Zur Modellierung von Systemen werden während der **Systemdefinition** die Systemgrenze zur Umgebung definiert, sowie die innere und äußere Struktur, Wechselwirkungen, Zustandsgrößen und Parameter des Systems festgelegt. Grundsätzlich wird im weiteren Vorgehen zwischen zwei Konzepten unterschieden: Mittels **Systemanalyse** kann aus bekanntem Systemverhalten auf die Struktur des Systems geschlossen werden. Im Unterschied dazu liegt während der **Systemsynthese** Strukturwissen und das Verhalten von Systemkomponenten vor, anhand dessen auf die Funktion eines Gesamtsystems geschlossen wird. (Niemeyer 1972)

2.3.1 Modellierung und Simulation des Produktverhaltens

Aussagen in Bezug auf Funktionen und Eigenschaften eines Produktes und spezifizierten Anforderungen können durch analytische Modellierung und Simulation eines digitalen Produktprototypen getroffen werden (Gilz et al. 2014). Computer-Aided-Engineering Methoden (CAE) werden dafür als Rechnerunterstützung in frühen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt, um zeit- und kosteneffiziente Auswirkungen von Produktänderungen und -abweichungen sowie Prozesseinflüsse auf die Qualität und Funktion technischer Systeme zu simulieren (Roubanov 2014; Klause 1992).

Folgende CAE-Methoden mit Schnittstelle zu konstruierten Computer-Aided-Design (CAD) Modellen sind in der industriellen Anwendung (Roubanov 2014):

- **Mehrkörpersimulation** (MKS), zur Analyse von Bewegungen und Kräften eines mechanischen Systems (zeitdiskret),
- **Finite Elemente Methode** (FEM), zur Festigkeitsanalyse von Bauteilen (zeit- und raumdiskret),
- **Computational Fluid Dynamics** (CFD), zur Interaktion eines Bauteils mit fluidischen Stoffen der Umgebung im Kontrollraum (zeit- und raumdiskret),
- **Noise, Vibration, Harshness** (NVH), zur Analyse von Akustik- und Schwingungsverhalten von Produkten in der Nutzeranwendung (zeitkontinuierlich),
- **Digital Mock-Up** (DMU), zur Kollisions-, Montierbarkeits- und Funktionsanalyse eines Endproduktes.

Ergänzend zu den rein CAE-Methoden bieten **multiphysikalische Systemsimulationen** ein Hilfsmittel zur Analyse vielfältiger Effekte und Wechselwirkungen komplexer Systeme. Auf Basis gleichungs-, block- oder objektorientierter Modelle sowie Zustandsgraphen wird das physikalische und gesteuerte Verhalten einzelner Systembestandteile zeitdiskret simuliert (Gilz et al. 2014).

Neben der Modellierung analytischer Strukturmodelle besteht auch der Ansatz zur **statistischen Modellierung von Gestalt-Funktion Zusammenhängen**. Ziel ist es, die Wirkung von Faktoren in einer beschreibenden, datengetriebenen Gleichung auf Basis verfügbarer Experimentdaten der Produktverifikation zu erklären. Dadurch können Haupt- und Wechselwirkungen der Faktoren in einem statistischen **Funktionsmodell** quantifiziert werden. Das zugrundeliegende physikalische Phänomen wird jedoch nicht genauer beschrieben. Der statistische Ansatz eignet sich, gegenüber den analytischen Methoden, für komplexe Systeme oder wenn die notwendigen Eingangsdaten für die exakte analytische Modellierung nicht verfügbar sind (vgl. epistemische Unsicherheit, siehe Kapitel 2.1.1). (Siebertz et al. 2017) Die statistische Modellierung kann ebenso auf Basis von Simulationsergebnissen erfolgen, falls ein direkter Einsatz der Simulation zu zeitaufwändig ist. Das daraus resultierende **Metamodell**, als Modell eines Modelles, beschreibt eine statistische Näherung der Input-Output-Relation des ursprünglichen Simulationsmodells, die eine Echtzeit-Auswertung ermöglicht. (Barton 1992)

Um den vollen Nutzen detaillierter, funktionaler Simulationsmodelle auszuschöpfen, bietet das Konzept des **Digitalen Zwillings** (engl. Digital Twin, DT) ein ganzheitliches und leistungsstarkes Mittel, um die Daten eines Gutes (Produkt, Maschine, Dienstleistung, Produktdienstleistungssystem) aus der realen, physischen Welt mit einer virtuellen Darstellung der physischen Ausdrücke zu verbinden (Stark et al. 2017). Der DT eines Produktes beinhaltet neben einer Repräsentation von Einzelteilen und Baugruppen oftmals physikalische und logische Eigenschaften, beispielsweise über Material, Beschaffenheit oder Feingestalt, und befähigt damit Simulationen des physikalischen Produktverhaltens unter Umweltbedingungen (Anderl 2006). Nach Stark et al. (2017) besteht der DT eines realen Gutes (physische Domäne) aus einem universellen digitalen Mastermodell (virtuelle Domäne) und seinem einzigartigen Digitalen Schatten zur intelligenten Verknüpfung der beiden Domänen (Stark et al. 2017).

Die Nutzung der Bauteilidentifikation in der Produktion bietet das Potential verfügbare Daten vertikal und horizontal zum Digitalen Schatten eines Unternehmens zu vernetzen. Durch diese Transparenzsteigerung werden Wirkzusammenhänge aus Datenanalysen erkennbar und im Sinne der Prozessoptimierung interpretierbar. (Schuh et al. 2017; Hippenmeyer et al. 2016). Darauf aufbauend wird die Entwicklung und Simulation mit Digitalen Zwillingen befähigt (Prognosefähigkeit, siehe Kapitel 3.2.1) und bietet die Möglichkeit, automatisches Handeln durch Regeln zur Selbstoptimierung abzuleiten (Adaptierbarkeit, siehe Kapitel 3.2.2) (Schuh et al. 2017). Darüber hinaus bietet die

markierungsfreie Bauteilidentifikation eine Möglichkeit als Maßnahme gegen Produktimitationen (Plagiate und Fälschungen) sowie Schutz von geistigem Eigentum (Produkt und Prozess Know-How) (Geiger 2014; Hockauf et al. 2014; Hippenmeyer et al. 2016).

2.3.2 Modellierung von Produktionssystemen unter Unsicherheit

Produktionssysteme weisen oftmals viele zeit- und zufallsabhängige Systemgrößen und Wirkzusammenhänge auf. Mathematisch-analytische Methoden zur Untersuchung solcher Systeme kommen bei der Bewertung des dynamischen Verhaltens schnell an ihre Grenzen. Mittels dynamischer, stochastischer und zeit- bzw. ereignisdiskreter Simulationen (Discrete Event Simulation, DES) hingegen kann das Ablaufverhalten komplexer Produktionssysteme untersucht und bewertet werden. (VDI 2014) Auf Basis gleichungs-, block- oder objektorientierter Modelle wird für jede Diskretisierung ein neuer Systemzustand ermittelt (März et al. 2011). Klassischerweise dienen DES-Modelle zur Analyse und Optimierung von Durchlaufzeit, Auslastung und Bestand nichtlinearer Zusammenhänge in Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen (VDI 1997).

Allerdings lassen sich äußere Einflussgrößen und Störfaktoren (vgl. aleatorische Unsicherheit, siehe Kapitel 2.1.1) ebenfalls mittels Zufallsvariablen als stochastische Prozesse modellieren. Dabei wird jedem stochastischen Eingangswert ein Wertevorrat (beispielsweise eine Wahrscheinlichkeitsverteilung) zugeordnet, aus dem eine aktuelle Ausprägung mittels Monte-Carlo Experiment zufällig ausgewählt wird. (Arnold et al. 2019) Im Monte-Carlo-Experiment werden zur Erzeugung der benötigten Werte, gleichverteilte Zufallszahlen rechnergestützt erzeugt und mittels Abbildungsfunktion der approximierten Prozessverteilung (z. B. Normal-, Gammaverteilung oder weitere) konkrete Realisierungen ξ_l (mit $l \geq 1$) berechnet. Nach dem Gesetz der großen Zahlen konvergiert das arithmetische Mittel der Realisierungen μ mit n -facher Durchführung für $n \rightarrow \infty$ gegen den Erwartungswert der approximierten Prozessverteilung $E(\xi_l)$ (siehe Formel 2-11 und Formel 2-12) (Graham et al. 2013). Liegen historische Messdaten des Prozesses vor (ohne Approximation einer statistischen Verteilung), kann mittels gleichverteilter Zufallszahlen ebenfalls aus diesem Wertevorrat gezogen werden.

$$\mu := \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \xi_l \quad \text{Formel 2-11}$$

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \mu = E(\xi^l) \quad \text{Formel 2-12}$$

3 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Forschung der für den Lösungsansatz erforderlichen Themenfelder dargestellt. Zunächst werden dazu Anforderungen an die Umsetzung funktionsorientierter Qualitätsregelung in der Produktion definiert (siehe Kapitel 3.1). Nachfolgend werden relevante wissenschaftliche Ansätze dargelegt (siehe Kapitel 3.2) und mit den zuvor gestellten Anforderungen abgeglichen (siehe Kapitel 3.3).

3.1 Anforderungen zur funktionsorientierten Qualitätsregelung

Aus der Motivation und den Grundlagen werden die Anforderungen (1) bis (3) abgeleitet. Sie stellen die wesentlichen Bestandteile einer Methode zur Planung und Auswahl funktionsorientierter Strategiealternativen der Qualitätsregelung in der Produktion dar und erlauben die Bewertung bestehender Ansätze (siehe Tabelle 3-1).

(1) Modellierung von Gestalt-Funktion Zusammenhängen

Zur funktionsorientierte Kompensation hochpräziser Produkte, mit mehreren, funktionsrelevanten Produktmerkmalen, sind Gestalt-Funktion Zusammenhänge erforderlich. Ansätze der qualitativen Funktionsmodellierung sind notwendig um den Aufbau von Funktionsverständnis und die Identifikation kritischer Haupteinflussfaktoren zu ermöglichen. Ansätze der quantitativen Funktionsmodellierung sind erforderlich, um die Funktionserfüllung einzelner Produktinstanzen, anhand der In-Line Messdaten ihrer Merkmale und Eigenschaften, prognostizieren zu können.

Um das reale Produktverhalten durch quantitative Funktionsmodelle möglichst präzise nachbilden zu können sind während der Modellbildung Methoden zur Reduktion der Modellunsicherheit erforderlich. Ein weitere Anforderung an die Funktionsmodelle besteht in der robusten Prognose gegenüber auftretenden Inputunsicherheiten, wie beispielsweise Messunsicherheiten der Produktmerkmale und -eigenschaften, um verlässliche Entscheidungen ableiten zu können.

Die Befähigung bestehender Strategien der Qualitätsregelung kann durch Integration der Funktionsmodelle in die Produktionssteuerung erfolgen. Kurzfristige Selektions- und Anpassungsvorgänge zur funktionsorientierte Kompensation anhand der Funktionsmodelle erfordern deren Echtzeit-nahe Funktionsprognosen. Ebenso ist eine Interpretierbarkeit der Funktionsmodelle notwendig, damit gezielte Gegenmaßnahmen zur Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen im Produktionssystem abgeleitet werden können.

(2) Qualitätsregelung in der Produktion

Eine ganzheitliche Betrachtung möglicher Qualitätsregelungen macht die Berücksichtigung bestehender Ansätze erforderlich. Die Vielzahl bestehender Strategie zur Qualitätsregelung erfordert eine integrierte Modellierung, die eine Bewertung und Auswahl geeigneter Strategien und Strategiekombinationen für den jeweiligen Anwendungsfall ermöglichen. In der Modellierung sind bestehende Strategien der konventionellen Montage, Strategien der selektiven bzw. individuellen Montage und auch Strategien der statistisch adaptiven bzw. individuellen Fertigung in einer generalisierten Modellierung bestehender Qualitätsregelungen zu berücksichtigen.

(3) Qualitätsbezogene Kostenbewertung

Die Planung und Auswahl geeigneter Strategiealternativen zur funktionsorientierten Qualitätsregelung bedarf einer ganzheitlichen Bewertung. Neben einer technischen Bewertung muss daher auch eine qualitätsbezogene Kostenbewertung erfolgen, welche die eingesparten Ausschusskosten und zusätzliche, organisatorische Aufwände berücksichtigt.

3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Forschung zu Ansätzen der Gestalt-Funktion Modellierung, der Qualitätsregelung in der Produktion und der qualitätsbezogenen Kostenbewertung dargestellt.

3.2.1 Ansätze der Gestalt-Funktion Modellierung

Das *Contact & Channel and Connector (C&C²)* Modell stellt eine Methode zur qualitativen Verifikation von Produktmodellen in frühen Produktentwicklungsphasen dar. Die Methodik ermöglicht die Identifikation funktionskritischer Merkmale und Systembestandteile in komplexen, dynamischen multi-domänen Modellen, mittels strukturierter Systemanalyse und Hypothesen. Ergebnis des Vorgehens sind qualitative Gestalt-Funktion Grundzusammenhänge als Basis für die nachfolgende, detaillierte Produktspezifikation und den Aufbau von Simulationsmodellen zur Reduktion der Modellunsicherheit. (Matthiesen et al. 2019; Albers et al. 2014).

Zur Reduktion der Modellunsicherheit in der Toleranzanalyse verknüpfen Malmiry et al. (2016) klassische Modellierungsansätze basierend auf dem Energiefluss des betrach-

teten Systems. Dabei unterstützt die Modellierung den Übergang von qualitativen, funktionalen Anforderungen zur quantitativen, funktionalen Struktur und dem Verhalten des Systems (Systemanalyse). Nach erfolgter Modellierung des multiphysikalischen Systemverhaltens mittels des Energieflusses wird das Modell in eine ausführbare Simulation überführt. Die Produkteigenschaften werden aus der Funktionsbetrachtung abgeleitet. Durch eine Toleranzanalyse können die Auswirkungen geometrischer Merkmale auf die Funktion untersucht und durch Toleranzallokation in die geometrische Produktspezifikation überführt werden. Das Vorgehen wird im Anwendungsfall einer Zahnradölpumpe demonstriert. (Malmiry et al. 2016)

Youn et al. (2011) stellen ein Modellkalibrierungsverfahren zur Steigerung der Vorhersagefähigkeit rechnerbasierter Modelle vor. Ziel des Ansatzes ist es, die Modellunsicherheit durch statistische Schätzung unsicherer und unbekannter Eingangsgrößen auf Basis experimenteller Versuche zu reduzieren. Als Vergleichsmetrik wird eine Likelihood-Funktion definiert, die zur statistischen Bestimmung der unbekanntenen Eingangsgrößen maximiert werden muss. Die Verbesserung der Vorhersagefähigkeit durch den Ansatz wird anhand eines Zuverlässigkeitsmodells für ein Smartphone Display demonstriert. (Youn et al. 2011)

Walter et al. (2013) erweitern bestehende Modellierungsansätze der Toleranzanalyse für Systeme in Bewegung. Ziel ihres Ansatzes ist es, die phänomenologische Unsicherheit der Toleranzanalysemodelle zu reduzieren und durch Metamodellierung eine effizientere Ausführung während der Produktentwicklung zu ermöglichen. Im Ansatz werden Interaktionen auftretender Merkmalsabweichungen auf die resultierende, zeitabhängige Auswirkung der Produktfunktion, sowie auf die Merkmalsabweichung selbst prognostiziert. Auftretenden Abweichungen werden dabei in Anlehnung an die SPC in fähigkeitskritische und stabilitätskritische Abweichung unterschieden (siehe Kapitel 2.2.1). Im zweiten Schritt werden auftretende Wechselwirkungen der Merkmalsabweichungen durch Monte-Carlo Experimente für zufällige Abweichungen und Metamodelle für systematische Abweichungen angenähert und in die bestehenden Toleranzanalyse-simulationen integriert. Das Vorgehen wird am Beispiel eines Kurbeltriebs im Verbrennungsmotor diskutiert. (Walter et al. 2013)

Eine genauere Funktionsprognose auf Basis hochauflösender topographischer Messdaten wird im Ansatz von Weckenmann & Hartmann (2013) durch funktionsorientierte Verifikation, ohne Überführung in geometrische Charakterisierungen, erreicht (siehe

Kapitel 2.2). Ziel des Ansatzes ist es, die Unsicherheit der Übereinstimmung geometrischer Spezifikationen an der Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Produktion zu reduzieren. Definierte geometrische Spezifikationen erlauben es demnach in vielen Fällen nicht den Grad der Funktionserfüllung in Produktion und Verifikation ausreichend genau zu charakterisieren. Die funktionsorientierten Eigenschaften werden mittels eines parametrisierten mathematisch-physikalischen Modells aus den hochauflösenden Rohdaten evaluiert. Das Vorgehen erlaubt es theoretische und experimentelle Erkenntnisse der Produktentwicklung, hinsichtlich der beabsichtigten Funktion, zur Konformitätsprüfung in Fertigung und Versuch heranzuziehen. Ungenaue standardisierte Definitionen und Messauswertungen können durch die funktionsorientierte Auswertung entfallen. Die Validierung des Ansatzes wird am Beispiel einer mikrostrukturierten Farbwalze demonstriert. (Weckenmann et al. 2013)

Häfner & Lanza (2017) stellen eine Vorgehensweise zur quantitativen Beschreibung der Wirkkette aus Fertigung, Qualität und Zuverlässigkeit funktionsorientierter Messdatenauswertungen vor. Ziel des Ansatzes ist es, eine individuelle Funktionsprognose für bereits gefertigte Bauteile, unter Reduktion der epistemischen Unsicherheit und Unsicherheit der Übereinstimmung, zu ermöglichen. Im Ansatz werden hochpräzise 3D-Messungen von Mikrozahnradern (Reduktion der Unsicherheit durch Übereinstimmung) durch Finite-Elemente-Simulationen zur Berechnung realistischer Belastungen verarbeitet (Reduktion der Modellunsicherheit) und mit experimentellen Daten aus Lebensdauerversuchen korreliert (Reduktion der verhaltensorientierten Unsicherheit). Vorhandene Vorkenntnisse werden in das gemeinsame Modell mittels Bayesscher Statistik, zur Reduktion des experimentellen Versuchsaufwands, als zusätzlicher Input integriert. Die aleatorische Unsicherheit des Modells, aufgrund von Inputunsicherheiten, wird nach den Prinzipien des GUM quantifiziert (siehe Kapitel 2.2.4). Das Vorgehen kann im Anwendungsfall die Lebensdauerprognose von Mikro-Getrieben zum Stand der Technik verbessern. (Haefner et al. 2017; Häfner 2017)

Um eine zeiteffiziente Funktionsprognose für den Einsatz in der industriellen Serienproduktion zu ermöglichen, wird, neben dem Ansatz der Bayesschen Statistik, ebenfalls die Anwendung von maschinellem Lernen, auf Basis künstlicher neuronaler Netze, untersucht. Die Fähigkeit der Echtzeit-nahen Funktionsprognose stellt jedoch einen Kompromiss der Modellgüte (Modellunsicherheit) und der Prognosedauer dar. (Haefner et al. 2018)

3.2.2 Ansätze der Qualitätsregelung in der Produktion

3.2.2.1 Montagestrategien der Qualitätsregelung

Schmitt et al. (2010) stellen den Ansatz eines cyberphysischen Produktionssystems (CPPS) am Beispiel von PKW-Hinterachsgetrieben vor. Eine wissensbasierte Datenbank sammelt, speichert und verarbeitet Prozesswissen verschiedener Faktoren und Interdependenzen aus Prozessen, Materialien, Produktionsmitteln und Fertigungsabweichungen mit ihrem Effekt auf die Produktfunktion mittels Reinforcement Learning. Tritt in der 100%-Funktionsprüfung eine Tragbildabweichung des Verzahnungspaares auf, werden durch ein Fehlercluster Toleranzanpassungen der Montageparameter in der Getriebeendmontage abgeleitet, um spätere Fehlfunktionen, wie beispielsweise Verschleiß und hör- oder spürbare Schwingungen des Hinterachsgetriebes im PKW, zu vermeiden. (Schmitt et al. 2010; Laass et al. 2013; Wagels et al. 2008; Loosen et al. 2011)

Peter et al. (2014) stellen einen Ansatz zum Ausgleich von Unwucht in der Rotorfertigung von Elektromotoren vor. Basierend auf einer Datenbank werden während der Magnetmontage statistische Vorhersagen der Unwucht als Folge des Magnetgewichts und der Montageposition auf dem Rotor getroffen. Gewählte Magnete werden durch Optimierung direkt an einen Rotorscheibenplatz zur Reduzierung der Unwucht positioniert. Die Datenbank wird zeitgleich mit den aktuellen Gewichtsmesswerten für weitere Prognosen erweitert. Ein Zwischenspeicher ist somit nicht notwendig. (Peter et al. 2014; Wößner et al. 2019)

Fang et al. (1995) vergleichen analytisch die Aufteilung in Maßklassen mit äquidistanten Toleranzbereichen gegenüber einer Aufteilung gemäß ausgeglichener relativer Häufigkeit beider Paarungspartner, um potentielle Restbauteile auf dem Paarungsfeld aufgrund variierender Prozessfähigkeiten zu vermeiden (Fang et al. 1995). Mease et al. (2004) erweitern diesen Ansatz und leiten eine stochastische Gleichung zur Ermittlung optimaler Maßklassengrenzen ab (Mease et al. 2004).

Babu et al. (2014) verwenden, im Anwendungsfall der selektiven Montage, Taguchis Verlustfunktion als Fitnessfunktion zur Ermittlung der optimalen Klassenanzahl im Artificial Immune System Optimierer (siehe Kapitel 3.2.3). (Babu et al. 2014)

Colledani et al. (2014) untersuchen die Auswirkung des Informationsverlusts des exakten Messergebnis eines Merkmals, durch das Aufteilen der Bauteile in Maßklassen.

Simulationsstudien zeigen, dass sowohl die Anzahl der Maßklassen, als auch die spezifizierte Klassenbreite demnach den Grad des Informationsverlustes definieren. Somit ist eine hohe Klassenanzahl mit enger Klassenbreite für die Wahrung der meisten Informationen aus Messergebnissen zu bevorzugen. Andererseits ist es jedoch erforderlich ausreichend Bauteile pro Klasse vorzuhalten, um fehlende Komponenten für die Paarung zu vermeiden und dadurch semi-optimale Paarungen („deadlock avoidance policies“) in Kauf nehmen zu müssen. (Colledani et al. 2014a; Ebrahimi 2014)

Die Informationsgüte der In-Line Messung hat ebenfalls einen hohen Einfluss auf die Klassierung und Bauteilauswahl in der selektiven Montage. Matsuura et al. (2007) untersuchen daher den Einfluss der Messunsicherheit für die Aufteilung in Maßklassen. Anhand des entwickelten analytischen Modells kann daraus der zu erwartenden Anteil fehlerhafter Produkte in Abhängigkeit der Messunsicherheit und der Maßklassenanzahl berechnet werden. (Matsuura et al. 2007)

Meyer et al. (2016) und Mayr et al. (2017) entwickelten ein Intralogistiksystem zur 100%-Prüfung geometrischer und magnetischer Eigenschaften, als auch zur bauteilindividuellen Speicherung von Magneten in einem automatisierten Kleinteilelager für die Produktion elektrischer Synchronmotoren. Das Konzept ermöglicht es Schwankungen der magnetischen Eigenschaften durch individuelle Magnetanordnung zu kompensieren. Zur Auswahl optimaler, im Kleinteillager verfügbarer Magnete, wird ein Modell des maschinellen Lernens vorgeschlagen, das die Laufeigenschaften des Motors basierend auf gegebenen magnetischen und geometrischen Eigenschaften der Magnete berechnen soll. (Meyer et al. 2016; Mayr et al. 2017)

Ebenfalls im Anwendungsfall der Montage elektrischer Synchronmotoren stellen Colledani et al. (2018) und Colledani et al. (2015) einen Ansatz zur individuellen Montage mit Magneten bestückter Rotorscheiben vor. Basierend auf zuvor erhobenen In-Line Messdaten und der Bauteilrückverfolgung wird die optimale Montagereihenfolge und die Ausrichtung der Magnetscheiben auf dem Rotor, anhand der im Puffer verfügbaren Magnetscheiben, ermittelt. Mit einem Brute-Force Optimierungsalgorithmus können so die Gesamtabweichung des magnetischen Flusses minimiert und die Feldgleichförmigkeit im magnetisierten Rotor maximiert werden. (Colledani et al. 2018; Colledani et al. 2015)

Onken et al. (2018) und Colledani et al. (2015) untersuchen die **sequentielle Montage**, die als Unterausprägung der selektiven bzw. individuellen Montage zu sehen ist. In diesem Ansatz erfolgt die Zuordnung des optimalen Loses bzw. individuellen Bauteils nicht am Montageprozess, sondern bereits zuvor im Synchronisationspunkt, der die Los- bzw. Bauteilsequenz bestimmt, in der sie der Montagelinie zugeführt werden. (Onken et al. 2018; Colledani et al. 2015).

3.2.2.2 Fertigungsstrategien der Qualitätsregelung

Matsuura et al. (2011) untersuchen die statistisch adaptive Fertigung im Zusammenspiel mit selektiver Montage am Beispiel der Fertigung und Montage von Motorzylinder und -Kolben eines Verbrennungsmotors. Der Außendurchmesser des Kolbens kann üblicherweise mit einer höheren Prozessfähigkeit als der Innendurchmesser des Zylinders hergestellt werden. Die Fertigung an verschiedenen Nennwerten bietet einen möglichen Freiheitsgrad zur bedarfsorientierten Herstellung von Motorkolben. Durch Lösen eines Mischverteilungsproblems, anhand der Messdaten verfügbarer Motorzylinder, werden möglichst optimale Fertigungsnennwerte für die Herstellung der Motorkolben ermittelt. Ziel der Optimierung ist es die Anzahl der Restkomponenten statistisch zu reduzieren und damit die Anzahl verbleibender Bauteile ohne Paarungspartner zu vermindern. (Matsuura et al. 2011)

Akansel et al. (2011) erforschen am Beispiel des Düsenmoduls eines Einspritzsystems ebenfalls Auswirkungen der statistisch adaptiven Anpassung in Kombination mit der selektiven Montage. Ihr Ansatz ist es anhand des Mischverteilungsproblems optimale Bauteilnennwerte für parallele Fertigungsprozesse des Außendurchmessers der Düsen-nadel zu ermitteln. Dabei werden basierend auf produzierten Innendurchmesser des Düsenkörpers statistische Fertigungsanpassungen in unterschiedlichen Frequenzen, mitsamt optimaler Losgröße je angepasstem Fertigungsnennwert, ermittelt. Anhand einer Simulation des Produktionssystems kann der Einfluss von Anpassungsfrequenz und Fertigungsgeschwindigkeit der Fertigungsprozesse auf die Anzahl der Restkomponenten in Zwischenspeichern des Produktionssystems untersucht werden. (Akansel et al. 2011)

Lanza et al. (2015) verknüpfen bestehende Ansätze der Qualitätsregelung in ein CPPS, das sich laufend an die veränderte Ausgangssituation anpasst. Als Reaktion wird die Strategie der Qualitätsregelung mit den minimalen Gesamtkosten für den nächsten Pla-

nungsschritt auf Basis historischer Messwerte evaluiert. Dieser Ansatz wird an der Herstellung von Statoren eines Hybrid-Elektroantriebs evaluiert, wobei Strategien der selektiven und individuellen Montage, als auch Strategien der statistisch adaptive und der individuelle Fertigung, anhand der Gesamtkosten, verglichen werden. Die Strategie zur individuellen Fertigung des Statoraußenrings weist, ab einem gewissen Reifegrad der zugehörigen Fertigungsprozesses, das größte Potential der wirtschaftlichen Herstellung von Statoren auf. (Lanza et al. 2015)

3.2.3 Ansätze der qualitätsbezogenen Kostenbewertung im Produktionssystem

Einen Ansatz zur Monetarisierung produzierter Qualitätsabweichungen bietet **Taguchis Verlustfunktion**. Nach Taguchis Methode entstehen bereits Qualitätskosten $K_{Taguchi}$, wenn der Messwert $m_{i,j}$ eines funktionsrelevanten Merkmals vom Nennwert n_i abweicht, obwohl die Toleranzen $TOL = OSG - USG$ eingehalten werden (Taguchi et al. 2005). Die Kosten steigen quadratisch mit der Abweichung an und erreichen an der Toleranzgrenze den Betrag für Ausschuss beziehungsweise Nacharbeit (siehe Formel 3-1).

$$K_{Taguchi} = \begin{cases} K_{Ausschuss} * \left(\frac{2 * (m_{i,j} - n_i)}{TOL} \right)^2 & , \text{für } |m_i - n| \leq \frac{TOL}{2} \\ K_{Ausschuss} & , \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Formel 3-1}$$

Moroni et al. (2011) nutzen den Ansatz zur Bewertung von **Prüfkosten** K_{Pr} , basierend auf einem Kostenmodellen, das in Abhängigkeit der Verifikation geometrischer Toleranzen TOL steht. Darin werden Verifikationskosten für die Abschreibung des Messmaschine K_{MA} sowie Betriebskosten zur Messung K_{Betr} und Fehlerkosten K_{Er} , die durch die Messunsicherheit des jeweiligen Messinstruments und den gewählten Stichprobenumfang herbeigeführt werden, berücksichtigt (siehe Formel 3-2). Die Prüfkosten bestehen aus den Wahrscheinlichkeiten $P(U f_i)$ zu Unrecht abgelehnter Prüflinge ($i = E, 1. Art$) und fälschlich akzeptierter Prüflinge ($i = E, 2. Art$) sowie den daraus resultierenden Kosten K_i (siehe Formel 3-3). Die Wahrscheinlichkeiten $P(U f_i)$ sind dabei abhängig von der Qualitätsanforderung, der Prozessfähigkeit, der Prüfhäufigkeit bzw. dem Stichprobenumfang und der Messunsicherheit des Messinstruments. (Moroni et al. 2011; Savio 2012)

$$K_{Pr} = K_{MA} + K_{Betr} + K_{Er} \quad \text{Formel 3-2}$$

$$K_{Er} = K_{Er,1.Art} * P \left(\bigcup_j^J f_{E,1.Art} \right) + K_{Er,2.Art} * P \left(\bigcup_j^J f_{E,2.Art} \right) \quad \text{Formel 3-3}$$

Da eine häufigere und präzisere Verifikation für gewöhnlich eine Verringerung der messbedingten Fehlerkosten nach sich zieht, gleichzeitig jedoch kostenintensiver ist, gilt es das Kostenoptimum zu finden. Mit dem gewonnenen Modellzusammenhang der Prüfkosten in Abhängigkeit der Toleranzen und gegebenen Messmitteln (Brownfield), kann die Toleranzallokation in der Produktentwicklungsphase im Anwendungsfall unterstützt werden (Moroni et al. 2011; Walter et al. 2015; Savio 2012; Moroni et al. 2014).

Häfner et al. (2014) betrachten qualitätsbezogene Kosten im Rahmen der entwickelten Qualitäts-Wertstrom Methode (QVSM). Als Effekt des In-Line Qualitätssicherungseinsatzes sollen defekte Bauteile kurzzyklisch identifiziert und ausgeschleust bzw. nachgearbeitet werden, um Wertschöpfung an Ausschussteilen und die damit verbundenen, qualitätsbezogenen Kosten reduziert werden. Als qualitätsbezogenen Gesamtkosten werden im Ansatz Vermeidungskosten (Prävention), zusätzliche Prüfkosten (In-Line Qualitätssicherung), Nacharbeitskosten, Verschrottungskosten und mögliche Kundenreklamationskosten jedes Prozessschrittes berücksichtigt. Der Einsatz zusätzlicher In-Line Qualitätssicherung wird den eingesparten Ausschuss- und Nacharbeitskosten, unter wirtschaftlichen Aspekten, gegenübergestellt. (Haefner et al. 2014)

3.3 Forschungsdefizit

In Kapitel 3.2 wurden die relevanten Forschungsarbeiten der für die Zielstellung erforderlichen Anforderungen vorgestellt. Diese sind in einer Übersicht mit thematischer Einordnung in Tabelle 3-1 zusammenfassend dargestellt.

Die Ansätze der Modellierung von Gestalt-Funktion Zusammenhängen verfolgen das Ziel, die Realität für das vorgesehene, pragmatische Merkmal, möglichst unter geringen Abweichungen, nachzubilden. Einige Ansätze kombinieren bereits analytische Modelle mit experimentellen Beobachtungen zum Digitalen Zwilling. Nur wenige Ansätze führen jedoch eine umfassende Unsicherheitsanalyse zur Bewertung der eingesetzten Abhilfemaßnahmen durch. Die Echtzeit-nahe Auswertung der Funktionsmodelle zur Sicherstellung der Produktfunktionalität in der Fertigung ist in den meisten Ansätzen aufgrund des hohen Rechenaufwandes und der damit verbundenen hohen Simulationszeit nicht

gegeben. Lediglich der Ansatz von Häfner et al. (2018) ermöglicht eine Echtzeit-nahe Funktionsprognose (Haefner et al. 2018). Eine Integration des Produktwissens ist jedoch mit der gewählten Metamodellierung (künstliches neuronales Netz - *Blackbox*), aufgrund der fehlenden Interpretierbarkeit der Modelle zur Ableitung von Maßnahmen in der Produktion, nicht möglich.

Bestehende Ansätze der Qualitätsregelung in der Produktion untersuchen den Einsatz und die Optimierung einzelner Aspekte der Strategien, wie beispielsweise die Optimierung von Fertigungsnennwerten in der adaptiven Fertigung oder die optimale Klassenanzahl in der selektiven Montage. Die Vielzahl der Ansätze lässt die Inputunsicherheit der Messprozesse für die Strategien der Qualitätsregelung unberücksichtigt. Lediglich der Ansatz von Matsuura et al. (2007) berücksichtigt die Informationsgüte der In-Line Messung für die Wahl der Klassenbreite in der selektiven Montage durch Quantifizierung der Unsicherheit des Messprozesses (Matsuura et al. 2007).

Ebenfalls erfolgt in der Vielzahl der Ansätze lediglich eine technische jedoch keine wirtschaftliche Bewertung durch den Einsatz der Methoden. Die Ausnahme bildet der Ansatz nach Babu et al. (2014), der Taguchis Verlustfunktion zur wirtschaftlichen Bewertung der optimalen Klassenanzahl als Fitnessfunktion ansetzt, dabei jedoch den Einsparungen keine ganzheitliche Bewertung der zusätzlichen Aktivitäten gegenüberstellt (Babu et al. 2014).

Alle bisherigen Ansätze der Qualitätsregelung basieren auf der Verbesserung geometrischer Merkmale (z. B. des Passungsspiels, Akansel et al. 2011) beziehungsweise funktionsrelevanter Eigenschaften (z. B. des konstanten magnetischen Flusses, Colledani et al. 2018). Die Rückführung und Regelung auf Basis der gesamten Produktfunktion, mittels Gestalt-Funktion Zusammenhängen, bleiben bisher unerforscht. Daher ist die Auswahl von Paarungsbauteilen, die mehrere, funktionsrelevante Produktmerkmale und -eigenschaften besitzen, durch eine rein geometrische Bewertung, mangels geeigneter Zusammenhänge, im Stand der Forschung und Technik nicht möglich.

4 Lösungsansatz

Ausgehend von den Defiziten im Stand der Technik (siehe Kapitel 3.3) und den entwickelten Forschungshypothesen (siehe Kapitel 1.3) besteht die Zielsetzung darin, die Ansätze der Qualitätsregelung durch die Integration von Funktionsmodellen zu erweitern, um eine funktionsorientierte Qualitätsregelung zu ermöglichen und zu bewerten (siehe Abbildung 4-1). Die Integration von Produktwissen zur funktionsorientierten Steuerung (1) dient als Abhilfemaßnahme zur Reduktion von Unsicherheit der Übereinstimmung und der Unbestimmtheit durch Spezifikationen, sowie epistemischer Unsicherheit in der Produktion (siehe Abbildung 2-6). Die Herstellung präziser Produkte unter hohen Qualitätsanforderungen soll dabei mittels der integrierten, funktionsorientierten Qualitätsregelung (2) in einer bestehenden Serienproduktion ermöglicht werden. Eine Bewertungsmetrik und die Ergebnisse aus einer ereignisorientierten Ablaufsimulation, mit stochastisch modellierten Prozessen, erlauben die technische und wirtschaftliche Bewertung (3) der jeweiligen Qualitätsregelkreise.

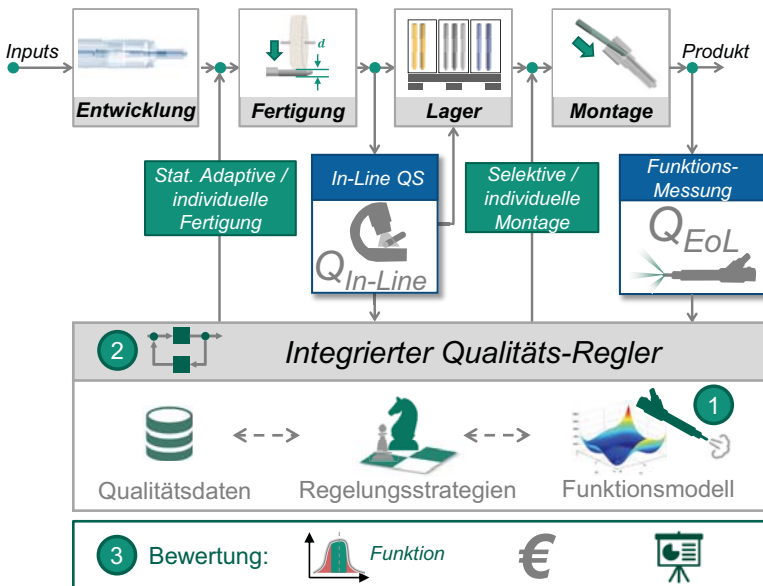


Abbildung 4-1: Grundgedanke der funktionsorientierten Qualitätsregelung mittels Funktionsmodellen, eigene Darstellung

Der Lösungsansatz gliedert sich in drei Kapitel (siehe Abbildung 4-2). Zu Beginn erfolgt die Entwicklung eines Vorgehens zur Modellierung quantitativer Funktionszusammenhänge in einem Digitalen Zwilling (siehe Kapitel 5.1). Darin werden für ein zu betrachtendes Produkt zunächst Funktionsanalysen (siehe Kapitel 5.1.1) durchgeführt und ein Digitaler Zwilling des Produktes, unter geringer Modellunsicherheit, modelliert (siehe Kapitel 5.1.2). Darauf folgend werden Metamodelle des DT abgeleitet, die eine Echtzeit-nahe Funktionsprognose ermöglichen (siehe Kapitel 5.1.3). Die Ermittlung der Modellunsicherheit (epistemische Unsicherheit) und der Standardabweichung des Modells aus den Inputunsicherheiten (aleatorische Unsicherheit) erlauben es, die Modelle hinsichtlich ihrer Gesamtunsicherheit zu bewerten und ein optimales Modell, als Kompromiss zwischen systematischer Abweichung (Bias) und Unsicherheit (Varianz), auszuwählen (siehe Kapitel 5.1.4).

Im zweiten Schritt erfolgt die Entwicklung von Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung (siehe Kapitel 5.2). Hier gilt es zunächst eine geeignete Modellierung zur Simulation von Produktionssystemen unter Unsicherheit zu entwickeln (siehe Kapitel 5.2.1). Anschließend erfolgt die Modellierung der vorgestellten Strategien der Qualitätsregelung in der Materialflusssimulation (siehe Kapitel 5.2.2). Durch Integration des zuvor abgeleiteten Funktionsmodells, werden die bestehenden Strategien zu funktionsorientierten Qualitätsregelkreisen erweitert (siehe Kapitel 5.2.3).

Um die entwickelten Strategien der funktionsorientierten Qualitätsregelung vergleichbar zu machen, sind Methoden zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung erforderlich (siehe Kapitel 5.3). Dazu wird zunächst eine Bewertungsmetrik entwickelt (siehe Kapitel 5.3.1), die eine ganzheitliche Betrachtung von Aufwand und Nutzen ermöglicht. Darauf aufbauend wird es für das betrachtete Produkt und das zugehörige Produktionssystem möglich, Anforderungen und Eignung der eingesetzten In-Line Messmittel zu analysieren (siehe Kapitel 5.3.2), sowie eine Strategieauswahl der Qualitätsregelung unter optimalen Parametern zu treffen (siehe Kapitel 5.3.4). Aufbauend auf den zuvor entwickelten Methoden wird ein Vorgehen zur Entwicklung alternativer Qualitätsregelkreise vorgestellt (siehe Kapitel 5.3.5).

Die Erprobung und prototypische Realisierung der entwickelten Methoden wird am Beispiel eines Hochdruck-Einspritzsystems für PKW Verbrennungsmotoren durchgeführt und validiert (siehe Kapitel 6).

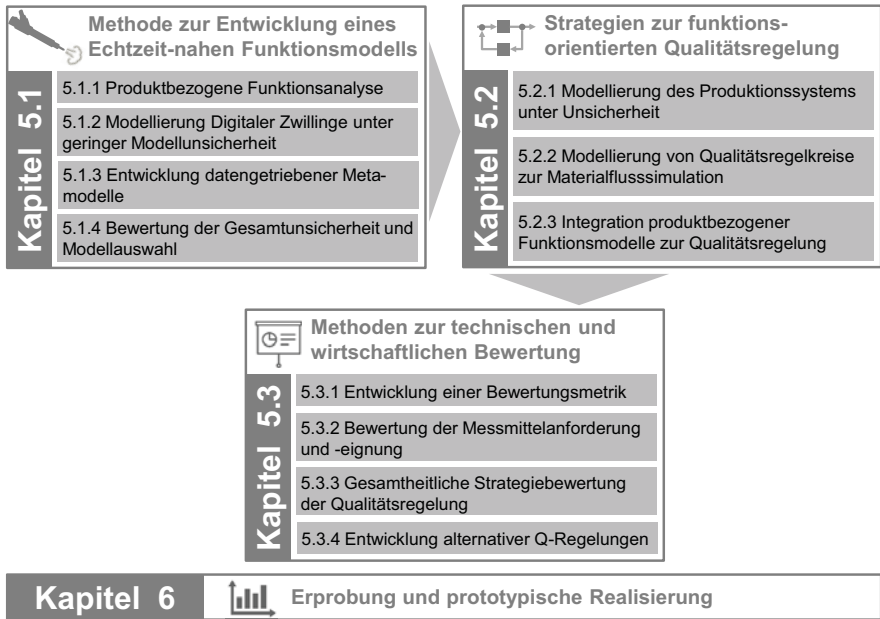


Abbildung 4-2: Methodischer Lösungsansatz der funktionsorientierten Qualitätsregelung zur wirtschaftlichen Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen in der Serienproduktion, eigene Darstellung

Studentische Arbeiten, die im Rahmen dieser Arbeit sowohl inhaltlich als auch organisatorisch vom Autor der vorliegenden Arbeit angeleitet wurden, sind im Folgenden in der Form (A_<Nachname> <Jahr>) aufgeführt.

5 Funktionsorientierte Qualitätsregelung

5.1 Methode zur Entwicklung einer Echtzeit-nahen Funktionsprognose mittels Digitaler Zwillinge

Die Methode zur Entwicklung einer Echtzeit-nahen Funktionsprognose in der Produktionssteuerung gliedert sich in vier Schritte auf (siehe Abbildung 5-1). Die Funktionsanalyse und Bestimmung von Wirkzusammenhängen eines Produktes dient als Grundlage zur späteren Modellierung von Gestalt-Funktion Zusammenhängen (siehe Kapitel 5.1.1). Basierend auf den Erkenntnissen und experimentellen Daten kann die detaillierte Modellierung eines DT des Produktes unter geringer Modellunsicherheit (epistemische Unsicherheit) erfolgen (siehe Kapitel 5.1.2). Das Ableiten interpretierbarer, datengetriebener Metamodelle ermöglicht die Echtzeit-nahe Funktionsprognose (siehe Kapitel 5.1.3). Abschließend erfolgt die Bewertung der Gesamtunsicherheit und Modellauswahl mit minimaler Gesamtunsicherheit (siehe Kapitel 5.1.4), zur späteren Integration von Produktwissen in die Produktionssteuerung (siehe Kapitel 5.2.3).

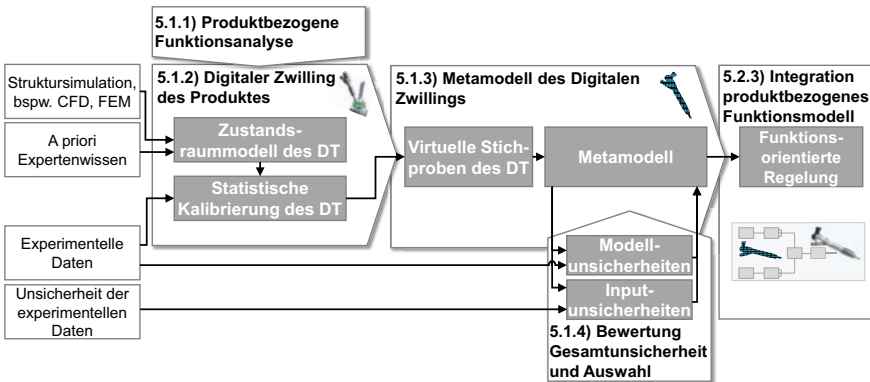


Abbildung 5-1: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung von Metamodellen zur Echtzeit-nahen, funktionsorientierten Auswertung, eigene Darstellung

5.1.1 Produktbezogene Funktionsanalyse

Initial ist es erforderlich die vorgesehenen Produktfunktionen zu charakterisieren, die im weiteren Verlauf analysiert und modelliert werden sollen. Aufbauend darauf kann der Modellzweck definiert werden (Stachowiak 1973). Nachfolgend ist der Aufbau eines

Systemverständnisses des Produktes anhand bestehender Produktmodelle und Konstruktionen, wie beispielsweise technischer Zeichnungen und CAD Modellen, erforderlich. Expertenworkshops und der Einsatz von Methoden zur qualitativen Identifikation von Gestalt-Funktion Zusammenhänge, beispielsweise mit dem C&C²-Ansatz, sind geeignet, um funktionsrelevante Teilsysteme, Produktmerkmale und -eigenschaften zu identifizieren. Die Unterteilung des Gesamtsystems in Teilsysteme, mit den zugehörigen Teilfunktionen, unterstützt dabei die Komplexitätsreduktion. Treten verschiedene Systemzustände auf, sind unterschiedliche Systemzustandssequenzen erforderlich, um den Einfluss von Produktmerkmalen und -eigenschaften in allen Betriebspunkten zu ermitteln. (Matthiesen et al. 2019). Experimentelle Vorversuche unter Ein-Faktor Variation dienen der Verifikation identifizierter Hypothesen und Merkmale. Somit können funktionskritische Produktmerkmale und -eigenschaften auf Basis der qualitativen Untersuchungen identifiziert werden.

Neben der Analyse der Produktmerkmale erfolgt ebenfalls eine Analyse ihrer zugehörigen Fertigungs- und Messprozesse. Dabei werden historische Messdaten zur Näherung geeigneter statistischer Verteilungen herangezogen und auf ihre statistische Signifikanz geprüft. Zeitreihenanalysen ermöglichen die Einteilung der Fertigungsprozesse zu den Prozessmodellen (siehe Tabelle 2-1). Zur quantitativen Bewertung der vorliegenden Fertigungsprozesse werden die Fähigkeitskennzahlen Prozessfähigkeit und kritische Prozessfähigkeit ermittelt (siehe Formel 2-1 und Formel 2-2). Für die Messprozesse erfolgt eine Bewertung der Messprozesseignung (siehe Formel 2-9). Historische Daten über Funktionsverhalten in der Anwendung und Fehlerhäufigkeiten in der Produktion dienen als Grundlage, um häufig auftretende Fehlerursachen einzugrenzen. Als Ergebnis können Produktions- und Verifikationsprozesse bestimmt werden, deren Fertigungs- bzw. Messabweichung kritisch für die Sicherstellung der Produktfunktion sind und welche Produktfunktionen durch die Fertigungsabweichungen am häufigsten beeinflusst werden.

Zur Bestimmung quantitativer Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Produktmerkmalen $x_{i,j}$ bzw. deren Messdaten $m_{i,j}$ und der fokussierten Produktfunktion y_q werden statistische Datenanalysen durchgeführt (siehe Anhang A1).

Für Anwendungsfälle, mit einer geringen Anzahl funktionsrelevanter Einflussfaktoren und einfachen Zusammenhängen, bietet die Bestimmung quantitativer Gestalt-Funktion Zusammenhänge, in Form von linearen Regressionen $f_{q,Reg}$, Vorteile durch eine

hohe Interpretierbarkeit der gewonnenen Modelle und einen ausreichend geringen Gesamtfehler der Prädiktion (Siebertz et al. 2017).

Im Anwendungsfall von Produkten mit vielen Einflussfaktoren und nicht-linearer Gestalt-Funktion Zusammenhänge sind die gewöhnlichen Ansätze zur Anpassung nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate oftmals begrenzt. Je aufwändiger die Modellansätze werden und je größer die Anzahl der funktionsrelevanten Einflussgrößen, desto mehr Prädiktoren müssen geschätzt werden. Um die Prädiktoren möglichst präzise schätzen zu können, gilt die Forderung, dass die Anzahl der Datensätze d zur Schätzung viel größer sein muss, als die Anzahl der zu schätzenden Prädiktoren r (siehe Formel 5-1). Ist diese nicht erfüllt, besteht die Gefahr, dass die Prädiktoren schlecht geschätzt werden. Ihre Prädiktionen unterliegen hohen systematischen Modellabweichungen (Bias) und einer hohen Varianz. (Zou et al. 2005).

$$d \gg r$$

Formel 5-1

Die Durchführung vieler Experimente unter seriennahen Bedienungen zur Erzeugung gezielter Grenzmuster, mittels DoE, ist jedoch kostspielig und eine Vielzahl der hergestellten Produkte kann nicht am Markt veräußert werden (Siebertz et al. 2017). Der Einsatz von Produktsimulationen bietet die Möglichkeit notwendige Daten, mit ausreichend Variation der Einflussfaktoren zu erzeugen, um die Prädiktoren für höherwertige Ansätze statistisch signifikant zu schätzen (siehe 5.1.2).

Ebenfalls mit steigender Anzahl an Prädiktoren im Modell steigt im Allgemeinen der Anteil an Prädiktoren, die wenig oder gar keinen Informationsbeitrag zur Prädiktion leisten. Die Einbeziehung wenig bis irrelevanter Prädiktoren führt zur Überanpassung (engl. Overfitting) des Modells und resultiert in unnötiger Komplexität. Es wird zunehmend schwieriger, die Wirkung relevanter Variablen zu erkennen und zu interpretieren. (Hastie et al. 2009) Ansätze zur Auswahl einer Prädiktorteilmenge, mittels Regularisierung (siehe Kapitel 5.1.3), haben den Effekt, dass die Prädiktionen einer geringen Unsicherheit unterliegen und die Interpretierbarkeit der Modelle steigt. (Zou et al. 2005)

5.1.2 Modellierung Digitaler Zwillinge unter geringer Modellunsicherheit

Um die funktionalen Eigenschaften eines Produktes zu modellieren, bieten Strukturmodelle für multiphysische Simulationen mit räumlicher Diskretisierung (z. B. FEM- oder CFD-Simulationen) ein leistungsfähiges Mittel (siehe Kapitel 2.3.1) (Überhuber 1995). Für eine systematische Analyse aller relevanten Produktrealisierungen, die potentiell

aus der Produktion stammen können, ist ihr Rechenaufwand jedoch zu hoch. Ein geeigneter Ansatz sind Zustandsraummodelle, die eine multiphysische Systemzustandsimulation realisieren, indem sie nur ihre wichtigsten geometrischen Eigenschaften mit einer zeitlichen Diskretisierung modellieren (Überhuber 1995). Im Kontext des DT können diese Zustandsraummodelle als digitales Mastermodell betrachtet werden (Stark et al. 2017). Durch ihre Verknüpfung mit Expertenwissen und individuellen Ausprägungen des digitalen Schattens, als individuell ausgeprägte In-Line Messdaten einzelner Produktmerkmale und -eigenschaften und der zugehörigen EoL Funktionsprüfung des Produktes, werden DT der Produkte erzeugt (siehe Abbildung 5-2).

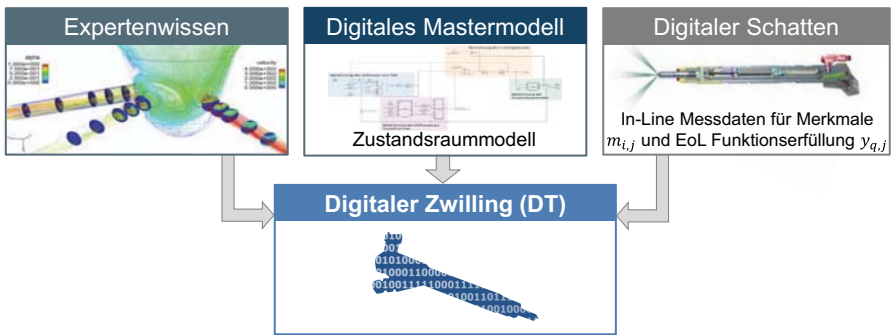


Abbildung 5-2: Strukturdarstellung zur DT-Modellierung für Produkte, eigene Darstellung

Im Allgemeinen kann der DT durch die Formel 5-2 beschrieben werden. Die prognostizierte Produktfunktion $\hat{y}_{q,j}$ des DT im Betriebspunkt q ist abhängig von den einzelnen In-Line Messergebnissen $m_{i,j}$ der Qualitätsmerkmale $x_{i,j}$ und den Modellparametern p_i des Zustandsraummodells f_q . Um ein realistisches Modellverhalten zu ermöglichen, werden zunächst die Modellparameter p_i durch Struktursimulationen wie FE-Analysen sowie durch Expertenwissen ermittelt.

$$\hat{y}_{q,j} = f_q(m_{i,j}, p_i) \quad \text{Formel 5-2}$$

Zur Reduktion der verbleibenden Modellunsicherheit wird ein Kalibrierungsverfahren angewandt, das eine statistische Approximation der Modellparameter p_i für $i = \{1, \dots, I\}$ durchführt. Modellparameter die unsicherheitsbehaftet und/oder mit einer hohen Sensitivität auf die Funktionsprognose des DT verknüpft sind, werden statistisch so optimiert, dass die Prognoseabweichung minimal ist (siehe Abbildung 5-3).

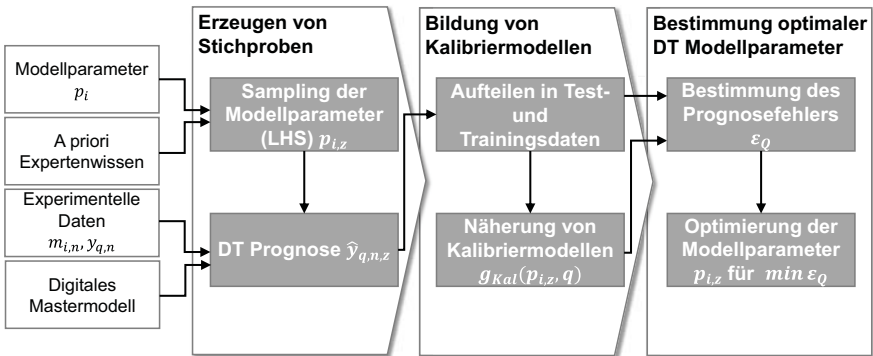


Abbildung 5-3: Methodisches Vorgehen zur statistischen Kalibrierung der Zustandsraummodell-Parameter des Digitalen Zwillings, (nach A_Quasnitza 2019)

Die Kalibrierung erfolgt anhand experimenteller Daten $n = \{1, \dots, N\}$ einzeln hergestellter Produkte mit ihren In-Line Messdaten $m_{i,n}$ der Qualitätsmerkmale $x_{i,n}$ und zugehöriger Produktfunktionen $y_{q,n}$ aus dem EoL-Funktionstests. Funktionsprognosen \hat{y}_{q,n,z_i} verschiedener Betriebspunkte $q = \{1, \dots, Q\}$ eines Produktes werden mit dem Quotienten ihrer jeweiligen Funktionsspezifikation $TOL_q = USG_q - USG_q$ zu relativen Produktfunktionen $\hat{y}_{q,n,rel}$ normiert, um deren Prognosefehler in einer gemeinsamen Metrik vergleichbar zu machen (siehe Formel 5-3).

$$\hat{y}_{rel,q,n} = \frac{\hat{y}_{q,n}}{TOL_q} \tag{Formel 5-3}$$

Für die zu kalibrierenden Modellparameter p_i werden, mittels Latin Hypercube Sampling (LHS), $z_1 = \{1, \dots, Z_1\}$ Ausprägungen als Wertekombinationen $[p_{i,z_1}, \dots, p_{i,z_1}]$ zufällig kombiniert. Die N experimentellen Datensätze $[m_{i,n}, y_{q,n}]$ werden Z_1 mal vervielfältigt und jeweils einer Wertekombination der Modellparameter p_{i,z_1} zugeordnet. Die Datensätze $[m_{i,n}, y_{q,n}, p_{i,z_1}]$ dienen als Input für $Z_1 * N * Q$ Funktionsprognosen $\hat{y}_{q,n,z_1} = f_q(m_{i,n}, p_{i,z_1})$ mittels des Zustandsraummodelles des Produktes. Anschließend werden die Input-Output Relationen der $[m_{i,n}, y_{q,n}, p_{i,z_1}, \hat{y}_{q,n,z_1}]$ -Tupel anhand statistischer Kalibriermodelle $g_{Kal,q,n}$, in Abhängigkeit der Modellparameter p_{i,z_1} , für jeden Betriebspunkt q und jeden Datensatz n , mit geeigneten Modellansätzen (beispielsweise Gaußscher Prozess Regression, Support Vector Machine (SVM) oder klassischen Regressionen)

angenähert (siehe Formel 5-4). Durch wiederholte, k -fach Kreuzvalidierung kann der Modellfehler des jeweiligen Modellansatzes abgeschätzt werden. Für die Modellierung wird der Modellansatz mit dem geringsten Kreuzvalidierungsfehler $\min(\varepsilon_{q,n}(z_i))$ ausgewählt (siehe Formel 5-5).

$$\check{y}_{q,n,z_1} = g_{Kal,q,n}(p_{i,z_1}) \quad \text{Formel 5-4}$$

Die Kalibriermodelle besitzen eine deutlich höhere Laufzeiteffizienz als die Systemzustandssimulation und erlauben eine fein inkrementelle Analyse der zu kalibrierenden Modellparameter p_i im jeweiligen Suchintervall. Dazu werden mittels LHS erneut $Z_2 > > Z_1$ Ausprägungen zu kalibrierender Modellparameter p_i , mit $z_2 = \{1, \dots, Z_2\}$, als Wertekombinationen $[p_{i,z_2}, \dots, p_{1,z_2}]$ zufällig erzeugt. Die N experimentellen Datensätze $[m_{i,n}, y_{q,n}]$ werden nun Z_2 mal vervielfältigt und jeweils einer Wertekombination der Modellparameter p_{i,z_2} zugeordnet. Prognosen der $[m_{i,n}, y_{q,n}, p_{i,z_1}]$ -Datensätze, anhand der Kalibriermodelle $g_{Kal,q,n}$, erlauben es den Prognosefehler $\varepsilon_{q,n}$ für jede Modellparameterkombination p_{i,z_2} im Betriebspunkt q , als Wurzel der Residuen-Quadratsumme (engl. root mean squared error, RMSE), zu berechnen (siehe Formel 5-5). Um Overfitting zu vermeiden wird für die Kalibrierung eine wiederholte, k -fach Kreuzvalidierung (engl. repeated k -fold Cross Validation) angewandt (Zhang 1993).

$$\varepsilon_{q,n}(z_i) = \frac{\sqrt{\sum_{z_i=1}^{Z_i} (y_{q,n} - \check{y}_{q,n}(p_{i,z_i}))^2}}{TOL_q} \quad \text{Formel 5-5}$$

Als Ergebnis der Kalibrierung wird die Parameterkombination p_{i,z_2} bestimmt, für den der Prognosefehler ε_q über alle experimentellen Daten n minimal ist (siehe Formel 5-6). Die Modellunsicherheit des digitalen Mastermodells wird mit der vorgestellten Methode und experimentellen Daten im jeweiligen Anwendungsfall statistisch reduziert, um der Anforderung von Prognosen der Produktfunktion unter geringer Unsicherheit gerecht zu werden.

$$\min_{p_{i,z_2}} \varepsilon_q = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{z_2=1}^{Z_2} (y_{q,n} - \check{y}_{q,n}(p_{i,z_2}))^2}}{TOL_q} \quad \text{Formel 5-6}$$

5.1.3 Entwicklung datengetriebener Metamodelle

Treten im Produktionssystem Abweichungen (aleatorische Unsicherheit) zum Soll-Zustand auf, müssen wirksame Maßnahmen abgeleitet werden, die einem potentiellen Leistungsrisiko der hergestellten Produkte entgegenwirken (siehe Kapitel 2.1). Erweiternd zu den bereits vorgestellten Abhilfemaßnahmen des Toleranzmanagements und der Qualitätssicherung (Verifikation, siehe Kapitel 2.2) wird Produktwissen in der Produktionssteuerung verfügbar gemacht. Durch funktionsorientierte Entscheidungen können Unsicherheiten der Unbestimmtheit und der Übereinstimmung vermieden werden (siehe funktionsorientierte Verifikation, Abbildung 2-6).

Daraus leitet sich die Anforderung von **Echtzeit-nahen Prognosen der Produktfunktion** ab, um den DT für kurzzyklische Entscheidungen im Produktionstakt der Produktionssteuerung nutzbar zu machen. Simulationen von DT benötigen jedoch häufig einen hohen Rechenaufwand. Ihre Zeitdauer ist zu lange, um Echtzeit-nahe Entscheidungen in der Produktionssteuerung abzuleiten. (Barton 1992) Der Ansatz datengetriebener Modelle, als Metamodelle des digitalen Mastermodells, bietet die Möglichkeit eine Echtzeit-nahe Funktionsprognosen zu ermöglichen.

Zu diesem Zweck werden virtuelle Input-Output Datensätze durch den DT simuliert. Für die Prognose der Produktfunktion $\hat{y}_{q,s}$ werden Produktfunktion in allen Betriebspunkten $q = \{1, \dots, Q\}$ des DT, als Prognose der Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,s}$ simuliert. Die $s = \{1, \dots, S\}$ „Simulations-Ausprägungen“ der Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,s}$ werden mittels Latin Hypercube Sampling, anhand der beobachteten Mittelwerte $\mu(x_i)$ und deren Kovarianz $COV(X_i, X_j)$, mit $i, j = \{1, \dots, I\}$ erzeugt. Für eine ausreichende Abdeckung des hochdimensionalen Raumes (große Anzahl I) ist eine ausreichend große Anzahl Ausprägungen S zu berechnen (Prinzip des „Fluchs der Dimensionalität“) (Bellman 2015). Somit wird die aleatorische Unsicherheit der Fertigungsprozesse, die als Fertigungsabweichungen auftreten, in den Datensätzen auch für höherdimensionale Räume berücksichtigt.

Für die Modellierung datengetriebener Modelle ist die Auswahl geeignete Ansätze notwendig, um potentiell entstehender Unsicherheit entgegenzuwirken und somit den Anforderungen hochpräziser Produkte gerecht zu werden. Es ist daher erforderlich, dass die Funktionsprognosen, auch nach Überführung in datengetriebene Metamodelle, das reale Produktverhalten möglichst **präzise**, mit geringer systematischer Abweichung

(Bias), nachbilden. Ebenfalls ist ein hohes Maß an **Robustheit** der Metamodelle erforderlich, so dass die Funktionsprognose nur wenig empfindlich gegenüber auftretender Eingangsunsicherheiten des Modells, wie beispielsweise Messunsicherheiten (siehe Kapitel 2.2.3), reagiert und keine erhöhte Varianz, durch ungünstige Fehlerfortpflanzung, erzeugt wird. (Friedman 1997)

Weiterhin ist die **Interpretierbarkeit der Metamodelle** zu beachten. Diese Transparenz ist erforderlich damit Einflussgrößen identifiziert werden können, deren Beitrag durch Fertigungsabweichungen ein Leistungsrisiko für die Produkte darstellen. Nur wenn die Zusammenhänge verstanden werden können, kann das resultierende Metamodell genutzt werden, um Strategien und Konzepte für die funktionsorientierte Qualitätsregelung in der Produktion zu entwickeln (siehe Kapitel 5.2.3). Schließlich erlauben interpretierbare Metamodelle die Ermittlung von Produktmerkmalen, die durch Adaption, als Regelgröße im Qualitätsregelkreis der Produktion, dem Leistungsrisiko entgegenwirken und damit die Funktionserfüllung der Produkte sicherstellen. Diese Anforderung spielt in der Auswahl eines statistischen Modellierungsansatzes eine entscheidende Rolle, da Verfahren, wie beispielweise Klassifikationsverfahren oder auch die Gaußsche Prozess Regressionen, sich nur sehr schwer oder gar nicht interpretieren lassen. Tabelle 5-1 gibt eine Übersicht ausgewählter Modellierungsansätze hinsichtlich der Eignung der zuvor gestellten Anforderungen.

Tabelle 5-1: Übersicht ausgewählter Ansätze zur datengetriebenen Metamodellierung und ihrer Eignung hinsichtlich der gestellten Anforderungen, (●) erfüllt, (○) nicht erfüllt

| Modellierungsansätze | Prognose im Takt | Interpre- tierbarkeit | Präzision | Robust- heit |
|---|---------------------|--------------------------|-----------|-----------------|
| Klassifikation (KNN, SVM, kNN, ...) | ● | ○ | ● | ○ |
| Regression: | | | | |
| - Klassische, multiple Regression (Ordinary Least-Squares, OLS) | ● | ● | ● | ○ |
| - Stückweise, multiple Regression (bspw. MARS) | ● | ● | ● | ○ |
| - Regression mit Regularisierung (LASSO, Ridge, Elastic Net) | ● | ● | ● | ● |
| - Gaußsche Prozess Regression | ● | ○ | ● | ○ |

Bestehende Klassifikationsansätze sind aufgrund ihrer mangelnden Interpretierbarkeit nicht für den Einsatz in den funktionsorientierten Qualitätsregelkreisen geeignet. Verschiedene Regressionstechniken, wie zum Beispiel (stückweise) multiple Regressionen, Polynome, Sinusfunktionen, Wavelets, Response Surface Modelle, usw., scheinen aufgrund ihrer guten Interpretierbarkeit, Echtzeit-nahen Prognosefähigkeit und Präzision auf vielfältige Datenstrukturen besonders vielversprechend, um Input-Output Relationen des DT zu modellieren (Barton 1992).

Steigt jedoch die Anzahl an Einflussgrößen für komplexe Modelle mit vielfältigen Interaktionen, wodurch prinzipiell Modelle mit höherer Präzision (geringerer Bias) gewonnen werden, steigt im Allgemeinen auch der Anteil an signifikanten Einflussgrößen, die lediglich einen geringen Informationsbeitrag leisten. Daher kommt es in Fällen mit vielen signifikanten Einflussgrößen (und daher auch einer großen Anzahl Datensätze, vgl. „Fluch der Dimensionalität“ zuvor) zu Overfitting. Geringe Eingangsunsicherheiten (z. B. Messunsicherheiten) führen dann bereits zu einer hohen Varianz der Prädiktionen (Varianzinflation). Die geforderte Robustheit des Modellierungsansatzes ist daher nicht erfüllt. (Hastie et al. 2009)

Um diesem Effekt entgegenzuwirken werden Regressionsansätze mit Regularisierungsmethode, zur Auswahl einer Prädiktorteilmenge, auf die Trainingsdaten angepasst (Zou et al. 2005). Ein Ansatz ist die Elastic Net Methode, die eine Kombination aus Ridge Regression und Least Absolute Shrinkage and Selector Operator (LASSO) Regression darstellt. Die beste Schätzung der Regressionskoeffizienten $\hat{\beta}_i$ werden durch Minimierung der Fehlerquadrate ermittelt, wobei Überanpassungen der Prädiktoren mittels des Straftermes λ bestraft werden (siehe Formel 5-7). Der Koeffizient α beschreibt das Verhältnis zwischen L1- (LASSO) und L2- (Ridge) Bestrafung der Regressionskoeffizienten β_i . Modelle mit $\alpha = 0$ führen zur Anpassung reiner Ridge Regressionen, die durch einen steigenden Strafterm λ auftretender Kollinearität von Einflussgrößen reduzieren. Modelle mit $\alpha = 1$ führen zur Anpassung reiner LASSO Regressionen, die durch einen steigenden Strafterm λ eine Dimensionsreduktion der Einflussgrößen zur Folge haben und damit potentielle Überanpassung vermeiden. Mit steigendem λ werden überangepasste Prädiktoren stärker bestraft und die Gesamtheit der Prädiktoren, durch Elimination, reduziert. (Hastie et al. 2009).

$$\hat{\beta}_i = \operatorname{argmin}_{\beta} \sum_{s=1}^S \|\hat{y}_{q,s} - \beta_0 - m_{i,s}\beta_i\|^2 + \lambda \left(\frac{1-\alpha}{2} \|\beta\|^2 + \alpha \|\beta\|_1 \right) \quad \text{Formel 5-7}$$

Anschließend lassen sich Metamodelle \tilde{f}_q zur Echtzeit-nahen Funktionsprognose \tilde{y}_q , in Abhängigkeit der In-Line Messdaten $m_{i,j}$ der Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,j}$, im Produktionstakt prognostizieren (siehe Formel 5-8). Die Auswahl optimaler Elastic Net-Modelle für den jeweiligen Betriebspunkt q , in Abhängigkeit von λ und α , bedarf einer Bewertung der Gesamtunsicherheit der verfügbaren Modelle.

$$\tilde{y}_{q,j} = \tilde{f}_q(m_{i,j}) \quad \text{Formel 5-8}$$

5.1.4 Bewertung der Gesamtunsicherheit und Modellauswahl

Für eine robuste Produktionssteuerung ist die Wahl eines Metamodells mit minimaler Gesamtunsicherheit für den jeweiligen Betriebspunkt q notwendig. Zur Identifikation des Metamodells mit minimaler Gesamtunsicherheit ist eine Unsicherheitsquantifizierung für verfügbare Modelle erforderlich. Die erweiterte Gesamtunsicherheit des Metamodells $U_q(\tilde{f}_q)$ setzt sich aus der Standardunsicherheit $u_{\varepsilon,q}$, die sich auf die Modellunsicherheit aufgrund der systematischen Modellabweichung (Bias) bezieht, und der Standardunsicherheit $u_{I,q}$, die sich auf die Unsicherheiten der Modelleinflussfaktoren bezieht (Varianz), mit einem Erweiterungsfaktor k_{cov} , gemäß GUM zusammen (siehe Formel 5-9). (JCGM 2008; Friedman 1997)

$$U_q = k_{cov} \sqrt{u_{\varepsilon,q}^2 + u_{I,q}^2} \quad \text{Formel 5-9}$$

Die auf die Modellunsicherheit bezogene Standardunsicherheit $u_{\varepsilon,q}$ wird auf Grundlage von unabhängigen Testdaten $t = \{1, \dots, T\}$ als RMSE der Funktionsprognose $\tilde{y}_{q,t}$ der In-Line Messdaten $m_{j,t}$ und den zugehörigen EoL-Funktionsmessdaten $y_{q,t}$ hergestellter Produkte bestimmt (siehe Formel 5-10) (Zhang 1993).

$$u_{\varepsilon,q} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (y_{q,t} - \tilde{y}_{q,t})^2}{T}} \quad \text{Formel 5-10}$$

Die Standardunsicherheit $u_{I,q}$, bezogen auf die Unsicherheiten der Modelleinflussfaktoren, wird nach der Monte-Carlo-Methode gemäß GUM-Supplement 1 bestimmt (siehe Kapitel 2.2.4.2) (JCGM 2008).

Das Metamodell mit minimaler Gesamtunsicherheit, als Kompromiss zwischen systematischer Abweichung und Varianz, wird mittels Regularisierungspfaden, unter logarithmischer Aufteilung über den Lösungsraum der Elastic Net-Parameter $\lambda = [0, \dots, \lambda_{max}]$ und $\alpha = [0, \dots, 1]$ ermittelt (Friedman 1997). Als Ergebnis der Methode können die Metamodelle \tilde{f}_q des DT für den jeweiligen Betriebspunkt q unter minimaler Gesamtunsicherheit $U_q(\tilde{f}_q)$ in Abhängigkeit der In-Line-Messdaten $m_{i,j}$ der Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,j}$ prognostiziert werden. Das Vorgehen erlaubt die Integration **präziser und robuster Metamodelle** in die Produktionssteuerung, zur Prognose der Produktfunktion im Produktionstakt. Nachfolgenden können ermittelten Metamodelle des DT in Ansätze der Qualitätsregelung integriert werden (siehe Kapitel 5.2.3).

5.2 Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung

5.2.1 Modellierung des Produktionssystems unter Unsicherheit

Aufbauend auf den Ansätzen der Qualitätsregelung in der Produktion ist es erforderlich die bestehenden Strategien (siehe Kapitel 0) anhand von produktionstechnischen Kennzahlen bewertbar zu machen. Durch Modellierung der Strategien für maschinenübergreifende Regelungen in einer ereignisorientierten Materialflusssimulation wird die Grundlage für eine technische und wirtschaftliche Bewertung (siehe Kapitel 5.3) gelegt.

Die ereignisgesteuerte Materialflusssimulation besteht dabei aus einer Hauptroutine, einer Simulationsuhr, einem Ereigniskalender, einer Zeitführungsroutine, einem stochastischen Zufallszahlengenerator, einer Ereignisroutine, einem Produktionssystem und einer Ergebnisroutine (VDI 2014; Law et al. 2000) (siehe Abbildung 5-4).

Die allgemeine Hauptroutine der ereignisorientierten Simulation initialisiert zunächst die Simulationsparameter, sowie die Entitäten, die sich bereits im Produktionssystem befinden. Anhand vorgegebener Startereignisse im Ereigniskalender erfolgt der Simulationsstart. Anschließend interagieren der Ereigniskalender und die Bauteilentitäten mit objektbezogenen Ereignisroutinen der einzelnen Prozessbausteine im Produktionssystem, bis das Endereignis (vorgegebene Simulationsdauer, Produktionsmenge, ...) erreicht ist.

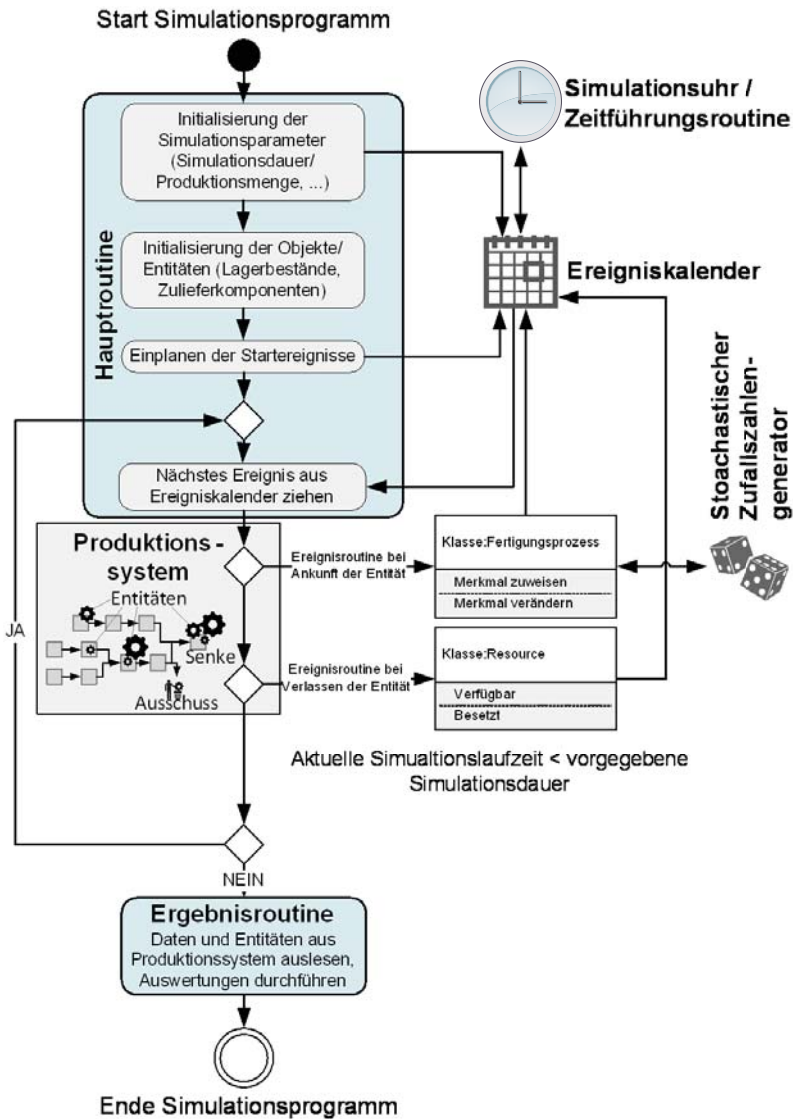











Abbildung 5-4: Ablaufdiagramm Hauptroutine der ereignisorientierten Ablaufsimulation eines Produktionssystems (nach A_Steinlein 2017)

Abschließend führt die Ergebnisroutine eine Datenaufbereitung und Auswertung durch. (Arnold et al. 2019) Ergänzend werden, im vorliegenden Ansatz den Entitäten der ereignisorientierten Materialflusssimulation einzelne Ausprägungen geometrischer Produktmerkmale bzw. hydraulischer und elektro-mechanischer Produkteigenschaften in den Fertigungsprozessen stochastisch zugewiesen, verändert, gemessen und ausgewertet. Das Vorgehen erlaubt es neben der Analyse produktionstechnischer Kennzahlen, wie Durchlaufzeitminimierung, Terminabweichungsminimierung, Auslastungsmaximierung, Bestandsminimierung und Wirtschaftlichkeitsmaximierung (VDI 2014), auch auf die Produktqualität zu schließen.

Für die anwendungsbezogene Materialflusssimulation sind die Modellierung des Produktionssystems und die Abstraktion der darin enthaltenen Prozessschritte notwendig (Arnold et al. 2019). Im Vorgehen werden daher einzelne Prozesse der realen Wertschöpfungskette mit ihren auftretenden Unsicherheiten in stochastischen Prozessbausteinen nachgebildet. Die Aufteilung auftretender Produktionsprozesse orientiert sich dabei an der VDI Richtlinie 2860 „Montage- und Handhabungstechnik“ zur Unterscheidung von standardisierten Prozessbausteinen in Fertigungs-, Mess-, Montage-, Lagerungs-, Sortier-, Black Box und Warteschlangenprozesse (VDI 1990) (siehe Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Übersicht Prozessbausteine zur ereignisorientierten Materialflusssimulation unter Einbeziehung von Produktmerkmalen und -Eigenschaften (nach VDI 1990)

| Symbol | Prozessart | Funktionen | Eingangsgrößen |
|---|-------------------|---|--|
|  | Fertigungsprozess | <ul style="list-style-type: none"> • Erzeugen eines Merkmals- oder Eigenschaftswertes • Ändern eines bestehenden Merkmals- oder Eigenschaftswertes • Addieren der Prozesskosten | <ul style="list-style-type: none"> • Nennwert • Merkmal- oder Eigenschaftswerte <ul style="list-style-type: none"> ○ Historische Messdaten ○ Statistische Verteilungen ○ Fähigkeitskennwerte • Prozesszeit • Prozesskosten |
|  | Messprozess | <ul style="list-style-type: none"> • Erzeugen eines Mess-/Prüfergebnisses für bestehende Merkmalswerte oder -paare • Ausschleusen von Bauteilen bzw. -gruppen außerhalb der Spezifikation • Addieren der Prozesskosten | <ul style="list-style-type: none"> • Sollwert • Merkmals-/Eigenschaftsspezifikation • Messunsicherheit • Prozesszeit • Prozesskosten |

| Symbol | Prozessart | Funktionen | Eingangsgrößen |
|---|-----------------------|---|---|
|  | Montageprozess | <ul style="list-style-type: none"> • Konventionelles Fügen/ Montieren zugeführter Bauteile • Datenübertrag von Bauteilsdaten zu Baugruppendaten • Addieren der Prozesskosten | <ul style="list-style-type: none"> • Fügepartner • Hauptbaugruppe • Anzahl jeweiliger Bauteile • Prozesszeit • Prozesskosten |
|  | Sortierprozess | <ul style="list-style-type: none"> • Sortieren von Bauteilen nach Teilenummer, Mess-/Prüfergebnis, Produktmerkmal bzw. -eigenschaft • Addieren der Prozesskosten | <ul style="list-style-type: none"> • Klassifizierungsmerkmal • Anzahl Klassen • Prozesszeit • Prozesskosten |
|  | Lagerungsprozess | <ul style="list-style-type: none"> • Lagern von Bauteilen • Speichern von Messwerten und Positionen • Lagern in zuvor festgelegten Klassen • Addieren der Prozesskosten | <ul style="list-style-type: none"> • Lagerkapazität • Lagerfläche • Anzahl Regale • Wiederbeschaffungszeit • Bestellmenge • Mindestbestand • Anfangsbestand • Lagerung in Klassen (Ja/ Nein) <ul style="list-style-type: none"> ○ Klassenanzahl ○ Bestellmenge pro Klasse • Prozesskosten |
|  | Warteschlangenprozess | <ul style="list-style-type: none"> • Lagern von Bauteilen • Addieren der Prozesskosten | <ul style="list-style-type: none"> • Pufferkapazität • Pufferfläche • Prozesskosten |
|  | Black Box Prozess | <ul style="list-style-type: none"> • Vereinfachung und Repräsentation von Hilfsprozessen in Zeitdauer und Kapazität • Addieren der Prozesskosten | <ul style="list-style-type: none"> • Prozesskapazität • Prozesszeit • Prozesskosten |
|  | Transportprozess | <ul style="list-style-type: none"> • Transportieren von Entitäten zwischen Prozessbausteinen • Addieren der Prozesskosten | <ul style="list-style-type: none"> • Prozessdauer • Prozesskapazität • Prozessfrequenz • Prozesskosten |
|  | Informationstransfer | <ul style="list-style-type: none"> • Informationstransfer zu Prozessen, Steuerungen, Datenbanken, ... • Auslösen von Bestellungen | <ul style="list-style-type: none"> • Prozessdauer • Prozessfrequenz |

Der Prozessbaustein für **Fertigungsprozesse** hat die Funktion, einer Entität Produktmerkmale und -eigenschaften zuzuweisen (bspw. für ur- und umformende sowie zerspanende Prozesse) bzw. bestehende Merkmale und Eigenschaften zu ändern (bspw. für Beschichtungsprozesse). Auftretende aleatorische Unsicherheiten als prozessinhärente Fertigungsabweichung werden durch stochastische Monte-Carlo Zufallsexperimente nachgebildet, denen jeweils eine statistische Näherung der Prozessverteilung hinterlegt ist. Mittels n-facher Wiederholung des Zufallsexperiments, werden konkret ausgeprägte Zufallszahlen erzeugt, deren Ergebnisverteilung der Approximation der zuvor bekannten Stichprobe realer Fertigungsprozessdaten entspricht. (Deutsch et al. 2014) Die einzelnen Ausprägungen werden den Entitäten zugewiesen und auf der Entität selbst gespeichert.

Um Zeitreiheneffekte in den Fertigungsprozessen mit signifikanten Stabilitätseffekten ebenfalls zu berücksichtigen, werden für betreffende Prozesse Streuungsanteile der Fähigkeit und der Stabilität analysiert. Die Stabilitätseffekte werden mittels Fourier-Approximation angenähert und als dynamischen Erwartungswert mit konstanter Prozessstandardabweichung (Fähigkeitsanteil) modelliert (Chai et al. 2014).

Messprozesse werden im zugehörigen Prozessbaustein mit der Funktion zur Erzeugung von Mess- bzw. Prüfergebnissen $m_{i,j}$ einzelner Entitäten j einer Bauteilart i auf Basis ihrer bestehenden Ausprägungen der Produktmerkmale und -eigenschaften modelliert. Die stochastische Modellierung der aleatorische Messunsicherheit des Messprozesses erfolgt durch Zugrundelegung einer Normalverteilung \mathcal{N} , wobei deren Erwartungswert dem realen Merkmals- bzw. Eigenschaftswert $x_{i,j}$ der Entität und die Standardabweichung der zuvor ermittelten Standardmessunsicherheit $u(x_i)$ des zugehörigen Messprozess entspricht (siehe Formel 5-11).

$$\mathcal{N}(\mu = x_{i,j}, \sigma^2 = u^2(x_i)) \quad \text{Formel 5-11}$$

Die Ermittlung des Mess- bzw. Prüfergebnisses erfolgt mittels einmaliger Durchführung eines Monte-Carlo Zufallsexperimentes, wobei dem Experiment die statistische Verteilung \mathcal{N} aus Formel 5-11 hinterlegt ist. Das Ergebnis wird der Entität ebenfalls zugewiesen und mitgeführt. Anhand der erzeugten Ausprägung, als Mess- bzw. Prüfergebnis, erfolgt anschließend ein Abgleich mit den Merkmals- bzw. Eigenschaftsspezifikationen (siehe Formel 5-12). Nicht-konforme Entitäten werden nachfolgend ausgeschleust und dem Ausschuss zugeführt (siehe Papierkorb in Abbildung 5-5 ff.). Eine Berücksichtigung von Nacharbeit bzw. Wiedergewinnung der Bauteile erfolgt an dieser Stelle nicht.

$$USG + U(x_i) \leq m_{i,j} \leq OSG - U(x_i)$$

Formel 5-12

Das konventionelle Fügen bzw. Montieren von zugeführten Bauteilen oder -gruppen wird im Standardprozess **Montagevorgänge** modelliert. Die Identifikation und Informationen der Bauteile werden an die Entität der Hauptbaugruppe übertragen und deren eigene Entität nachfolgend gelöscht. Zur korrekten Montage sind die Bauteile und ihre jeweilige Anzahl, sowie die Hauptbaugruppe zu spezifizieren.

Sortierprozesse werden ebenfalls in einem eigens modellierten Standardprozess abgebildet, in dem Entitäten nach Bauteilart, Mess- bzw. Prüfergebnissen oder auch Merkmals- und Eigenschaftswerten in zuvor spezifizierten Klassen sortiert werden. Dieser Prozess unterliegt der Annahme, dass auf Basis der Klassifizierungswerte keine weiteren Fehler durch den Klassierungsprozess selbst entstehen.

Das Lagern von Bauteilen und -gruppen wird im **Lagerungsprozess** oder auch **Warteschlangenprozess** modelliert. Im Lagerungsprozess können, im Unterschied zum Warteschlangenprozess, Bauteile nicht nur nach dem FIFO-Prinzip, sondern losweise oder bauteilindividuell ausgelagert werden. Dafür besteht eine Lagerverwaltung, die bei Bedarf zur losweisen oder bauteilindividuellen Nachverfolgung, anhand der Bauteilidentifikation oder der Bauteilmerkmale, auf ihre Liegeposition eingesetzt werden kann.

Der **Black Box** Standardbaustein erlaubt es Hilfs- und Nebenprozesse auf eine aggregierte Kapazität und Durchlaufzeit zu vereinfachen. Dabei kann ohne Verlust der Wiederbeschaffungszeit und -frequenz der Fokus auf relevante Prozesse für Produktmerkmale und -eigenschaften gelegt werden.

Durch Verknüpfen der einzelnen Prozessbausteine mit **Transportprozessen** und **Informationstransfers** wird es möglich die Bausteine zu einem Netzwerk zu verknüpfen. Die erzeugten Entitäten folgen dem Netzwerk und fließen von einem Prozessbaustein zum nächsten. Allen Standardbausteinen, mit Ausnahme dem Lagern von Bauteilen, wird eine feste Prozesszeit zugewiesen, aus der sich die Verweilzeit einer Entität am jeweiligen Prozess ergibt. Die definierten Standardbausteine erlauben die datenverarbeitungsgerechte Umsetzung der Modellierung des Produktionssystems, unter Verwendung einer bausteinorientierten Simulationsumgebung. (Arnold et al. 2019)

In allen Standardbausteinen wird durch Addieren der notwendigen **Prozesskosten** K_i zum ursprünglichen Bauteilwert K_{W-1} , gemäß dem Ansatz der aktivitätsbasierten Kos-

tenbewertung (siehe Anhang A2), der monetäre Gesamtwert eines Bauteils/einer Baugruppe K_W zum aktuellen Wertschöpfungszustand W nach Verlassen des aktuellen Wertschöpfungsprozesses w berechnet (siehe Formel 5-13) (Etienne et al. 2017). Der Gesamtwert wird gemäß dem Ansatz der Kostenbetrachtung im Umlaufbestand jeder Entität zugewiesen und mitgeführt (siehe Kapitel 3.2.3). Dieses Vorgehen legt den Grundstein zur wirtschaftlichen Bewertung im Produktionssystem (siehe Kapitel 5.3).

$$K_W = K_{W-1} + K_i \quad \text{Formel 5-13}$$

5.2.2 Modellierung von Qualitätsregelkreisen zur Materialflusssimulation

Die nachfolgenden Ansätze zur Qualitätsregelung sind durch ihren maschinenübergreifenden Regelungsansatz, auf organisatorischer Ebene des Produktionssystems, zur Qualitätssteigerung charakterisiert. Der Modellierungsansatz der Standardbausteine für die Qualitätsregelung wird daher durch Kombination der zuvor eingeführten Prozessbausteine durchgeführt. Die Qualitätsregeln folgen alle dem Haupt- zu Paarungsbauteil-Prinzip. Das Hauptbauteil ist ein Bauteil bzw. Baugruppe mit einem qualitätskritischen Produktmerkmal und -eigenschaft bezogen auf die Prozessfähigkeit. In den meisten Fällen besitzt das Hauptbauteil gleichzeitig einen höheren wirtschaftlichen Gesamtwert und ein größeres Lagerungsvolumen gegenüber dem Paarungsbauteil.

5.2.2.1 Montagestrategien der Qualitätsregelung

Zur Modellierung der **selektiven Montage** werden zwei Montagepartner dem Standardbaustein zugeführt (siehe Abbildung 5-5). Im eigentlichen selektiven Montagevorgang wird ein Hauptbauteil einem maschineninternen Warteschlagenprozess entnommen (1), funktionsrelevante Produktmerkmal/ -eigenschaft bauteilindividuell gemessen (2) und das Messergebnis per Informationstransfer an den Qualitätsregler übermittelt (3). Anschließend erfolgt der Transport des Hauptbauteils zum eigentlichen Montageprozess (4). Im Qualitätsregler wird zunächst der individuelle, optimale Merkmalsnennwert n_p des Paarungsbauteils p , auf Basis des Messergebnisses $m_{h,o}$ für die aktuelle Ausprägung o des Hauptbauteils h und dem geometrisch spezifizierten Soll-Spiel-/Übermaß s_p berechnet (5) (siehe Formel 5-14). Anschließend erfolgt die Identifikation der passenden Merkmalsklasse $c(p)$, aus der verfügbaren Klassenanzahl $C(p)$ und der Klassenbreite $b(p)$, des Paarungsbauteils p für die bestmögliche Kompensation des

Hauptbauteils (siehe Formel 5-15). Die vorliegende Klassenbreite b , für eine äquidistante Aufteilung, ergibt sich aus der vorgegebenen Spezifikationsgrenzen OSG_p und USG_p und der vorliegenden Klassenanzahl C (siehe Formel 5-16).

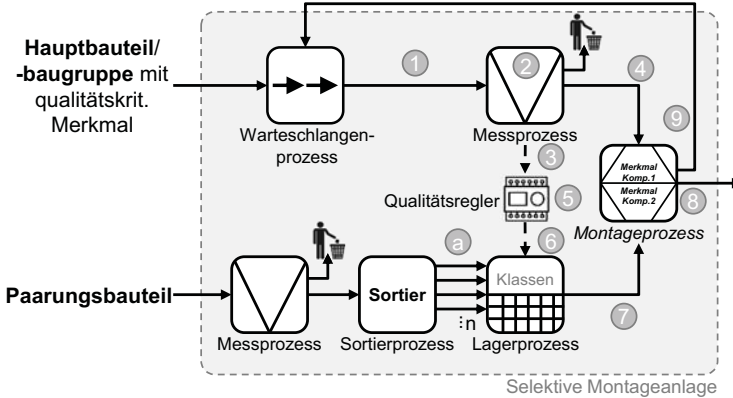


Abbildung 5-5: Übersicht Standardbaustein selektive Montage für die Materialflusssimulation, eigene Darstellung

$$n_p = m_{h,o} + s_p \quad \text{Formel 5-14}$$

$$c(p) = \left\lceil \frac{n_p}{b(p)} \right\rceil \quad \text{Formel 5-15}$$

mit $c \in \mathbb{Z} = \{1, \dots, C\}$

und $\lceil x \rceil := \min\{\delta \in \mathbb{Z} \mid \delta \geq x\}$ ¹

$$b(p, C) = \frac{OSG_p - USG_p}{C(p)} \quad \text{Formel 5-16}$$

Für die Paarungsbauteile der gewählten Klasse c müssen die Spezifikationen OSG_g und USG_g der Baugruppe g nach dem selektiven Montieren zur vorliegende Ausprägung o des Hauptbauteils h , durch ein geeignetes Klassendesign, erfüllen (siehe Formel 5-17).

$$\begin{aligned} USG_g &\leq USG_p + (c(p) - 1) * b(p) + m_{h,o} \cap OSG_g \\ &\geq OSG_p + c(p) * b(p) + m_{h,o} \end{aligned} \quad \text{Formel 5-17}$$

¹ Die Aufrundungsfunktion (Gaußklammer) sind Funktionen, die jeder reellen Zahl die nächstliegende nicht kleinere ganze Zahl zuordnen.

Per Informationstransfer an den Lagerprozess des Paarungsbauteils wird der Auslageauftrag eines Paarungsbauteils der gewählten Klasse c übermittelt (6). Die Paarungsbauteile wurden zuvor in Merkmalsklassen zugeführt oder innerhalb der Montageanlage in einem Messprozess gefolgt von einem Sortierprozess nach Produktmerkmalen und -eigenschaften sortiert und in diesen losweise gelagert (a).

Ist ein Paarungsbauteil der gewählten Klasse verfügbar, wird es zum Fügeprozess transportiert (7) und zum Hauptbauteil montiert (8). Ist im aktuellen Zustand kein Paarungsbauteil der Klasse c verfügbar (Deadlock-Situation, siehe Kapitel 3.2.2.1), wird im Qualitätsregler die Erfüllung geforderter Spezifikationen (Formel 5-17) für die Klassen $c - 1$ bzw. $c + 1$ geprüft (Deadlock avoidance, nach Colledani et al. 2014a). Erfüllt eine benachbarte Klasse die Anforderungen, wird ein entsprechendes Paarungsbauteil ausgelagert. Werden die Spezifikationsanforderungen von alternativen Klassen nicht erfüllt bzw. ist kein Paarungsbauteil verfügbar, wird das Hauptbauteil ausgeschleust und zu einem späteren Zeitpunkt dem Montageprozess wieder zugeführt (9).

Der Ansatz der selektiven Montage in Klassen wird zur Qualitätssteigerung durch individuelle Kompensation der Fertigungsabweichungen des Hauptbauteils bzw. der Baugruppe eingesetzt. Gemäß den vorgestellten Ansätzen im Stand der Technik spielt die Aufteilung in Merkmals- bzw. Eigenschaftsklassen eine maßgebliche Rolle in Bezug auf die erreichbare Produktqualität, den Informationsverlust, klassenindividuelle Lagerkapazitäten und die Restbestände. Die Anzahl der Klassen wird jedoch durch die Messunsicherheit der In-Line Messprozesse, sowie durch steigende Komplexität in der Logistik und die dadurch entstehenden Lager- und Gemeinkosten, mit zunehmender Klassenanzahl, eingeschränkt. Diese Aspekte werden im Rahmen der technischen und wirtschaftlichen Bewertung, sowie Optimierung einbezogen (siehe Kapitel 5.3).

Die Modellierung der **individuellen Montage** erfolgt in großen Teilen gleich, wie die Modellierung der selektiven Montage. Unterschiede bestehen in der bauteilindividuellen Nachverfolgung von Messwerten der Paarungsbauteile (a) sowie der bauteilindividuellen Nachverfolgung im maschineninternen Lagerungsprozess (b). Daraus resultiert ein Unterschied zur der Ermittlung der optimalen Montagepaarung im Qualitätsregler (5) (siehe Abbildung 5-6).

Der Messwert $m_{p,j}$, der individuellen Ausprägung j des Paarungsbauteils p wird in einem In-Line Messprozess erfasst und gemeinsam mit einer eindeutigen Identifikation

per Informationstransfer an die zentrale Qualitätsdatenbank übermittelt (a). In der nachfolgenden Einlagerung des Paarungsbauteils in den Lagerungsprozess wird ebenfalls die zugehörige Bauteilidentifikation der Lagerverwaltung übergeben (b). Somit wird im maschineninternen Lagerungsprozess eine bauteilindividuelle Nachverfolgung und Auslagerung von Paarungsbauteilen möglich (7).

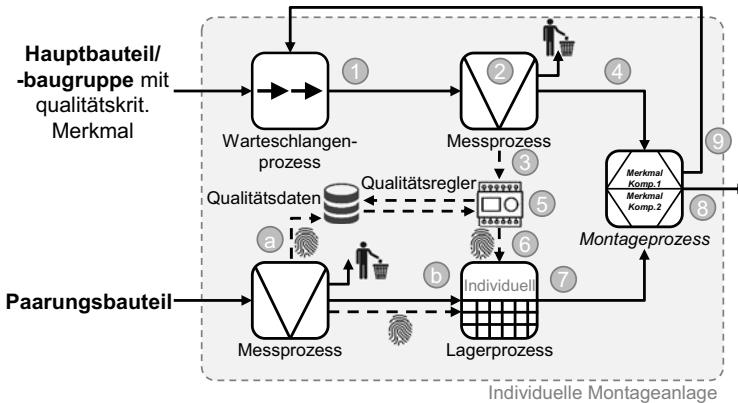


Abbildung 5-6: Übersicht Standardbaustein individuelle Montage für die Materialflusssimulation, eigene Darstellung

Im Qualitätsregler der individuellen Montage wird, parallel zum Vorgehen der selektiven Montage, zunächst der individuelle, optimale Merkmalsnennwert $n(p)$ des Paarungsbauteils p berechnet (5) (siehe Formel 5-14). Anschließend wird für jede im Lagerungsprozess verfügbare Ausprägung j des Paarungsbauteils p die absolute Abweichung a zum optimalen Merkmalswert $n(p)$, anhand der zuvor erhobenen, detaillierten Messdaten $m_{n,o}$ in den Qualitätsdaten, ermittelt (siehe Formel 5-18). Die eigentliche Auswahl des individuellen Paarungsbauteils kann anhand unterschiedlicher Optimierungsziele erfolgen. Ein Ziel ist die Ermittlung der minimalen Abweichung a_j aller verfügbaren Paarungsbauteile ($p_{Best-Fit}$, siehe Formel 5-19). Ein weiteres Ziel ist die Ermittlung des Paarungsbauteils mit der längsten Verweildauer im Lagerungsprozess t_L ($p_{FIFO-Fit}$, siehe Formel 5-20). Dabei werden ausschließlich Paarungsbauteile unter Erfüllung der Spezifikationsanforderungen USG_g bzw. OSG_g der Baugruppe g in Betracht gezogen.

$$a_j = |n(p) - m_{p,j}|$$

Formel 5-18

$$p_{Best-Fit} = \{ \min(a_j) \mid USG_g + U \leq (m_{p,j} - m_{h,o}) \leq OSG_g - U \} \quad \text{Formel 5-19}$$

$$p_{FIFO-Fit} = \{ \max(t_L(p_j)) \mid USG_g + U \leq (m_{p,j} - m_{h,o}) \leq OSG_g - U \} \quad \text{Formel 5-20}$$

Ist ein passendes Paarungsbauteil $p_{Best-Fit}$ bzw. $p_{FIFO-Fit}$, zur Kompensation der Abweichung des Hauptbauteils ermittelt, wird der Auslagerungsauftrag für die explizite Bauteilidentifikation, per Informationstransfer, an den Lagerprozess übermittelt (6) und die zugehörigen Messdaten aus den im Lagerungsprozess verfügbaren Messdaten entfernt. Es erfolgt die individuelle Auslagerung und der Transport des Paarungsbauteils zum Fügeprozess (7). Dort wird das Paarungsbauteil zum Hauptbauteil montiert (8).

Kann der Qualitätsregler (5) innerhalb der Qualitätsdaten kein verfügbares Paarungsbauteil identifizieren, das die Spezifikationsanforderungen erfüllt (siehe Formel 5-19 und Formel 5-20), wird das Hauptbauteil ausgeschleust und zu einem späteren Zeitpunkt dem Montageprozess wieder zugeführt (9).

Mit den Modellierungen für die selektive und individuelle Montage ist auch jeweils eine **sequentielle, selektive** bzw. **sequentielle, individuelle Montage** realisierbar (siehe 3.2.2.1). Im Unterschied zur vorgestellten Modellierungen werden die Zuordnung der Merkmalsklassen bzw. der Bauteile vorgelagert durchgeführt und als untrennbarer Bauplatz der Montagelinie zugeführt.

5.2.2.2 Fertigungsstrategien der Qualitätsregelung

Die **statistisch adaptive Fertigung** ist durch die bedarfsorientierte Anpassung von Fertigungsparametern in Vorprozessen zur Montage charakterisiert (siehe Abbildung 5-7). Eine Anpassung erfolgt ausschließlich bei Fertigungsprozessen, deren hergestellte Produktmerkmale und -eigenschaften die größere Prozessfähigkeit im späteren Merkmalspaar vorweisen (Paarungsbauteil). Vorgelagert zum Montageprozess nehmen In-Line Messprozesse die Messdaten der Produktmerkmale und -eigenschaften auf und übermitteln diese per Informationstransfer an die Qualitätsdatenbank (a und b). Der Qualitätsregler liest zunächst die konkrete Verteilung der Messergebnisse für das Hauptbauteil $m_{h,o}$ im Betrachtungszeitraum $t_{sim} - 1$ bis t_{sim} aus (1) und führt anschließend die Schätzung optimaler Fertigungsparameter durch (2).

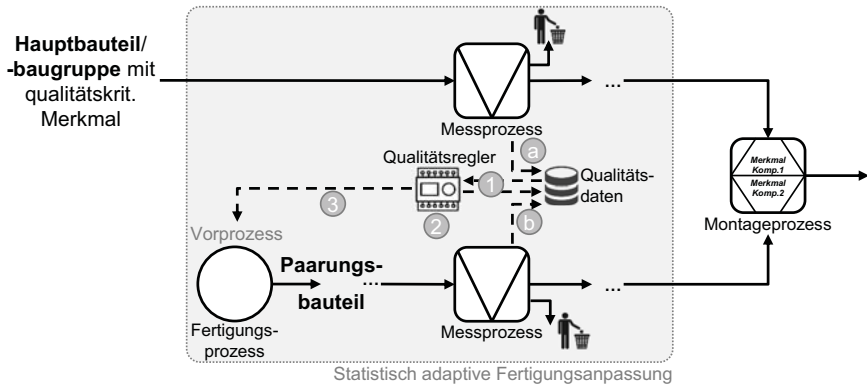


Abbildung 5-7: Übersicht Standardbaustein statistisch adaptive Fertigung für Materialflusssimulation, eigene Darstellung

Dafür wird im Qualitätsregler die konkrete Verteilung optimaler Merkmalsnennwert $n(p)$ des Paarungsbauteils p , auf Basis der Messergebnisse $m_{h,o}$ und des geometrisch spezifizierten Soll-Spiels/-Übermaßes s_p berechnet (siehe Formel 5-21). Anschließend werden die Parameter der stetigen Verteilung für $n(o)$ mittels Schätzfunktion, beispielsweise mit der Maximum-Likelihood-Methode, für K Stichproben geschätzt (siehe Formel 5-22) (Hedderich et al. 2016).

$$\begin{aligned} n(o) &= m_{h,o} + s_p \\ \text{mit } o &= \{1, \dots, O\} \end{aligned} \quad \text{Formel 5-21}$$

$$L(\vartheta) = \prod_{k=1}^K P(N_k = n_{p,o,k} | \vartheta) \quad \text{Formel 5-22}$$

In Anwendung der statistisch adaptiven Fertigung in Kombination mit der konventionellen Montage ist es das Ziel den optimalen Fertigungsmittelwert μ_i für eine möglichst hohe First Pass Yield Rate nach der zufälligen Montage zu schätzen. Unter der Annahme einer Normalverteilung und bekannter, empirischer Varianz s^2 des Fertigungsprozess kann der optimale, empirische Fertigungsmittelwert $\mu_i = \mu(\bar{n})$ für die berechnete Stichprobe von $t_{Sim} - 1$ bis t_{Sim} (damit $K = 1$), durch partielle Ableitung der Maximum-Likelihood-Methode (engl. maximum-likelihood estimator, MLE) nach μ_i , geschätzt werden (siehe Formel 5-23) (Hedderich et al. 2016).

$$\frac{\partial L(\mu)}{\partial \mu} = \frac{\partial}{\partial \mu} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(n_{p,o} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{Formel 5-23}$$

$$\Leftrightarrow \mu = \frac{1}{n} \sum_{o=1}^O n_{p,o}$$

Die statistisch adaptive Fertigung wird im Zusammenspiel mit der selektiven bzw. individuellen Montage hingegen eingesetzt, um die Streuung eines Produktmerkmals bzw. -eigenschaft des Paarungsbauteils p gezielt zu vergrößern. Durch Parameteranpassung erfolgt die Fertigung des Merkmals auf N verschiedene Fertigungsnennwerte (teilweise auf parallelen Maschinen), um eine möglichst bedarfsorientierte statistische Gesamtheit zu erzielen (Matsuura et al. 2011; Akansel et al. 2011). Die optimalen Fertigungsnennwerte einer gewichteten Gauß-Mischverteilung, mit den Gewichten π_i , können durch die MLE-Methode numerisch geschätzt werden (siehe Formel 5-24) (Hedderich et al. 2016).

$$L(\vartheta_i) = \prod_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \pi_i \mathcal{N}(n_{p,o}; \mu_i; \sigma_i^2) \quad \text{Formel 5-24}$$

mit $\vartheta = \{\mu_1, \dots, \mu_N, \sigma_1, \dots, \sigma_N, \pi_1, \dots, \pi_N\}$ und $\sum_{i=1}^N \pi_i \stackrel{!}{=} 1$

Werden die verschiedenen Fertigungsnennwerte auf demselben Fertigungsprozess, mit konstanter Prozessfähigkeit gefertigt, kann Varianzgleichheit ($\sigma_1^2 = \dots = \sigma_n^2$) in der Parameterschätzung der Mischverteilung angenommen werden (siehe Abbildung 5-8).

Sind die optimalen Fertigungsnennwerte und die ggf. zugehörigen Gewichtsanteile ermittelt, werden diese per Informationstransfer an den vorgelagerten Fertigungsprozess übermittelt (3).

Im industriellen Anwendungsfall werden auch Kanban-Steuerungen zur Fertigung bestimmter Merkmalsklassen eingesetzt, um Paarungsbauteile bedarfsorientiert an vorgegebenen Fertigungsnennwerten einfach und transparent zu steuern. Der Vorteil der in dieser Arbeit vorgeschlagenen adaptiven Fertigungsanpassung besteht in der Freiheit, optimale Fertigungsnennwerte in einem kontinuierlichen Wertebereich zu ermitteln ohne an feste Vorgabewerte gebunden zu sein.

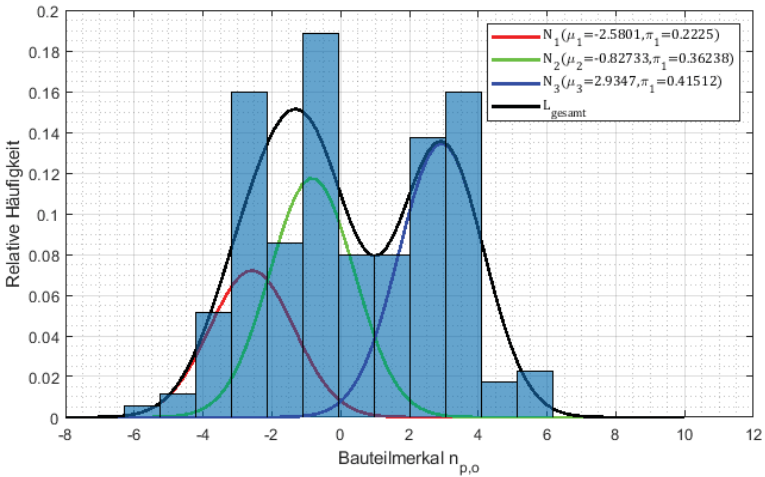


Abbildung 5-8: Beispielhafte grafische Darstellung der Maximum-Likelihood-Schätzung für Gauß-Mischverteilung und $\eta = 3$ unter Varianzgleichheit $\sigma_\eta = 1,23$, eigene Darstellung

Die **individuelle Fertigung** ist als Feinbearbeitungssystem durch die Kombination standardisierter Prozessbausteine modelliert (siehe Abbildung 5-9).

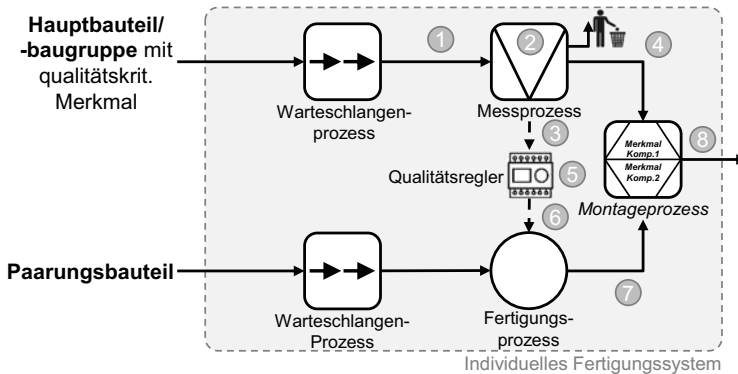


Abbildung 5-9: Übersicht Standardbaustein individuelle Fertigung für die Materialflusssimulation, eigene Darstellung

Im individuellen Fertigungsvorgang wird, analog zur selektiven Montage, ein Hauptbauteil aus dem maschineninternen Warteschlagenprozess entnommen (1), das funktionsrelevante Produktmerkmal/-eigenschaft bauteilindividuell gemessen (2) und das Messergebnis $m_{n,o}$ per Informationstransfer an den Qualitätsregler übermittelt (3). Anschließend erfolgt der Transport des Hauptbauteils zum eigentlichen Montageprozess (4). Im Qualitätsregler der individuellen Fertigung wird der individuelle, optimale Merkmalsnennwert $n(p)$ des Paarungsbauteils p berechnet (5) (siehe Formel 5-14). Per Informationstransfer wird $n(p)$ an den Fertigungsprozess für das Paarungsbauteils übermittelt (6). Im Fertigungsprozess wird ein Halbzeug des Paarungsbauteils mit Fertigungsnennwert $n(p)$ fein bearbeitet. Unter der Annahme, dass der Prozess normalverteilt, mit bekannter Varianz σ^2 Halbzeuge fein bearbeitet, wird dem Paarungsbauteil p ein Merkmalswert $x_{p,j}$ mittels einmaliger Durchführung eines Monte-Carlo Zufallsexperiment unter der angenommenen statistischen Verteilung zugewiesen (siehe Formel 5-25).

$$\mathcal{N}(\mu = n(p), \sigma^2) \quad \text{Formel 5-25}$$

Nach abgeschlossenem Feinbearbeitungsprozess erfolgt der Transport des Paarungsbauteils zum Fügeprozess (7), wobei das Paarungsbauteil durch individuelle Zuordnung zur zuvor gemessenen Ausprägung o des Hauptbauteils zugeordnet werden muss (individuelle Montage). Das Paarungsbauteil wird zum Hauptbauteil montiert oder als untrennbarer Bausatz (Kit), in einem gemeinsamen Warenträger, zu den nachfolgenden Montageprozessen weitertransportiert (8).

Im industriellen Anwendungsfall wird die Strategie der individuellen Fertigung beispielsweise mit Feinschleifprozessen realisiert, deren Prozessfähigkeit $C_p > 2$ ist, bezogen auf die Spezifikation OSG_g bzw. USG_g der Gesamtbaugruppe g nach dem selektiven Montieren zur vorliegende Ausprägung o des Hauptbauteils (siehe Formel 5-26).

$$C_p = \frac{OSG_g - USG_g}{3 * 2 * \sigma} > 2 \quad \text{Formel 5-26}$$

5.2.3 Integration produktbezogener Funktionsmodelle zur funktionsorientierten Qualitätsregelung

Die Integration von Produktwissen in die vorgestellten Ansätze der Qualitätsregelung ermöglicht eine funktionsorientierte Optimierung der Bauteilauswahl bzw. Fertigungsparameter innerhalb der Montage- und Fertigungsstrategien.

In den Montagestrategien werden die abgeleiteten Metamodelle des DT \tilde{f}_q zur Ermittlung optimaler Paarungsbauteile p , anhand der prognostizierten Funktionserfüllung $\tilde{y}_{q,j}$ in Abhängigkeit der In-Line Messdaten $m_{i,j}$, eingesetzt. Die Ermittlung optimaler Funktionsklasse \hat{e} für $e = \{1, \dots, E\}$ (siehe Formel 5-27) oder optimale, individuelle Bauteilen $p_{Best-Fit}$ (siehe Formel 5-28) erfolgt im direkten Abgleich zu den nominalen Produktfunktionen $y_{q,nom}$ und deren spezifizierten Funktionsgrenzen OSG_q und USG_q für den jeweiligen Betriebspunkt q , unter Berücksichtigung der Gesamtunsicherheit des Metamodells U_q .

$$\hat{e} = \left\{ \min(|y_{q,nom} - \tilde{y}_{q,j}(e)|) \mid USG_q + U_q \leq \tilde{y}_{q,j} \leq OSG_q - U_q \right\} \quad \text{Formel 5-27}$$

$$p_{Best-Fit} = \left\{ \min(|y_{q,nom} - \tilde{y}_{q,j}|) \mid USG_q + U_q \leq \tilde{y}_{q,j} \leq OSG_q - U_q \right\} \quad \text{Formel 5-28}$$

In beiden Fällen wird die funktionsorientierte Bewertung und Auswahl von Paarungsbauteilen p , mit mehreren funktionsrelevanten Merkmalen und komplexen Interaktionen, anhand der Funktionsmodelle \tilde{f}_q , möglich. Eine Klassifizierung nach Merkmalsklassen $c(p)$ oder Auswahl nach Spezifikationen OSG_g bzw. USG_g und deren Prüfung auf Konformität entfällt.

Die Fertigungsstrategien werden durch Integration der gewonnenen Funktionsmodelle ebenfalls zur funktionsorientierten Ermittlung optimaler Fertigungsparameter befähigt. Die Schätzung optimaler Fertigungsnennwerte erfolgt weiterhin im Qualitätsregler, nun jedoch in Zusammenspiel mit den Funktionsmodellen \tilde{f}_q . Zunächst wird der funktionsorientierte Bedarf an konkreten Merkmalsnennwerten $\tilde{n}(p)$ für das Paarungsbauteil p , auf Basis der In-Line Messdaten $m_{h,o}$ des Hauptbauteils h und der Funktionsmodelle \tilde{f}_q für eine optimale Funktionserfüllung $y_{q,nom}$ prognostiziert (siehe Formel 5-29). Anschließend erfolgt die Schätzung stetiger Verteilungen für die diskreten, funktionsorientierten Merkmalsnennwerte $\tilde{n}(p)$, um die optimalen Fertigungsparameter zu ermitteln (siehe Kapitel 5.2.2).

$$\tilde{n}(p) = \tilde{f}_q(m_{h,o}) \text{ mit } o = \{1, \dots, O\} \quad \text{Formel 5-29}$$

Liegen in den Prozessschritten zum betrachteten Wertschöpfungsschritt w noch nicht alle Einflussgrößen der Metamodelle, in Form individueller In-Line Messdaten, für eine

ganzheitliche Funktionsprognose vor, können alternativ Mittelwerte historischer Messdaten oder Nominalwerte n_i von Produktmerkmalen und -eigenschaften x_i heran gezogen werden.

Als Ergebnis erfolgt die Ermittlung von Bauteilkombinationen und Fertigungsparametern in der Qualitätsregelung durch ein funktionsorientiertes Vorgehen. Abhilfemaßnahmen für die auftretenden Fertigungsabweichungen und Messunsicherheiten in der Produktion (beide aleatorische Unsicherheit) können gezielt zur Vermeidung non-konformer Produkte (Leistungsrisiko) durch das integrierte Produktwissen (verringerte epistemische Unsicherheit) angepasst werden. Es ist mit einer wirksameren Kompensation der Fertigungsabweichungen als mit den bisherigen Strategien zu rechnen.

Der direkte Abgleich mit Funktionsprognosen des Produktes vermeidet darüber hinaus den Abgleich mit Spezifikationen (Unsicherheiten der Unbestimmtheit und der Übereinstimmung) im Produktionsprozess (siehe Kapitel 2.2.3). Bei gleichen Prozessfähigkeiten sind für die funktionsorientierte Verifikation größere Konformitätsbereiche in der Fertigung und folglich ein höherer Anteil konformer Produkte zu erwarten.

Für den Einsatz der alternativen Qualitätsregelungen ist in den meisten Fällen jedoch ein höherer organisatorischer Aufwand, als im Status Quo, erforderlich, um non-konforme Produkte zu vermeiden. Die Herstellung der Produkte, unter Einsatz einer Qualitätsregelung, ist daher mit zusätzlichen Kosten und einem gesteigerten Anteil konformer Produkte verbunden. Ein ganzheitlicher Vergleich der Ansätze erfordert daher eine technische und wirtschaftliche Bewertungsmetrik (siehe Kapitel 5.3).

5.3 Methode zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung

5.3.1 Entwicklung einer technischen Bewertungsmetrik

Als Ergebnis der ereignisorientierten Materialflusssimulation liegen Produktentitäten an der Senke des Produktionssystems bzw. der jeweiligen Ausschusstation vor (siehe Abbildung 5-4). Zur Bewertung und Vergleichbarkeit verschiedener Ansätze der Qualitätsregelung bedarf die Ergebnisroutine einer gemeinsamen Bewertungsmetrik. Diese soll sowohl unter technischen, als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgen.

Zur **technischen Bewertung** werden die realen Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,j}$ bzw. Funktionsprognosen $\tilde{y}_{q,j}$ der vorliegenden Entitäten analysiert und den Merkmals- bzw. Funktionsspezifikationen gegenübergestellt. Anhand dieser Prüfung lässt

sich der First Pass Yield FPY , als Anteil produzierter Einheiten P_{iO} , die im ersten Prozessdurchlauf spezifikationskonform sind (siehe Formel 5-30), bezogen auf die Gesamtanzahl produzierter Produkte P_G , berechnen (siehe Formel 5-31). Dieser dient als Kennzahl für den technischen Vergleich verschiedener Qualitätsregelungskonzepte im Anwendungsfall.

$$P_{iO} = \sum_{j=1}^{P_G} \begin{cases} 1, & \text{wenn } USG + U \leq x_{i,j} \text{ bzw. } f_q(x_{i,j}) \leq OSG - U \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Formel 5-30}$$

$$FPY = \frac{P_{iO}}{P_G} * 100\% \quad \text{Formel 5-31}$$

Weiterhin können statistische Standardgrößen, wie beispielsweise die Varianz s^2 der resultierenden Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,j}$ bzw. Funktionsprognosen $\tilde{y}_{q,j}$, als technische Kennzahl dienen (siehe Formel 5-32). Änderungen in der Varianz sind ein Indiz für eine technische Auswirkung durch den Einsatz alternativer Qualitätsregeln auf die Produktfunktion, im Hinblick auf die statistische Gesamtheit der produzierten Produkte P_G .

$$s^2 = \frac{1}{P_G} \sum_{j=1}^{P_G} (f(x_{g,j}) - \overline{f(x_g)})^2 \quad \text{Formel 5-32}$$

5.3.2 Bewertung der In-Line Messmittelanforderung und -eignung

Die Eignungsbeurteilung von Messprozessen erfolgt, nach VDA-Band 5, durch den Vergleich der Messprozessunsicherheit U_{MP} zu den Spezifikationsgrenzen (siehe 2.2.4.3). Für den Einsatz prozessintegrierter Messprozesse in Qualitätsregelungen sind teilweise jedoch höhere Anforderungen jenseits der Spezifikationsgrenzen für die Verifikation, die Sortierung in Merkmalsklassen bzw. die individuelle Auswahl von Bauteilen zur Verifikation erforderlich. Bedingt durch auftretende Messunsicherheiten kommt es zu Prüffehler 1. Art (zu Unrecht abgelehnter Prüflinge) für Bauteile, Teil- und Gesamtprodukte in deren Konformitätsprüfung (Moroni et al. 2011). Weitere Folgen in den Strategien der selektiven und individuellen Montage sind Fehlsortierungen von Bauteilen in falsche Klassen bzw. größere Standardunsicherheiten in der Funktionsprognose des Gesamtproduktes. Die Bewertung prozessintegrierter Messprozesse auf ihre Messprozesseignung, mit der erforderlichen Klassenbreite $b(p)$, für die selektive Montage

(siehe Formel 5-33) bzw. der Passungstoleranz $OSG_g - USG_g$, einer Baugruppe g , als Paarungskriterium der individuellen Montage (siehe Formel 5-34), ermöglichen eine Eignungsbeurteilung anhand des Eignungskriteriums Q_{MP^*} (siehe Kapitel 2.2.4.3).

$$Q_{MP^*} = \frac{2 U_{MP}}{b(p)} 100\% \tag{Formel 5-33}$$

$$Q_{MP^*} = \frac{2 U_{MP}}{OSG_g - USG_g} 100\% \tag{Formel 5-34}$$

Als Folge sich ändernder Messunsicherheiten als Inputunsicherheit der Gestalt-Funktion Zusammenhänge, ändert sich ebenfalls die Gesamtunsicherheit der Metamodelle. Anhand der geänderten Bewertung erfolgt die neue Auswahl eines Funktionsmodells mit minimaler Gesamtunsicherheit $U_q(\tilde{f}_q)$. Eine analytische Betrachtung der Wirkzusammenhänge im Ansatz der funktionsorientierten Qualitätsregelung ist im Allgemeinen daher nicht möglich. Ein Indiz für die Fortpflanzung der Messunsicherheit eines Messprozesses gibt der Sensitivitätskoeffizient c_i des zugehörigen Produktmerkmals bzw. -eigenschaft x_i , nach Taylorreihenentwicklung 1. Ordnung der jeweiligen Modellgleichung (siehe Formel 2-7) (Cox et al. 2010).

Eine Auswirkungsanalyse auf die sequentiellen Selektionsmechanismen in der Qualitätsregelung kann jedoch nur durch die explizite Simulation von Ausprägungen erfolgen. Daher werden Sensitivitätsuntersuchungen für die erweiterte Messunsicherheit der eingesetzten In-Line Messprozesse als Input für Simulationsstudien anhand der ereignisorientierten Materialflusssimulationen für eine betrachtete Strategie der Qualitätsregelung durchgeführt, um die Auswirkungen auf mögliche Prüffehler zu untersuchen. Durch den produktindividuellen Vergleich realer Merkmalsausprägungen $x_{i,j}$ mit den Messergebnissen $m_{i,j}$, ist eine Bewertung auftretender Prüffehler 1. Art p_1 in der Konformitätsprüfung (siehe Formel 5-35) bzw. 2. Art p_2 in der Non-Konformitätsprüfung (siehe Formel 5-36) möglich. (Moroni et al. 2011; Savio 2012)

$$p_1 = \sum_{j=1}^{P_g} \begin{cases} 1, \text{für } z_1 \\ 0, \text{sonst} \end{cases} \tag{Formel 5-35}$$

$$\text{mit } z_1 = USG_q + U_{\varepsilon,q} \leq \tilde{f}(x_{i,j}) \leq OSG_q - U_{\varepsilon,q} \cap (USG_q + U_q > \tilde{f}(m_{g,j}) \cup \tilde{f}(m_{g,j}) > OSG_q - U_q)$$

$$p_2 = \sum_{j=1}^{P_G} \begin{cases} 1, \text{ für } z_2 \\ 0, \text{ sonst} \end{cases}$$

Formel 5-36

mit $z_2 = USG_q + U_{\varepsilon,q} > \tilde{f}_q(x_{i,j}) \cup \tilde{f}_q(x_{i,j}) > OSG_q - U_{\varepsilon,q} \cap$

$$\left(USG_q + U_q(\tilde{f}_q) \leq \tilde{f}_q(m_{g,j}) \leq OSG_q - U_q(\tilde{f}_q) \right)$$

Aus Vorarbeiten von Moroni et al. (2011) ist bekannt, dass Messprozesse von Produktmerkmalen und -eigenschaften genauer zu betrachten sind, wenn die zugehörigen Fertigungsprozesse fähigkeitskritisch sind ($C_p < 1,33$). In diesen Fällen steigt die Wahrscheinlichkeit für Prüffehler an. (Moroni et al. 2011) Fokussiert werden daher ausgewählte Sensitivitätsanalysen für In-Line Messprozesse, deren Produktmerkmal bzw. -eigenschaft einen hohen Sensitivitätskoeffizient c_i und eine niedrigen Fähigkeitskennwert C_p aufweisen.

5.3.3 Entwicklung einer wirtschaftlichen Bewertungsmetrik

In der **wirtschaftlichen Bewertung** erfolgt eine ganzheitliche, aktivitätsbasierte Kostenbetrachtung aller hergestellten Produkte (siehe Anhang A2). Dabei bildet die Kostenbetrachtung auf Produktebene, als Summe einzelner Entitäten j mit dem jeweiligen Wertschöpfungszustand K_w im Umlaufbestand, die Grundlage zur Kostenbewertung (siehe Kapitel 5.2.1). Zur Betrachtung der Gesamtkosten je konformem Produkt K_G werden die gesamten Herstellkosten K_{HK} , als Summe der aktivitätsbasierten Kosten K_w aller hergestellten Produkte P_G , auf die Anzahl konformer Produkte P_{iO} umgelegt (siehe Formel 5-37). Ausschuss und Prüffehler, durch die fehlerhafte Qualitätsprüfung bzw. die irrtümliche Prognose des Metamodells, werden in der EoL-Funktionsprüfung identifiziert. Ihre Kosten sind damit in den Herstellkosten aller hergestellten Produkte P_G inbegriffen und werden, da diese Produkte nicht konform sind, in den Gesamtkosten je konformem Produkt K_G auf die konformen Produkte P_{iO} umgelegt. (Haefner et al. 2014). Somit dient die wirtschaftliche Bewertung der Herstellkosten je konformem Produkt K_G als aggregierte Kennzahl, die auf das technische Ergebnis rückgeführt wurde. (McKenna et al. 2019)

$$K_G = \frac{K_{HK}}{P_{iO}} = \frac{\sum_{j=1}^{P_G} K_{w,j}}{P_{iO}}$$

Formel 5-37

Dementsprechend ergeben sich die Ausschusskosten $K_{Ausschuss}$ als Differenz der Gesamtkosten je konformem Produkt K_G zu den geplanten Herstellkosten $K_{HK}(iO)$ eines konformen Produktes (siehe Formel 5-38).

$$K_{Ausschuss} = K_G - K_{HK}(iO) \tag{Formel 5-38}$$

In allen Standardbausteinen wird durch Addieren der notwendigen **Aktivitätskosten** zum ursprünglichen Bauteilwert K_{W-1} , gemäß des Ansatzes der aktivitätsbasierten Kostenbewertung, der monetäre Gesamtwert eines Bauteils bzw. der Baugruppe K_W zum aktuellen Wertschöpfungsprozess w nach Verlassen des aktuellen Wertschöpfungsprozesses w berechnet (siehe Formel 5-39).

$$K_W = K_{W-1} + K_i \tag{Formel 5-39}$$

Die Herstellkosten werden in jedem Wertschöpfungsschritt in verschiedene Kostenbestandteile unterteilt, die in den Standardbausteinen durch Addieren der jeweiligen Kosten K_i im Wertschöpfungsprozess w zum ursprünglichen Wertschöpfungsprozess w hinzukommen (siehe Abbildung 5-10).

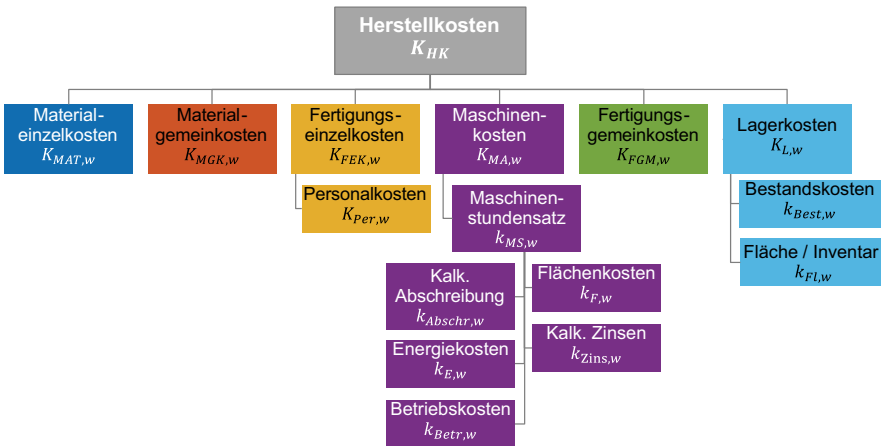


Abbildung 5-10: Kostenstruktur der Herstellkosten K_{HK} zur aktivitätsbasierten Kostenbewertung, eigene Darstellung

Die Herstellkosten K_{HK} in dieser Arbeit setzten sich aus Materialeinzelkosten K_{MAT} , Materialgemeinkostenkosten K_{MGK} , Fertigungseinzelkosten K_{FEK} , Maschinenkosten K_{MA} ,

Fertigungsgemeinkosten K_{FGM} und Lagerkosten K_L des jeweiligen Wertschöpfungsschrittes w zusammen, die zum bisherigen Wertschöpfungszustand K_{W-1} addiert werden (siehe Formel 5-40).

$$K_W = K_{W-1} + K_{MAT,w} + K_{MGK,w} + K_{FEK,w} + K_{MA,w} + K_{FGM,w} + K_{L,w} \quad \text{Formel 5-40}$$

Die Fertigungseinzelkosten K_{FEK} bestehen aus Personalkosten K_{Per} des Wertschöpfungsprozesses w . Die Personalkosten K_{Per} beinhalten alle Lohnkostenbeiträge, die zum Betreiben von Fertigungs- und Prüfprozessen, sowie zum Erfüllen von Steuerungsaufwänden, innerhalb der Qualitätsregelung, erforderlich sind. Die Maschinenkosten K_{MA} bestehen dabei aus dem Maschinenstundensatz k_{MS} , multipliziert mit der Prozesszeit t_{Pr} des Wertschöpfungsprozesses w (siehe Formel 5-41). Der Maschinenstundensatz k_{MS} beinhalten die kalkulatorische Abschreibung k_{Abschr} , die Energiekosten k_E , die Betriebskosten k_{Betr} , die Flächenkosten k_F und den kalkulatorischen Zinsen k_{Zins} (siehe Formel 5-42).

$$K_{MA,w} = k_{MS,w} * t_{Pr,w} \quad \text{Formel 5-41}$$

$$k_{MS,w} = k_{Abschr,w} + k_{E,w} + k_{Betr,w} + k_{F,w} + k_{Zins,w} \quad \text{Formel 5-42}$$

Die kalkulatorischen Abschreibungskosten $k_{Abschr,w}$ des Wertschöpfungsschrittes w setzt sich aus dem linearen Quotienten der Wiederbeschaffungskosten $K_{Reinvest}$ mit der geplanten tatsächlichen Nutzungsdauer in Jahren t_{ND} zusammen (Währisch 2000).

$$k_{Abschr,w} = \frac{K_{Reinvest,w}}{t_{ND,w}} \quad \text{Formel 5-43}$$

Die kalkulatorischen Zinsen $k_{Zins,w}$ setzen sich aus dem durchschnittlich gebundenen Kapital (Wiederbeschaffungskosten $K_{Invest,w}$ und dem Restwert $K_{Rest,w}$ zum aktuellen Planungszeitpunkt) des Wertschöpfungsschrittes w und dem kalkulatorischen Zinssatz Z_{Zins} zusammen (siehe Formel 5-44) (Mumm 2019).

$$k_{Zins,w} = \frac{k_{Invest,w} + k_{Rest,w}}{2} * Z_{Zins} \quad \text{Formel 5-44}$$

Die Lagerkosten setzen sich aus einem Bestandskostensatz k_{BEST} und einem Flächenkostensatz k_{FL} , jeweils multipliziert mit der individuellen Verweildauer t_L jedes Bauteils/jeder Baugruppe im Lagerungsprozess w , zusammen (siehe Formel 5-45). Der

Bestandskostensatz basiert dabei auf den Opportunitätskosten des aktuellen Gesamtwertes K_W je Bauteil, multipliziert mit einem kalkulatorischen Zinssatz z_{Zins} (siehe Formel 5-46) (Mankiw et al. 2018).

$$K_L = (k_{BEST} + k_{FL}) * t_{L,W} \tag{Formel 5-45}$$

$$k_{BEST} = K_W * z_{Zins} \tag{Formel 5-46}$$

Für alle Planungsalternativen, unter Einsatz von Qualitätsregelung, lässt sich abschließend ein Kosten-Leistungs-Vergleich (engl. „Cost Performance Ratio“, CPR) der Gesamtkosten je konformem Produkt $K_G(\theta)$ in Strategiealternative θ mit den anfallenden Gesamtkosten im Status Quo $K_G(Statu\ Quo)$ durchführen (siehe Formel 5-47). Die Umsetzung jeder Alternative mit $CPR > 1$ ist aus technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu empfehlen. (Windmark et al. 2018b)

$$CPR(\theta) = \frac{K_G(Statu\ Quo)}{K_G(\theta)} \tag{Formel 5-47}$$

Unter Bewertung der Taguchi Strafkosten $K_{Taguchi}$ können Qualitätsabweichungen im Hinblick auf die statistische Gesamtheit der konformen Produkte P_{i0} unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten analysiert werden. Die Strafkosten $K_{Taguchi}$ steigen quadratisch mit der Abweichung der Produktfunktion an und erreichen an der Toleranzgrenze den Betrag für die Herstellkosten je konformem Produkt (ohne Strafkosten) K_G , (siehe Formel 5-48).

$$K_{Taguchi} = \begin{cases} K_G * \left(\frac{2 * (m_i - n)}{TOL}\right)^2 & , \text{für } |m_i - n| \leq \frac{TOL}{2} \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \tag{Formel 5-48}$$

Die Betrachtung der Taguchi-Strafkosten $K_{Taguchi}$ erfolgt losgelöst von den Gesamtkosten je konformem Produkt K_G , um ein Ausfallrisiko im Sinne von Garantie und Kundenzufriedenheit als Opportunitätskosten zu analysieren.

5.3.4 Gesamtheitliche Strategiebewertung der Qualitätsregelung

Bereits während der Entwicklung alternativer Qualitätsregelkreise entstehen Konzepte zur Qualitätssteigerung hochpräziser Produkte. Im Rahmen der Strategieauswahl erfolgt die Bewertung von Strategiealternativen θ anhand von Simulationsergebnissen

und der entwickelten Bewertungsmetrik (siehe Kapitel 5.3.1f.). Ziel der Strategieauswahl ist es daher, den Ansatz der Qualitätsregelung, mit dem größten First Pass Yield $\max(FPY)$ zu den geringsten Herstellkosten je konformem Produkt K_G im Anwendungsfall zu identifizieren. FPY und K_G sind dabei abhängig von der eingesetzten Strategiealternative θ . θ setzt sich aus der Montage- $M(x_i)$ und der Fertigungsstrategie $F(x_i)$ jedes Montage- und zugehörigen, vorgelagerten Fertigungsprozesses funktionsrelevanter Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_i zusammen (siehe Abbildung 2-15 und Formel 5-49).

$$\min K_G(\theta) = \min_{\theta} \left\{ \frac{\left\{ \sum_{h=1}^H \sum_j^{P_G} K_{w,j}(\theta) \right\}}{P_{io}(\theta)} \right\} \quad \text{Formel 5-49}$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \theta &:= \{M(x_i); F(x_i); C(x_i); N(x_i)\}; \quad M(x_i) := \{1; 2; 3\}; \\ F(x_i) &:= \{A; B; C\}; \quad C, N_v \in \mathbb{N} \end{aligned}$$

Für jede Strategiealternative θ wird ein alternatives Produktionssystem modelliert, dessen Verhalten in ereignisgesteuerten Materialflusssimulationen nachgebildet und unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten analysiert wird. Neben der Betrachtung des First Pass Yield FPY und der Herstellkosten je konformem Produkt K_G bieten die Varianz s^2 der resultierenden Funktionsprognosen $\tilde{y}_{q,j}$ unter technischen und die Taguchi-Strafkosten $K_{Taguchi}$ unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten einen Einblick in die Veränderung der statistischen Gesamtheit konformer Produkte durch die funktionsorientierte Qualitätsregelung. Die Strategiealternative θ mit dem minimalen Kosten-Leistungs-Verhältnis $\min(CPR)$ ist unter technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten zur Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen in der Serienproduktion am besten geeignet.

Aufgrund des stochastischen Verhaltens einzelner Bausteine und der sequentiellen Selektionsmechanismen wirkt sich ihr Verhalten in der Simulation, durch vielfache Wechselwirkungen, auf das technische und wirtschaftliche Ergebnis der Materialflusssimulationen aus. Zur Ermittlung statistisch signifikanter Ergebnisse werden für jede Strategiealternative n_{repl} Replikationen der Simulation, unter gleichen Eingangsgrößen und Variation der Startwerte zur Erzeugung der Zufallszahlen, durchgeführt. Statistisch abgesicherte Ergebnisse liefern der Mittelwert $\overline{K_G(\theta)}$ (siehe Formel 5-50) und das zugehörige Konfidenzintervall $G_{1/2}$ (siehe Formel 5-51), aus Schätzung einer t-Verteilung $Z_{\gamma/2}$ (unter Normalverteilungsannahme) mit Konfidenzniveau γ , Stichprobenumfang n_{repl}

und Standardabweichung $\sigma(\theta)$ der Replikationen. Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich ein statistisch signifikanter Unterschied der Strategiealternativen θ , bezüglich den Gesamtkosten eines konformen Produktes $K_G(\theta)$, feststellen. (VDI 1997)

$$\overline{K_{G(\theta)}} = \frac{1}{n_{repl}} \sum_{i=1}^{n_{repl}} K_{G,i}(\theta) \tag{Formel 5-50}$$

$$G_{1/2} = \overline{K_{G(\theta)}} \pm Z_{\gamma/2} * \frac{\sigma(\theta)}{\sqrt{n_{repl}}} \tag{Formel 5-51}$$

5.3.5 Methodisches Vorgehen zur Ableitung funktionsorientierter Qualitätsregelungen

Die Konzeptionierung und Identifikation geeigneter Strategien zur Qualitätsregelung wird durch ein methodisches Vorgehen unterstützt (siehe Abbildung 5-11).

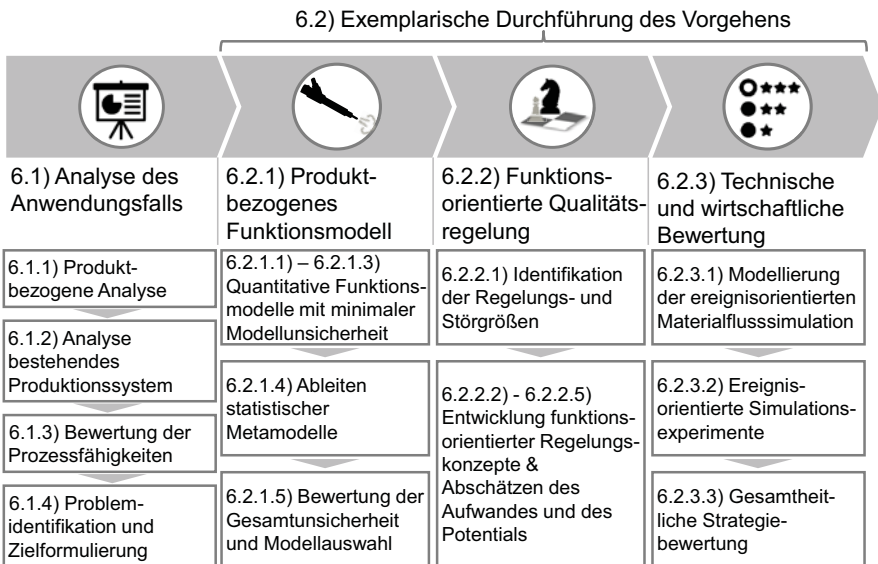


Abbildung 5-11: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung alternativer Strategien der Qualitätsregelung (nach A_ Wörner 2019)

Das Vorgehen startet durch die **Analyse des Anwendungsfalls** (siehe Kapitel 6.1): Zunächst wird eine produktbezogene Analyse, anhand qualitativer Funktionsmodelle, durchgeführt, die den Aufbau von Systemverständnis ermöglicht (siehe Kapitel 6.1.1). Anschließend erfolgt eine Analyse des bestehenden Produktionssystems anhand einer Wertstromanalyse mit Informationsflüssen, gemäß der Quality Value Stream Mapping Methode (QVSM) (siehe Kapitel 6.1.2) (Haefner et al. 2014). Im nächsten Schritt wird eine Bewertung der Prozessfähigkeiten der Fertigungsprozesse, auf Basis historischer Prozessdaten, sowie eine Bewertung der Messprozesseignungen der In-Line Messprozesse, anhand der Messsystemanalysen, zur Herstellung bzw. Messung der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i , durchgeführt (siehe Kapitel 6.1.3). Als Ergebnis der Analyse der Ausgangssituation liegt eine detaillierte Problemidentifikation und die Zielformulierung vor (siehe Kapitel 6.1.4).

Auf Basis der Analyse den Anwendungsfalls kann anschließend die **exemplarische Durchführung des Vorgehens** zur Entwicklung funktionsorientierte Qualitätsregelungen in der Produktion erfolgen (siehe Kapitel 6.2): Zunächst erfolgt die quantitative Modellierung produktbezogener Funktionsmodelle (siehe Kapitel 6.2.1). Dabei können verschiedene Modellierungsansätze, wie beispielsweise statistische Modelle anhand von Versuchsdaten oder auch analytische Zustandsraummodelle, zur Gewinnung quantitativer Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Produktmerkmalen und -eigenschaften x_i und der Produktfunktion y_q zum Einsatz kommen (siehe Kapitel 6.2.1.1 bis Kapitel 6.2.1.3). Abhängig des gewählten Modellierungsansatzes ist das nachgelagerte Ableiten statistischer Metamodelle, zur Echtzeit-nahen Funktionsprognose, (siehe Kapitel 6.2.1.4) sowie Auswahl des Metamodells unter minimaler Gesamtunsicherheit (siehe Kapitel 6.2.1.5) notwendig.

Während der Entwicklung der **funktionsorientierten Qualitätsregelung** (siehe Kapitel 6.2.2) werden zunächst die Stör- und Regelungsgrößen mittels Nutzwertanalyse identifiziert (siehe Kapitel 6.2.2.1): Störgrößen sind dabei funktionskritische Produktmerkmale, die nicht prozesssicher herstellbar sind und deren Abweichungen großen Einfluss auf die Produktfunktion besitzen. Regelungsgrößen hingegen sind Produktmerkmale, die prozesssicher an verschiedenen Vorgabewerten herstellbar sind und deren Abweichung ebenfalls einen großen Einfluss auf die Produktfunktion haben. Dabei dienen die quantitativen Wirkzusammenhänge der Bewertung der Einflussgrößen, als auch die Prozessfähigkeit zugehöriger Fertigungsprozesse als Eingangsgrößen für die eigentli-

che Nutzwertanalyse. Als Ergebnis der Identifikation von Stör- und geeigneter Regelgrößen liegt eine Bewertung für die funktionsrelevanten Produktmerkmale, zur Entwicklung alternativer Qualitätsregeln, vor.

Anschließend erfolgt die Entwicklung alternative Regelungskonzepte (siehe Kapitel 6.2.2.2). Zur Kompensation statistisch nicht stabiler Prozessmodelle, unter Lageänderung, wie beispielsweise für Batch-Prozesse, werden in der nachfolgenden Entwicklung alternativer Qualitätsregeln für die entsprechenden Regelgrößen der Einsatz adaptiver Fertigungsstrategien fokussiert. Für Prozessmodelle unter fähigkeitskritischer Streuung, eignet sich der Einsatz von Montagestrategien zur bauteilindividuellen Kompensation der Störgrößen. Der Entwicklung alternativer Strategien zur Qualitätsregelung steht somit eine Teilmenge der Produktmerkmale mit Einfluss auf die Produktfunktion (Regelgrößen) zur Kompensation einer weiteren Teilmenge (Störgrößen) zur Verfügung. Anhand des eingeführten Frameworks möglicher Strategien zur Qualitätsregelung (siehe Abbildung 2-15) und der zuvor erarbeiteten Analyseergebnisse können anhand von Kreativitätstechniken in Expertenworkshops alternative Qualitätsregelungskonzepte erarbeitet werden. Wichtig ist es, dabei die Wahl einer Regelgröße so zu wählen, dass die Merkmalsabweichungen innerhalb eines Teilsystems (geometrisch) direkt oder über Teilsysteme hinweg (funktionsorientiert), durch Über- und Untererfüllung von Teilfunktionen, kompensiert werden. Der funktionsorientierte Ansatz bedarf der Integration von Gestalt-Funktion Zusammenhängen in die Qualitätsregelung (siehe Kapitel 5.2.3). Eine erste Eingrenzung der entwickelten alternativen Strategien zur Qualitätsregelung findet durch den Einsatz einer Portfolio-Methode, unter Einschätzen von Aufwand und Potential statt (Brüggemann et al. 2012). Anhand einer Vorabschätzung durch Expertenmeinungen zu dem zu erwartenden Aufwand sowie zu technischen und wirtschaftlichen Potentialen, durch die Implementierung der Alternative, erfolgt eine Detaillierung selektierter Konzepte (siehe Kapitel 6.2.2.3 bis Kapitel 6.2.2.5).

Abschließend erfolgt eine **gesamtheitliche Strategiebewertung** des Einsatzes alternativer Qualitätsregelkreise mit Hilfe ereignisdiskreter Materialflusssimulationen des Produktionssystems (siehe Kapitel 6.2.3). Zunächst erfolgt die Implementierung des Produktionssystemmodells in Simulationsumgebungen, wie beispielsweise Siemens Tecnomatix Plant Simulation ©, AnyLogic © oder MATLAB © SimEvents, die eine ereignisdiskreten Materialflusssimulation ermöglichen (siehe Kapitel 6.2.3.1). Unter Hinzufügen/Verändern der Standardbausteine der Qualitätsregelung (siehe Kapitel 5.2.2)

erfolgt die Modellierung der Strategiealternativen zur Qualitätsregelung. Durch den ereignisdiskreten Charakter der Materialflusssimulation lassen sich sequentiellen Selektions-, Anpassungs- und Bestellvorgänge, sowie die stochastischen Prozesse in kurzer Zeit simulieren (VDI 2001). Anschließend werden ereignisorientierte Simulationsexperimente durchgeführt (siehe Kapitel 6.2.3.2). Anhand der Bewertungsmetrik (siehe Kapitel 5.3) lassen sich die Simulationsergebnisse der Strategiealternativen θ , unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkte, gegenüber der Ausgangssituation bewerten (siehe Kapitel 6.2.3.3). Eine Handlungsempfehlung zur Wandlung des Produktionssystems kann abschließend daraus abgeleitet werden.

6 Erprobung und prototypische Realisierung

Der vorgestellte Forschungsansatz wird im industriellen Anwendungsfall exemplarisch erprobt. Zunächst werden das beispielhafte Produkt und das bestehende Produktionssystem analysiert (siehe Kapitel 6.1). Anschließend erfolgt die Dokumentation zur Anwendung und Implementierung der vorgestellten Methoden zur funktionsorientierten Qualitätsregelung im industriellen Anwendungsfall und die damit erzielten Ergebnisse (siehe Kapitel 6.2).

6.1 Analyse des exemplarischen Anwendungsfalls

Der Ansatz zur funktionsorientierten Qualitätsregelung findet in der Serienproduktion zur Herstellung von Piezo-Injektoren ihre exemplarische Anwendung. Zunächst wird ein grundlegendes Verständnis zum Aufbau und der Funktionsweise der Produkte dargestellt (siehe Kapitel 6.1.1), anschließend erfolgt die Analyse des bestehenden Produktionssystems (siehe Kapitel 6.1.2) und eine Charakterisierung der vorliegenden Fertigungs-, Montage- und Messprozesse im Status Quo (siehe Kapitel 6.1.3).

6.1.1 Produktbezogene Analyse: Piezo-Injektoren

Piezo-Injektoren sind ein Systembestandteil der Common-Rail-Systeme zur Kraftstoffeinspritzung in Verbrennungsmotoren für Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen (Reif 2020). Ihre **Funktion f_q** ist die **Einspritzung einer exakten Kraftstoffmenge** innerhalb eines definierten Zeitraums, um eine effiziente Verbrennung in der Arbeitsmaschine zu ermöglichen (Bosch Mobility Solutions 2020; Reif 2020). Eingangsgrößen zur Funktionserfüllung der Piezo-Injektoren sind eine Kraftstoffversorgung aus dem gemeinsamen Druckspeicher (Common-Rail), sowie Signale des Motorsteuergeräts, als Energie- und Informationsfluss (siehe Abbildung 2-2 und Abbildung 6-1) (Reif 2020).

Piezo-Injektoren bestehen aus mehreren hochpräzisen Subsystemen, die verschiedenen Disziplinen wie Mechanik, Mechatronik und Strömungsmechanik zugeordnet sind (siehe Abbildung 6-1). Zur Einspritzung wird die Düsennadel im Düsenmodul (7) indirekt über ein Servoventil (5) gesteuert. Die gewünschte Einspritzmenge wird dabei über die Öffnungsdauer des Ventils, und dem resultierenden hydraulischen Kraftstoffdruck in der Kammer über der Düsennadel, geregelt (siehe Abbildung 6-3). Der Piezo-Aktor (3) betätigt das Servoventil. Er besteht aus mehreren hundert Schichten einer Piezo-

Keramik, die sich bei Beaufschlagen einer elektrischen Spannung durch das Motorsteuergerät von 110 V bis 150 V mittels piezo-elektrischem Effekt, um einige Mikrometer ausdehnt. Der Koppler (4) verstärkt den translatorischen Aktorhub, mittels hydraulischer Übersetzung, zur Betätigung des Servoventils. Die Drosseleinheit (6) verfügt über verschiedene hydraulische Zulauf- und Ablaufdrosseln, um das hydro-dynamische Verhalten zwischen Ventil und Düsenmodul abzustimmen. (Reif 2020)

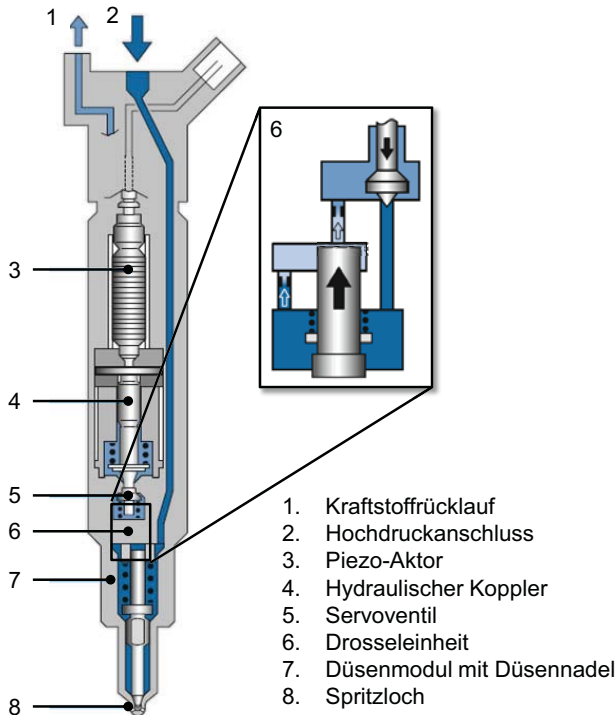


Abbildung 6-1: Konstruktive Ausführung des Piezo-Inline-Injektors, (nach Reif 2020), Bildkennzeichnungen: UMK1974-1Y und UMK1985D

Zur Funktionserfüllung, der Einspritzung einer präzisen Kraftstoffmenge y_q innerhalb weniger Mikrosekunden, ist höchste Präzision und Qualität der Bauteile und Subsysteme erforderlich, um die Kundenanforderungen an Leistung und Effizienz zu erfüllen. In der vorliegenden Arbeit werden $Q = 4$ Betriebspunkte, als spezifische Kombinati-

nen aus Ansteuerdauer und Einspritzdruck, betrachtet, die durch den Kunden spezifiziert sind (siehe Abbildung 6-2 vgl. a - d). Einige Produktmerkmale und -eigenschaften sind mit geometrische Spezifikationen im unteren, einstelligen Mikrometerbereich spezifiziert, um die Produktfunktion sicherzustellen. (Reif 2020).

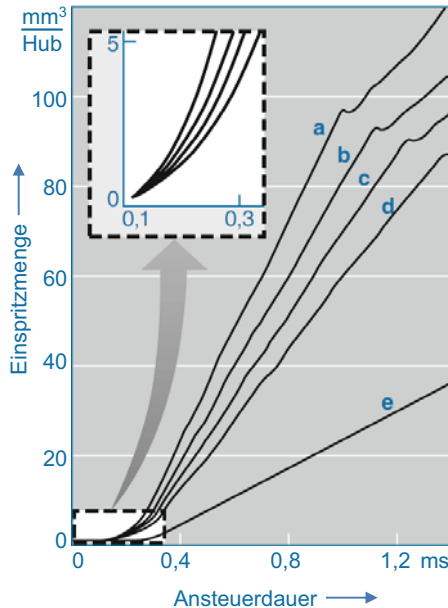


Abbildung 6-2: Einspritzmengenkennfeld des Piezo-Inline-Injektors für verschiedene Einspritzdrücke, a) 2.500 bar, b) 1.200 bar, c) 1.000 bar, d) 800 bar, e) 250 bar, (Reif 2020), Bildkennzeichnung: UMM0634Y

Die Funktionsweise des Produktes wurde mit Experten anhand der Produktmodelle, der technischen Zeichnungen und der CAD Modelle diskutiert. Aufgrund der Systemkomplexität und verschiedener Systemzustände wurde das Gesamtsystem in Teilsysteme und Systemzustandssequenzen (a, b, c) unterteilt, um den Einfluss der jeweiligen Produktmerkmale und -eigenschaften qualitativ zu durchdringen (siehe Abbildung 6-3).

Als Ergebnis konnten funktionsrelevante Bauteile des Produktes zur Funktionserfüllung, auf Basis des qualitativen Systemverständnisses, eingegrenzt werden. Die Erkenntnisse, bereits zuvor veröffentlichter Analyseergebnisse, zu Piezo-Injektoren,

durch Salvador et al (2014), decken sich mit dem in dieser Arbeit aufgebauten Systemverständnis und identifizierter Bauteile. Spezifizierte Produktmerkmale und -eigenschaften der Subsysteme Piezo-Aktor, hydraulischer Koppler, Servoventil (1), Drossleinheit (2, 4, 6) und Düsenmodul (5) beeinflussen die Einspritzung präziser Kraftstoffmengen, im jeweiligen Betriebspunkt, in besonders großem Maße (siehe Abbildung 6-3). (Salvador et al. 2014)

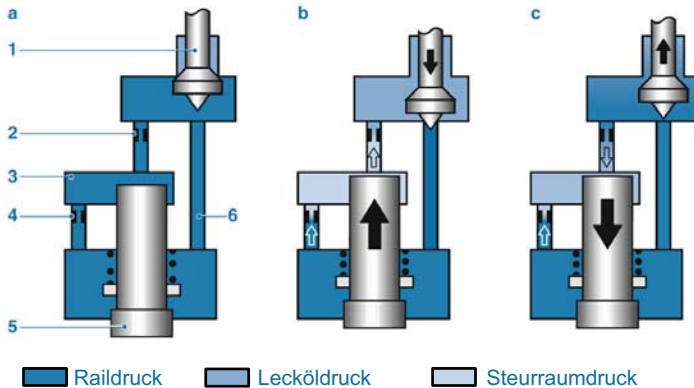


Abbildung 6-3: Systemzustandssequenzen zur Funktionsweise des Servoventils; a) Startzustand, b) Servoventil öffnet, c) Servoventil schließt; Servoventil (1), Ablaufdrossel (2), Steuerraum (3), Zulaufdrossel (4), Düsennadel (5) Bypass (6), (Reif 2020), Bildkennzeichnung: UMK050511-1D

In Sensitivitätsanalysen, unter Ein-Faktor Variation der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i , konnte die Hypothese, eines großen Funktionseffektes auf die Produktfunktion f_q „präzise Einspritzmenge pro Hub im Betriebspunkt q “, für $I = 16$ Produktmerkmale und -eigenschaften x_i , verteilt über vier Teilsysteme, nicht abgelehnt werden. Fertigungsabweichungen dieser Produktmerkmale und -eigenschaften x_i beeinflussen das Einspritzmengenniveau des Produktes statistisch signifikant. Diese x_1 bis x_{16} wurden daher alle als funktionsrelevant identifiziert.

Im Folgenden werden die zur Erprobung relevanten Bauteile des Piezo-Injektors als Bauteile **A** bis **G** und ihre Produktmerkmale bzw. -eigenschaften werden als x_i bezeichnet. Eine konkrete Zuordnung kann aufgrund unternehmenskritischer Information jedoch nicht erfolgen.

6.1.2 Analyse des bestehenden Produktionssystems

Ergänzend zur produktbezogenen Analyse, erfolgte eine produktionsbezogene Analyse des Produktionssystems im Status Quo. Auf Basis der Qualitäts-Wertstrom Methode wurde die Prozessabfolge in der Piezo-Injektoren Serienproduktion aufgenommen und in ein Modell des Produktionssystems überführt, das sich der standardisierten Prozessbausteine (siehe Kapitel 5.2.1) und Bausteine zur Qualitätsregelkreise (siehe Kapitel 5.2.2) bedient (siehe Abbildung 6-4). Darüber hinaus wurden historische Messdaten $m_{i,j}$ der Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,j}$, Prozessdauern, Prozesskosten und weitere prozessspezifische Kennzahlen der jeweiligen Prozessschritte w aufgenommen (vgl. Tabelle 5-2).

Die Montage der Bauteile und Teilsysteme zum Gesamtsystem erfolgt an einer vollautomatisierten, starr verketteten Montagelinie. Die Bauteile und Teilsysteme werden der Montagelinie, mit ihren funktionsrelevanten Produktmerkmalen und -eigenschaften $x_{i,j}$, zugeführt (siehe blaue und rote Boxen in Abbildung 6-4). Die Fertigung der Bauteile und Subsysteme erfolgt teilweise bei externen Zulieferern bzw. in verlängerter Werkbank, an einem weiteren Standort desselben Unternehmens (blaue Boxen). Die verbleibenden Produktmerkmale und -eigenschaften, extern beschaffter Rohmaterialien bzw. Halbzeuge, werden final intern bearbeitet (rote Boxen).

Die Montageprozesse in der Montagelinie erfolgte in konventioneller Montage ($M(x_i) = 1$), mit Ausnahme der Bauteil **C** und **E**, die jeweils in selektiver Montage ($M(x_2)$ bzw. $M(x_3/x_4) = 2$) zur Kompensation von Fertigungsabweichungen der Bauteile **A** bzw. **B** auf geometrischer Basis der Hauptbaugruppe zu montiert wurden (siehe Abbildung 6-4 gelber bzw. grüner Bereich). Das Bauteil **C** besitzt das Produktmerkmal x_2 , welches die Produktfunktion f_q statistisch signifikant beeinflusst. Es wird während der vorgelagerten Prozesse in $C(x_2) = 20$ geometrische Merkmalsklassen klassifiziert, losweise rückverfolgt und alle $C(x_2)$ Merkmalsklassen werden zeitgleich an der Montagelinie bereitgestellt, um ein Schließmaß der Hauptbaugruppe (Bauteil **A**) durch selektive Montage geometrisches optimal zu erfüllen (siehe gelber Bereich in Abbildung 6-4).

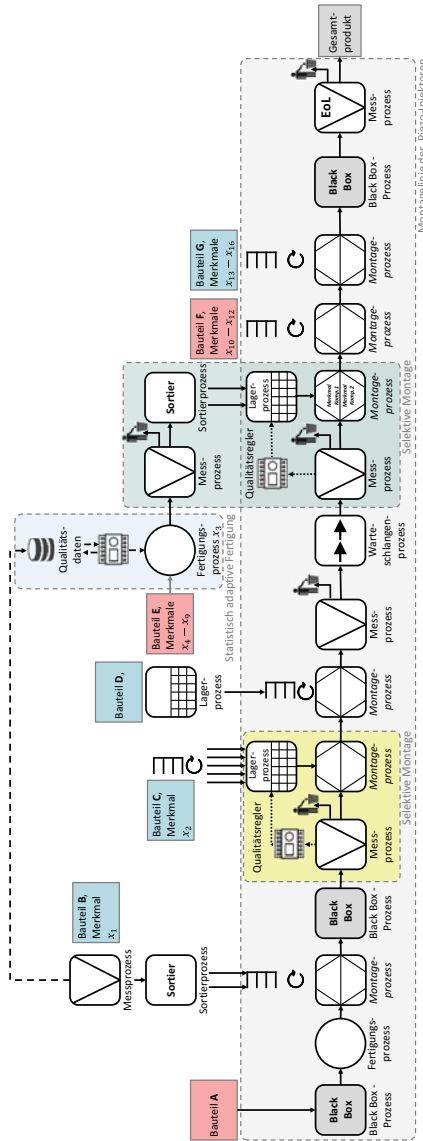


Abbildung 6-4: Modell der Montagelinie des bestehenden Produktionssystems im Status Quo, eigene Darstellung

Das Bauteil **E** besitzt sieben Produktmerkmale und -eigenschaften $x_3 - x_9$, welche die Produktfunktion f_q ebenfalls statistisch signifikant beeinflussen. Die Fertigungs- und Montagestrategien für Bauteil **E** folgen der empirischen Beobachtung, dass ein kleineres bzw. größeres x_1 (Bauteil **B**) zu einer niedrigeren bzw. höheren Einspritzmenge und ein kleinerer bzw. größerer Quotient x_3/x_4 (Bauteil **E**) ebenso zu einer niedrigen bzw. höheren Einspritzmenge des Piezo-Injektors führt. Eine Kombination von beispielsweise einem Bauteil **B**, mit niedrigem x_1 , und einem Bauteil **E**, mit niedrigem Quotienten x_3/x_4 , führt gemäß der Annahme zu einer besonders niedrigen Kraftstoffmenge (siehe Abbildung 6-5, rote Markierung). Um diese Kombination möglichst zu vermeiden, erfolgt die Montage des Bauteils **E** selektiv ($M(x_3/x_4) = 2$) aus zwei Merkmalklassen in Abhängigkeit der Produkteigenschaft $x_{1,j}$ (siehe Abbildung 6-5, grüne Markierung).

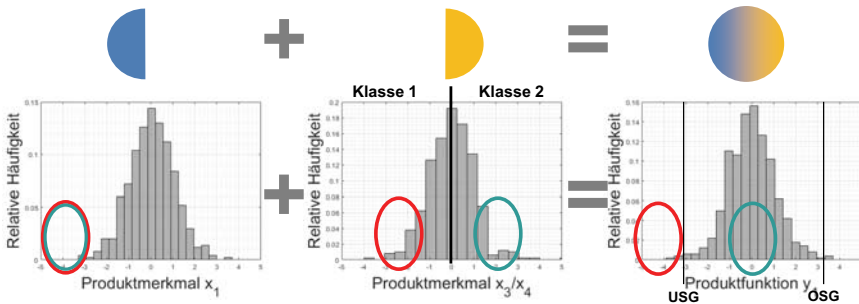


Abbildung 6-5: Prinzipdarstellung der selektiven Montage für Bauteil **E** zur Kompensation des Bauteils **B** im Anwendungsfall des Piezo-Injektors, eigene Darstellung

Zur selektiven Montage wird sowohl das Bauteil **B** als auch das Bauteil **E** in zwei Merkmals bzw. Eigenschaftsklassen klassifiziert und losweise rückverfolgt. Korrespondierende Merkmalsklassen werden losweise an der Montagelinie gerüstet und in der Montageanlage konventionell montiert (siehe grüner Bereich in Abbildung 6-4). Mangels quantitativer Gestalt-Funktion Zusammenhänge erfolgt die Klassifizierung des Bauteils **E** im Status Quo auf Basis des Eigenschaftsquotienten x_3/x_4 . Damit die jeweilige Eigenschaftsklasse x_3/x_4 bedarfsorientiert zur Montage verfügbar ist, erfolgt die Herstellung des Bauteils **E** unter statistisch adaptiver Fertigung ($F(x_3) = 2$) der Produkteigenschaft x_3 in Abhängigkeit gemessener Qualitätsdaten des Produktmerkmals x_1 . Der Fertigungsnennwert zur Herstellung von x_3 wird in Abhängigkeit gemessener Qualitätsdaten des Produktmerkmals x_1 (Bauteil **B**) und x_4 (Bauteil **E**) variiert (siehe hellblauer

Bereich in Abbildung 6-4). Die Steuerung des Fertigungsprozesses zur Herstellung an verschiedenen, vorgegebenen Nennwerten erfolgt per Signal-Kanban. Der Einsatz dieser Strategie zur spezifikationsorientierten Qualitätsregelung konnte bereits eine Verringerung der non-konformen Produkte erzielen.

Der Transport einzelner Produkte erfolgt nach dem Einzelteilfluss-Prinzip auf Warenträgern. An jedem Warenträger ist ein RFID-Tag, zur Rückverfolgung und Speicherung bauteilindividueller Prozess- und Messdaten, angebracht. Alle Bauteile mit funktionskritischer Produktmerkmalen und -eigenschaften haben eine Markierung zur bauteilindividuellen Identifikation, mittels DMC. Anhand der Bauteilidentifikation, zur eindeutigen Wiedererkennung, kann auf erhobene Prozess- und Messdaten vorgelagerter Prozessschritte im CAQ-System zurückgegriffen werden. Eine horizontale Integration vorgelagerter Prozess- und Messdaten besteht für Bauteile und Subsysteme, die in der verlängerten Werkbank und intern gefertigt werden. Für alle weitere Produktmerkmale und -eigenschaften, die extern gefertigt werden, besteht aktuell keine Datenverfügbarkeit.

6.1.3 Bewertung der Prozessfähigkeiten

Die Charakterisierung der Prozessmodelle zur Fertigung der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i mit $i = \{1, \dots, 16\}$ erfolgt durch statistische Tests auf Normalverteilung für Kurzzeitdaten, die durch Langzeitanalysen und Anpassung alternativer statistischer Verteilungen ergänzt wurden (siehe Tabelle 6-1):

In statistischen Tests der Kurzzeitverteilung wurden die Produktmerkmale und -eigenschaften $x_1 - x_{16}$ auf Normalverteilung getestet (siehe Abbildung 6-6 für x_1 und Anhang A3, Abbildung 0-1 ff. für $x_2 - x_{16}$). Für alle Produktmerkmale bzw. -eigenschaften konnte die Alternativhypothese $H1$: „die Zufallsvariable X_i ist nicht normalverteilt“ verworfen. Eine Ausnahme bildet der Fertigungsprozesse des Produktmerkmals x_{10} . Die statistische Verteilung der hergestellten Ausprägungen des Produktmerkmals x_{10} ähnelt einer Beta-Verteilung (mit Hyperparameter der Beta-Verteilung < 1). Sie ist ein charakteristisches Resultat der im Anwendungsfall vorliegenden individuellen Montage ($M(x_{10}) = 3$) vorgelagerter Montageprozesse, in der das Paarungsbauteil nach dem FIFO-Optimierungsziel $p_{FIFO-Fit}$ ausgewählt und montiert wurde (siehe Formel 5-19 in Kapitel 5.2.2).

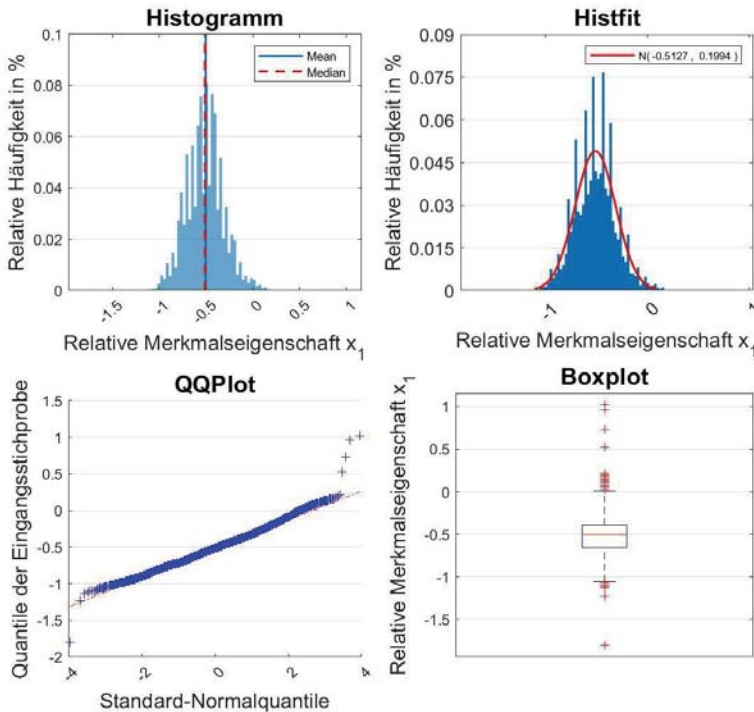


Abbildung 6-6: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_1 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall [$USG_{x_i} = -1$, $OSG_{x_i} = +1$] (nach A_Kieninger 2019)

Im Weiteren wurden verschiedene Zeitreihenmodelle an die historischen Fertigungsmessdaten der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i angepasst und die Güte des jeweiligen Modells bestimmt, um Veränderungen des Prozessmittelwertes bzw. der -standardabweichungen in Abhängigkeit der Zeit zu prüfen. Zur Beurteilung ihrer Güte und Auswahl der Modelle wurden die Wurzel aus den mittleren Fehlerquadraten (RMSE) bestimmt (Chai et al. 2014).

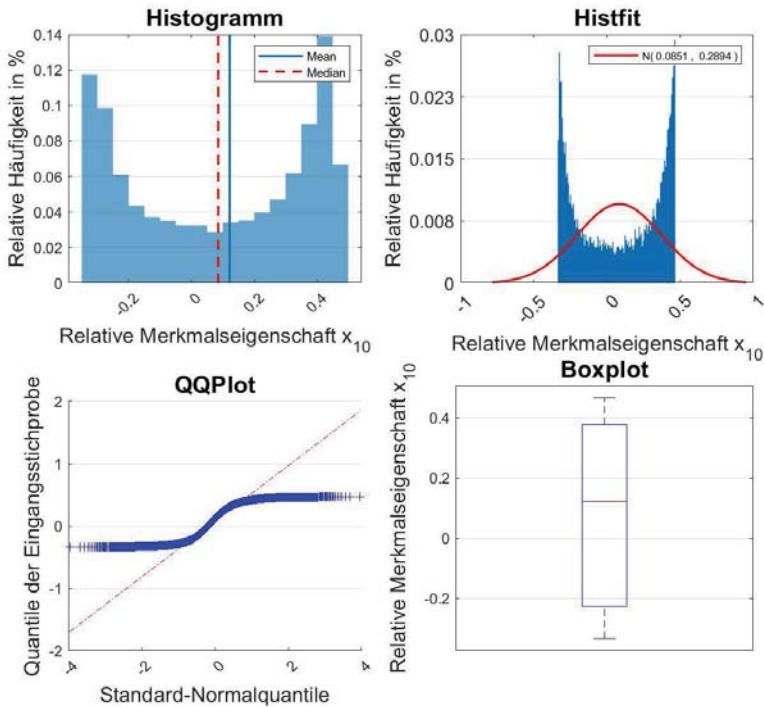


Abbildung 6-7: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{10} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

Am Beispiel der Produkteigenschaft x_1 ist eine Fourier-Reihe, unter minimalen RMSE, an die historischen Fertigungsmessdaten angepasst. Diese bildet den Verlauf des Prozessmittelwertes für x_1 über 18 Monate nach (siehe Abbildung 6-8, oben). Aus den Langzeitbeobachtungen kann eine Normalverteilung mit der Standardabweichung $\sigma(x_1) = 0,289$ und dem Prozessmittelwert $\mu(x_1) = -0,210$ angepasst werden. Bildet man die Residuen der tatsächlichen Messwerte m_1 zu den Werten des angepassten Fourier-Modells erhält man eine Normalverteilung der jeweiligen Kurzzeitfähigkeit mit durchschnittlicher Standardabweichung $\sigma(x_1) = 0,264$ der Residuen, unter variierendem Prozessmittelwert (siehe Abbildung 6-8, unten, normalisiert).

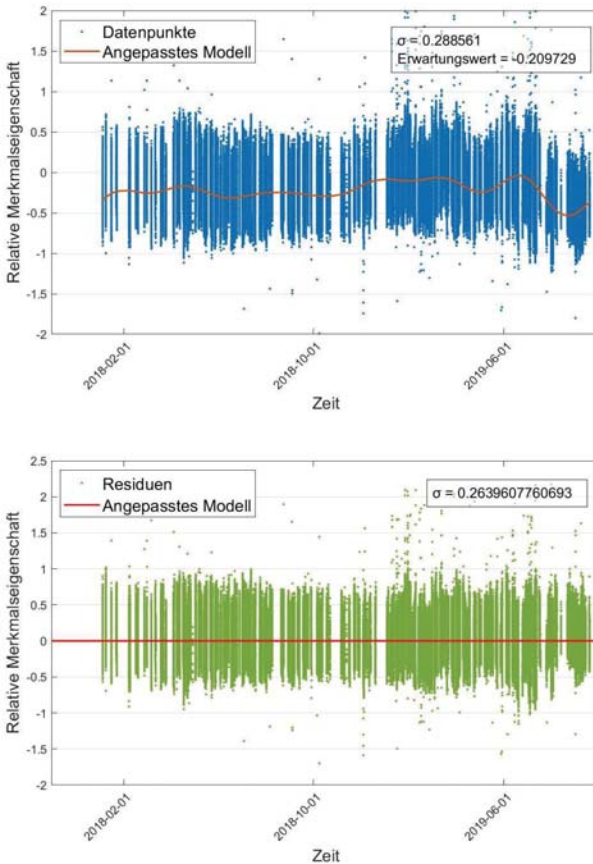


Abbildung 6-8: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_1 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

Das weiterentwickelte Langzeitmodell zeigt eine höhere Güte, anhand der um 8,65 % reduzierten Standardabweichung. Durch weitere statistische Tests der Residuen (Augmented-Dickey-Fuller-Test) konnte für die Prozessmodelle zur Herstellung des Produktmerkmals x_1 ein stationärer Zufallsprozess, ohne Autokorrelation, ermittelt werden. (Eckstein 2019).

Weitere Langzeitanalysen der Produktmerkmale und -eigenschaften $x_2 - x_{16}$ sind dem Anhang A4 zu entnehmen (siehe Abbildung 0-15 ff.). Die Zeitreihenanalysen zeigen für

x_1, x_8 und x_{13} einen nicht konstanten Prozessmittelwert, unter zufälliger (jedoch ohne systematische) Lageveränderung, bei verhältnismäßig konstanter Prozessstandardabweichung. Daher wird den zugehörigen Fertigungsprozessen das Prozessmodelle C2 zugeordnet (siehe Tabelle 6-1 und Kapitel 2.2.1).

Tabelle 6-1: Prozessmodelle und Kurzzeitfähigkeitskennwerte der Fertigungsprozesse zur Herstellung der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i im Anwendungsfall, blau hinterlegte Werte werden extern gefertigt (nach DIN 2019)

| Fertigungsprozess für | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | x_{10} | x_{11} | x_{12} | x_{13} | x_{14} | x_{15} | x_{16} |
|-----------------------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Bauteil | B | C | E | | | | | | F | | | G | | | | |
| Prozessmodell | C2 | A1 | A1 | A1 | A1 | A1 | A1 | C2 | A1 | D | A2 | A1 | C2 | A1 | A1 | A1 |
| C_p/P_p | 1,05 | 5,45 | 1,37 | 1,12 | 1,35 | 2,32 | 3,32 | 7,21 | 0,52 | 1,15 | 0,72 | 1,65 | 1,17 | 3,62 | 3,34 | 1,28 |
| C_{pk}/P_{pk} | 0,81 | 4,43 | 1,18 | 1,09 | 0,84 | 1,67 | 3,26 | 6,68 | 0,30 | 1,05 | 0,71 | 1,32 | 0,91 | 2,59 | 2,80 | 0,93 |

Die Bewertung der Messprozesseignung $Q_{MP}(x_i)$ der prozessintegrierten In-Line Messmittel erfolgte nach der Messsystemanalyse, mittels Wiederholmessungen kalibrierter Werkstücke nach (DIN 2018) (siehe Tabelle 6-2). Für extern erhobenen Messwerte $m_{9,j}, m_{12,j}, m_{13,j}, m_{14,j}, m_{15,j}, m_{16,j}$ (grau hinterlegt) wurde mangels Informationen über die vorliegenden Messprozesse eine bedingte Messprozesseignung $Q_{MP} = 30\%$ angenommen.

Tabelle 6-2: Messprozesseignung und Prüfhäufigkeit (● 100%, ○ Stichprobe, [] keine) der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i im Anwendungsfall, grau hinterlegte Werte basieren auf Annahme bedingt geeigneter Messprozesse

| Messprozess des Merkmals | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | x_{10} | x_{11} | x_{12} | x_{13} | x_{14} | x_{15} | x_{16} |
|--------------------------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Bauteil | B | C | E | | | | | | F | | | G | | | | |
| $u(x_i) / TOL_{x_i}$ | 0,004 | 0,033 | 0,003 | 0,010 | 0,007 | 0,002 | 0,001 | 0,003 | 0,075 | 0,048 | 0,039 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,075 |
| $Q_{MP}(x_i)$ | 1,7 | 13,0 | 1,4 | 4,1 | 2,8 | 0,7 | 0,5 | 1,3 | 30,0 | 19,2 | 15,7 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 | 30,0 |
| Prüfhäufigkeit | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | |

Zur Bewertung der Messprozesseignung eingesetzter In-Line Messprozess innerhalb der Qualitätsreglung wurde der Messprozess zur Klassifizierung der Produkteigenschaften x_1 und x_3 näher untersucht. Die Bewertung der Messprozesseignung erfolgte

dabei anhand des Eignungskriteriums Q_{MP^*} für selektive Montageprozesse und der Klassenbreite b des Paarungsbauteils für das Produktmerkmal x_i (siehe Formel 6-1). Die Klassenbreite b ergibt sich, durch Aufteilen der jeweiligen Toleranz TOL_{x_i} in C Eigenschaftsklassen (siehe Formel 6-2).

$$Q_{MP^*}(x_i) = \frac{2 U_{MP}}{b(x_i, C)} 100\% \quad \text{Formel 6-1}$$

$$b(x_i, C) = \frac{OSG_{x_i} - USG_{x_i}}{C} \quad \text{Formel 6-2}$$

Im Fall der Produkteigenschaften x_1 und x_3 beträgt die Klassenbreite b bei $C = 2$ Funktionsklassen jeweils die Hälfte der jeweiligen Toleranz TOL_{x_i} . Das Eignungskriterium Q_{MP^*} ergibt sich anhand der erweiterten Messunsicherheit der prozessintegrierten Messprozesse (siehe Tabelle 6-2) und der Klassenbreiten b zu $Q_{MP^*}(x_1) = 3,4\%$ bzw. $Q_{MP^*}(x_3) = 2,8\%$ (jeweils $Q_{MP^*}(x_i) < Q_{MP^*,krit} = 30\%$). Damit sind die Anforderungen der In-Line Messprozesse für die Produkteigenschaften x_1 und x_3 innerhalb der Qualitätsregelung erfüllt. Die In-Line Messprozesse, in der vorliegenden selektiven Montage, wären ab einer Klassenanzahl $C(x_1) = 18$ bzw. $C(x_3) = 22$ als kritisch zu betrachten.

6.1.4 Problemidentifikation und Zielformulierung des Status Quo

Aufgrund hoher Qualitätsanforderungen an funktionskritische Produktmerkmale und -eigenschaften werden in der Langzeitbetrachtung technologische Grenzen der Fertigungsprozesse, zur wirtschaftlichen Herstellung der Bauteile in Großserie, erreicht (siehe Tabelle 6-1). Wechselwirkungen durch Fertigungsabweichungen der Einflussgrößen auf die Produktfunktion „Einspritzung einer exakten Kraftstoffmenge“ und deren Einfluss auf den First Pass Yield wurden bisher nicht quantitativ untersucht. Zur Sicherstellung der Produktfunktion werden die Produkte vor Auslieferung daher einer 100% Funktionsprüfung unterzogen, um fehlerhafte Produkte zu identifizieren. Die Fehlerhäufigkeitsanalyse über vier Monate der Serienproduktion zeigte, dass die Sicherstellung der Produktfunktion Einspritzmenge in der Herstellung den größten Effekt auf den First Pass Yield FPY im Status Quo der Serienproduktion hatte (siehe Abbildung 6-9).

Die auftretenden Fehler an der EoL Funktionsprüfung schlugen sich ebenfalls in den Gesamtkosten je konformem Produkte K_G nieder. Diese setzten sich im Status Quo aus $K_{HK} = 94\% K_G$ Herstellkosten konformer Produkte und $K_{Ausschuss} = 6\% K_G$ Ausschusskosten non-konformer Produkte zusammen (siehe Abbildung 6-10).

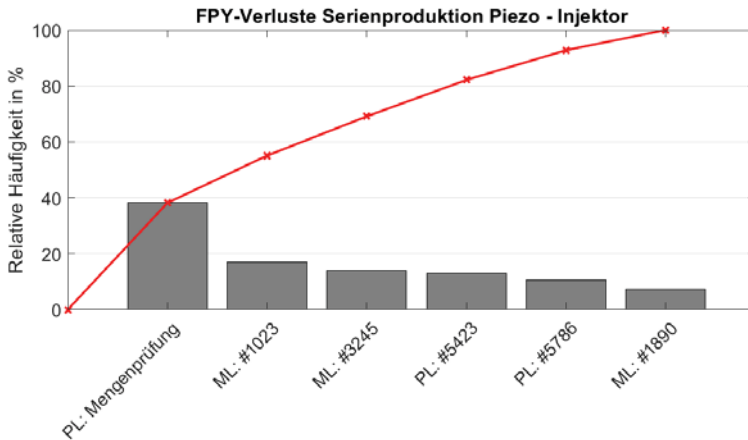


Abbildung 6-9: Fehlerhäufigkeit der Serienproduktion zur Herstellung der Piezo-Injektoren im Status Quo, Auftragsdauer vier Monate, eigene Darstellung

Die Verbesserung der Produktqualität sollte durch den Einsatz der funktionsorientierten Qualitätsregelung, mit organisatorische Aufwände im maximalen Umfang der Ausschusskosten $K_{Ausschuss} = 6\% K_G$, erreicht werden.

Gesamtkostenstruktur je konformem Produkte K_G im Status Quo

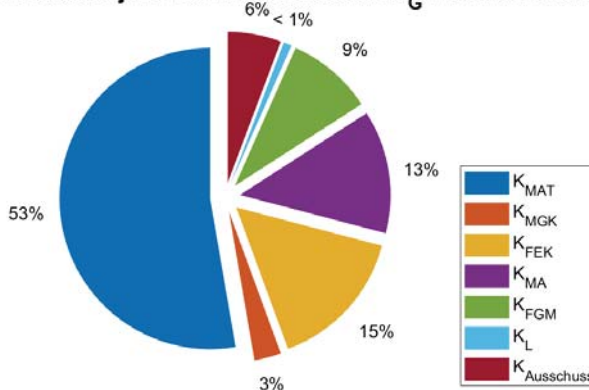


Abbildung 6-10: Prozentuale Gesamtkostenstruktur je konformem Produkt K_G in der Serienproduktion der Piezo-Injektoren (Status Quo), eigene Darstellung

6.2 Exemplarische Durchführung des Vorgehens

Das methodische Vorgehen zur Planung funktionsorientierten Qualitätsregelungen wurde im vorgestellten Anwendungsfall durchgeführt. Zunächst wurden geeignete Funktionsmodelle, unter geringer Unsicherheit, zur Echtzeit-nahen Funktionsprognose abgeleitet (siehe Kapitel 6.2.1). Anschließend erfolgte die Konzeptionierung und Modellierung alternativer Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung (siehe Kapitel 6.2.2), die anhand der entwickelten Bewertungsmetrik unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten evaluiert wurden (siehe Kapitel 6.2.3).

6.2.1 Produktbezogenes Funktionsmodell zur Echtzeit-nahen Prognose

Zur Entwicklung einer Echtzeit-nahen Funktionsprognose fand zunächst die Bestimmung quantitativer Wirkzusammenhänge, unter dem Ansatz multipler Regressionen und einer statistischen Versuchsplanung, Anwendung (siehe Kapitel 6.2.1.1). Darauf folgend wurde ein digitales Mastermodell entwickelt, unter dessen Anwendung mit Messdaten realer Piezo-Injektoren Digitale Zwillinge erzeugt werden konnten (siehe Kapitel 6.2.1.2). Zur Verringerung der Modellunsicherheit kam ein statistisches Kalibrierungsverfahren des digitalen Mastermodells zum Einsatz (siehe Kapitel 6.2.1.3). Das nachfolgende Ableiten interpretierbarer, datengetriebener Metamodelle ermöglichte die Echtzeit-nahe Funktionsprognose (siehe Kapitel 6.2.1.4). Anhand der Unsicherheitsbewertung erfolgte abschließend die Modellauswahl für das Modell mit der minimalen Gesamtunsicherheit (siehe Kapitel 6.2.1.5).

6.2.1.1 Bestimmung quantitativer Wirkzusammenhänge durch Versuchsdaten

Zur Ermittlung quantitativer Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Produktmerkmalen und -eigenschaften x_i und der Produktfunktion y_q wurden, mangels einer ausreichenden Datenbasis, Funktionsversuche mit eigens dafür hergestellten Grenzmustern in einer DoE durchgeführt. Dazu wurden $N = 442$ Versuche anhand eines teilfaktoriellen Versuchsplans für 13 Einflussfaktoren, 128 Eckpunkte und 19 Face Centered Punkte, in jeweils $n_{repl} = 3$ Replikationen, durchgeführt. Die Produkteigenschaften x_6, x_7 und x_8 konnten in der Fertigung nicht direkt beeinflusst werden und blieben somit in der Versuchsplanung unberücksichtigt, ihre Messdaten wurden jedoch in der Anpassung statistischer Modelle berücksichtigt. Statistische Trennschärfe und Stichprobenumfang Untersuchungen (engl. power and sample size) ergaben einen ausreichenden messbaren Effekt ($< 1\% * TOL_1$) für 128 Eckpunkte, 3 Replikationen,

ein Konfidenzniveau $\gamma = 0,9$ und der vorliegenden Standardabweichung im EoL-Messprozess. Zur Reduzierung aleatorischer Unsicherheit und systematischer Effekte wurden die Versuchsreihenfolge während der Durchführung randomisiert und eine Blockbildung durchgeführt. Des Weiteren wurden in Ursache-Wirkungsanalysen der De- und Re-Montage in der DoE Versuchsdurchführung (siehe Anhang A5, Abbildung 0-30) sowie der Messprozesse zur Funktionsprüfung der Piezo-Injektoren (siehe Abbildung 0-31 im Anhang A5) Störgrößen identifiziert. Für kritische Störgrößen wurden Abhilfemaßnahmen für die Versuchsdurchführung abgeleitet (bspw. Montagehilfen, Abkühl-dauer, begleitende Referenzmessungen) und in ein standardisiertes Vorgehen überführt (siehe Abbildung 0-32 im Anhang A5). Die Variation schwer einstellbarer Faktorstufen wurde mittels Split Plot Design in der Versuchsplanung möglichst vermieden. (Siebertz et al. 2017) Die Versuche wurden für alle Betriebspunkte $q = \{1, 2, 3, 4\}$ durchgeführt, wobei für die Messung der Kraftstoffmenge $y_{q,j}$ als Mittelwert aus 25 Wiederholmessungen je Versuch und Betriebspunkt q erfasst wurde.

Zur Analyse der quantitativen Einflussgrößen und Wechselwirkungen der Einflussgrößen mit den gewonnenen Funktionsprüfdaten wurden multiple lineare Regressionsmodelle angepasst (siehe Formel 6-3 und Anhang A1). (Morgenstern et al. 2008)

$$y_{q,m} = f(\vec{x}, \vec{\beta})_m = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i,p=1}^n \beta_{i,p} x_i x_p + \dots + \beta_{12\dots n} x_1 x_2 \dots x_n \quad \text{Formel 6-3}$$

Zur Anpassung der Regressionsmodelle wurde die Methode „SignifReg“, in der Statistiksoftware R, zur bidirektionalen Elimination von linearen Haupt- β_i und Wechselwirkungen $\beta_{i,j}$ bis zur 2. Ordnung anhand des Konfidenzniveaus $\gamma = 0,99$, ausgehend von einem voll besetzten Modell, verwendet (Kim et al. 2019) Für jeden Betriebspunkt q wurde ein individuelles Funktionsmodell $f_{q,Reg}$ generiert.

Für die Anpassung einer verlässlichen, multiplen Regression mussten die Voraussetzungen der Linearität des Zusammenhangs, die Gauß-Markov-Annahme, die Annahme der Unabhängigkeit der Einflussgrößen, die Normalverteilung der Residuen sowie eine geringe Multikollinearität der Daten erfüllt sein. (Keller 2016) Teilweise konnte die Überprüfung der Voraussetzung jedoch erst nach der Bestimmung der Modelle erfolgen (siehe Tabelle 6-3).

Tabelle 6-3: Prüfung der Voraussetzungen der multiplen linearen Regression (nach A_Kieninger 2019)

| Voraussetzung | Erfüllung | Kommentar |
|---|-----------|---|
| Linearität des Zusammenhangs | Ja | Nachweis der Linearität des Zusammenhangs in Streudiagrammen (siehe Anhang A6). |
| Linearität der Koeffizienten | Ja | Alle Koeffizienten b_i sind linear, siehe Formel 6-3. |
| Zufällige Stichprobe | Nein | Durch DoE-Ansatz nicht erfüllt. |
| Bedingter Erwartungswert | Ja | Mittelwert der Residuen für alle Modelle näherungsweise Null. |
| Stichprobenvariation der unabhängigen Variablen | Ja | Nach dem DoE-Ansatz müssen die Inputparameter eine Varianz vorweisen. |
| Homoskedastizität | Ja | Nachweis der Homoskedastizität in Streudiagrammen (siehe Anhang A7) |
| Unabhängigkeit des Fehlers | Nein | Es liegt Autokorrelation vor. |
| Normalverteilung des Fehlers | Ja | Prüfung auf Normalverteilung in Histogramme (siehe Abbildung 6-6 und Anhang A3) |
| Keine Multikollinearität | Nein | Es liegt sehr starke Multikollinearität vor. |

Die Linearität des Zusammenhangs wurde anhand von Streudiagrammen der Produktfunktion y_q über das jeweilige Produktemerkmal x_i geprüft (siehe Abbildung 6-11 für x_1 und Anhang A6 für $x_2 - x_{16}$). Auftretende Zusammenhänge konnten durch ein lineares Modell ausreichend angenähert werden.

Die Homoskedastizität wurde an Streudiagrammen der Prognoseresiduen $y_q - y_{Reg,q}$ über den prognostizierten Wert $y_{Reg,q}$ geprüft (siehe Abbildung 6-12 für $q = 1$ und Anhang A7 für $q = \{2, 3, 4\}$). Darin ist keine systematische Änderung der Residuen über den prognostizierten Wert $y_{Reg,q}$ zu erkennen.

Die meisten der Voraussetzungen für die Anpassung multipler, linearer Regressionen waren erfüllt (siehe Anhang A3, A6 und A7). Die Tatsache, dass eine nicht zufällige Stichprobe vorlag und die Fehlerterme nicht unabhängig waren, konnte dem DoE-Ansatz und der darin festgelegten Prüfreihefolge zugerechnet werden. In der Anpassung einer multiplen, linearen Regression trat starke Multikollinearität auf, die anhand des Varianz-Inflationsfaktors VIF bestimmt wurden (siehe Tabelle 6-4 und Anhang A1).

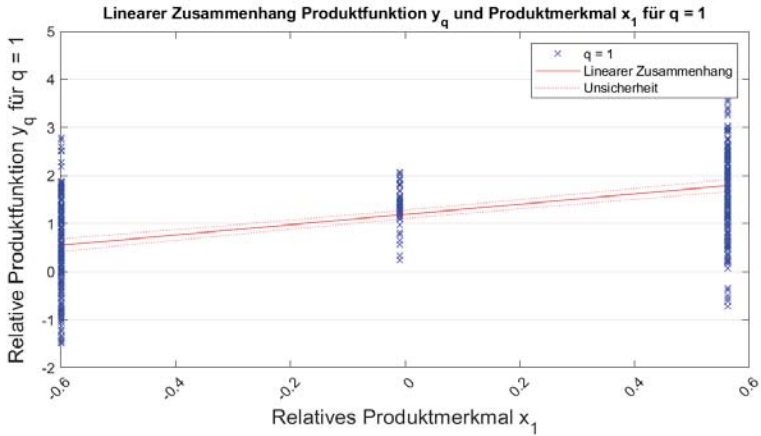


Abbildung 6-11: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_1 (nach A_Kieninger 2019)

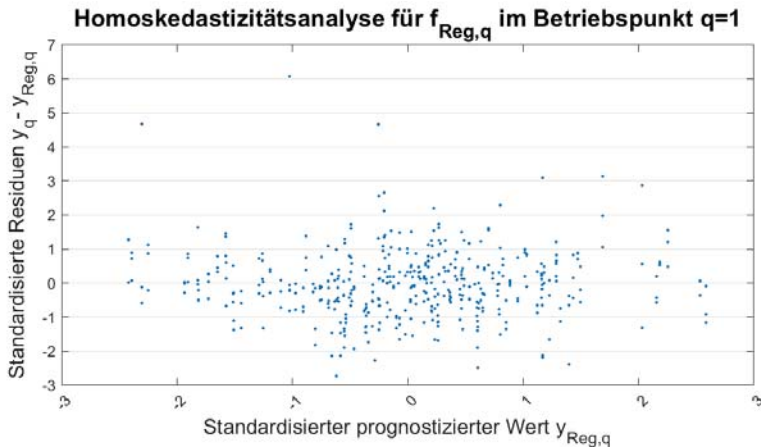


Abbildung 6-12: Grafische Analyse der Homoskedastizität der multiplen, linearen Regression $f_{\text{Reg},q}$ im Betriebspunkt $q = 1$ (nach A_Kieninger 2019)

Tabelle 6-4: Variations-Inflationsfaktoren der Einflussgrößen für $y_{Reg,q=1}$, für $\gamma = 0,99$, bidirektionale Elimination, ohne Wechselwirkungen

| Einflussgröße | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_9 | x_{10} | x_{11} | x_{12} | x_{13} | x_{14} | x_{15} | x_{16} |
|---------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| VIF | 4,8 | 1,0 | 1,2 | 2,0 | 2,0 | 1,8 | 1,5 | 2,4 | 3,2 | 5,9 | 1,1 | 7,0 | 4,0 |
| | $\cdot 10^6$ | $\cdot 10^{10}$ | $\cdot 10^3$ | $\cdot 10^8$ | $\cdot 10^7$ | $\cdot 10^3$ | $\cdot 10^5$ | $\cdot 10^6$ | $\cdot 10^7$ | $\cdot 10^3$ | $\cdot 10^9$ | $\cdot 10^6$ | $\cdot 10^5$ |

Ein $VIF > 10$ ist als höchst problematisch anzusehen und steht für sehr hohe Multikollinearität. Da die VIF aller Einflussfaktoren die Grenze deutlich überschritten, lag für die Einflussfaktoren eine starke Multikollinearität vor. Diese ließ sich selbst unter Anwendung alternativer OLS Eliminationskriterien, wie beispielsweise Akaike und dem Baysschen Informationskriterium, nicht reduzieren. (O'Brien 2007)

Zur Analyse der Modellgüte wurde die erweiterte Gesamtunsicherheit $U_q(f_{q,Reg})$, bestehend aus der Standardunsicherheit $u_{\varepsilon,q}$, die sich aus Modellunsicherheit aufgrund der systematischen Modellabweichung bezieht, der Standardunsicherheit $u_{I,q}$, die sich auf die Unsicherheit der Modelleinflussfaktoren bezieht und dem Erweiterungsfaktor $k_{cov} = 2$, bestimmt (siehe Tabelle 6-5 und Kapitel 5.1.4).

Die Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Reg})$ wurde als RMSE auf Grundlage von $T = 90$ unabhängigen Testdaten $t = \{1, \dots, T\}$ der In-Line Messdaten $m_{i,t}$ und den zugehörigen EoL-Funktionsmessdaten $y_{q,t}$ hergestellter Piezo-Injektoren bestimmt (siehe Formel 5-10).

Die Standardunsicherheit $u_{I,q}(f_{q,Reg})$, bezogen auf die Unsicherheit der Modelleinflussfaktoren, wurde mittels Monte-Carlo-Methode nach GUM-Supplement 1 bestimmt. Dazu wurde die „Uncertainty“ Softwarebibliothek des National Institute of Standards and Technology in der Statistiksoftware R verwendet (Gasca-Aragon 2018). Als Modellgleichung Y dienen die jeweiligen multiplen, linearen Regressionsmodelle $f_{q,Reg}$. Als Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einflussfaktoren $g(X_i)$ wurden Normalverteilungen \mathcal{N} herangezogen. Der Nominalwert n_i der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i diente als Erwartungswert $\mu(x_i)$ und die Varianz der Serienmessprozesse $u_{MP}^2(x_i)$ als Varianz σ^2 der Normalverteilungen (siehe Tabelle 6-2 und Formel 6-4).

$$g(X_i) = \mathcal{N}(\mu = n_i, \sigma^2 = u_{MP,i}^2) \quad \text{Formel 6-4}$$

Anschließend wurde die erweiterte Gesamtunsicherheit $U_q(f_{q,Reg})$ durch $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Reg})$ und $u_{I,q}(f_{q,Reg})$, mit dem Erweiterungsfaktor $k_{cov} = 2$, gemäß GUM für die multiplen linearen Regressionen $f_{q,Reg}$ im jeweiligen Betriebspunkt q berechnet (siehe Formel 5-8

und Tabelle 6-5) (JCGM 2008; Friedman 1997). Die erweiterte Gesamtunsicherheit $U_q(f_{q,Reg})$ betrug mindestens das 1,7fache ($> 1,757$) der jeweiligen Toleranz TOL_q für die multiplen, linearen Regressionsansätze $f_{Reg,q}$.

Tabelle 6-5: Gesamtunsicherheit U_q der multiplen, lin. Regressionsmodelle $f_{q,Reg}$, bezogen zur jeweiligen Toleranz TOL_q im Betriebspunkt q auf Basis der DoE Versuchsdaten

| q | $u_{\varepsilon,q}/TOL_q$ | $u_{I,q}/TOL_q$ | U_q/TOL_q |
|-----|---------------------------|-----------------|-------------|
| 1 | 0,157 | 0,8642 | 1,757 |
| 2 | 0,235 | 460,386 | 920,771 |
| 3 | 0,096 | 4.609,421 | 9.218,843 |
| 4 | 0,166 | 1,699 | 3,413 |

Detaillierte Analysen der Gesamtunsicherheit zeigten, dass die Standardabweichung der Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Reg})$ in allen Fällen sehr gering waren ($\min(u_{\varepsilon,q}/TOL_q) = u_{\varepsilon,q=3}/TOL_q = 0,096$, $\max(u_{\varepsilon,q}/TOL_q) = u_{\varepsilon,q=1}/TOL_q = 0,235$) und die Standardabweichung der Inputunsicherheiten $u_{I,q}$ ein Vielfaches der jeweiligen Toleranzbreite TOL_q einnahmen ($\min(u_{I,q}/TOL_q) = u_{I,q=4} = 1,699$, $\max(u_{I,q}/TOL_q) = u_{I,q=3} = 4.609,421$). Die Prädiktionen, mittels multipler, linearer Regressionen $f_{q,Reg}$, unterlagen somit maßgeblich einer hohen Varianz durch Inputunsicherheiten und können für den Einsatz in der Produktionssteuerung nicht herangezogen werden. Ein Ansatz zur Erzeugung einer größeren Menge an Datensätzen, mit ausreichender Variation der Einflussfaktoren (auch für x_6 , x_7 und x_8), war der Einsatz von Produktsimulationen, die eine robuste Anpassung der Prädiktoren erlauben. Ansätze der Regularisierung, zur Auswahl der Prädiktorteilmenge, zeigten sich in anderen Ansätzen bereits als geeignetes Mittel zur Reduktion auftretender Multikollinearität (siehe 5.1.3) (Hastie et al. 2009).

6.2.1.2 Erstellung Digitaler Zwillinge der Piezo-Injektoren

Zur Modellierung digitaler Produktzwillinge wurde ein multiphysikalisches Zustandsraummodell des Piezo-Injektoren auf Basis von gleichungs-, blockorientierten Bausteinen in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink, als digitales Mastermodell, entwickelt. Grundlage des digitalen Mastermodells war das Zustandsraummodell eines Piezo-Injektors von Notheis (2015), das die Vorgängergeneration des Piezo-Injektors im vorliegenden Anwendungsfall darstellt. (Notheis 2015) Das Vorgängermodell diente als Ausgangsbasis zur Entwicklung eines eigenen multiphysikalischen Produktmodells, das die konstruktiven Änderungen der Nachfolgenergeneration in den Zustandsraummodell berücksichtigt und gleichzeitig in die Lage versetzte, durch Integration von In-Line

Messdaten $m_{i,j}$ der Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,j}$, Digitale Zwillinge realer Produktausprägungen darzustellen.

Das Simulationsmodell des Piezo-Injektors beinhaltet einen mechatronischen, einen mechanischen und einen hydraulischen Systembestandteil, die zusammen alle Systemzustände des Produktes durch vielfältige Interaktion und Wechselwirkung auf analytischer Basis, in einer zeitlicher Diskretisierung, nachbilden (siehe Abbildung 6-13). Komplexe mechanische und hydraulische Zusammenhänge des Systemzustands, wie beispielsweise elastische Verformung, hydraulische Verluste, Kompressibilität der Fluide, Kavitationseffekte etc., wurden in physikalischen Funktionen, innerhalb der Systemblöcke, berechnet. Durch Variation der elektrischen Ansteuerung und Kraftstoffzufuhr wurde die Simulation der Kraftstoffmenge y_q in verschiedenen Betriebspunkten q möglich. Maßgebliche Modell- und Simulationsparameter p_i , wie beispielsweise form- und fluidabhängige Konstanten zur Berechnung hydraulischer Effekte, wurden in detaillierten CFD-Simulationsstudien bestimmt (siehe Abbildung 6-15) bzw. mit Literaturwerten ergänzt.

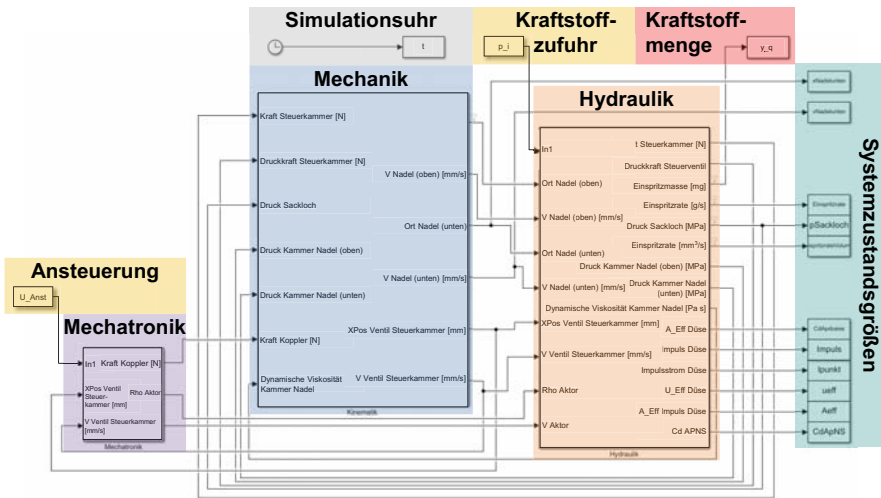


Abbildung 6-13: Übersicht der Systembereiche des Piezo-Injektor Zustandsraummodells (nach A_Wannenwetsch 2018)

Konstruktive Änderung im mechanischen Bereich war die Anpassung der Düsenadelgeometrie (siehe Anhang A8, Abbildung 0-52) und im hydraulischen Bestandteil die

Integration einer Fülldrossel sowie eines Bypass (siehe Anhang A8, Abbildung 0-53) (Tschöke et al. 2018). Diese wurden durch entsprechende Ergänzung im Systemzustandsmodell implementiert und anhand der vorliegenden Produktspezifikation parametrisiert (siehe Anhang A8).

Um das Modell mit In-Line Messdaten $m_{i,j}$ der Serienproduktion simulieren zu können, wurde die Modellierung des digitalen Mastermodells angepasst, so dass diese als Inputparameter eines individuellen Digitalen Zwillings integriert wurden und für eine nachfolgende Funktionssimulation zur Verfügung standen. Ein Fokus der Anpassung wurde auf die Modellierung der Drossleinheit gelegt, da für dieses Teilsystem lediglich Produkteigenschaften in Form gemessener hydraulischer Durchflusswerte mit bzw. ohne Gegendruck vorlagen. Eine Modellierung mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung, wie in den Ansätzen von Notheis (2015) und Salvador et al (2014), war ohne geometrische Charakterisierung zur Berechnung des hydraulischen Verlustbeiwerts nicht möglich (Notheis 2015; Salvador et al. 2014). Stattdessen wurde ein Ansatz gewählt, welcher die Durchflussrate anhand von einer stückweisen, linearen Funktion in Abhängigkeit der Wurzel der Druckdifferenz $\sqrt{\Delta p}$, aus Druck am Drosseleingang p_E und dem Druck am Drosselausgang p_A , beschreibt (siehe Formel 6-5) (Salvador et al. 2014).

$$\sqrt{\Delta p} = \sqrt{p_E - p_A} \quad \text{Formel 6-5}$$

Liegt eine große hydraulische Druckdifferenz Δp an der Drossel an, tritt ab der kritischen Druckdifferenz $\sqrt{\Delta p_{krit}}$ Kavitation auf. Kavitation beschreibt die Bildung von Gasblasen durch Verdampfung. Diese sind durch Turbulenzen bedingt. Als Folge der Turbulenzen entstehen Niederdruckbereiche, in denen der Kraftstoff den spezifischen Dampfdruck unterschreitet und nicht mehr in flüssiger Form vorliegt. Die Bildung von Gasblasen verhindert eine weitere Zunahme der Durchflussrate $Q(\sqrt{\Delta p})$, trotz steigender Druckdifferenzen $\sqrt{\Delta p}$. (Andersen 2011) Unter Berücksichtigung des Kavitationseffekts wurde die stückweise, lineare Funktion modelliert (siehe Formel 6-6 und Abbildung 6-14). Die stückweise, lineare Funktion konnte anhand der In-Line Messdaten $m_{i,j}$ der Produkteigenschaft, des Durchflusses mit Gegendruck Q_{mGD} und dessen ohne Gegendruck Q_{oGD} als Stützpunkte, aufgestellt werden.

$$Q(\sqrt{\Delta p}) = \begin{cases} \frac{Q_{mGD}}{\sqrt{5,47}} * \sqrt{\Delta p}, & \sqrt{\Delta p} \leq \sqrt{\Delta p_{krit}} \\ Q_{oGD}, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Formel 6-6}$$

$$\text{mit } \sqrt{\Delta p_{krit}} = \sqrt{5,47} \frac{Q_{oGD}}{Q_{mGD}}$$

Um die angenommene Funktion zu validieren wurden Strömungssimulationen einer Referenzgeometrie der Zulaufdrossel mittels der CFD-Methode für verschiedene Druckdifferenzen durchgeführt. In den Ergebnissen war die Substitution der flüssigen Phase durch Bildung einer gasförmigen Phase zu erkennen (siehe Abbildung 6-15). Mit zunehmender Druckdifferenz $\sqrt{\Delta p}$ wurde der hydraulisch wirksame Durchmesser eingeschnürt, der hydraulische Durchfluss $Q(\sqrt{\Delta p})$ blieb ab $\sqrt{\Delta p_{krit}}$ auch für größere Druckdifferenzen $\sqrt{\Delta p} > \sqrt{\Delta p_{krit}}$ konstant.

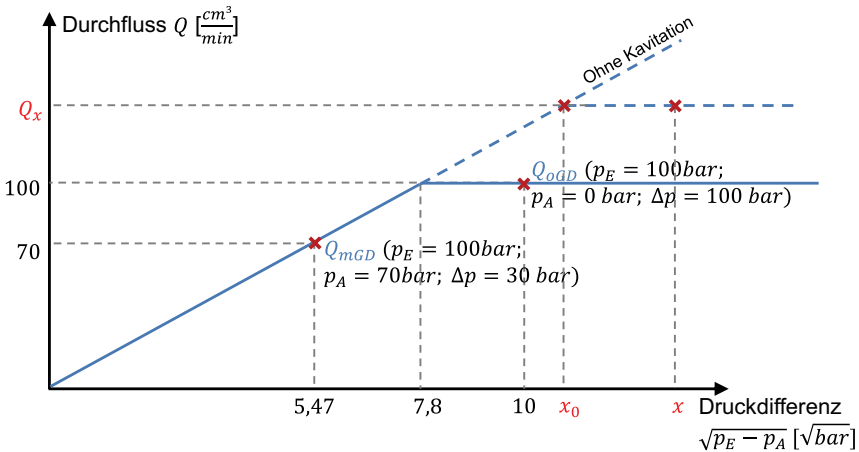


Abbildung 6-14: Verlauf der Durchflussrate Q unter Berücksichtigung des formabhängigen Kavitationseffekts am Beispiel der Fülldrossel (nach A_Wannenwetsch 2018)

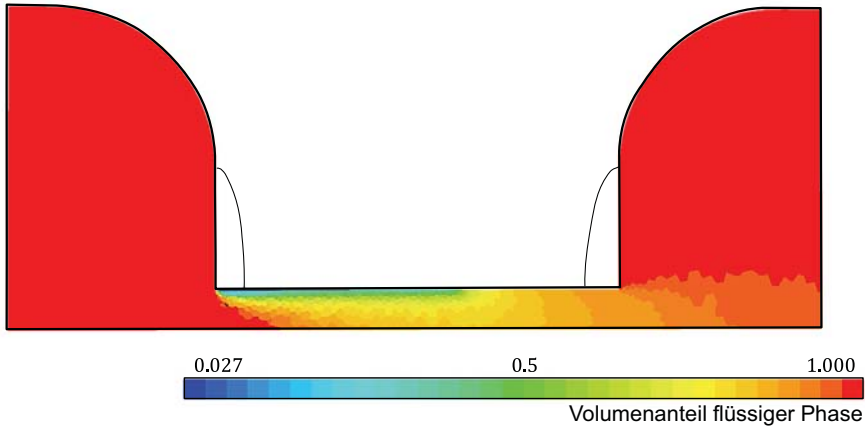


Abbildung 6-15: CFD Simulation in der Zulaufdrossel unter Auftreten von Kavitation, Software Star-CMM+, Fluid Diesel, $\sqrt{\Delta p} = 10$, zeitl. Diskretisierung $2 * 10^{-8}s$, Simulationsdauer $1 * 10^{-3}s$, 5.000 Iterationen bis Gleichgew. (nach A_Wannenwetsch 2018)

Anhand von Vergleichsergebnissen einer Drossel mit Referenzgeometrie konnte die stückweise, lineare Funktion mit der Bernoulli-Gleichung und Ergebnissen der CFD-Simulation, unter gleichen hydraulischen Parametern, validiert werden (siehe Abbildung 6-16). Für Druckunterschiede $\sqrt{\Delta p} > 0,5$ war die Vereinfachung nahezu äquivalent zur detaillierten Modellierung mit der Bernoulli-Gleichung und den Ergebnissen der CFD-Simulation. Die Durchflüsse der Bernoulli-Gleichungen wichen für $\sqrt{\Delta p} < 0,5$ geringfügig von den Ergebnissen der stückweise, linearen Funktion und den Ergebnisse der CFD-Simulationen ab. Insgesamt beschreib der vereinfachte Zusammenhang für $\sqrt{\Delta p} > 0,5$ und $p_E = 100 \text{ bar}$ die Durchflussrate Q somit sehr gut. Zudem trat der Systemzustand geringer Druckdifferenzen an den Drosseln im Anwendungsfall nur in sehr kurzen Zeitintervallen auf. Der Effekt auf die Produktfunktion y_q war in diesem Bereich vernachlässigbar. Als Ergebnis wurde die stückweise, lineare Funktion, unter Integration der In-Line Messdaten $m_{i,j}$, als physikalische Funktion in den Hydraulikbereich des Zustandsraummodells integriert.

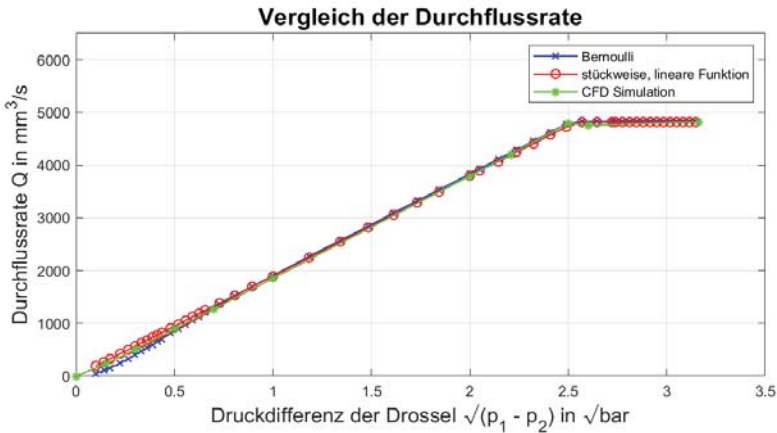


Abbildung 6-16: Vergleich der Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Durchflussrate Q in Drosseln (nach A_Wannenwetsch 2018)

Neben der detaillierten Modellierung analytischer Modellparameter hatten ebenfalls die Simulationsparameter einen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Vor allem die Schrittweite der zeitlichen Diskretisierung beeinflussten die Simulationslaufzeit und die Prognosegüte der Systemzustandssimulation einzelner Piezo-Injektorausprägungen. Eine Vergrößerung der Schrittweite verkürzte die Simulationslaufzeit, eine Verkleinerung bewirkte eine höhere Auflösung in der Aktualisierung des Systemzustands pro Zeiteinheit. Eine systematische Schrittweitenanalyse diente dem Zweck einen Kompromiss zwischen einer kurzen Simulationsdauer und einer ausreichenden Genauigkeit der Prognoseergebnisse zu ermitteln. Aufgrund der Analyseergebnisse (siehe Anhang A9, Abbildung 0-54 und Abbildung 0-55) wurde die Schrittweite von $2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ als sinnvoller Kompromiss befunden. Eine weitere Vergrößerung der Schrittweite versprach keine erhebliche Laufzeitverkürzung der Simulation. Eine Echtzeit-nahe Prognose anhand der Systemzustandsmodelle war nicht zu erreichen. Eine weitere Verkürzung der Schrittweite war aufgrund der bereits geringen Abweichung von circa $2 \cdot 10^{-5} \%$ zur referenzierten Kraftstoffmenge im Betriebspunkt $q = 1$ nicht erforderlich.

Das Systemzustandsmodell der Piezo-Injektoren war schließlich, durch Integration der In-Line Messdaten $m_{i,j}$ und Informationen aus CFD-Simulationen und Vorwissen, befähigt Digitale Zwillinge realer Piezo-Injektorausprägungen j und deren Funktion, Einspritzmenge, virtuell darzustellen. Zur Quantifizierung der Modellunsicherheit $u_{e,q}(f_q)$

der Digitalen Zwillinge in der Ausgangssituation wurde der relative RMSE bezogen zur jeweiligen Toleranz TOL_q anhand der $T = 90$ unabhängigen Testdaten $t = \{1, \dots, T\}$ der In-Line Messdaten $m_{i,t}$ und der zugehörigen EoL-Funktionsmessdaten $y_{q,t}$ hergestellter Piezo-Injektoren, bestimmt (siehe Formel 5-10 und Abbildung 6-17).

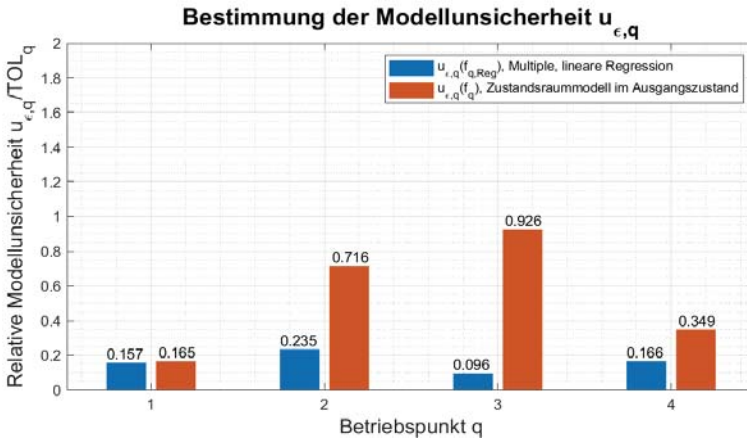


Abbildung 6-17: Bestimmung der relativen Modellunsicherheit $u_{\epsilon,q}$ der Zustandsraummodelle im Ausgangszustand (nach A_Quasnitza 2019)

Trotz des relativ umfangreichen Modellierungsaufwandes umfasste die Modellunsicherheit $u_{\epsilon,q}(f_q)$ der Digitalen Zwillinge im Ausgangszustand 16,5% bis 92,6% der jeweiligen Toleranz TOL_q . Eine Bestimmung der Standardunsicherheit $u_{i,q}(f_q)$, bezogen auf die Unsicherheit der Einflussfaktoren war, aufgrund der Simulationslaufzeit der Zustandsraumdarstellungen, nicht mit vertretbarem Aufwand zu ermitteln. Die Modellunsicherheit in den Betriebspunkte $q = \{2, 3\}$ war im Vergleich zu den multiplen, linearen Regressionen $f_{Reg,q}$ um das zwei- bzw. neunfache der jeweiligen Toleranz TOL_q gestiegen. Für den Einsatz in der Serienproduktion war die Modellunsicherheit $u_{\epsilon,q}(f_q)$ der Digitalen Zwillinge im Ausgangszustand zu groß.

6.2.1.3 Digitale Zwillinge unter geringer Modellunsicherheit

Trotz umfangreichem Modellierungsaufwand zur Ermittlung realistischer Modellparameter p_i gelang es nicht, unter Einbeziehen von Struktursimulationen sowie Expertenwissen, mit verhältnismäßigem Aufwand ein hinreichend realistisches Modellverhalten

des Zustandsraummodells, unter geringer Modellunsicherheit, zur erreichen. Zur weiteren Reduktion der Modellunsicherheit wurden Modellparameter ausgewählt, die durch Literaturwerte oder Näherungen abgeschätzt wurden. Diese wurden einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, um die Modellparameter p_i zu identifizieren, deren Inputunsicherheit den größten Einfluss auf die prognostizierte Kraftstoffmenge hatte. Dazu wurde die $N = 442$ experimentellen Datensätze simuliert und die mittlere, prozentuale Abweichung der prognostizierten Einspritzmenge $y_{q,n,rel}$ zur gemessenen Kraftstoffmenge $y_{q,j}$ unter Variation $p_i * \{0, +20\%, +50\%, -20\%, -50\%\}$ ausgewählter Modellparameter p_i des Systemraummodells bestimmt (siehe Abbildung 6-18).

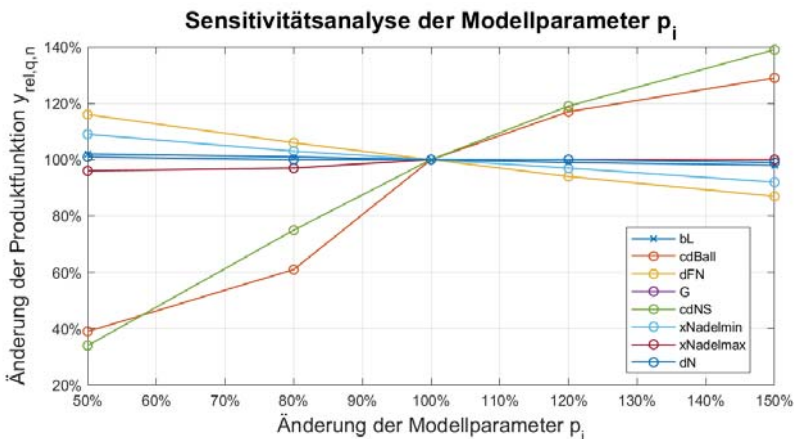


Abbildung 6-18: Sensitivitätsanalyse unsicherer Modellparameter p_i des Zustandsraummodells bezogen zur relativen Gesamtfunktion $y_{rel,q,n}$ (nach A_Quasnitza 2019)

Die Modellparameter „hydraulischer Verlustbeiwert der Balldrossel im Servoventil $p_1 = CdBall$ “ und „hydraulischer Verlustbeiwert des Nadelsitzes im Düsenmodul $p_2 = CdNS$ “ zeigten dabei einen großen Einfluss auf die prognostizierte Einspritzmenge. Diese beiden Modellparameter wurden für die Anwendung der Kalibrierungsmethode ausgewählt, um durch Rückführung und Validierung anhand der N experimentellen Daten eine verringerte Modellunsicherheit zu erlangen. Weitere Modellparameter zur Kalibrierung wurden nicht in Betracht gezogen, um die Gefahr der Überanpassung, durch zu große Flexibilität des Modells, zu vermeiden.

Für die beiden Modellparameter p_1 und p_2 wurde jeweils ein plausibles Intervall $p_1, p_2 = [0,5; 0,9]$ festgelegt, deren Werten die Modellparameter aus technischer Sicht prinzipiell einnehmen können.

Im nächsten Schritt wurden $Z_1 = 50$ Ausprägungen als Wertekombinationen $[p_{1,z_1}, p_{2,z_1}]$, mit $z_1 = \{1, \dots, Z_1\}$, mittels der Latin Hypercube Sampling Methode „Ihshdesign“ in MATLAB© zufällig kombiniert (MathWorks 2020). Jeder Ausprägung $n = \{1, \dots, N\}$ der experimentellen Datensätze wurde $Z_1 = 50$ mal vervielfältigt, eine der Z_1 Wertekombinationen $[p_{1,z}, p_{2,z}]$ zum Datensatz $[m_{i,n}, y_{q,n}]$ zugeordnet und eine Funktionsprognose $\hat{y}_{q,n,z} = f_q(m_{i,n}, p_{1,z}, p_{2,z})$ anhand des Zustandsraummodells generiert. Diese $Z_1 * N * Q = 88.400$ Berechnungen, für $z = \{1, \dots, Z = 50\}$, $n = \{1, \dots, N = 442\}$ und $q = \{1, \dots, Q = 4\}$, wurden auf dem bwHPC UniCluster mit 4 parallelen Workspaces, jeweils 16 Kernen (Singlenode) und 4 GB Arbeitsspeicher über 2 Tage berechnet. Durch Zusammenführung der zugehörigen Werte entstanden $[m_{i,n}, y_{q,n}, p_{1,z}, p_{2,z}, \hat{y}_{q,n,z}]$ -Tupel, die zur Anpassung der Kalibriermodelle $g_{Kal,q,n}$ unter Anwendung verschiedener Modellansätze und wiederholter, $k = 10$ -fach Kreuzvalidierung herangezogen wurden (siehe Formel 5-5). Dabei wurde für jede Datensatzausprägung n im MATLAB© „Regression Learner“ ein Kalibriermodelle $g_{Kal,q,n}$ im jeweiligen Betriebspunkt q angepasst (MathWorks 2020). Im Folgenden werden ausschließlich die Ergebnisse für Betriebspunkt $q = 1$ exemplarisch dargestellt. Die Ergebnisse für alle weiteren Betriebspunkte $q = \{2, 3, 4\}$ sind im Anhang A10, Abbildung 0-57 ff. dargestellt.

Der Modellansatz der Gaußschen Prozessmodelle wiesen den geringsten Prognosefehler $\varepsilon_{q,n}$ auf und wurden daher zu Anpassung der Kalibriermodelle $g_{Kal,q,n}$ angewandt (siehe Formel 6-7 und Abbildung 0-56). Der mittlere, relative Prognosefehler der Kalibriermodelle $\varepsilon_{1,n}$ bezogen zur Toleranz $TOL_{q=1}$ betrug 3,73 % (siehe Abbildung 6-19).

$$\varepsilon_{q,n}(Z_1) = \frac{\sqrt{\sum_{z_1=1}^{Z_1=50} (y_{q,n} - \check{y}_{q,n}(p_{1,z_1}, p_{2,z_1}))^2}}{TOL_{q=1}} \quad \text{Formel 6-7}$$

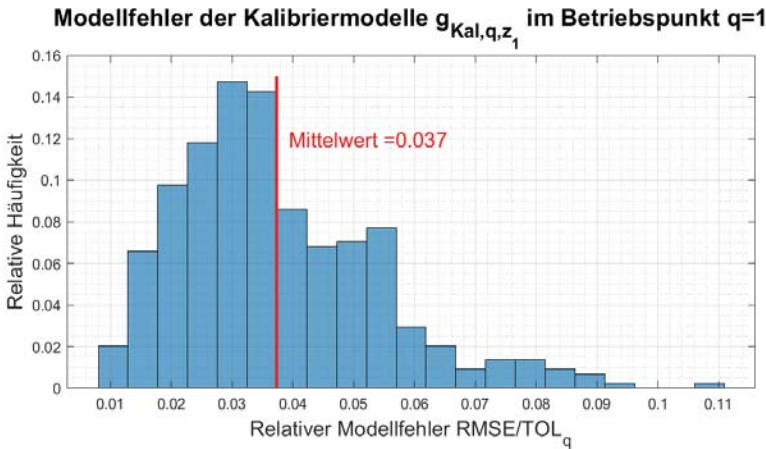


Abbildung 6-19: Histogramm des relativen Modellfehlers RMSE der Kalibriermodelle $g_{Kal,1,z_1}$ bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 1$ (nach A_Quasnitza 2019)

Anschließend wurden $Z_2 = 1.000$ Ausprägungen, mit $z_2 = \{1, \dots, Z_2\}$, als Wertekombinationen $[p_{1,z_2}, p_{2,z_2}]$ innerhalb desselben Intervalls $p_1, p_2 = [0,5; 0,9]$, mittels der Latin Hypercube Sampling Methode „Ihsdesign“ in MATLAB© zufällig kombiniert (MathWorks 2020). Die $N = 442$ experimentellen Datensätze wurden $Z_2 = 1.000$ -fach vervielfältigt und mit den Modellparameter $[p_{1,z_2}, p_{2,z_2}]$ kombiniert. Daraufhin erfolgte die Berechnung der Funktionsprognosen $\check{y}_{q,n}$ anhand der Datensätze $[m_{i,n}, p_{1,z_2}, p_{2,z_2}]$. Die Prognosen erlaubten es den relativen Prognosefehler ε_q bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt q , zu berechnen (siehe Formel 6-8/ Formel 6-7, Tabelle 6-6 und Abbildung 6-20).

$$\varepsilon_{q=1} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N = 442} \sum_{n=1}^{N=442} \sum_{z_2=1}^{Z_2=1.000} \left(y_{q,n} - \check{y}_{q,n}(m_{i,n}, p_{1,z_2}, p_{2,z_2}) \right)^2}}{TOL_{q=1}} \quad \text{Formel 6-8}$$

Tabelle 6-6: Relativer Prognosefehler ε_q (absteigend) bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 1$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2

| Rang | $p_1 = CdBall$ | $p_2 = CdNS$ | ε_q/TOL_q |
|------|----------------|--------------|-----------------------|
| 1 | 0,652 | 0,566 | 0,153 |
| 2 | 0,687 | 0,544 | 0,154 |
| 3 | 0,663 | 0,567 | 0,154 |
| 4 | 0,695 | 0,542 | 0,155 |
| 5 | 0,635 | 0,588 | 0,155 |

| | | | |
|----|-------|-------|-------|
| 6 | 0,702 | 0,541 | 0,156 |
| 7 | 0,629 | 0,583 | 0,156 |
| 8 | 0,628 | 0,587 | 0,156 |
| 9 | 0,662 | 0,550 | 0,157 |
| 10 | 0,699 | 0,532 | 0,157 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

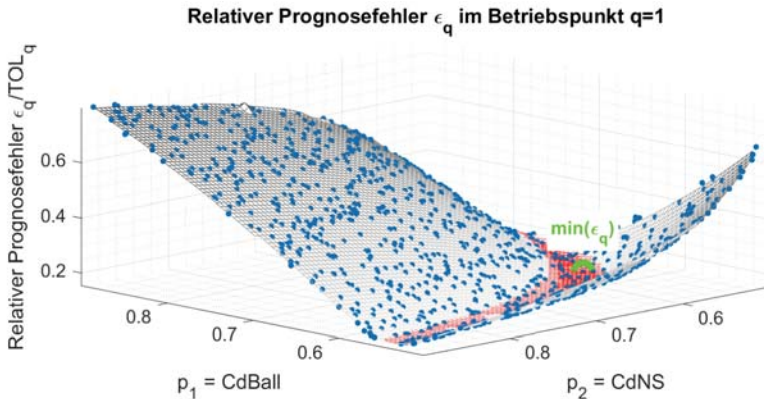


Abbildung 6-20: Relativer Prognosefehler ϵ_q bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 1$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2 (nach A_Quasnitza 2019)

Abschließend wurde die Parameterkombination $[p_1, p_2]$ der kalibrierten Zustandsraummodelle $f_{q,Kal}$ im Betriebspunkt q ermittelt, für die der relative Prognosefehler ϵ_q/TOL_q über alle experimentellen Daten n minimal war (siehe Tabelle 6-7).

Tabelle 6-7: Ermittelte Modellparameter p_1, p_2 unter minimalen Prognosefehlern ϵ_q bezogen zur Toleranz TOL_q des Zustandsraummodells $f_{q,Kal}$ im Betriebspunkt q

| q | $p_1 = CdBall$ | $p_2 = CdNS$ | ϵ_q/TOL_q |
|-----|----------------|--------------|--------------------|
| 1 | 0,566 | 0,652 | 0,153 |
| 2 | 0,505 | 0,800 | 0,543 |
| 3 | 0,501 | 0,631 | 0,295 |
| 4 | 0,890 | 0,737 | 0,113 |

Zur Modellunsicherheitsquantifizierung $u_{\epsilon,q}(f_{q,Kal})$ der kalibrierten Zustandsraummodelle $f_{q,Kal}$ wurden Digitale Zwillinge anhand der Modelle und der $T = 90$ unabhängigen Testdaten, aus $t = \{1, \dots, T\}$ In-Line Messdaten $m_{i,t}$ und zugehöriger EoL-Funktionsmessdaten $y_{q,t}$ hergestellter Piezo-Injektoren, generiert und Funktionsprognosen $\hat{y}_{q,t}$

mit den Modelle $f_{q,Kal}$ simuliert. Die Funktionsprognosen ermöglichten die Berechnung der relative RMSE bezogen zur jeweiligen Toleranz TOL_q (siehe Formel 5-10). Damit wurde ein Vergleich der Modellunsicherheiten $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Kal})$ der kalibrierten Zustandsraummodelle mit den zuvor entwickelten Modellen möglich (siehe Abbildung 6-21).

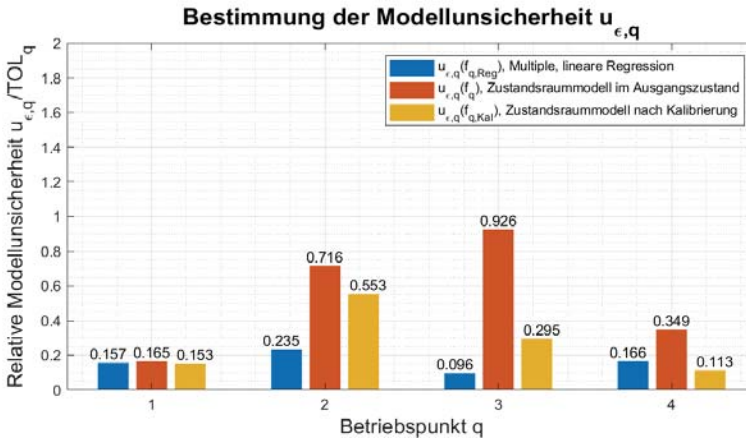


Abbildung 6-21: Bestimmung der relativen Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}$ der Zustandsraummodelle vor bzw. nach Kalibrierung im Betriebspunkt q (nach A_Quasnitza 2019)

Als Ergebnis konnte die Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Kal})$ der kalibrierten Zustandsraummodelle $f_{q,Kal}$, als digitale Mastermodelle der Digitalen Zwillinge, anhand der statistischen Kalibrierungsmethode und den N experimentellen Datensätzen, im Vergleich zur Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(f_q)$ der Zustandsraummodellen f_q im Ausgangszustand in allen Betriebspunkten $q = \{1, 2, 3, 4\}$, um bis zu 68% (für $q = 3$), reduziert werden. Im Vergleich zur Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Reg})$ der multiplen, linearen Regressionen $f_{q,Reg}$ konnte das Niveau der Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Kal})$ für die Betriebspunkte $q = \{1, 4\}$ nach der statistischen Kalibrierung wieder erreicht werden. Für die Betriebspunkte $q = \{2, 3\}$ blieb die Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Kal})$ weiterhin deutlich größer als $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Reg})$. Somit zeigt die Methode im Anwendungsfall ihre Wirksamkeit, um der Anforderung von Prognosen der Produktfunktion unter geringer Unsicherheit nachzukommen. Durch statistische Kalibrierung weiterer Modellparameter p_i im Anwendungsfall konnte die Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(f_{q,Kal})$ jedoch nicht weiter reduziert werden.

6.2.1.4 Interpretierbare, datengetriebene Metamodelle der Piezo-Injektoren

Durch das Ableiten datengetriebener Metamodelle wurde die Echtzeit-nahe Funktionsprognose der Piezo-Injektoren zur späteren Nutzung, in der Produktionssteuerung, nutzbar gemacht. Um entsprechende Modellansätze präzise und robust trainieren zu können, waren ausreichend viele Funktionsprognosen des digitalen Mastermodells notwendig. Zu diesem Zweck wurden jeweils $S = 100.000$ Ausprägungen der Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,s}$, mit $s = \{1, \dots, S\}$, virtueller Piezo-Injektoren, mittels Latin Hypercube Sampling Methode „lhsdesign“ in MATLAB©, erzeugt (MathWorks 2020). Als Eingangsverteilungen zur Erzeugung der virtuellen Piezo-Injektoren dienten empirischen Häufigkeitsverteilungen der jeweiligen Fertigungsprozesse über 18 Monate im Status Quo des Produktionssystems (siehe Tabelle 6-1).

Die $S = 100.000$ virtuellen Ausprägungen wurden mit den kalibrierten Zustandsraummodellen $f_{q,kal}$ verknüpft und $S * Q = 400.000$ Funktionsprognosen $\hat{y}_{q,s}$ der virtuellen Digitalen Zwillinge für die Betriebspunkte $q = \{1, \dots, Q = 4\}$ auf dem bwHPC UniCluster mit 16 parallelen Workspaces, jeweils 16 Kernen (Singlenode) und 4 GB Arbeitsspeicher über 2 Tage berechnet.

Zur Anpassung der datengetriebenen Elastic Net Regressionsmodelle wurde die „Elastic Net Searcher“ Methode (ENSR) in der Statistiksoftware R verwendet (DeWitt et al. 2019). Unter Variation der Hyperparameter λ (Strafterm, Intervall $\lambda = [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$) und α (Verhältnis zwischen Ridge und LASSO Regression, Intervall $\alpha = [0; 1]$) wurden multiple, lineare Regressionsmodelle, mit Wechselwirkungen bis zur zweiten Ordnung, unter Standardisierung der Einflussgrößen, angepasst (siehe Formel 6-9). Multiple Regressionsmodelle höherer Ordnung wurden für diese und die nachfolgenden Methoden ebenfalls angepasst, zeigten jedoch keine besseren Ergebnisse. Auf ihre Darstellung wird daher verzichtet.

$$\hat{\beta}_i = \underset{\beta}{\operatorname{argmin}} \sum_{s=1}^S \|\hat{y}_{q,s} - \beta_0 - m_{i,s}\beta_i - m_{i,s} * m_{j,s}\beta_{i,j}\|^2 \quad \text{Formel 6-9}$$

$$+ \lambda \left(\frac{1 - \alpha}{2} \|\beta\|^2 + \alpha \|\beta\|_1 \right)$$

Für das Aufstellen des $\lambda - \alpha$ -Netzes wurden 300 λ - und 40 α -Werte verwendet. Die α -Werte wurden in äquidistanten Abständen auf das Intervall $\alpha = [0; 1]$ verteilt. Die

Werte für den Strafterm λ wurden nach der ENSR Methode in einer Berechnungsvorschrift für Regularisierungspfade festgelegt: Zunächst wird der kleinste maximale Strafterm $\lambda = \lambda_{max}$ bestimmt, dessen Bestrafung das Regressionsmodell mit dem vorliegenden Datensatz in Abhängigkeit des Verhältnisses α alle Prädiktoren eliminiert ($\beta_i; \beta_{i,j} = 0$) und damit lediglich die Konstante β_0 verbleibt. Anschließend wurde der minimale Strafterm $\lambda = \lambda_{min}$ in Abhängigkeit von λ_{max} berechnet (siehe Formel 6-10). Die Werte des Strafterms λ wurden daraufhin auf das Intervall $\lambda = [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ in absteigend, logarithmischer Unterteilung gewählt. (Friedman et al. 2010)

$$\lambda_{min} = 10^{-4} * \lambda_{max} \quad \text{Formel 6-10}$$

Als Ergebnis wurde ein Regressionsmodell für jede der 12.000 $\lambda - \alpha$ -Kombinationen und jeden Betriebspunkt q , abgeleitet. Diese 48.000 verschiedenen, interpretierbaren Metamodelle \tilde{f}_q ermöglichten damit die geforderte Echtzeit-nahe Funktionsprognose \tilde{y}_q , in Abhängigkeit der In-Line Messdaten $m_{i,j}$ der Produktmerkmale bzw. -eigenschaften $x_{i,j}$. Sie variieren jedoch stark in ihrer Gesamtunsicherheit $U_q(\tilde{f}_q)$.

6.2.1.5 Bewertung der Gesamtunsicherheit und Metamodellauswahl

Zur Auswahl eines geeigneten Metamodells wurde für jedes verfügbare Metamodell eine Bewertung der Gesamtunsicherheit $U_q(\tilde{f}_q)$ als Auswahlkriterium quantifiziert. Das Metamodell unter minimaler Gesamtunsicherheit $\min U_q(\tilde{f}_q)$, im Betriebspunkt q , sollte anschließend identifiziert und zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Produktion eingesetzt werden.

Zur Bestimmung der Modellunsicherheit wurden im ersten Schritt Funktionsprognosen $\tilde{y}_{q,t}$ aller verfügbaren Metamodelle \tilde{f}_q , im jeweiligen Betriebspunkt q , anhand der $T = 90$ unabhängigen Testdaten, aus $t = \{1, \dots, T\}$ In-Line Messdaten $m_{i,t}$, hergestellter Piezo-Injektoren, prognostiziert. Die Standardunsicherheit der Modellunsicherheit $u_{\varepsilon}(\tilde{f}_q)$ wurde anschließend als RMSE der Funktionsprognosen $\tilde{y}_{q,t}$ zu den geprüften EoL-Funktionsmessdaten $y_{q,t}$, bestimmt (siehe Formel 6-11).

$$u_{\varepsilon,q} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T=90} (y_{q,t} - \tilde{y}_{q,t})^2}{T}} \quad \text{Formel 6-11}$$

Die Standardunsicherheit $u_{l,q}(\tilde{f}_q)$ der Metamodelle \tilde{f}_q , bezogen auf die Unsicherheiten der Modelleinflussfaktoren wurde anhand der Monte-Carlo-Methode bestimmt (siehe Kapitel 2.2.4.2). Dazu wurde die „Uncertainty“ Softwarebibliothek des National Institute of Standards and Technology (NIST) in der Statistiksoftware R verwendet (Gasca-Aragon 2018). Als Modellgleichung Y dienen die jeweiligen Metamodelle \tilde{f}_q . Als Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einflussfaktoren $g(X_i)$ wurden Normalverteilungen \mathcal{N} herangezogen. Der Nominalwert n_i der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i diene als Erwartungswert $\mu(X_i)$ und die Varianz der In-Line Messprozesse $u_{MP,i}^2(x_i)$ als Varianz σ^2 der Normalverteilungen (siehe Formel 6-4 und Tabelle 6-2). Für jede Modellgleichung Y erfolgten $M = 10^6$ Zufallsexperimente zur Erzeugung der diskreten Häufigkeitsverteilung $G(Y)$. Aus dieser Gesamtheit wurde anschließend die empirische Standardabweichung $u_{l,q} = u_y$ berechnet.

Anschließend wurde die erweiterte Gesamtunsicherheit $U_q(\tilde{f}_q)$ durch $u_{\varepsilon,q}(\tilde{f}_q)$ und $u_{l,q}(\tilde{f}_q)$, mit dem Erweiterungsfaktor $k_{cov} = 2$, gemäß GUM für jedes verfügbare Metamodel, unter Variation der Hyperparameter λ und α , und jeden Betriebspunkt q berechnet (siehe Formel 6-12 und Abbildung 6-22) (JCGM 2008; Friedman 1997). Im Folgenden werden ausschließlich die Ergebnisse für Betriebspunkt $q = 1$ exemplarisch dargestellt. Die Ergebnisse für alle weiteren Betriebspunkte $q = \{2, 3, 4\}$ sind im Anhang A11, Abbildung 0-63 ff. dargestellt.

$$U_q(\lambda, \alpha) = 2 * \sqrt{u_{\varepsilon,q}(\lambda, \alpha)^2 + u_{l,q}(\lambda, \alpha)^2}$$

Formel 6-12

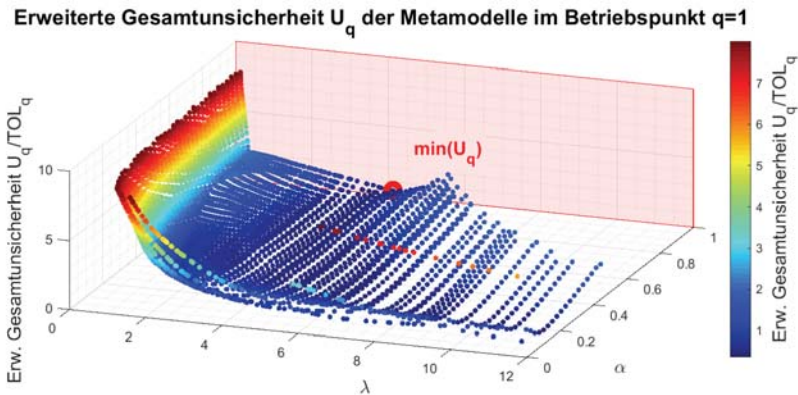


Abbildung 6-22: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 1$, eigene Darstellung

Weitere Analysen ermöglichten es die Standardunsicherheiten $u_{\varepsilon,q}(\tilde{f}_q)$ und $u_{l,q}(\tilde{f}_q)$ der Metamodelle \tilde{f}_q , unter fixiertem Verhältnis α (siehe rote Ebene in Abbildung 6-22), in Abhängigkeit des Strafterms λ detailliert zu untersuchen (siehe Abbildung 6-23). Die Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(\tilde{f}_q)$ der Metamodelle \tilde{f}_q fiel dabei im Intervall $\lambda = [0,1; 4,1]$ mit steigendem Strafterm λ und fortgeschrittener Elimination der Prädiktoren β_i ab. Die Elastic Net Methode schien Überanpassungen der Regressionsmodelle und Kollinearitäten der Einflussfaktoren $\beta_i; \beta_{i,j}$ zu regulieren bzw. zu eliminieren. Darüber hinaus ($\lambda > 4,1$) stieg die Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(\tilde{f}_q)$ wieder an. Relevante Einflussfaktoren und Wechselwirkungen $\beta_i; \beta_{i,j}$ zur präzisen Funktionsprognose \tilde{y}_q wurden ab dieser Schwelle, durch einen immer größeren Strafterm λ , eliminiert. Die Standardunsicherheit $u_{l,q}(\tilde{f}_q)$, bezogen auf die Unsicherheit der Einflussfaktoren, sank stetig mit steigendem Strafterm λ . Die Fehlerfortpflanzung der Eingangsunsicherheit wurde mit geringerer Anzahl an Einflussfaktoren immer weiter reduziert.

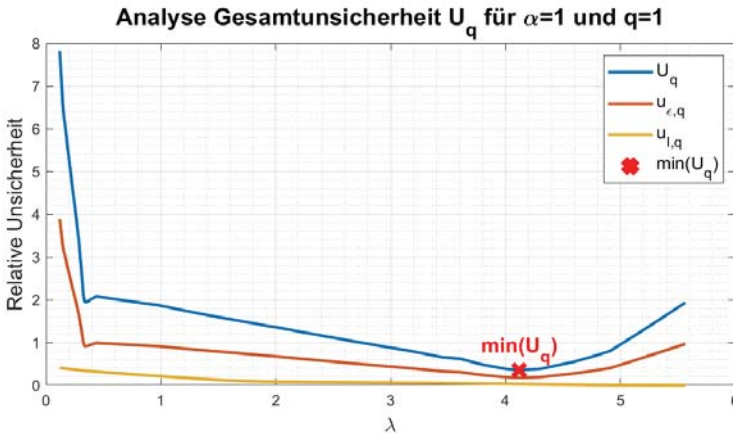


Abbildung 6-23: Analyse der erweiterten Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q mit Bestandteilen $u_{\epsilon,q}$ und $u_{l,q}$, jeweils bezogen zur Toleranz TOL_q für $\alpha = 0,237$ in Abhängigkeit des Strafterms λ im Betriebspunkt $q = 1$, eigene Darstellung

Das Metamodell \tilde{f}_q , unter minimaler Gesamtunsicherheit $\min U_q(\tilde{f}_q)$, wurde als Kompromiss zwischen systematischer Abweichung ($u_{\epsilon,q}(\tilde{f}_q)$) und auftretender Varianz ($u_{l,q}(\tilde{f}_q)$) im betrachteten Raum der Elastic Net-Hyperparameter λ und α , für jeden Betriebspunkt q , identifiziert (siehe Tabelle 6-8) (Friedman 1997). Die erweiterte Gesamtunsicherheit $U_q(\tilde{f}_q)$ der Metamodelle \tilde{f}_q bezogen zur Toleranz TOL_q betrug zwischen 35,6 % (für $q = 1$) und 55,1 % (für $q = 2$).

Tabelle 6-8: Übersicht der Metamodelle \tilde{f}_q unter minimaler erweiterter Gesamtunsicherheit U_q bezogen zur Toleranz TOL_q in den Betriebspunkten q

| q | λ | α | $u_{\epsilon,q}/TOL_q$ | $u_{l,q}/TOL_q$ | U_q/TOL_q |
|-----|-----------|----------|------------------------|-----------------|-------------|
| 1 | 4,114 | 1,000 | 0,028 | 0,176 | 0,356 |
| 2 | 9,940 | 0,000 | 0,171 | 0,216 | 0,551 |
| 3 | 4,379 | 0,000 | 0,149 | 0,173 | 0,456 |
| 4 | 6,122 | 0,026 | 0,136 | 0,234 | 0,541 |

In den Betriebspunkten $q = \{1, 2, 3\}$ konnte dabei die Modellunsicherheit $u_{\epsilon,q}(\tilde{f}_q)$ der Metamodelle \tilde{f}_q gegenüber der Modellunsicherheit $u_{\epsilon,q}(f_{q,Kal})$ der kalibrierten Zustandsraummodelle $f_{q,Kal}$, um bis zu 81,7 % (für $q = 1$), reduziert werden (siehe Abbildung 6-24). Im Betriebspunkten $q = 4$ hingegen steigt die Modellunsicherheit $u_{\epsilon,q}(\tilde{f}_q)$ im Vergleich zu $u_{\epsilon,q}(f_{q,Kal})$ um 20,4 % an. Im Vergleich zur Modellunsicherheit

$u_{\varepsilon,q}(f_{q,Reg})$ der multiplen, linearen Regressionen $f_{q,Reg}$ konnte das Niveau der Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(\tilde{f}_q)$ nahezu in allen Betriebspunkte q nach Ableiten der Metamodelle \tilde{f}_q wieder erreicht, in den Betriebspunkten $q = \{1, 2, 4\}$ sogar verbessert werden. Die Standardunsicherheit $u_{I,q}(\tilde{f}_q)$ der Metamodelle \tilde{f}_q , bezogen auf die Unsicherheiten der Modelleinflussfaktoren, beträgt maximal 23,4 % ($q = 4$) und macht damit, im Unterschied zur Standardunsicherheit $u_{I,q}(f_{q,Reg})$ der multiplen, linearen Regressionen $f_{q,Reg}$, nur einen Bruchteil der jeweiligen Toleranz TOL_q aus (siehe Tabelle 6-5 und Tabelle 6-8).

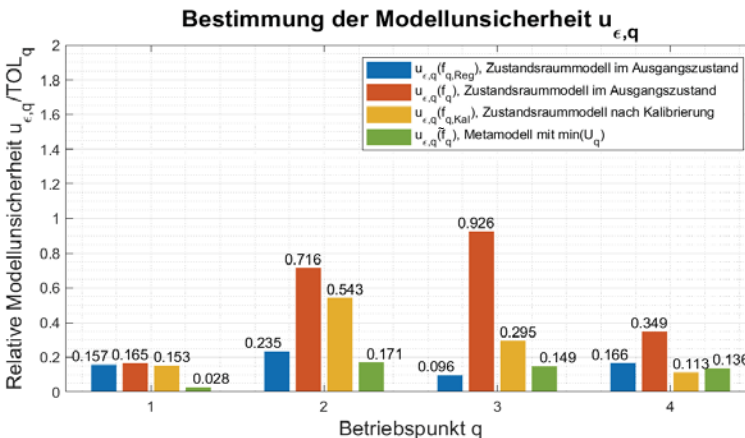


Abbildung 6-24: Vergleich der relativen Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}$ der im Betriebspunkt q , eigene Darstellung

Als Ergebnis der Methode können Echtzeit-nahe Funktionsprognosen \tilde{y}_q anhand der Metamodelle \tilde{f}_q des DT im Betriebspunkt q unter minimaler Gesamtunsicherheit $U_q(\tilde{f}_q)$, in Abhängigkeit der In-Line-Messdaten $m_{i,j}$ der Produktmerkmale und -eigenschaften $x_{i,j}$, präzise (geringe Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(\tilde{f}_q)$) und robust (geringe Unsicherheit durch Modelleinflussfaktoren $u_{I,q}(\tilde{f}_q)$) abgeleitet werden. Die erweiterte Gesamtunsicherheit $U_q(\tilde{f}_q)$ der Metamodelle \tilde{f}_q stellt im Vergleich zur erweiterten Unsicherheit $U_q(f_{q,Reg})$ der multiplen, linearen Regressionsmodelle $f_{q,Reg,q}$ einen erheblichen Fortschritt dar.

Im Sinne eines Messprozesses sind die Prognosen der Metamodelle \tilde{f}_q (im weiteren Funktionsmodelle genannt) nicht geeignet, da ihre Messprozesseignung $Q_{MP}(\tilde{f}_q)$ die kritische Messprozesseignung $Q_{MP,Max} = 30\%$ in den jeweiligen Betriebspunkten q überschreitet (vgl. Kapitel 2.2.4.3). Im Anwendungsfall werden die Funktionsmodelle \tilde{f}_q jedoch nicht als Prüfprozess eingesetzt (keine Substitution der EoL-Funktionsprüfungen), sondern dienen als quantitative Gestalt-Funktion Zusammenhänge, die in Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung integriert werden.

6.2.2 Funktionsorientierte Qualitätsregelung

Zur Entwicklung alternativer Qualitätsregelungen erfolgte zunächst die Identifikation geeigneter Regelungsgrößen und funktionskritischer Störgrößen (siehe Kapitel 6.2.2.1). Auf deren Basis wurden nachgelagert Strategiealternativen zur Qualitätsregelungen entwickelt (siehe Kapitel 6.2.2.2).

6.2.2.1 Identifikation geeigneter Regelungs- und funktionskritischer Störgrößen

Die **Identifikation geeigneter Regelungsgrößen** erfolgte anhand einer Nutzwertanalyse unter Berücksichtigung der Sensitivität einzelner Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_i ; Prozessfähigkeit und Prozessregelbarkeit zugehöriger Fertigungsprozesse; sowie Lagerbestand und Wiederbeschaffungsdauer der jeweiligen Bauteile. Zur Bewertung der Sensitivität der Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_i auf die Produktfunktion y_q wurden die Sensitivitätskoeffizienten c_i der gewonnenen Funktionsmodelle \tilde{f}_q aller Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_i , am jeweiligen Nominalwert n_i der Einflussgrößen, über alle Betriebspunkte q berechnet (siehe Formel 6-13).

$$c_i = \sum_{q=1}^{Q=4} \frac{\partial \tilde{f}_q}{\partial x_i} \quad \text{Formel 6-13}$$

Zur Gewichtung der Sensitivität wurden die Sensitivitätskoeffizienten c_i mit der zulässigen Variation $OSG_{x_i} - USG_{x_i}$ der Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_i multipliziert und der Betrag auf das Intervall $[0, 10]$ normiert. (siehe Formel 6-14 und Tabelle 6-9).

$$\text{Sensitivität}(x_i) = \frac{|c_i * (OSG_{x_i} - USG_{x_i})|}{\max(\text{Sensitivität})} * 10 \quad \text{Formel 6-14}$$

Die Bewertung der Prozessfähigkeit der Fertigungsprozesse, zur Herstellung der Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_i erfolgte anhand der ermittelten Prozessfähigkeiten $C_p(x_i)$ im bestehenden Produktionssystem (siehe Tabelle 6-1). Diese wurden ebenfalls auf das Intervall $[0; C_p = 0; 10; C_p \geq 2]$ normiert. Die weiteren Bewertungskriterien Prozessregelbarkeit, Lagerbestand, Wiederbeschaffungszeit für die Einflussgrößen sowie die jeweilige Gewichtung der Bewertungskriterien wurden in einem Expertenworkshop festgelegt (siehe Tabelle 6-9).

Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_i mit steigender Sensitivität auf die Produktfunktion y_q , einer höheren Prozessfähigkeit, einer einfacheren Prozessregelbarkeit, einem höheren Lagerbestand und einer geringeren Wiederbeschaffungsdauer wirken sich positiv auf die Eignung als Regelgröße aus und erhalten jeweils eine steigende Bewertung. Zur Bestimmung des Nutzwertes „Eignung als Regelungsgröße“ erfolgte die Berechnung der Summenprodukte, aus Bewertungen mit ihrem jeweiligen Gewicht, über die Zeilen eines Produktmerkmals bzw. -eigenschaft x_i . Ein steigender Nutzwert entspricht einer steigenden Eignung als Regelgröße (siehe Tabelle 6-9).

Das Produktmerkmal x_3 konnte durch die Nutzwertanalyse als am meisten geeignete Regelgröße identifiziert werden. Das Bauteil **E** ist mit dem Quotienten der Produktmerkmale x_3/x_4 bereits Paarungsbauteil der selektiven Montage ($M(x_3/x_4) = 2$) im Status Quo (siehe Kapitel 6.1.2). Somit deckten sich die Erkenntnisse aus bisheriger Planung der Produktionssysteme und der Nutzwertanalyse zur Identifikation geeigneter Regelungsgrößen. Die Ausprägung der Produktmerkmale und -eigenschaften x_5, x_6, x_7, x_8 und x_9 , die dem Bauteil **E** ebenfalls inne lagen, wurden jedoch bei der Klassifizierung und Selektion bisher nicht berücksichtigt. Sie waren in der bisherigen Strategie als Störgrößen anzusehen. Durch das entwickelte Funktionsmodell ergab sich der Ansatz Fertigungsabweichungen anderer Bauteile, unter funktionsorientierter Berücksichtigung aller Produktmerkmale und -eigenschaften des Bauteils **E**, wirksamer zu kompensieren. Die Produktmerkmale x_5, x_6, x_7, x_8 und x_9 könnten als Regelungsgrößen eingesetzt werden.

Tabelle 6-9: Identifikation geeigneter Regelgrößen im Anwendungsfall der funktionsorientierten Qualitätsregelung mittels Nutzwertanalyse, extern gefertigte Merkmale blau

| Bauteil/ Bau- gruppe | Produkt- merkmal | Sensi- tivität | Pro- zessfä- higkeit | Prozess- regelbar- keit | Lager- bestand | Wieder- beschaf- fung | Nutz- wert | |
|----------------------------|---------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------|-----|
| Gewicht | | 5 | 3 | 5 | 2 | 2 | | |
| ← Montager Reihenfolge | | x_1 | 10 | 5 | 3 | 4 | 3 | 94 |
| | C | x_2 | 2 | 10 | 8 | 10 | 3 | 106 |
| | E | x_3 | 4 | 7 | 10 | 6 | 8 | 119 |
| | | x_4 | 1 | 6 | 6 | 6 | 8 | 81 |
| | | x_5 | 1 | 7 | 6 | 6 | 8 | 84 |
| | | x_6 | 2 | 10 | 2 | 6 | 8 | 78 |
| | | x_7 | 1 | 10 | 2 | 6 | 8 | 73 |
| | | x_8 | 3 | 10 | 2 | 6 | 8 | 83 |
| | | x_9 | 3 | 3 | 5 | 6 | 1 | 63 |
| | F | x_{10} | 0 | 6 | 6 | 6 | 6 | 72 |
| | | x_{11} | 1 | 4 | 8 | 6 | 6 | 81 |
| | | x_{12} | 1 | 8 | 2 | 6 | 6 | 63 |
| | G | x_{13} | 10 | 6 | 1 | 4 | 1 | 83 |
| | | x_{14} | 1 | 10 | 1 | 4 | 1 | 50 |
| | | x_{15} | 1 | 10 | 1 | 4 | 1 | 50 |
| | | x_{16} | 1 | 6 | 1 | 4 | 1 | 38 |

Die **Identifikation funktionskritischer Störgrößen** erfolgte ebenfalls anhand einer Nutzwertanalyse unter Berücksichtigung der Sensitivität; sowie auftretender Fertigungsabweichungen einzelner Produktmerkmale und -eigenschaften x_i (siehe Tabelle 6-10). Die Bewertung der Fertigungsabweichungen erfolgte als umgekehrt proportionale Bewertungsmetrik zur Prozessfähigkeit und auf das Intervall $[0, 10]$ normiert (siehe Formel 6-15).

$$\text{Fertigungsabweichung}(x_i) = \frac{1}{C_p * \max(\text{Sensitivität})} * 10 \quad \text{Formel 6-15}$$

Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_i mit steigender Sensitivität der Produktfunktion y_q und stärker auftretenden Fertigungsabweichungen wirken sich negativ auf die Produktqualität aus und besitzen mit steigendem Nutzwert eine höhere Kritikalität. Zur Bestimmung des Nutzwertes „funktionskritische Störgröße“ erfolgte ebenfalls die Berechnung der Summenprodukte, aus Bewertungen und Gewicht, über die Zeilen eines

Produktmerkmals bzw. -eigenschaft x_i . Ein steigender Nutzwert entspricht einer steigenden Kritikalität als Störgröße auf die Produktfunktion y_q (siehe Tabelle 6-10).

Tabelle 6-10: Identifikation der Störgrößen im Anwendungsfall der funktionsorientierten Qualitätsregelung mittels Nutzwertanalyse, extern gefertigte Merkmale blau

| | Bauteil/ Baugruppe | Produkt- merkmal | Sensitivität | Fertigungsab- weichungen | Nutzwert |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------------------|----------|
| | Gewicht | | 5 | 5 | |
| Montagereihenfolge ↓ | | x_1 | 10 | 6 | 80 |
| | C | x_2 | 2 | 1 | 15 |
| | E | x_3 | 4 | 4 | 40 |
| | | x_4 | 1 | 5 | 30 |
| | | x_5 | 1 | 4 | 25 |
| | | x_6 | 2 | 2 | 20 |
| | | x_7 | 1 | 2 | 15 |
| | | x_8 | 3 | 1 | 20 |
| | | x_9 | 3 | 10 | 65 |
| | F | x_{10} | 0 | 5 | 25 |
| | | x_{11} | 1 | 8 | 45 |
| | | x_{12} | 1 | 3 | 20 |
| | G | x_{13} | 10 | 5 | 75 |
| | | x_{14} | 1 | 2 | 15 |
| | | x_{15} | 1 | 2 | 15 |
| | | x_{16} | 1 | 4 | 25 |

Das Produktmerkmal x_1 (Bauteil **B**) konnte als Störgröße mit der größten Kritikalität, gefolgt von der Produkteigenschaft x_{13} (Baugruppe **G**) identifiziert werden. Es ist zu beachten, dass Baugruppe **G** zudem noch durch die Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_{14} , x_{15} und x_{16} ausgeprägt ist, die lediglich eine geringe Kritikalität gegenüber der Produktfunktion y_q vorweisen.

Als Ergebnis konnten das Produktmerkmal x_3 , gemeinsam mit den weiteren Produktmerkmalen bzw. -eigenschaften x_4 bis x_9 des Bauteils **E**, als am besten geeignete Regelungsgröße und das Produktmerkmal x_1 (Bauteil **B**) sowie die Produkteigenschaft x_{13} (Bauteil **G**) als Störgrößen mit der höchsten Funktionskritikalität identifiziert werden. Beide Ergebnisse nehmen Einfluss in die nachfolgende Konzeptionierung alternativer, funktionsorientierter Strategien zur Qualitätsregelung.

6.2.2.2 Entwicklung alternativer, funktionsorientierter Regelungskonzepte

Ziel der funktionsorientierten Strategien zur Qualitätsregelung war es, die Fertigungsabweichungen der Störgrößen x_1 und x_{13} , unter Berücksichtigung der vorliegenden

Prozessmodelle (siehe Tabelle 6-1) möglichst optimal zu kompensieren. Die Fertigungsprozesse beider Produktmerkmale bzw. -eigenschaften wurden dem Prozessmodell C2 zugeordnet und waren damit nicht beherrscht. Zudem waren die Fertigungsprozesse zur Herstellung des Produktmerkmals x_1 ($C_p(x_1) = 1,05$) bzw. der Produkteigenschaft x_{13} ($C_p(x_{13}) = 1,17$) in der vorliegenden Kurzzeitanalyse fähigkeitskritisch. In Expertenworkshops wurden daher alternative Qualitätsregelungskonzepte fokussiert, die eine Kombination von Fertigungs- (Kompensation von Fertigungsprozessen unter Lageänderung) und Montagestrategien (Kompensation fähigkeitskritischer Fertigungsprozesse) beinhalten. Als geeignete Regelungsgröße wurden die Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_3 bis x_9 des Bauteils **E** in Betracht gezogen. Eine individuelle Fertigung ($F(x_3) = 3$) kam dabei nicht in Frage, da die Voraussetzungen ($C_p > 2$) der Regelungsgrößen nicht erfüllt waren (siehe Formel 5-26 in Kapitel 5.2.2).

Durch den Einsatz von Kreativitätstechniken wurden funktionsorientierte Strategiekonzepte innerhalb des Frameworks möglicher Strategien zur Qualitätsregelung entwickelt (siehe Abbildung 6-25):

- Strategiealternative $\theta = S1^*$ beinhaltet eine funktionsorientierte Kompensation des Produktmerkmals x_1 (Bauteil **B**) durch selektive Montage ($M(x_3, \dots, x_9) = 2$) des Bauteils **E**, das anhand der Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_3 bis x_9 funktionsorientiert klassifiziert wurde.
- Strategiealternative $\theta = S2^*$ beinhaltet Strategiealternative $\theta = S1^*$ ergänzt um eine statistisch, adaptive Fertigung des Bauteils **E** ($F(x_3) = 2$). Es erfolgt eine Nennwertadaption im Fertigungsprozess des Produktmerkmals x_3 anhand der Funktionsmodelle \tilde{f}_q , der Qualitätsdaten m_1 und der MLE-Methode.
- Strategiealternative $\theta = S3^*$ beinhaltet eine funktionsorientierte Kompensation des Produktmerkmals x_1 (Bauteil **B**) durch individuelle Montage ($M(x_3, \dots, x_9) = 3$) des Bauteils **E**, dessen Produktmerkmal x_3 statistisch adaptiv gefertigt wurde (siehe $\theta = S2^*$).
- Strategiealternative $\theta = S4^*$ beinhaltet eine funktionsorientierte Kompensation des Produktmerkmals x_{13} (Baugruppe **G**) durch die selektive Montage ($M(x_3, \dots, x_9) = 2$) des Bauteils **E**, das anhand der Produktmerkmale und -eigenschaften x_3 bis x_9 in Funktionsklassen klassifiziert wurde.

- Strategiealternative $\theta = S5^*$ beinhaltet Strategiealternative $\theta = S4^*$ ergänzt um eine statistisch, adaptive Fertigung des Bauteils **E** ($F(x_3) = 2$), durch Nennwertanpassung des Produktmerkmals x_3 anhand der \tilde{f}_q , der Qualitätsdaten m_{13} und des MLE-Methode.

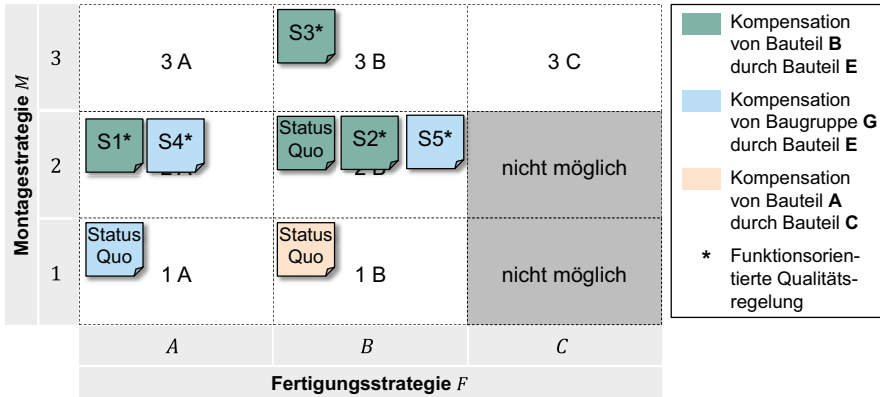


Abbildung 6-25: Entwickelte Strategiealternativen zur funktionsorientierten Qualitätsregelung des Anwendungsfall der Piezo-Injektor Herstellung, eigene Darstellung

Eine Eingrenzung der entwickelten Strategiealternativen erfolgte durch Abschätzung des zu erwartenden Implementierungsaufwandes sowie zu erwartende technischen und wirtschaftlichen Potentiale in der Expertenrunde (siehe Abbildung 6-26):

- Strategiealternative $\theta = S1^*$ besitzt einen niedrigen Aufwand, da keine Änderung der Prozessabfolge und lediglich sehr geringe Änderung (Steuerungsprogrammierung, Datenbereitstellung) der Produktionsanlagen notwendig sind. Das technisch und wirtschaftliche Potential wurde als niedrig eingestuft.
- Strategiealternative $\theta = S2^*$ besitzt einen mittleren Aufwand, da eine funktionsorientierte Fertigungssteuerung implementiert werden muss, welche die bisherige Signal-Kanbansteuerung an festen Fertigungsnennwerten ersetzt. Das technische und wirtschaftliche Potential wird als mittel bis hoch eingestuft.
- Strategiealternative $\theta = S3^*$ besitzt einen mittleren bis hohen Aufwand, da Änderungen des Logistikkonzeptes und der Steuerung notwendig sind. Die Prozessabfolge erfordert keine Änderung, das Potential wurde als hoch eingestuft.

- Strategiealternative $\theta = S4^*$ besitzt ebenfalls einen mittleren bis hohen Aufwand, der durch Änderung der Prozessabfolge begründet ist. Die Zuordnung einer Ausprägung der Baugruppe **G** zur Hauptbaugruppe erfolgt bislang als letzter Schritt. Das technische und wirtschaftliche Potential wurde als mittel eingestuft.
- Strategiealternative $\theta = S5^*$ besitzt einen hohen Aufwand zur Implementierung, der neben den Aufwänden von $S4^*$ in der horizontalen Datenbereitstellung und Chargenverfolgung extern gefertigter Baugruppe **G** begründet sind. Wären diese Voraussetzungen gegeben, würde das Potential als hoch eingestuft.

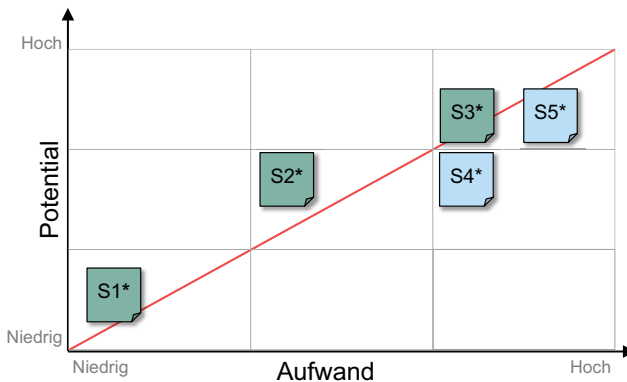


Abbildung 6-26: Portfolioanalyse der entwickelten Strategiealternativen zur Abschätzung des Aufwandes und des Potentials der Strategiealternativen, eigene Darstellung

Anhand der Portfolioanalyse erfolgte eine Selektion der Strategiealternativen $\theta = S1^*$, $S2^*$, $S3^*$ zur weiteren Konkretisierung. Diese wurden anhand der Standardbausteine zur Qualitätsregelung modelliert und durch ereignisorientierten Materialflusssimulationen analysiert und bewertet.

6.2.2.3 Strategiealternative $\theta = S1^*$: Funktionsorientierte selektive Montage des Bauteils **E** zur Kompensation von x_1

Das Konzept der Strategiealternative $\theta = S1^*$ ordnet sich für das Bauteil **E** in die Montagestrategie ($M(x_3, \dots, x_9) = 2$) ein. Dabei kann auf die gleichen Montageanlagen des Status Quo, ohne Modifikation der Maschinen selbst, zurückgegriffen werden. Der Unterschied der Strategiealternative $\theta = S1^*$ zum Status Quo liegt in der Berücksichtigung

aller Produktmerkmale und -eigenschaften x_3 bis x_9 des Bauteils **E**, als Regelungsgröße in der Klassifizierung und Selektion. Diese wird durch den Einsatz der zuvor gewonnen Funktionsmodelle \tilde{f}_q möglich (siehe Abbildung 6-27).

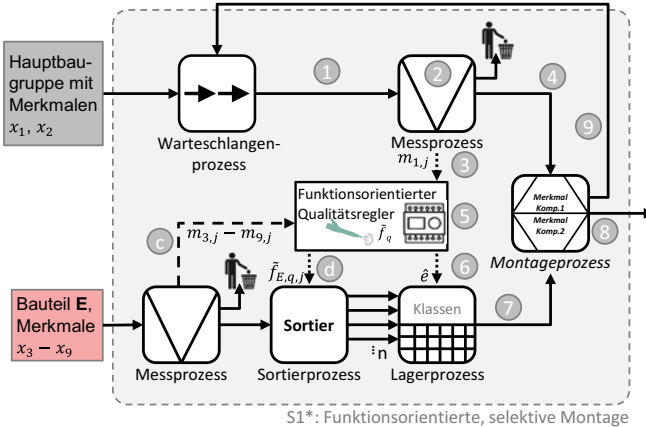


Abbildung 6-27: Visualisierung der Strategiealternative $\theta = S1^*$ zur funktionsorientierten, selektiven Montage ($M = 2$) im Anwendungsfall der Piezo-Injektor Produktion, eigene Darstellung

Zur funktionsorientierten Klassifikation des Bauteils **E** wird dessen Funktionsbeitrag $\tilde{f}_{E,j}$ anhand der In-Line Messdaten $m_{3,j}$ bis $m_{9,j}$ in der Ausprägung j und der Sensitivitätskoeffizienten $c_{q,i}$ im Betriebspunkt q berechnet (Schritt c in Abbildung 6-27) (siehe Formel 6-16). Die Sensitivitätskoeffizienten $c_{q,i}$ werden dabei durch Taylorreihenentwicklung 1. Ordnung der Funktionsmodelle \tilde{f}_q im Betriebspunkt q und der statistischen Erwartungswerte $\mu(x_j)$ aller weiteren Produktmerkmale und -eigenschaften x_j angenähert (siehe Formel 6-17). Anhand der normierten Funktionsbeiträge $\tilde{f}_{E,j}$ über alle Betriebspunkte $Q = 4$ erfolgt die Klassifizierung der Ausprägungen j des Bauteils **E** in Funktionsklassen $e = \{1, 2\}$ (Schritt d in Abbildung 6-27) (siehe Formel 6-18).

$$\tilde{f}_{E,q,j} = \sum_{i=3}^{I=9} (m_{i,j} * c_{q,i}) \tag{Formel 6-16}$$

$$c_{q,i} = \frac{\partial \tilde{f}_q(\mu(x_j))}{\partial x_i}, \quad \text{mit } i, j = \{1, \dots, 16\} \text{ und } j \neq i \quad \text{Formel 6-17}$$

$$\tilde{f}_{E,j} = \sum_{q=1}^{Q=4} \left(\frac{\tilde{f}_{E,q,j}}{TOL_q} \right) \quad \text{Formel 6-18}$$

Die Zuordnung der Funktionsklasse $\hat{e} = \{1,2\}$ des Bauteils **E** zur Kompensation der Fertigungsabweichungen der Produkteigenschaft x_1 (Bauteil **B**) erfolgt gemäß dem Status Quo (siehe Kapitel 6.1.2). Die Wahl der Funktionsklassengrenze $OSG_{\hat{e}=1}$ erfolgt dabei bedarfsorientiert in Abhängigkeit auftretender Produkteigenschaften x_1 in den Klassen $c(x_1) = 1$ bzw. $c(x_1) = 2$.

Zur Implementierung der Strategiealternative $\theta = S1^*$ wurden gegenüber dem Status Quo zusätzliche +0,2% der Fertigungsgemeinkosten K_{FGM} , durch Programmieraufwände der Maschinensteuerungen, angenommen. Hingegen wurde angenommen, dass -0,5% der Fertigungseinzelkosten K_{FEK} entfallen, da manuelle Steuerungsaufwände zur bedarfsorientierten Fertigung des Bauteils **E**, per Signal-Kanban, entfallen.

6.2.2.4 Strategiealternative $\theta = S2^*$: Funktionsorientierte adaptive Fertigung und selektive Montage des Bauteils **E** zur Kompensation von x_1

Die Strategiealternative $\theta = S2^*$ beinhaltet die funktionsorientierte, selektive Montage ($M(x_3, \dots, x_9) = 2$) des Bauteils **E** zur Kompensation des Produktmerkmals x_1 (Bauteil **B**) (siehe Strategiealternative $S1^*$). Ergänzt wird diese durch eine funktionsorientierte, statistisch adaptive Fertigung ($F(x_3) = 2$) des Bauteils **E**. Die statistisch, adaptive Fertigung erfolgt durch Nennwertanpassung des Produktmerkmals x_3 (siehe Abbildung 6-28). Die Berechnung optimaler Nennwerte zur bedarfsorientierten Herstellung des Produktmerkmals x_3 erfolgt anhand der Funktionsmodelle \tilde{f}_q , der In-Line Messdaten $m_{i,j}$ und der MLE-Methode. Im Qualitätsregler wird zunächst eine Stichprobe J der In-Line Messdaten $m_{i,j}$ alle Produktmerkmale aus den Qualitätsdaten ausgelesen (Schritt a in Abbildung 6-28).

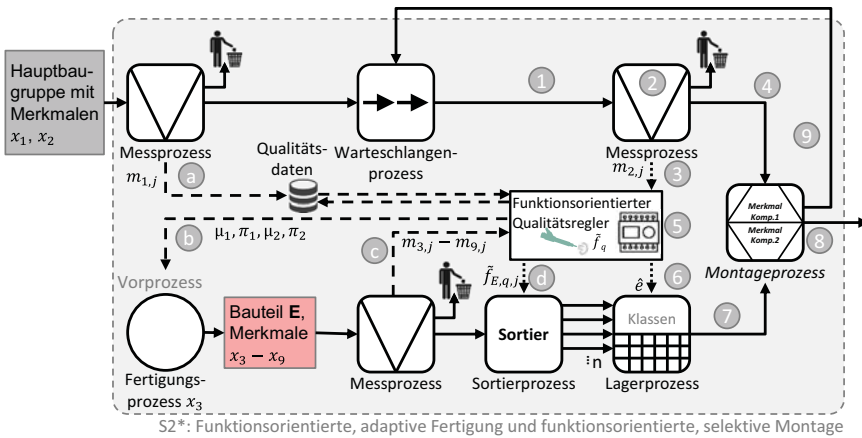


Abbildung 6-28: Visualisierung der Strategiealternative $\theta = S2^*$ zur funktionsorientierten, adaptiven Fertigung ($F = 2$) und funktionsorientierten, selektiven Montage ($M = 2$) im Anwendungsfall der Piezo-Injektor Produktion, eigene Darstellung

Anschließend erfolgt die Berechnung statistisch optimaler Funktions-Sollbeiträge $\tilde{f}_{E,q,k,Soll}$ des Paarungsbauteils E, als konkrete Verteilung $k = \{1; \dots; K\}$, anhand der Sensitivitätskoeffizienten $c_{q,i}$ im jeweiligen Betriebspunkt q , der In-Line Messdaten $m_{1,k}$ und $m_{2,k}$, der Prozessmittelwerte μ_{10} bis μ_{16} und der Modellkonstant $\beta_{0,q}$ des Funktionsmodells \tilde{f}_q (Schritt 5 in Abbildung 6-28) (siehe Formel 6-19). Daraufhin werden statistisch optimale Produktmerkmale $x_{3,q,j}$ des Paarungsbauteils E, als konkreten Verteilung $k = \{1; \dots; K\}$, anhand der Sensitivitätskoeffizienten $c_{q,i}$ und der In-Line Messdaten $m_{4,j}$ bis $m_{9,j}$ im jeweiligen Betriebspunkt q berechnet (siehe Formel 6-20). Diese werden über die Betriebspunkte $q = \{1; 2; 3; 4\}$ gemittelt (siehe Formel 6-21) und anschließend eine statistische Verteilung, mittels MLE-Methode angenähert (siehe Formel 6-22).

$$\tilde{f}_{E,q,k,Soll} = y_{q,nom} - \left(\beta_{0,q} + \sum_{i=1}^{I=2} m_{i,k} * c_{q,i} + \sum_{i=10}^{I=16} \mu_i * c_{q,i} \right) \tag{Formel 6-19}$$

$$x_{3,q,k} = - \frac{1}{c_{q,3}} * \left(\tilde{f}_{E,q,k,Soll} - \sum_{i=4}^{I=9} m_{i,k} * c_{q,i} \right), \tag{Formel 6-20}$$

$$x_{3,k} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^{Q=4} x_{3,q,k} \quad \text{Formel 6-21}$$

$$L(\vartheta) = \prod_{k=1}^K P(x_{3,k} | \vartheta) \quad \text{Formel 6-22}$$

Schließlich können die statistisch optimalen Fertigungsnennwerte μ_i mit den zugehörigen Gewichten π_i durch Lösen eines gewichteten Gauß-Mischverteilungsproblems numerisch geschätzt werden (siehe Formel 5-23 in Kapitel 5.2.2). Die ermittelten Fertigungsnennwerte μ_i mit den zugehörigen Gewichten π_i werden per Informationstransfer an den vorgelagerten Fertigungsprozess zur Herstellung des Produktmerkmals x_3 übermittelt (Schritt b in Abbildung 6-28).

Zur Implementierung der Strategiealternative $\theta = S2^*$ wurden gegenüber dem Status Quo zusätzliche +0,3% der Fertigungsgemeinkosten K_{FGM} , durch Programmieraufwände der Maschinensteuerungen, angenommen. Dem gegenüber wurde eine Reduktion um -0,5% der Fertigungseinzelkosten K_{FEK} angenommen, da manuelle Steuerungsaufwände zur bedarfsgerechten Herstellung von Bauteil **E** entfallen. Ebenfalls wurde eine Reduktion um -3,2% der Lagerkosten K_L im Status Quo angenommen, da sich der Bestand des Bauteils **E**, durch die bedarfsorientierte Fertigung, reduziert.

6.2.2.5 Strategiealternative $\theta = S3^*$: Funktionsorientierte adaptive Fertigung und individuelle Montage des Bauteils **E** zur Kompensation von x_1

Die Strategiealternative $\theta = S3^*$ beinhaltet die funktionsorientierte, statistisch adaptive Fertigung ($F(x_3) = 2$) des Bauteils **E** (siehe Teilaspekt der Strategiealternative $\theta = S2^*$). Der Unterschied zur Strategiealternative $\theta = S2^*$ liegt in der individuellen Montage ($M(x_3, \dots, x_9) = 3$) des Bauteils **E** zur Kompensation des Produktmerkmals x_1 (Bauteil **B**). Diese wird durch die bauteilindividuelle Rückverfolgung und Funktionsprognose \tilde{y}_q in Abhängigkeit der In-Line Messdaten $m_{1,j}$ bis $m_{9,j}$ (Hauptbaugruppe und Bauteil **E**) möglich (siehe Abbildung 6-29).

Zur individuellen Auswahl eines Paarungsbauteils **E** erfolgt im Qualitätsregler (5) eine Funktionsprognose $\tilde{y}_q(j)$ für alle verfügbaren Ausprägung j des Paarungsbauteils **E** anhand der Funktionsmodelle \tilde{f}_q , der In-Line Messdaten $m_{1,o}$, $m_{1,o}$ der Hauptbaugruppenausprägung o , der In-Line Messdaten $m_{3,j}$ bis $m_{9,j}$ des Paarungsbauteils **E** und der Erwartungswerte $\mu(x_{10})$ bis $\mu(x_{16})$ in den Betriebspunkten q (siehe Formel 6-23). Die

Ausprägung \hat{j} , des Paarungsbauteils **E**, mit dem minimalen, absoluten Residuum über alle Betriebspunkte Q zwischen der Funktionsprognose $\tilde{y}_q(j)$ und der nominalen Funktion $y_{q,nom}$, wird als Paarungsbauteil der Hauptbaugruppe, in der Ausprägung o , ausgewählt (siehe Formel 6-24).

$$\tilde{y}_q(j) = \tilde{y}_q(m_{1,o}, m_{2,o}, m_{3,j} - m_{9,j}, \mu(x_{10}) - \mu(x_{16})) \tag{Formel 6-23}$$

$$p_{Best-Fit} = \min_j \left(\sum_{q=1}^{Q=4} \frac{|y_{q,nom} - \tilde{y}_q(j)|}{TOL_q} \right) \tag{Formel 6-24}$$

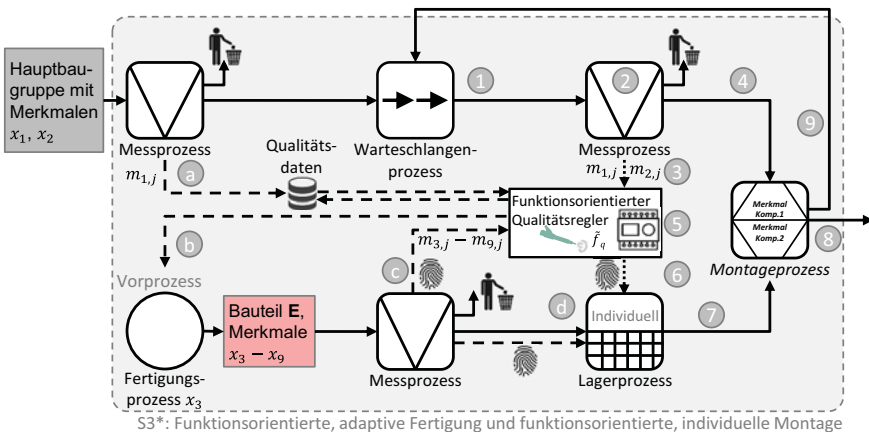


Abbildung 6-29: Visualisierung der Strategiealternative $\theta = S3^*$ zur funktionsorientierten, adaptiven Fertigung ($F = 2$) und funktionsorientierten, individuelle Montage ($M = 3$) im Anwendungsfall der Piezo-Injektor Produktion, eigene Darstellung

Zur Implementierung der Strategiealternative $\theta = S3^*$ wäre ein Umbau bestehender Montageanlagen zur individuellen Bauteilerauswahl und -montage notwendig, zu dessen zusätzliche +2,1% der Maschinenkosten K_{MA} des Status Quo angenommen wurden. Es wurde hingegen eine Reduktion um -0,8% der Fertigungseinzelkosten K_{FEK} angenommen, da die klassenweise Bereitstellung von Paarungsbauteilen **E** an der Montagelinie und die manuelle Steuerungsaufwände zur bedarfsgerechten Herstellung von Bauteil **E** entfallen. Ebenfalls wurde eine Reduktion um -4,8% der Lagerkosten K_L im Status Quo angenommen, da sich der Bestand des Bauteils **E**, durch die bedarfsorientierte Fertigung und den Entfall von Paarungsklassen, reduziert.

6.2.3 Technische und wirtschaftliche Bewertung

Das Produktionssystem im Status Quo und die entwickelten Strategiealternativen wurde anhand der standardisierten Prozessbausteine und der Standardbausteine zur Qualitätsregelung modelliert (siehe Abbildung 6-4, Abbildung 6-27, Abbildung 6-28 und Abbildung 6-29). Die Modelle wurden in eine ereignisgesteuerte Materialflusssimulation implementiert, um die Auswirkungen funktionsorientierter Qualitätsregelungen zu untersuchen und anhand der Simulationsergebnisse eine Bewertung unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten abzuleiten.

6.2.3.1 Implementierung der ereignisorientierten Materialflusssimulation

Als Simulationsumgebung für die ereignisorientierte Materialflusssimulation wurde die Softwareumgebung MATLAB © SimEvents gewählt. Die zur ereignisgesteuerten Simulation notwendigen Bestandteile einer Simulationsuhr, eines Ereigniskalenders, einer Zeitführungsroutine sind in SimEvents bzw. MATLAB © Simulink bereits implementiert. Die Hauptroutine und die Erzeugung stochastischer Zufallszahlen der ereignisgesteuerten Materialflusssimulation werden im zugehörigen MATLAB © Workspace programmiert bzw. durchgeführt. Die SimEvents Bibliothek bietet einen Grundstock an ereignisgesteuerten Funktionsblöcken, u.a. zur Erzeugung („Entity Generator“) bzw. zur Löschung („Entity Terminator“) der Entitäten innerhalb des Materialflusses. Weiterhin kann eine Entität aus zwei eingehenden Entitäten gebildet und deren Attribute kombinieren („Composite Entity Creator“) werden. Entitäten können in Warteschlangenprozessen gelagert („FIFO Queue“), Chargen aus eingehenden Entitäten gebildet („Entity Batch Creator“) und diese wieder aufgelöst werden („Entity Batch Splitter“). Entitäten können anhand ihrer Attribute klassifiziert („Entity Output Switch“) und Ereignisroutinen bei Ankunft/vor Austritt/nach Austritt einer Entität durchgeführt werden („Server“) (siehe Anhang A12, Abbildung 0-73 in). Ereignisroutinen im Serverbaustein werden dabei selbst programmiert. Außerdem bietet SimEvents, als integrierter Teil der MATLAB © Simulink-Erweiterung, die Möglichkeit zur Modellierung hybrider Systeme (zeitkontinuierlich und zeitdiskret) anhand des Funktionsblocks „Simulink Function“. Damit wird beispielsweise die Simulation Digitaler Zwillinge einzelner Injektoren während der Materialflusssimulation möglich (siehe Kapitel 6.2.1.2). Durch Kombination der SimEvents Funktionsblöcke und programmierten Ereignisroutinen im Funktionsblock „Server“ wurden die Prozessbausteine und die Standardbausteine zur Qualitätsregelung in SimE-

vents implementiert (siehe Anhang A12, Abbildung 0-74 ff.). Sie erlauben es ein Simulationsmodell des Produktionssystems im Status Quo in der Simulationsumgebung SimEvents nachzubilden (siehe Abbildung 6-30). Jedem Bauteilblock (Blöcke unter Bauteilbezeichnung in Abbildung 6-30) ist dabei ein detailliertes Subnetzwerkwerk zur Erzeugung, Fertigung, Messung und Klassifizierung der Bauteile hinterlegt.

Die Prozessbausteine und die Standardbausteine zur Qualitätsregelung des Modells im Status Quo wurden gemäß der produktionstechnischen Kennzahlen des Produktionssystems parametrisiert (siehe Kapitel 6.1.2). Den Prozessbausteinen zur Erzeugung der Produktmerkmale bzw. -eigenschaften x_1 bis x_{16} wurden die statistischen Verteilungen (Normal-, Betaverteilung, etc.) ggf. mit Zeitreihenmodell, zur Nachbildung der zufälligen Mittelwertabweichungen, hinterlegt (siehe Tabelle 6-1). Die Ermittlung eines Messergebnisses $m_{i,j}$ in den Messprozessen erfolgte mittels einmaliger Durchführung eines Monte-Carlo Zufallsexperiments, wobei dem Experiment die statistische Normalverteilung $\mathcal{N}(\mu = x_{i,j}, \sigma^2 = u^2(x_i))$ mit Varianz σ^2 als quadrierte Standardabweichung $u^2(x_i)$ der Untersuchungen der Messprozesseignung entsprach (siehe Tabelle 6-2). Allen Prozessbausteinen des ereignisgesteuerten Simulationsmodells wurden die, in der Wertstromanalyse aufgenommenen, spezifischen Kennzahlen, wie beispielsweise Prozessdauer, Prozesskosten, (Lager-) Kapazität, Anzahl Klassen, Wiederbeschaffungsdauer, Toleranzspezifikationen etc. hinterlegt.

Die Verifikation des Simulationsmodells erfolgte durch visuelle Beobachtung der einzelnen Montagestationen bezogen auf Entitäten im Produktionssystem und die Syntaxüberprüfung des Compilers bezogen auf die sprachorientierte Logik. Im Rahmen der Validierung wurde geprüft, ob das ereignisorientierte Simulationsmodell das Verhalten des realen Systems ausreichend genau widerspiegelte. Die Plausibilität des Simulationsmodells wurde durch Analysen charakteristischer Eingangsgrößen getestet. Beispielhafte Gegenüberstellung relativer Häufigkeiten des Simulationsmodells mit denen des realen Produktionssystems zeigten nahezu identische Ergebnisse hergestellter Produktmerkmale bzw. -eigenschaften $x_{i,j}$. Weitere Simulationsläufe dienten dazu, die Prozesszeiten abzugleichen oder den auftretenden Ausschussanteil mit dem realen Fehlervorkommen abzugleichen. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass der mathematische Anspruch und die Logik des ereignisorientierten Simulationsmodells im Status Quo das reale Produktionssystem ausreichend genau darstellt (siehe Kapitel 6.2.3.2)

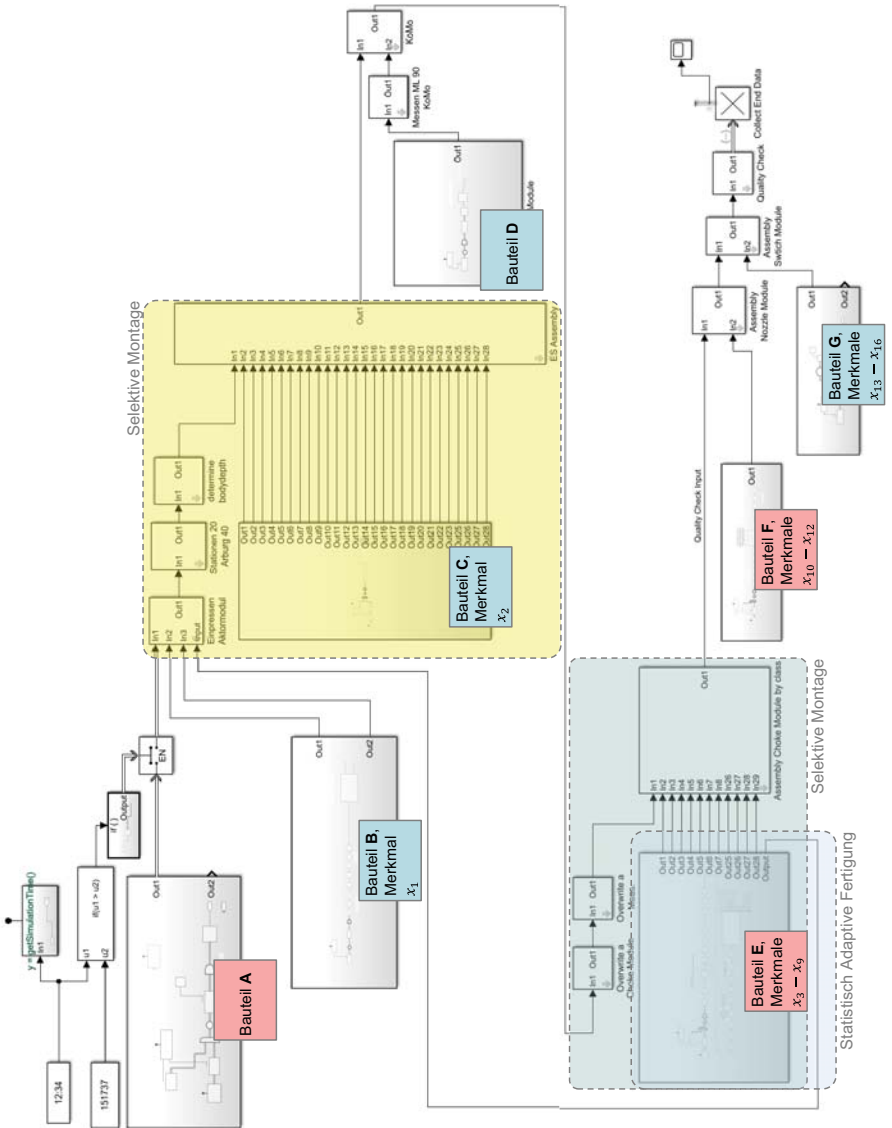


Abbildung 6-30: Gesamtmodell der Montagelinie im Status Quo in der Simulationsumgebung MATLAB © SimEvents, eigene Darstellung

Die entwickelten Strategiealternativen wurden als alternative Simulationsmodelle des Produktionssystems unter denselben Eingangsparametern des Status Quo modelliert. Dabei wurden für die jeweiligen Strategiealternativen der Fertigungs- (Subnetzwerk Bauteil **E** in Abbildung 6-30) bzw./und der Montageprozess (siehe grüner Kasten in Abbildung 6-30) für das Bauteil **E** durch alternative Standardbausteine zur funktionsorientierten Qualitätsregelung substituiert. Den Standardbausteinen wurden die Funktionsmodelle \tilde{f}_q unter minimaler Gesamtunsicherheit $\min(U_q)$ (siehe Kapitel 6.2.1.5) und die Logik zur funktionsorientierten Qualitätsregelung (siehe Kapitel 6.2.2.3ff.) hinterlegt.

6.2.3.2 Ereignisorientierte Simulationsexperimente der Piezo-Injektor Produktion

Zur Erzeugung der Simulationsergebnisse in der Materialflusssimulation im Status Quo sowie den entwickelten Strategiealternativen θ wurden jeweils $n_{repl} = 3$ Replikationen über eine Simulationsdauer von $T_{sim} = 14$ Tagen, unter Variation der Zufallszahlen, simuliert. Innerhalb dieser Simulationsdauer wurden jeweils $P_G = 40.750$ Piezo-Injektoren produziert. Die EoL-Funktionsprüfung der hergestellten Piezo-Injektoren wurde durch Funktionsprognose \tilde{y}_q , anhand des Elastic Net Regressionsmodelle \tilde{f}_q , unter minimaler Modellunsicherheit $\min(u_{\varepsilon,q}(\tilde{f}_q))$ und den realen Produktmerkmalen und -eigenschaften $x_{i,j}$ (ohne Messunsicherheit), modelliert (siehe Abbildung 6-31 für $\theta = S2^*$; Anhang A13, Abbildung 0-82 für $\theta = S1^*$ und Anhang A14, Abbildung 0-84 für $\theta = S3^*$). In der grafischen Auswertung konnte für die Strategiealternativen $\theta = \{S2^*, S3^*\}$ eine deutliche Streuungsreduzierung in der Produktfunktion $y_{q=1}$ der hergestellten Produkte gegenüber des Status Quo beobachtet werden. Die auftretenden Produktfunktionen $y_{q=2} - y_{q=4}$ blieben für die Strategiealternativen $\theta = \{S2^*, S3^*\}$ nahezu konstanten. Die Verteilung erzielter Produktfunktionen $y_{q=1} - y_{q=4}$ für die Strategiealternative $\theta = S1^*$ blieben gegenüber des Status Quo nahezu unverändert.

6.2.3.3 Gesamtheitliche Strategiebewertung im Anwendungsfall

Zur technischen Bewertung der Strategiealternativen $\theta = S1^*, S2^*, S3^*$ erfolgte eine Konformitätsprüfung durch Abgleich der prognostizierten Produktfunktionen \tilde{y}_q mit den jeweiligen Funktionsspezifikationen USG_q und OSG_q (siehe Formel 6-25). Anhand der Anzahl konformer Produkte $P_{ic}(\theta)$ konnte der First Pass Yield $FPY(\theta)$ für die jeweilige Strategiealternative θ berechnet werden (siehe Formel 6-26). Die Varianz s^2 der prog-

nostizierten Produktfunktionen \tilde{y}_q lieferten eine weitere Aussage zur Änderung der Produktqualität hergestellter Produkte in der jeweiligen Strategiealternative θ (siehe Formel 6-27).

$$P_{io}(\theta) = \sum_{j=1}^{P_G} \begin{cases} 1, & \text{wenn } USG_q \leq \tilde{y}_q \leq OSG_q \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Formel 6-25}$$

$$FPY(\theta) = \frac{P_{io}}{P_G} * 100\% \quad \text{Formel 6-26}$$

$$s^2(\tilde{y}_q, \theta) = \frac{1}{P_G} \sum_{j=1}^{P_G} (\tilde{y}_{q,j} - \bar{\tilde{y}}_{q,j})^2 \quad \text{Formel 6-27}$$

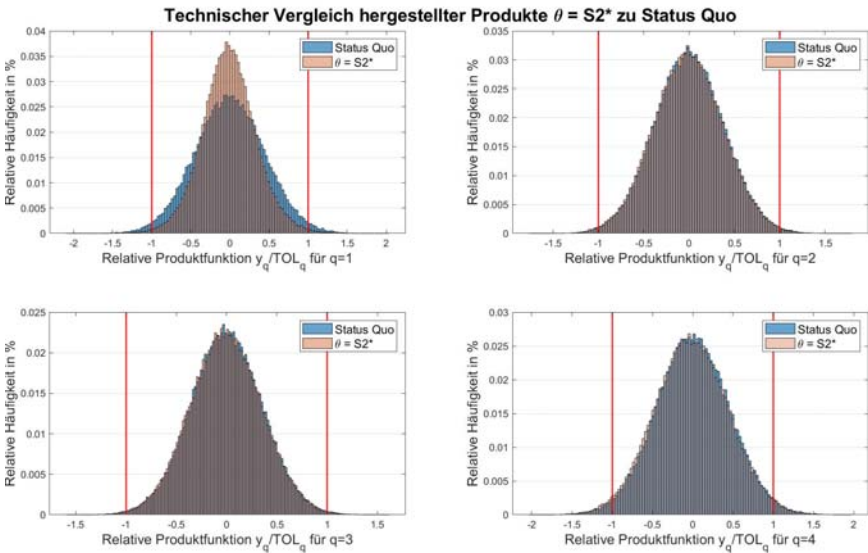


Abbildung 6-31: Histogramme der Produktfunktionen \tilde{y}_q als Ergebnis der ereignisgesteuerten Materialflusssimulation für $\theta = S2^*$ und Status Quo, eigene Darstellung

Zur wirtschaftlichen Bewertung der Strategiealternativen θ erfolgte die Berechnung der Gesamtkosten je konformem Produkt $K_G(\theta)$. Dazu wurden die Herstellkosten $K_{HK}(\theta)$ der Strategiealternative θ , als Summe aller Kostenbestandteile hergestellter Produkte

$P_G(\theta)$ auf die Anzahl konformer Produkte $P_{iO}(\theta)$ umgelegt (siehe Formel 6-28 und Abbildung 6-32 für $\theta = S2^*$ und Anhang A13, Abbildung 0-83 für $\theta = S1^*$ und Anhang A14, Abbildung 0-85 für $\theta = S3^*$).

$$K_G(\theta) = \frac{K_{HK}(\theta)}{P_{iO}} \tag{Formel 6-28}$$

$$= \frac{\sum_{j=1}^{P_G} K_{MAT,j}(\theta) + K_{MGK,j}(\theta) + K_{FEK,j}(\theta) + K_{MA,j}(\theta) + K_{FGM,j}(\theta) + K_{L,j}(\theta)}{P_{iO}(\theta)}$$

Zusätzlich erfolgte die Berechnung der Taguchi Strafkosten $K_{Taguchi}(\theta)/P_{iO}$ je konformem Produkt zur wirtschaftlichen Analyse der Qualitätsabweichungen im Hinblick auf die statistische Gesamtheit der konformen Produkte P_{iO} (siehe Formel 6-29).

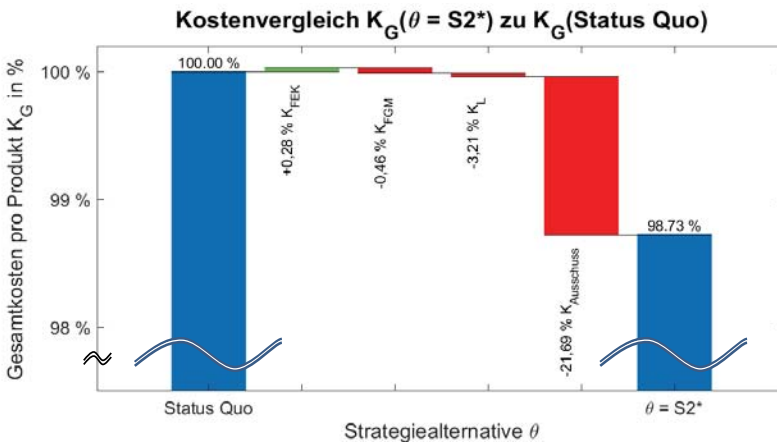


Abbildung 6-32: Kostenvergleich Gesamtkosten konformer Produkte K_G der Strategiealternative $\theta = S2^*$ zu denen des Status Quo, eigene Darstellung

$$\frac{K_{Taguchi}(\theta)}{P_{iO}} = \frac{1}{P_{iO}} \left\{ K_G(\theta) * \left(\frac{2 * (\tilde{y}_{q,j}(\theta) - y_{q,nom})}{TOL_q} \right)^2, \text{ f\u00fcr } |\tilde{y}_{q,j}(\theta) - y_{q,nom}| \leq \frac{TOL_q}{2} \right. \tag{Formel 6-29}$$

$$\left. , \text{sonst} \right.$$

Zur statistischen Absicherung wurden jeweils die Mittelwerte $\overline{K_G(\theta)}$ aller technischen und wirtschaftlichen Bewertungskenngr\u00f6\u00dfen sowie das zugeh\u00f6rige Konfidenzintervall $G_{1/2}$ durch Sch\u00e4tzung einer t-Verteilung mit Konfidenzniveau $\gamma = 0,95$, Stichprobenumfang $n_{repl} = 3$ und Standardabweichung σ_θ der Replikationen berechnet (siehe Formel

5-49 und Formel 5-50 am Beispiel der Gesamtkosten je konformem Produkt K_G). Abschließend wurden das Kosten-Leistungs-Verhältnis CPR für die Strategiealternativen θ berechnet (siehe Formel 6-30).

$$CPR(\theta) = \frac{\overline{K_G}(\text{StatusQuo})}{\overline{K_G}(\theta)} \quad \text{Formel 6-30}$$

Zur gesamtheitlichen Bewertung wurden die technischen und wirtschaftlichen Kennzahlen der Strategiealternativen θ im Anwendungsfall gegenübergestellt (siehe Tabelle 6-11).

Tabelle 6-11: Gegenüberstellung der technischen und wirtschaftlichen Kennzahlen je Strategiealternative θ nach ereignisorientierter Materialflusssimulation über $T_{Sim} = 14$ Tage für $n_{repl} = 3$, $\gamma = 0,95$

| | <i>Status Quo</i> | $\theta = S1^*$ | $\theta = S2^*$ | $\theta = S3^*$ |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Berechnung | geometrisch | funktionsorientiert | funktionsorientiert | funktionsorientiert |
| Klassenanzahl | $C = 2$ | $E = 2$ | $E = 2$ | – |
| $P_G(\theta) [-]$ | 4.750 ± 0 | 40.750 ± 0 | 40.750 ± 0 | 40.750 ± 0 |
| $P_{io}(\theta) [-]$ | 38,745 $\pm 104,65$ | 38,803 $\pm 180,22$ | 39,249 $\pm 79,02$ | 39,538 $\pm 118,65$ |
| $FPY(\theta)$ in % | 95,08 $\pm 0,2568$ | 95,22 $\pm 0,4423$ | 96,32 $\pm 0,1939$ | 97,03 $\pm 0,2912$ |
| $s^2(\tilde{f}_{q=1}, \theta)$ in mm^3 | 0,197 $\pm 0,0039$ | 0,1895 $\pm 0,0045$ | 0,1218 $\pm 0,0012$ | 0,0858 $\pm 0,0034$ |
| $s^2(\tilde{f}_{q=2}, \theta)$ in mm^3 | 0,146 $\pm 0,0002$ | 0,1470 $\pm 0,0016$ | 0,1471 $\pm 0,0010$ | 0,1464 $\pm 0,0016$ |
| $s^2(\tilde{f}_{q=3}, \theta)$ in mm^3 | 0,124 $\pm 0,0004$ | 0,1278 $\pm 0,0018$ | 0,1254 $\pm 0,0010$ | 0,1250 $\pm 0,0017$ |
| $s^2(\tilde{f}_{q=4}, \theta)$ in mm^3 | 0,203 $\pm 0,0001$ | 0,2030 $\pm 0,0033$ | 0,2090 $\pm 0,0009$ | 0,2084 $\pm 0,0035$ |
| $\overline{K_G}(\theta)$ in % | 100,00 $\pm 0,2745$ | 99,89 $\pm 0,4638$ | 98,73 $\pm 0,2108$ | 98,21 $\pm 0,3040$ |
| $CPR(\theta) [-]$ | 1 | 1,0019 | 1,0129 | 1,0197 |
| $K_{Taguchi}(\theta)$ in % | 14,627 | 14,634 | 13,440 | 12,752 |

Als Ergebnis konnten die funktionsorientierten Strategiealternativen $\theta = \{S2^*, S3^*\}$ eine signifikante Steigerung um +1,24 % bzw. +1,95 % des First Pass Yield $FPY(\theta)$ gegenüber dem Status Quo erzielen (siehe Abbildung 6-33). Der First Pass Yield $FPY(\theta =$

S3*) überstieg 97 % der hergestellten Piezo-Injektoren P_G . Die FPY -Änderung der Strategiealternativen $\theta = S1^*$ hingegen war statistisch nicht signifikant (siehe Abbildung 6-33).

Bemerkenswert ist, dass die Anwendung aller funktionsorientierten Strategiealternativen θ ausschließlich eine Varianzreduktion der Produktfunktion $\tilde{y}_{q=1}$ erreichte. Die Varianz der Produktfunktion \tilde{y}_q in den anderen Betriebspunkten $q = \{2, 3, 4\}$ bleibt hingegen nahezu konstant. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Sensitivitätskoeffizienten aller Produktmerkmale und -eigenschaften x_1 (Bauteil **B**) und x_3 bis x_9 (Bauteil **E**) auf die jeweiligen Betriebspunkte q ergab, dass ihr Einfluss auf die Produktfunktion \tilde{y}_q in den verschiedenen Betriebspunkten q sich unterschiedlich stark auswirkt (siehe Tabelle 6-12 und Formel 6-14). Einige Produktmerkmale und -eigenschaften x_i haben einen wechselnden Einfluss auf die Produktfunktion \tilde{y}_q , in den unterschiedlichen Betriebspunkte q . Die Selektion einer optimalen Funktionsklasse \hat{e} bzw. eines optimalen Paarungsbauteils $\hat{p}_{BestFit}$ scheint für Betriebspunkt $q = 1$, aufgrund der großen und konstant positiven Sensitivitäten, in den Selektionsmechanismen zu dominieren.

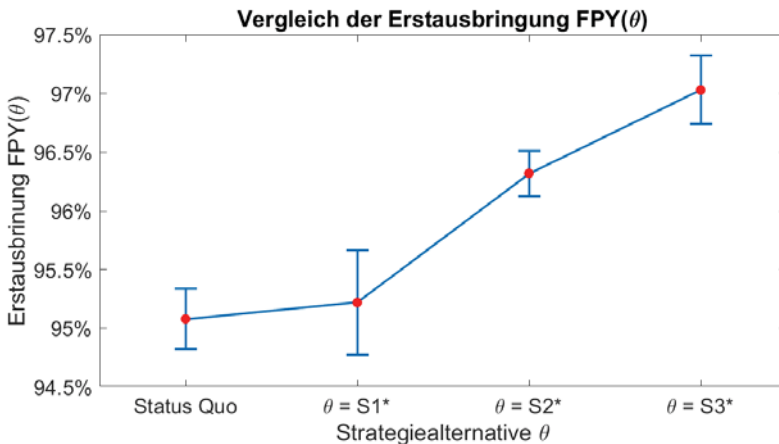


Abbildung 6-33: Erzielter First Pass Yield FPY der Strategiealternativen θ mit zugehörigen Konfidenzintervallen für $\gamma = 0,95$, eigene Darstellung

Tabelle 6-12: Sensitivität der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i des Bauteils B und E auf die Produktfunktion \tilde{y}_q

| | B | E | | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | x_1 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 |
| $q = 1$ | 10 | 2 | 2 | 2 | 6 | 10 | 8 | 7 |
| $q = 2$ | 10 | 2 | -1 | -1 | 1 | -2 | -1 | 1 |
| $q = 3$ | 10 | 3 | -2 | -2 | -1 | -5 | -5 | 0 |
| $q = 4$ | 7 | 6 | -2 | -2 | -2 | -7 | -10 | 0 |

Die Gesamtkosten je konformem Produkt K_G reduzieren sich für die funktionsorientierten Strategiealternativen $\theta = \{S2^*, S3^*\}$ um 1,27 % bzw. 1,79 % gegenüber den Gesamtkosten K_G des Status Quo ($K_G(\text{Status Quo}) = 100\%$). Die Gesamtkostenreduktion wird maßgeblich durch eine Reduktion um 21,69 % ($\theta = S2^*$) bzw. 34,17 % ($\theta = S3^*$) der Ausschusskosten $K_{\text{Ausschuss}}$ erreicht. Die Änderung der Gesamtkosten je konformem Produkt K_G ist für Strategiealternativen $\theta = S1^*$ ebenfalls statistisch nicht signifikant.

Das Kosten-Leistungs-Verhältnis $CPR(\theta = \{S1^*, S2^*, S3^*\}) > 1$ impliziert für alle Strategiealternativen θ eine positive Bilanz. Die entwickelten Strategiealternativen $\theta = \{S2^*, S3^*\}$ zur funktionsorientierten Qualitätsregelung sind im Anwendungsfall der Piezo-Injektoren anhand der technischen und wirtschaftlichen Bewertung zur Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen in der Serienproduktion geeignet.

Auf Basis der erreichten Qualitätsverbesserung unter vergleichsweise geringem Implementierungsaufwand wurde die Implementierung der funktionsorientierte Strategiealternative $\theta = S2^*$ in die Serienproduktion der Piezo-Injektoren, durch den Industriepartner entschieden. Die maschinentechnischen Voraussetzungen zur Implementierung diese Strategiealternative waren in der Serienproduktion bereits gegeben. Zur Umsetzung waren lediglich die Programmierung der Funktionsmodelle in der jeweiligen Maschinensteuerung, sowie die Datenverknüpfung zu den Qualitätsdaten, zur statistisch adaptiven Fertigung, erforderlich.

Nach deren Einführung konnte bereits über sechs Monate eine Steigerung um 1,5 % des First Pass Yield $FPY_{\text{Real}}(\theta = S2^*)$ erreicht werden. Die Steigerung der Gutausbringung liefert den Nachweis des technischen und wirtschaftlichen Mehrwerts. Durch Implementierung der funktionsorientierten Qualitätsregelung kann beim Industriepartner mit verhältnismäßig geringem Aufwand eine Einsparung von 1,53 % der Gesamtkosten

K_G erreicht werden. Die realisierte Reduktion der Gesamtkosten fällt jedoch beim Industriepartner niedriger aus. Der Grund ist eine Wiedergewinnung der Bauteile non-konformer Piezo-Injektoren, die im realen Produktionssystem aufgrund des bisher hohen Ausschussanteils zuvor durchgeführt wurde. Diese ist nicht Teil des modellierten Produktionssystems.

7 Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel erfolgt der Abgleich der in Kapitel 3.1 gestellten Anforderungen mit dem erarbeiteten Lösungsansatz zur funktionsorientierten Qualitätsregelung mittels Integration von Funktionsmodellen. Ebenfalls wird geprüft ob die Nachweise der forschungsleitenden Hypothesen (siehe Kapitel 1.3) erbracht wurden. Abschließend erfolgt ein Ausblick weiterführender Forschungsfragen innerhalb des Themenfeldes.

7.1 Diskussion

Der Lösungsansatz der vorliegenden Arbeit entwickelt eine Methode zur Planung und Bewertung von Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelungen in der Serienproduktion hochpräziser Produkte. Diesbezüglich konnte eine **Modellierung bestehender Qualitätsregelungen in der Produktion** entwickelt werden, welche die Strategien der **konventionellen Montage**, der **selektiven bzw. individuellen Montage** und auch der **statistisch adaptiven bzw. individuellen Fertigung** integriert betrachtet. Die Modellierung stellt die Grundlage der generalisierten Planungsmethode verschiedener Strategien und Strategiekombinationen dar.

Zur Berücksichtigung produktbezogener Funktionsmodelle in der Qualitätsregelung konnte ein Vorgehen zur **Modellierung von Gestalt-Funktion Zusammenhängen** entwickelt werden. Darin wurden Ansätze der **qualitativen Funktionsmodellierung** eingesetzt, um Funktionsverständnis komplexer Produkte zu erlangen. Ansätze der **quantitativen Funktionsmodellierung** wurden zur Modellierung eines digitalen Mastermodells des Produktes eingesetzt. Das digitale Mastermodell konnte mit verfügbaren In-Line Messdaten der Produktmerkmale und -eigenschaften zu Digitalen Zwillingen verknüpft werden. Die Digitalen Zwillinge ermöglichten die individuelle Prognose der zu erwartenden Funktionserfüllung in Abhängigkeit der Fertigungsabweichung einzelner Produktausprägungen. Angemerkt sei, dass das digitale Mastermodell das pragmatische Merkmal der Funktion „Einspritzung einer exakten Kraftstoffmenge“ umfasst. Dadurch können keine Implikationen in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bzw. der Qualitätsregelung auf weitere Produktfunktionen, wie beispielsweise die Lebensdauer des Produktes, getroffen werden.

Zur **Reduktion der Modellunsicherheit** des digitalen Mastermodells konnte ein statistisches Kalibrierungsverfahren entwickelt werden, um das reale Produktverhalten, an-

hand experimenteller Funktionsprüfungen, möglichst präzise nachzubilden. Im beispielhaften Anwendungsfall der Piezo-Injektoren konnte die Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}(f_q)$ der Zustandsraummodelle f_q durch Anwendung des statistischen Kalibrierungsverfahrens um bis zu 68% gegenüber dem Ausgangszustand reduziert werden.

Um das Produktwissen in der Produktionssteuerung verfügbar zu machen, wurden innerhalb des entwickelten Ansatzes datengetriebene Metamodelle des digitalen Mastermodells abgeleitet. Diese Funktionsmodelle ermöglichten eine **Echtzeit-nahe Prognose** der Produktfunktion, in Abhängigkeit der In-Line Messdaten. Die Modellierung der Funktionsmodelle erfolgt dabei unter Anpassung statistischer Elastic Net-Regressionen. Der Modellansatz der Regressionen stellte ebenso die **Interpretierbarkeit der Funktionsmodelle** sicher, wodurch das Ableiten gezielter Maßnahmen zur Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen im Produktionssystem möglich wurde.

Die methodische Auswahl optimaler Elastic Net-Regressionen \tilde{f}_q erfolgte in dieser Arbeit anhand einer Unsicherheitsquantifizierung, welche die Modellabweichungen und die Unsicherheiten der Modelleinflussfaktoren, gemäß des internationalen Leitfadens Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), berücksichtigte. Das Berücksichtigen der Modellabweichung diente der **Reduktion der Modellunsicherheit** (geringe systematische Abweichung). Das Einbeziehen der Unsicherheit der Modelleinflussfaktoren diente einer **robusten Prognose gegenüber auftretenden Inputunsicherheiten** (geringe Varianz). Die Funktionsmodelle unter minimaler Gesamtunsicherheit U_q wurden schließlich zur Integration in die Qualitätsregelung ausgewählt. Im beispielhaften Anwendungsfall der Piezo-Injektoren konnten durch die entwickelte Methodik Funktionsmodelle \tilde{f}_q zur Echtzeit-nahen und interpretierbaren Funktionsprognose \tilde{y}_q individueller Produktausprägungen, mit einer mittleren, erweiterten Gesamtunsicherheit $U_q(f_q)$ von 47,6 % der Toleranzspezifikation TOL_q , gewonnen werden. Die Messprozesseignung der Funktionsmodelle \tilde{f}_q konnte nicht erreicht werden. Die Modelle dienten dennoch als quantitative Gestalt-Funktion Zusammenhänge zur funktionsorientierten Qualitätsregelung.

In weiteren Schritten der Planungsmethode erfolgte die ganzheitliche Betrachtung möglicher Qualitätsregelungen. Auf Basis der integrierten Modellierung erfolgte die Integration gewonnener Funktionsmodell, welche die Entwicklung funktionsorientierter Strategiealternativen ermöglichten. Die Funktionsmodelle dienten dabei der Identifikation geeigneter Regelungsgrößen und funktionskritischer Störgrößen sowie der Entwicklung

funktionsorientierter Strategiealternativen θ . Zur Auswahl geeigneter Strategiealternativen θ konnte eine ganzheitliche Bewertungsmetrik entwickelt werden. Neben einer technischen Bewertung erfolgte eine **qualitätsbezogene Kostenbewertung**, die wirtschaftliche Aspekte, wie beispielsweise eingesparten Ausschuss oder zusätzliche organisatorische Aufwände, berücksichtigte. Ereignisorientierte Materialflusssimulationen, auf Basis der integrierten Modellierung der Strategien zur Qualitätsregelung, stellten die Grundlage zur Strategiebewertung.

Im Anwendungsfall zur Herstellung der Piezo-Injektoren konnten funktionsorientierte Strategiealternativen θ anhand der Planungsmethode entwickelt werden. Durch Implementierung der drei am vielversprechendsten Strategiealternativen $\theta = \{S1^*, S2^*, S3^*\}$ in Materialflusssimulationen konnten im Vergleich zum Status Quo eine Steigerung des First Pass Yield FPY um bis zu 1,95 % bei gleichzeitiger Reduktion der Gesamtkosten pro konformem Produkt K_G um bis zu 1,79 % erzeugen. Angemerkt sei, dass die technische Bewertung der jeweiligen funktionsorientierten Strategiealternative, unter Verwendung Elastic Net Regressionsmodelle \tilde{f}_q , unter minimaler Gesamtunsicherheit $\min(U_q(\tilde{f}_q))$ und den In-Line Messdaten $m_{i,j}$ der Produktmerkmalen und -eigenschaften, durch virtuelle EoL-Funktionsprüfungen, als Elastic Net Regressionsmodelle \tilde{f}_q , unter minimaler Modellunsicherheit $\min(u_{\varepsilon,q}(\tilde{f}_q))$ und den realen Produktmerkmalen und -eigenschaften $x_{i,j}$ (ohne Messunsicherheit), durchgeführt wurden. Die unabhängige Modellierung der EoL-Funktionsprüfung wäre hier erstrebenswert. Mangels unabhängiger Modelle der EoL-Funktionsprüfung diente der Kurzzeitversuch der Strategiealternative $\theta = S2^*$ in der Serienproduktion des Industriepartners dazu eine Qualitätssteigerung, anhand real hergestellter Piezo-Injektoren und einer real durchgeführten EoL-Funktionsprüfung, unabhängig zu validieren.

Die Strategiealternative $\theta = S2^*$ wurde auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse fest in die Serienproduktion des Industriepartners zur Herstellung von Piezo-Injektoren implementiert. Nach deren Einführung konnte eine Steigerung um 1,5 % des First Pass Yield FPY , bei gleichzeitiger Reduktion der Gesamtkosten K_G , erreicht werden. Die vergleichsweise geringe Reduktion der Gesamtkosten K_G ist durch Wiedergewinnung der Bauteile non-konformer Piezo-Injektoren in der Serienproduktion des Industriepartners

zu begründen. Die Wirksamkeit der entwickelten Methoden konnte durch die Implementierung der funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion des Anwendungsfalls nachgewiesen werden.

Als Gesamtbewertung lässt sich folgern, dass die Forschungshypothesen (siehe Kapitel 1.3) aufgrund der Durchführung der Methode im exemplarischen Anwendungsfall der Piezo-Injektoren sowie der Validierung, durch Implementierung in die Serienproduktion, bestätigt werden konnten. Zur Zielerreichung konnte ein **quantitatives Funktionsmodell** zur Verknüpfung der Fertigungsabweichungen mit der Funktionserfüllung der Produkte unter geringer Gesamtunsicherheit abgeleitet werden. Der Einsatz von Strategiealternativen zur funktionsorientierten Qualitätsregelung erzeugte eine **Steigerung des First Pass Yield**. Die entwickelte Bewertungsmetrik ermöglichte **den Wirtschaftlichkeitsnachweis** der funktionsorientierten Qualitätsregelung.

7.2 Ausblick

Die kontinuierliche Verknüpfung Digitaler Zwillinge ist der Schlüssel zur weiteren Verbesserung der betrieblichen Leistungsfähigkeit und zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit für Hersteller filigraner Präzisionsprodukte. In weiteren Forschungsarbeiten besteht daher der Handlungsbedarf eine generalisierte Datenstruktur zu entwickeln, die den Einsatz Digitaler Zwillinge im gesamten Produktentstehungsprozess ermöglicht. Ein erstes Framework zur Datenstruktur Digitaler Zwillinge im Bereich der Fertigung ist in der ISO-Normenreihe 23247 zurzeit in Ausarbeitung. Aufbauend darauf ist die Anpassung des Produktdesigns, unter Berücksichtigung der Strategien zur Qualitätsregelung, bzw. weitere Maßnahmen der Produktionsplanung, unter Integration von Produktwissen, in exemplarischen Anwendungsfällen zu erforschen. Zukünftig könnte bereits während der Produkt- und Produktionsentwicklung neuer Erzeugnisse die Planung der Qualitätsregelung berücksichtigt werden.

Potential zur methodischen Weiterentwicklung bietet die Integration von Funktionsmodellen auch für Regelkreise innerhalb einer Maschine. Während der Herstellung von Hochpräzisionsbauteilen haben bereits geringer Werkzeugverschleiß und Abweichungen der Prozessparameter einen signifikanten Einfluss auf die Bauteilqualität. So könnten anhand von Daten über den Prozesszustand, beispielsweise aus der Maschinensteuerung und weiteren In-Prozess Sensordaten, eine virtuelle funktionsorientierte Verifikation durchgeführt werden. Weiterführende Ansätze beschäftigen sich mit der Rückführung der gewonnen Erkenntnisse innerhalb einer Maschine zur funktionsorientierte

Anpassung der Werkzeug- und Prozessparametern für einen optimalen Fertigungsprozess der Präzisionsbauteile ohne Ausschuss (Gauder et al. 2019).

Weiterhin besteht großes Potential in der Erforschung werksübergreifenden Strategien der Qualitätsregelung zur Kollaboration in Wertschöpfungsnetzwerken. Forschungsbedarf besteht in der Entwicklung von Strategien zur Qualitätsregelung über Unternehmensgrenzen hinweg sowie der horizontalen Integration von Kunden und Zulieferern. Erste Ansätze verfolgen die Entwicklung geeigneter Anreizsysteme, die einen hohen Reifegrad des Datenaustausches zwischen Unternehmen erstrebenswert machen (Silbernagel et al. 2019). Befähigt werden die Ansätze ebenfalls durch die fortschreitenden Entwicklung zur markierungsfreien, individuellen Bauteilidentifikation, wie beispielsweise dem FingerPrint-Verfahren des Fraunhofer IPM (Fraunhofer IPM 2019).

8 Zusammenfassung

Eine hohe Produktqualität ist in zunehmendem Maße eine zentrale Kundenanforderung und für produzierende Unternehmen ein entscheidender Faktor zur Behauptung der Führungsrolle im globalen Wettbewerb (BMBF 2014). In vielen Fällen steigt die Komplexität der Hochpräzisionsprodukte jedoch erheblich und die Anforderungen erreichen technologische Fertigungsgrenzen (Colledani et al. 2014b). Auftretende Fertigungsabweichungen gefährden dabei die Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen und damit die Sicherstellung der Funktionalität hergestellter Produkte.

Eine Abhilfemaßnahme stellt der Ansatz zur Qualitätsregelung in der Produktion dar (Akansel et al. 2011). Bisherige Ansätze der Qualitätsregelung basieren dabei auf der geometrischen Kompensation direkter Merkmalspaare (Lanza et al. 2015). Besitzen Bauteile bzw. Teilbaugruppen eines Produktes mehrere funktionsrelevante Produktmerkmale, kommen bisherige Strategien der Qualitätsregelung jedoch an ihre Grenzen.

Um das aufgezeigte Defizit zu beheben wurde in der vorliegenden Arbeit eine Methode zur Planung und Bewertung der funktionsorientierten Qualitätsregelung vorgestellt. Die entwickelte Methode erlaubt das Erstellen Digitaler Zwillinge einzelner Produktausprägungen unter minimaler Gesamtunsicherheit, durch Modellierung und Kalibrierung. Quantitative, interpretierbare Funktionsmodelle der Digitalen Zwillinge können anhand statistischer Methoden abgeleitet werden. Sie ermöglichen die Echtzeit-nahe Funktionsprognose, unter minimaler Gesamtunsicherheit. Durch Integration dieser Funktionsmodelle in die Produktionssteuerung werden funktionsorientierte Strategiealternativen entwickelt und in ereignisorientierten Materialflusssimulationen analysiert. Die abschließende Auswahl geeigneter Strategiealternativen erfolgt anhand einer technischen und wirtschaftlichen Bewertung der Simulationsergebnisse.

Die entwickelten Methoden des Planungsansatzes konnte im industriellen Anwendungsfall der Serienproduktion zur Herstellung von Piezo-Injektoren exemplarisch demonstriert werden. Ergebnisse ereignisorientierter Materialflusssimulationen als auch die Implementierung der Strategiealternative zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion des Anwendungspartners zeigen eine gesteigerte First Pass Yield Rate bei gleichzeitiger Reduktion der Gesamtkosten konformer Produkte. Der Einsatz der funktionsorientierten Qualitätssicherung dient damit als Abhilfemaßnahme zur Reduktion auftretender Unsicherheit in Produktspezifikation und Produktion hochpräziser Produkte.

Publikationsliste

Wagner, R.; Haefner, B. & Lanza, G. (2016), „Paarungsstrategien für hochpräzise Produkte. Industrie 4.0 bietet Potentiale bei steigenden Präzisionsanforderungen kostengünstig zu produzieren“, *wt Werkstatttechnik online*, 106(11/12), S. 804–808.

Wagner, R.; Kuhnle, A. & Lanza, G. (2017), „Optimising Matching Strategies for High Precision Products by Functional Models and Machine Learning Algorithms“, *WGP Annals*, 7, S. 231–240.

Haefner, B.; Biehler, M.; Wagner, R. & Lanza, G. (2018), „Meta-Model Based on Artificial Neural Networks for Tooth Root Stress Analysis of Micro-Gears“, *Procedia CIRP*, 75, S. 155–160.

Wagner, R.; Haefner, B. & Lanza, G. (2018), „Function-Oriented Quality Control Strategies for High Precision Products“, *Procedia CIRP*, 75, S. 57–62.

Gauder, D.; Wagner, R.; Götz, J.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Funktionsorientierte Qualitätssicherung von Mikrozahnrädern hinsichtlich des Geräuschverhaltens“, *tm - Technisches Messen*, 86(9), S. 469–477.

Lanza, G.; Haefner, B.; Schild, L.; Berger, D.; Eschner, N.; Wagner, R. & Zaiß, M. (2019), „In-line Measurement Technology and Quality Control“ in *Metrology*, Hrsg. W. Gao, Springer, Singapur, S. 1–35.

Silbernagel, R.; Wagner, R.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Qualitätsregelstrategien in Wertschöpfungsnetzwerken. Strategien zur datenbasierten Qualitätsregelung kollaborativer Wertschöpfungsnetzwerke“, *wt Werkstatttechnik online*, 109(11/12), S. 802–806. [https://www.werkstatttechnik.de/wt/article.php?data\[article_id\]=92538](https://www.werkstatttechnik.de/wt/article.php?data[article_id]=92538).

Wagner, R.; Schleich, B.; Haefner, B.; Kuhnle, A.; Wartzack, S. & Lanza, G. (2019), „Challenges and Potentials of DT and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products“, *Procedia CIRP*, 84, S. 88–93.

Wagner, R.; Haefner, B.; Biehler, M. & Lanza, G. (2020), „Digital DNA in quality control cycles of high-precision products“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 69(1).

Wagner, R., Fischer, J., Gauder, D., Haefner, B., & Lanza, G. (2020), „Virtual In-line Inspection for Function Verification in Serial Production by means of Artificial Intelligence“, *Procedia CIRP*, 92, 63-68.

Literaturverzeichnis

Literaturquellen nach dem Schema (A_<Nachname> <Jahr>) beziehen sich auf studentische Arbeiten am wbk Institut für Produktionstechnik, die durch den Autor der Dissertation angeleitet wurden.

(A_Diemer 2018)

Diemer, A. (2018), *Development of Function-Oriented Strategies for Quality Control and their Evaluation based on a Process Simulation using the Example of Fuel Injection Systems*. Bachelorarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Kieninger 2019)

Kieninger, P. (2019), *Digitaler Zwilling - Optimierte Produktion durch virtuelle Produkte*. Masterarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Quasnitza 2019)

Quasnitza, T. (2019), *Entwicklung eines datengetriebenen Funktionsmodells zur Integration von Produktwissen in der Produktion*. Masterarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Steinlein 2017)

Steinlein, F. (2017), *Analyse von Paarungsstrategien in der Düsenmodulmontage und Bewertung von alternativen Produktionsstrategien für zweidimensionale Paarungen*. Masterarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Wannenwetsch 2018)

Wannenwetsch, M. (2018), *Entwicklung eines produktbezogenen FE-Funktionsmodells zur echtzeitnahen Auswertung von Produktmerkmalen*. Bachelorarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Wörner 2019)

Wörner, S. (2019), *Konzeption eines adaptiven Fertigungs- und Montageprozesses zur Qualitätssicherung hochpräziser Produkte befähigt durch optische Sensoren*. Masterarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Abele et al. 2003)

Abele, E.; Elzenheimer, J. & Rüstig, A. (2003), „Anlaufmanagement in der Serienproduktion“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 98(4), S. 172–176.

(AIAG 2010)

AIAG (2010), *Measurement System Analysis. Reference Manual*, Chrysler Corp., Ford Motor Co., General Motors Corp., Michigan (USA).

(Akansel et al. 2011)

Akansel, M.; Emel, E. & Hacıoğlu, V. (2011), „Optimal control of inventory accumulation in selective assembly processes“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(5-8), S. 729–742.

(Albers et al. 2014)

Albers, A. & Wintergerst, E. (2014), „The contact and channel approach (C&C2-A): relating a system’s physical structure to its functionality“ in *An Anthology of Theories and Models of Design*, Springer, London, S. 151–171.

(Albers et al. 2016)

Albers, A.; Reiss, N.; Bursac, N. & Richter, T. (2016), „iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering“, *Procedia CIRP*, 50, S. 100–105.

(Anderl 2006)

Anderl, R. (2006), „Virtuelle Produktentwicklung in der Automobilindustrie“ in *Informatisierung der Arbeit - Gesellschaft im Umbruch*, Hrsg. A. Baukrowitz, T. Berker, A. Boes, S. Pfeiffer, R. Schmiede & M. Will-Zocholl, Edition Sigma, Berlin, S. 37–54.

(Andersen 2011)

Andersen, F. H. (2011), *Numerical Simulation of the Flow in Fuel Nozzles for Two-Stroke Diesel Engines*. Masterarbeit, Technical University of Denmark, Lyngby, Department of Mechanical Engineering MEK.

(Anwer et al. 2013)

Anwer, N.; Ballu, A. & Mathieu, L. (2013), „The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design“, *CIRP Annals*, 62(1), S. 143–146.

(Arnold et al. 2019)

Arnold, D. & Furmans, K. (2019), *Materialfluss in Logistiksystemen // Einführung und Überblick*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-01404-8.

(Asha et al. 2008)

Asha, A.; Kannan, S. & Jayabalan, V. (2008), „Optimization of clearance variation in selective assembly for components with multiple characteristics“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(9-10), S. 1026–1044.

(Babu et al. 2014)

Babu, J. R. & Asha, A. (2014), „Tolerance modelling in selective assembly for minimizing linear assembly tolerance variation and assembly cost by using Taguchi and AIS algorithm“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5-8), S. 869–881.

(Barton 1992)

Barton, R. R. (1992), „Metamodels for simulation input-output relations“. *Proceedings of the 24th conference on Winter simulation*, Hrsg. R. R. Barton, ACM, New York, NY, S. 289–299. ISBN: 0780307984.

(Bedford et al. 2001)

Bedford, T. & Cooke, R. (2001), „What is uncertainty?“ in *Probabilistic risk analysis. Foundations and methods*, Hrsg. T. Bedford & R. M. Cooke, Cambridge University Press, Cambridge, S. 17–38.

(Bellman 2015)

Bellman, R. (2015), *Adaptive control processes. A guided tour*, Princeton University Press, Princeton, N.J. <http://www.jstor.org/stable/10.2307/j.ctt183ph6v>. ISBN: 1400874661.

(Binner 2014)

Binner, H. F. (2014), „Industrie 4.0 bestimmt die Arbeitswelt der Zukunft“, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 131(7), S. 230–236.

(BMBF 2014)

BMBF (2014), *Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von Morgen*, BMBF, Bonn. https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Innovationen_fuer_die_Arbeit_von_morgen.pdf [03.03.2020].

(Bosch Mobility Solutions 2020)

Bosch Mobility Solutions (2020), *Common-Rail-Systeme mit Piezo-Injektoren. Diesel-Einspritzsystem CRS3-27 für bis zu 2700 bar Systemdruck*. <https://www.bosch-mobility-solutions.de/de/produkte-und-services/pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge/antriebssysteme/common-rail-system-piezo/> [14.02.2020].

(Breidenstein et al. 2016)

Breidenstein, B.; Denkena, B.; Mörke, T. & Hockauf, R. (2016), „Markierungsfreie Bauteil-Identifikation. Potentiale von Oberflächenmerkmalen zur Bauteil-Identifikation in Fertigung und Nutzungsphase“, *wt Werkstatttechnik online*, 106(6), S. 412–415.

(Browning 1999)

Browning, T. R. (1999), „Sources of schedule risk in complex system development“, *Systems Engineering*, 2(3), S. 129–142.

(Brüggemann et al. 2012)

Brüggemann, H. & Bremer, P. (2012), *Grundlagen Qualitätsmanagement*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-1309-1.

(Brugnach et al. 2008)

Brugnach, M.; Pahl-Wostl, C.; Lindenschmidt, K. E.; Janssen, J.A.E.B.; Filatova, T.; Mouton, A.; Holtz, G.; van der Keur, P. & Gaber, N. (2008), „Complexity and Uncertainty: Rethinking the Modelling Activity“ in *Environmental modelling, software and decision support. State of the art and new perspectives*, Hrsg. A. J. Jakeman, Elsevier, Amsterdam, Boston, S. 49–68.

(Brunner et al. 2011)

Brunner, F. J.; Wagner, K. W. & Durakbasa, N. M. (2011), *Taschenbuch Qualitätsmanagement. Leitfaden für Studium und Praxis*, Carl Hanser Fachbuchverlag, München. ISBN: 3446425160.

(Chai et al. 2014)

Chai, T. & Draxler, R. R. (2014), „Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature“, *Geoscientific Model Development*, 7(3), S. 1247–1250.

(Chalupnik et al. 2009)

Chalupnik, M. J.; Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2009), „Approaches to mitigate the impact of uncertainty in development processes“, *Proceedings of ICED, Design Processes, Palo Alto, CA, USA*, 17(1), S. 459–470.

(Colledani et al. 2006)

Colledani, M. & Tolio, T. (2006), „Impact of quality control on production system performance“, *CIRP Annals*, 55(1), S. 453–456.

(Colledani et al. 2014a)

Colledani, M.; Ebrahimi, D. & Tolio, T. (2014), „Integrated quality and production logistics modelling for the design of selective and adaptive assembly systems“, *CIRP Annals*, 63(1), S. 453–456. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850614001231>.

(Colledani et al. 2014b)

Colledani, M.; Tolio, T.; Fischer, A.; lung, B.; Lanza, G.; Schmitt, R. & Váncza, J. (2014), „Design and management of manufacturing systems for production quality“, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 63(2), S. 773–796.

(Colledani et al. 2014c)

Colledani, M.; Coupek, D.; Verl, A.; Aichele, J. & Yemane, A. (2014), „Design and Evaluation of In-line Product Repair Strategies for Defect Reduction in the Production of Electric Drives“, *Procedia CIRP*, 21, S. 159–164.

(Colledani et al. 2015)

Colledani, M.; Yemane, A.; Coupek, D. & Lechler, A. (2015), „Quality-oriented Design of Rotor Assembly Strategies for Electric Drive Production Systems“, *Procedia CIRP*, 36, S. 141–146.

(Colledani et al. 2018)

Colledani, M.; Coupek, D.; Verl, A.; Aichele, J. & Yemane, A. (2018), „A cyber-physical system for quality-oriented assembly of automotive electric motors“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 20, S. 12–22.

(Cox et al. 2010)

Cox, M. G.; Harris, P. M. & Smith, I. M. (2010), „Software specifications for uncertainty evaluation“, *National Physical Laboratory reports MS 7, NPL, Middlesex, UK*, S. 1–83.

(Culley 2011)

Culley, S. J. (2011), *Design information and knowledge*, Design Society, Glasgow. ISBN: 9781904670261.

(Dantan 2014)

Dantan, J.-Y. (2014), „Tolerancing“ in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Hrsg. L. Laperrière & G. Reinhart, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 1230–1237.

(Dantan et al. 2010)

Dantan, J. Y.; Vincent, J. P.; Goch, G. & Mathieu, L. (2010), „Correlation uncertainty—Application to gear conformity“, *CIRP Annals*, 59(1), S. 509–512.

(Deming 1998)

Deming, W. E. (1998), *Out of the crisis*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. ISBN: 0-911379-01-0.

(Deutsch et al. 2014)

Deutsch, H.-P. & Beinker, M. (2014), *Derivate und Interne Modelle. Modernes Risikomanagement*, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart. <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1689593>. ISBN: 3791033123.

(DeWitt et al. 2019)

DeWitt, P. E. & Bennett, T. D. (2019), *ENSR: R Package for Simultaneous Selection of Elastic Net Tuning Parameters. Documentation of Comprehensible R Archive Network (CRAN)*, The Comprehensive R Archive Network, Aurora, USA. <http://arxiv.org/pdf/1907.00914v1> [30.04.2020].

(Dietrich et al. 2017)

Dietrich, E. & Schulze, A. (2017), *Eignungsnachweis von Prüfprozessen. Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. ISBN: 978-3-446-45124-7.

(DIN 2013)

DIN 12100:2011(2013), *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleit-sätze - Risikobeurteilung und Risikominderung*, Beuth, Berlin, 13.110.

(DIN 2015)

DIN 9001:2015(2015), *Qualitätsmanagementsysteme –Anforderungen*, Beuth, Berlin, 03.120.10.

(DIN 2018a)

DIN 15530-3:2018(2018), *Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG)*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 17.040.30.

(DIN 2018b)

DIN 14253-1:2018(2018), *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen*, Beuth, Berlin, 17.040.40.

(DIN 2019)

DIN 22514-2(2019), *Statistische Verfahren im Prozessmanagement –Fähigkeit und Leistung –Teil 2: Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen von zeitabhängigen Prozessmodellen*, Beuth, Berlin, 03.120.30.

(Drake 1999)

Drake, P. J. (1999), *Dimensioning and tolerancing handbook*, McGraw-Hill, New York.

(Eastmen 1969)

Eastmen, C. (1969), „Cognitive Processes, Ill-Defined Problems: A Case Study from Design“, *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence: IJCAI, Washington, D. C., USA*, 69, S. 669–690.

(Ebrahimi 2014)

Ebrahimi, D. (2014), *Integrated quality and production logistic performance modeling for selective and adaptive assembly systems*. PhD Thesis, Politecnico di Milano, Milano, Department of Mechanical Engineering.

(Eckstein 2019)

Eckstein, P. P. (2019), *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. Eine realdatenbasierte Einführung mit SPSS*, Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-24797-3.

(Eger et al. 2018)

Eger, F.; Coupek, D.; Caputo, D.; Colledani, M.; Penalva, M.; Ortiz, J. A.; Freiburger, H. & Kollegger, G. (2018), „Zero Defect Manufacturing Strategies for Reduction of Scrap and Inspection Effort in Multi-stage Production Systems“, *Procedia CIRP*, 67, S. 368–373.

(Ehrlenspiel et al. 2013)

Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2013), *Integrierte Produktentwicklung*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. ISBN: 978-3-446-43548-3.

(Engelhardt et al. 2011)

Engelhardt, R. A.; Eifler, T.; Mathias, J.; Kloberdanz, H.; Birkhofer, H. & Bohn, A. (2011), „Linkage of Methods within the UMEA Methodology. An Approach to Analyse Uncertainties in the Product Development Process“, *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11)*, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 10, S. 433–442.

(Etienne et al. 2008)

Etienne, A.; Dantan, J.-Y.; Qureshi, J. & Siadat, A. (2008), „Variation management by functional tolerance allocation and manufacturing process selection“, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2(4), S. 207–218.

(Etienne et al. 2017)

Etienne, A.; Mirdamadi, S.; Mohammadi, M.; Malmiry, R. B.; Antoine, J.-F.; Siadat, A.; Dantan, J.-Y.; Tavakkoli, R. & Martin, P. (2017), „Cost engineering for variation management during the product and process development“, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(2), S. 289–300.

(Fang et al. 1995)

Fang, X. D. & Zhang, Y. (1995), „A new algorithm for minimising the surplus parts in selective assembly“, *Computers & Industrial Engineering*, 28(2), S. 341–350.

(Fraunhofer IPM 2019)

Fraunhofer IPM (2019), *Track & Trace per Fingerabdruck*, Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM. <https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/produktionskontrolle-inlinemesstechnik/anw/rueckverfolgbarkeit.html> [28.05.2019].

(Friedman 1997)

Friedman, J. H. (1997), „On Bias, Variance, 0/1—Loss, and the Curse-of-Dimensionality“, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1(1), S. 55–77.

(Friedman et al. 2010)

Friedman, J.; Hastie, T. & Tibshirani, R. (2010), „Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent“, *Journal of Statistical Software*, 33(1).

(Fritz 2018)

Fritz, A. (Hrsg.) (2018), *Technisches Zeichnen. Grundlagen, Normen, Beispiele, darstellende Geometrie : Lehr-, Übungs- und Nachschlagewerk für Schule, Fortbildung, Studium und Praxis, mit mehr als 100 Tabellen und weit über 1.000 Zeichnungen*, Cornelsen, Berlin. ISBN: 3064517120.

(Gasca-Aragon 2018)

Gasca-Aragon, H. (2018), *Uncertainty: R Package for Uncertainty Estimation and Contribution Analysis. Documentation of Comprehensible R Archive Network (CRAN)*, The Comprehensive R Archive Network, Gaithersburg, USA. <https://cran.r-project.org/web/packages/uncertainty/uncertainty.pdf> [30.04.2020].

(Gauder et al. 2019)

Gauder, D.; Wagner, R.; Gözl, J.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Funktionsorientierte Qualitätssicherung von Mikrozahnrädern hinsichtlich des Geräuschverhaltens“, *tm - Technisches Messen*, 86(9), S. 469–477.

(Geiger 2014)

Geiger, R. (2014), „Prävention von Produktpiraterie in deutschen Unternehmen“, *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 43(8), S. 443–447.

(Gilz et al. 2014)

Gilz, T. & Zafirov, R. (2014), „Modellbildung und erste Simulation“ in *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*, Hrsg. M. Eigner, D. Roubanov & R. Zafirov, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 97–113.

(Graham et al. 2013)

Graham, C. & Talay, D. (2013), *Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-39362-4.

(Hacker et al. 1998)

Hacker, W. & Sachse, P. (1998), *Allgemeine Arbeitspsychologie - Psychische Regulation von Tätigkeiten*, Hogrefe, Göttingen.

(Haefner et al. 2014)

Haefner, B.; Kraemer, A.; Stauss, T. & Lanza, G. (2014), „Quality Value Stream Mapping“, *Procedia CIRP*, 17, S. 254–259.

(Haefner et al. 2017)

Haefner, B. & Lanza, G. (2017), „Function-oriented measurements and uncertainty evaluation of micro-gears for lifetime prognosis“, *CIRP Annals*, 66(1), S. 475–478.

(Haefner et al. 2018)

Haefner, B.; Biehler, M.; Wagner, R. & Lanza, G. (2018), „Meta-Model Based on Artificial Neural Networks for Tooth Root Stress Analysis of Micro-Gears“, *Procedia CIRP*, 75, S. 155–160.

(Häfner 2017)

Häfner, B. (2017), *Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen*. Diss, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Hastie et al. 2009)

Hastie, T.; Tibshirani, R. & Friedman, J. (2009), *The Elements of Statistical Learning*, Springer New York, New York, NY. ISBN: 978-0-387-84857-0.

(Hedderich et al. 2016)

Hedderich, J. & Sachs, L. (2016), *Angewandte Statistik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-45690-3.

(Heizmann et al. 2011)

Heizmann, M. & Imkamp, D. (2011), „Automatisierung und Integration. Technologie-Roadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion“ in *Fertigungsmesstechnik 2020. Technologieroadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion*, Hrsg. K. Bettenhausen, R. Schmitt & J. Berthold, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 27–35.

(Heling et al. 2016)

Heling, B.; Aschenbrenner, A.; Walter, M.S.J. & Wartzack, S. (2016), „On Connected Tolerances in Statistical Tolerance-Cost-Optimization of Assemblies with Interrelated Dimension Chains“, *Procedia CIRP*, 43, S. 262–267.

(Hippenmeyer et al. 2016)

Hippenmeyer, H. & Moosmann, T. (2016), *Automatische Identifikation für Industrie 4.0*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-52700-9.

(Hockauf et al. 2014)

Hockauf, R.; Spitschan, B.; Mörke, T.; Denkena, B. & Grove, T. (2014), „Die Zukunft der Bauteilidentifikation. Innovative Methode zur Nutzung oberflächeninhärenter Bauteilinformationen“, *wt Werkstatttechnik online*, 104(11/12), S. 753–756.

(Hoffman et al. 1994)

Hoffman, F. O. & Hammonds, J. S. (1994), „Propagation of Uncertainty in Risk Assessments: The Need to Distinguish Between Uncertainty Due to Lack of Knowledge and Uncertainty Due to Variability“, *Risk Analysis*, 14(5), S. 707–712.

(Huang et al. 2017)

Huang, S.; Guo, Y.; Zha, S.; Wang, F. & Fang, W. (2017), „A Real-time Location System Based on RFID and UWB for Digital Manufacturing Workshop“, *Procedia CIRP*, 63, S. 132–137.

(Imkamp et al. 2012)

Imkamp, D.; Schmitt, R.; Berhold, J. & Berthold, J. (2012), „Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik. VDI/VDE-GMA Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020“, *Technisches Messen*, 79(10), S. 433–439.

(ISO 2011a)

ISO 17450-2:2011(2011), *Geometrical product specifications (GPS) - General concepts - Part 2: Basic tenets, specifications, operators, uncertainties and ambiguities*, Beuth, Berlin.

(ISO 2011b)

ISO 17450-1:2011(2011), *Geometrical product specifications (GPS) - General concepts - Part 1: Model for geometrical specification and verification.*, Beuth, Berlin.

(Iyama et al. 2013)

Iyama, T.; Mizuno, M.; McKay, K. N.; Yoshihara, N. & Nishikawa, N. (2013), „Optimal strategies for corrective assembly approach applied to a high-quality relay production system“, *Computers in Industry*, 64(5), S. 556–564. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361513000432>.

(JCGM 2008a)

JCGM 100:2008(2008), *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres Cedex, Frankreich.

(JCGM 2008b)

JCGM 101:2008(2008), *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “GUM” - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres Cedex, Frankreich.

(JCGM 2012)

JCGM 200:2012(2012), *International vocabulary of metrology, Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres Cedex, Frankreich.

(Kannan et al. 2009)

Kannan, S. M.; Sivasubramanian, R. & Jayabalan, V. (2009), „Particle swarm optimization for minimizing assembly variation in selective assembly“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(7-8), S. 793–803.

(Karmakar et al. 2012)

Karmakar, S. & Maiti, J. (2012), „A review on dimensional tolerance synthesis: paradigm shift from product to process“, *Assembly Automation*, 32(4), S. 373–388.

(Kayasa et al. 2012)

Kayasa, M. J. & Herrmann, C. (2012), „A Simulation-based Evaluation of Selective and Adaptive Production Systems (SAPS) Supported by Quality Strategy in Production“, *Procedia CIRP*, 3, S. 14–19.

(Keller 2016)

Keller, D. (2016), *Multiple lineare Regression mit SPSS/IBM. »SCHRITT-FÜR-SCHRITT-ANLEITUNG«*, e-publishing, Kürnach. www.statistik-und-beratung.de [30.04.2020].

(Kim et al. 2019)

Kim, J. & Zambom, A. Z. (2019), „R Package ‘SignifReg’. Documentation, Version 2.1“, *Repository CRAN*, S. 1–10. <https://cran.r-project.org/web/packages/SignifReg/SignifReg.pdf> [12.03.2020].

(Klause 1992)

Klause, G. (1992), *CAD; CAE; CAM; CAP; CIM Lexikon*, expert-Verl., Ehningen. ISBN: 3816906079.

(Köhler et al. 2008)

Köhler, C.; Conrad, J.; Wanke, S. & Weber, C. (2008), „A Matrix representation of the CPM/PPD approach as a means for change impact analysis“, *DS 48: Proceedings DESIGN 2008, the 10th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, S. 167–174.

(Kumar et al. 2007)

Kumar, M. S.; Kannan, S. & Jayabalan, V. (2007), „A new algorithm for minimizing surplus parts in selective assembly by using genetic algorithm“, *International Journal of Production Research*, 45(20), S. 4793–4822.

(Laass et al. 2013)

Laass, M. C.; Niggemann, C. & Schmitt, R. (2013), „Cognitive Failure Cluster as an Approach to Enhance the Precision of a Self-optimizing Process Model“, *Procedia CIRP*, 12, S. 486–491.

(Lanza et al. 2015)

Lanza, G.; Haefner, B. & Kraemer, A. (2015), „Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching“, *CIRP Annals*, 64(1), S. 399–402.

(Lanza et al. 2019)

Lanza, G.; Haefner, B.; Schild, L.; Berger, D.; Eschner, N.; Wagner, R. & Zaiß, M. (2019), „In-line Measurement Technology and Quality Control“ in *Metrology*, Hrsg. W. Gao, Springer, Singapur, S. 1–35.

(Law et al. 2000)

Law, A. M. & Kelton, W. D. (2000), *Simulation modeling and analysis*, McGraw-Hill, Boston. <http://www.loc.gov/catdir/description/mh023/99052146.html>. ISBN: 0070592926.

(Lindemann 2009)

Lindemann, U. (2009), *Methodische Entwicklung technischer Produkte*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-01422-2.

(Loosen et al. 2011)

Loosen, P.; Schmitt, R.; Brecher, C.; Müller, R.; Funck, M.; Gatej, A.; Morasch, V.; Pavim, A. & Pyschny, N. (2011), „Self-optimizing assembly of laser systems“, *Production Engineering*, 5(4), S. 443–451.

(Lu et al. 2008)

Lu, W.; Liu, X.; Jiang, X. & Xu, Z. (2008), „Research on Specification Uncertainty in the Next Generation GPS“, *Key Engineering Materials*, 381-382, S. 561–564.

(Lutters et al. 2014)

Lutters, E.; van Houten, F. J.A.M.; Bernard, A.; Mermoz, E. & Schutte, C. S.L. (2014), „Tools and techniques for product design“, *CIRP Annals*, 63(2), S. 607–630.

(Malmiry et al. 2016)

Malmiry, R. B.; Pailhès, J.; Qureshi, A. J.; Antoine, J.-F. & Dantan, J.-Y. (2016), „Management of product design complexity due to epistemic uncertainty via energy flow modelling based on CPM“, *CIRP Annals*, 65(1), S. 169–172.

(Mankiw et al. 2018)

Mankiw, N. G. & Taylor, M. P. (2018), *Grundzüge der Volkswirtschaftslehre*, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5484712>. ISBN: 9783791041421.

(März et al. 2011)

März, L.; Krug, W.; Rose, O. & Weigert, G. (2011), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-14535-3.

(MathWorks 2018)

MathWorks (2018), *SimEvents - Model and simulate message communication and discrete-event systems*. <https://de.mathworks.com/products/simevents.html> [30.04.2020].

(MathWorks 2020)

MathWorks (2020), *Statistics and Machine Learning Toolbox. User's Guide (R2020a)*. <https://de.mathworks.com/help/stats/lhsdesign.html> [21.03.2020].

(Matsuura et al. 2007)

Matsuura, S. & Shinozaki, N. (2007), „Optimal Binning Strategies under Squared Error Loss in Selective Assembly with Measurement Error“, *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 36(16), S. 2863–2876.

(Matsuura et al. 2011)

Matsuura, S. & Shinozaki, N. (2011), „Optimal process design in selective assembly when components with smaller variance are manufactured at three shifted means“, *International Journal of Production Research*, 49(3), S. 869–882.

(Matthiesen et al. 2019)

Matthiesen, S.; Grauberger, P.; Bremer, F. & Nowoseltschenko, K. (2019), „Product models in embodiment design: an investigation of challenges and opportunities“, *SN Applied Sciences*, 1(9), S. 423.

(Mayr et al. 2017)

Mayr, A.; Meyer, A.; Seefried, J.; Weigelt, M.; Lutz, B.; Sultani, D.; Hampl, M. & Franke, J. (2017), „Potentials of machine learning in electric drives production using the example of contacting processes and selective magnet assembly“, *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Würzburg, Germany(7)*, S. 1–8.

(McKenna et al. 2019)

McKenna, V.; Jin, Y.; Murphy, A.; Morgan, M.; Fu, R.; Qin, X.; McClory, C.; Collins, R. & Higgins, C. (2019), „Cost-oriented process optimisation through variation propagation management for aircraft wing spar assembly“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, S. 435–451.

(McManus et al. 2005)

McManus, H. & Hastings, D. (2005), „A Framework for Understanding Uncertainty and its Mitigation and Exploitation in Complex Systems“, *INCOSE International Symposium, Toulouse, Frankreich*, 15(1), S. 484–503.

(Mease et al. 2004)

Mease, D.; Nair, V. N. & Sudjianto, A. (2004), „Selective Assembly in Manufacturing: Statistical Issues and Optimal Binning Strategies“, *Technometrics*, 46(2), S. 165–175. <http://dx.doi.org/10.1198/004017004000000185>.

(Meyer et al. 2016)

Meyer, A.; Heyder, A.; Kühn, A.; Sand, C.; Gehb, H.; Abersfelder, S.; Franke, J.; Holzhey, R.; Büttner, U. & Wangemann, S. (2016), „Concept for Magnet Intra Logistics and Assembly Supporting the Improvement of Running Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motors“, *Procedia CIRP*, 43, S. 356–361.

(Miller et al. 1960)

Miller, G. A. & Galanter, Eugene, Pribram, Karl H. (1960), „The unit of analysis“ in *Plans and the structure of behavior*, Hrsg. Henry Holt and Co., Henry Holt and Co., New York, New York, USA, S. 21–39.

(Mohammadi et al. 2015)

Mohammadi, B.; Taleizadeh, A. A.; Noorossana, R. & Samimi, H. (2015), „Optimizing integrated manufacturing and products inspection policy for deteriorating manufacturing system with imperfect inspection“, *Journal of Manufacturing Systems*, 37, S. 299–315.

(Monostori et al. 2009)

Monostori, L.; Ilie-Zudor, E.; Kemény, Z.; Szathmári, M. & Karnok, D. (2009), „Increased transparency within and beyond organizational borders by novel identifier-based services for enterprises of different size“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), S. 417–420.

(Monostori et al. 2016)

Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W. & Ueda, K. (2016), „Cyber-physical systems in manufacturing“, *CIRP Annals*, 65(2), S. 621–641.

(Morgenstern et al. 2008)

Morgenstern, C.; Jörk, L.; Pleul & R. (2008), „Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments)“, *Six Sigma Modul 15*, 12, S. 1–79.

(Morgenstern et al. 2009)

Morgenstern, C.; Jörk, L. & Stockhaus, F. (2009), „Qualitätsregelkarten für quantitative Merkmale“, *Six Sigma Modul 19*, 18, S. 1–53.

(Moroni et al. 2011)

Moroni, G.; Petrò, S. & Tolio, T. (2011), „Early cost estimation for tolerance verification“, *CIRP Annals*, 60(1), S. 195–198.

(Moroni et al. 2014)

Moroni, G. & Petro, S. (2014), „Optimal inspection strategy planning for geometric tolerance verification“, *Precision Engineering*, 38(1), S. 71–81.

(Morse et al. 2018)

Morse, E.; Dantan, J.-Y.; Anwer, N.; Söderberg, R.; Moroni, G.; Qureshi, A.; Jiang, X. & Mathieu, L. (2018), „Tolerancing. Managing uncertainty from conceptual design to final product“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 67(2), S. 695–717.

(Mumm 2019)

Mumm, M. (2019), *Kosten- und Leistungsrechnung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-58097-4.

(Niemeyer 1972)

Niemeyer, G. (1972), *Ein integriertes Datenverarbeitungs- und Informationssystem. Mit Programmen für einen Modellbetrieb*, de Gruyter, Berlin. ISBN: 3110038072.

(Nigam et al. 1995)

Nigam, S. D. & Turner, J. U. (1995), „Review of statistical approaches to tolerance analysis“, *Computer-Aided Design*, 27(1), S. 6–15.

(Notheis 2015)

Notheis, D. (2015), *Numerische Untersuchung des Einspritzverhaltens und der Kleinstmengenfähigkeit eines Common-Rail-Piezo-Injektors*. Masterarbeit, Karlsruhe Institut für Technologie, Karlsruhe, IFKM Institut für Kolbenmaschinen.

(O'Brien 2007)

O'Brien, R. M. (2007), „A Caution Regarding Rules of Thumb for Variance Inflation Factors“, *Quality & Quantity*, 41(5), S. 673–690.

(Oberkampf et al. 2004)

Oberkampf, W. L.; Helton, J. C.; Joslyn, C. A.; Wojtkiewicz, S. F. & Ferson, S. (2004), „Challenge problems: uncertainty in system response given uncertain parameters“, *Reliability Engineering & System Safety*, 85(1-3), S. 11–19.

(Onken et al. 2018)

Onken, A.-K.; Wilhelmi, P.; Tracht, K. & Kuhfuss, B. (2018), „Increased output in micro production by tolerance field widening and synchronisation“, *MATEC Web of Conferences*, 190, S. 15006.

(Pahl et al. 2013)

Pahl, G.; Beitz W.; Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2013), *Konstruktionslehre*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-540-34060-7.

(Peter et al. 2014)

Peter, M. & Fleischer, J. (2014), „Rotor balancing by optimized magnet positioning during algorithm-controlled assembly process: Selection and assembly of rotor components minimizing the unbalance“, *Electric Drives Production Conference (EDPC), Nürnberg, Deutschland*, S. 1–4.

(Pfeifer 1993)

Pfeifer, T. (1993), *Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken*, Hanser, München. ISBN: 3-446-16526-6.

(Reif 2020)

Reif, K. (2020), *Dieselmotor-Management. Systeme, Komponenten, Steuerung und Regelung*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2179-9>. ISBN: 978-3-8348-2179-9.

(Ropohl 2009)

Ropohl, G. (2009), *Allgemeine Technologie : eine Systemtheorie der Technik*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. <http://www.doabooks.org/doab?func=full-text&rid=15084>. ISBN: 9783866443747.

(Roubanov 2014)

Roubanov, D. (2014), „Produktmodelle und Simulation (CAE)“ in *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*, Hrsg. M. Eigner, D. Roubanov & R. Zafirov, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 175-195.

(Roy et al. 2011)

Roy, C. J. & Oberkampf, W. L. (2011), „A comprehensive framework for verification, validation, and uncertainty quantification in scientific computing“, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(25-28), S. 2131–2144.

(Salvador et al. 2014)

Salvador, F. J.; Plazas, A. H.; Gimeno, J. & Carreres, M. (2014), „Complete modeling of a piezo actuator last-generation injector for diesel injection systems“, *International Journal of Engine Research*, 15(1), S. 3–19.

(Savio 2012)

Savio, E. (2012), „A methodology for the quantification of value-adding by manufacturing metrology“, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61(1), S. 503–506.

(Schmitt et al. 2008)

Schmitt, R. & Damm, B. E. (2008), „Prüfen und Messen im Takt. Wie Sie Mit Inline-Messtechnik Ihre Wertschöpfung Maximieren: Prüfen und Messen Im Takt“, *QZ. Qualität und Zuverlässigkeit*, 53(9), S. 57–59.

(Schmitt et al. 2010)

Schmitt, R.; Niggemann, C.; Isermann, M.; Laass, K. & Matuschek, N. (2010), „Cognition-based self-optimisation of an automotive rear-axle-drive production process“, *Journal of Machine Engineering*, 10(3), S. 68–77. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-3a8097d4-0a6f-4b3a-a762-b8a0d035f5b4>.

(Schmitt et al. 2011)

Schmitt, R.; Damm, B. E.; Jatzkowski, P. & Lose, J. (2011), „Anforderungen an die Produktion“ in *Fertigungsmesstechnik 2020. Technologieroadmap für die Messtechnik in der industriellen Produktion*, Hrsg. K. Bettenhausen, R. Schmitt & J. Bertold, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 14–19.

(Schuh et al. 2017)

Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Hompel, M. ten & Wahlster, W. (Hrsg.) (2017), *Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten*, Herbert Utz Verlag, München. http://web.archive.org/web/20170630013401/http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Projektberichte/acatech_STUDIE_Maturity_Index_WEB.pdf. ISBN: 9783831646111.

(Medeiros 1998)

Shannon, R. E. (1998), „Introduction to the art and science of simulation“. *1998 Winter Simulation Conference. Proceedings : Grand Hotel, Washington, D.C., 13-16 December, 1998*, Hrsg. D. J. Medeiros, IEEE, Piscataway, N.J, New York, N.Y, San Diego, Calif, S. 7–14. ISBN: 0-7803-5133-9.

(Siebertz et al. 2017)

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplanung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-55742-6.

(Silbernagel et al. 2019)

Silbernagel, R.; Wagner, R.; Häfner, B. & Lanza, G. (2019), „Qualitätsregelstrategien in Wertschöpfungsnetzwerken. Strategien zur datenbasierten Qualitätsregelung kollaborativer Wertschöpfungsnetzwerke“, *wt Werkstatttechnik online*, 109(11/12), S. 802–806. [https://www.werkstatttechnik.de/wt/article.php?data\[article_id\]=92538](https://www.werkstatttechnik.de/wt/article.php?data[article_id]=92538).

(Srinivasan 2008)

Srinivasan, V. (2008), „Standardizing the specification, verification, and exchange of product geometry: Research, status and trends“, *Computer-Aided Design*, 40(7), S. 738–749.

(Stachowiak 1973)

Stachowiak, H. (1973), *Allgemeine Modelltheorie*, Springer, Wien. ISBN: 3-211-81106-0.

(Stark et al. 2017)

Stark, R.; Kind, S. & Neumeyer, S. (2017), „Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design“, *CIRP Annals*, 66(1), S. 169–172.

(Taguchi et al. 2005)

Taguchi, G.; Chowdhury, S. & Wu, Y. (2005), *Taguchi's quality engineering handbook*, Wiley, Hoboken, NJ. <http://www.loc.gov/catdir/description/wiley042/2004011335.html>. ISBN: 0471413348.

(Tao et al. 2018)

Tao, F.; Cheng, J.; Qi, Q.; Zhang, M.; Zhang, H. & Sui, F. (2018), „Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), S. 3563–3576.

(Thornton 1999)

Thornton, A. C. (1999), „Variation Risk Management Using Modeling and Simulation“, *Journal of Mechanical Design*, 121(2), S. 297–304.

(Thunissen 2005)

Thunissen, D. P. (2005), *Propagating and mitigating uncertainty in the design of complex multidisciplinary systems*. Ph. D. Thesis, Division of Engineering & Applied Science, Pasadena, Californien. <http://resolver.caltech.edu/CaltechETD:etd-01072005-162147>.

(Tschöke et al. 2018)

Tschöke, H.; Mollenhauer, K. & Maier, R. (2018), *Handbuch Dieselmotoren*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-07696-2.

(Tsutsumi et al. 2018)

Tsutsumi, D.; Gyulai, D.; Kovács, A.; Tipary, B.; Ueno, Y.; Nonaka, Y. & Monostori, L. (2018), „Towards joint optimization of product design, process planning and production planning in multi-product assembly“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 67(1), S. 441–446.

(Überhuber 1995)

Überhuber, C. (1995), *Computer-Numerik 1*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l. ISBN: 9783540591511.

(VDA 2011)

VDA 5(2011), *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie*, VDA QMC, Berlin.

(VDA 2017)

VDA 4(2017), *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie*, VDA QMC, Berlin.

(VDI 1990)

VDI 2860:1990-05(1990), *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, VDI-Verlag, Düsseldorf.

(VDI 1997)

VDI 3633-3:1997(1997), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 03.100.10.

(VDI 2001)

VDI 3633-7:2001(2001), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 03.100.10.

(VDI 2004)

VDI 2206:2004-06(2004), *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 03.100.40; 31.220.

(VDI 2014)

VDI 3633-1:2014(2014), *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 03.100.10.

(VDI 2018a)

VDI 2221-1:2018-03(2018), *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 03.100.40.

(VDI 2018b)

VDI 2221-2:2018-03(2018), *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 03.100.40.

(Wagels et al. 2008)

Wagels, C.; Isermann, M. & Schmitt, R. (2008), „Cognitive tolerance matching“ in *6th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. 23 - 25 July 2008, Naples, Italy ; proceedings*, Hrsg. R. Teti, Naples, S. 289–293.

(Währisch 2000)

Währisch, M. (2000), „Der Ansatz kalkulatorischer Kostenarten in der industriellen Praxis“, *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 52(7), S. 678–694.

(Walter et al. 2013)

Walter, M.; Sprügel, T. & Wartzack, S. (2013), „Tolerance analysis of systems in motion taking into account interactions between deviations“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227(5), S. 709–719.

(Walter et al. 2015)

Walter, M.S.J.; Spruegel, T. C. & Wartzack, S. (2015), „Least Cost Tolerance Allocation for Systems with Time-variant Deviations“, *Procedia CIRP*, 27, S. 1–9.

(Weckenmann et al. 2013)

Weckenmann, A. & Hartmann, W. (2013), „Function-oriented method for the definition and verification of microstructured surfaces“, *Precision Engineering*, 37(3), S. 684–693.

(Weckenmann et al. 2014)

Weckenmann, A. & Werner, T. (2014), „Messen und Prüfen“ in *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, Hrsg. T. Pfeifer & R. Schmitt, Carl Hanser Fachbuchverlag, München, S. 624–664.

(Weill et al. 1988)

Weill, R.; Clément, A.; Hocken, R.; Farmer, L. E.; Gladman, C. A.; Wirtz, A.; Bourdet, P.; Freckleton, J. E.; Kunzmann, H.; Ham, I.; Trumpold, H. & Matthias, E. (1988), „Tolerancing for Function“, *CIRP Annals*, 37(2), S. 603–610.

(Windmark et al. 2018a)

Windmark, C. & Andersson, C. (2018), „Cost assessment of a production system – A method targeting a product’s aggregated value stream costs“, *Procedia Manufacturing*, 25, S. 231–238.

(Windmark et al. 2018b)

Windmark, C.; Bushlya, V. & Ståhl, J.-E. (2018), „CPR a general Cost Performance Ratio in Manufacturing-A KPI for judgement of different technologies and development scenarios“, *Procedia CIRP*, 72, S. 1220–1226.

(Wößner et al. 2019)

Wößner, W.; Peter, M.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Model-Based Assembly Optimization for Unbalance-Minimized Production Automation of Electric Motors“ in *Advances in Production Research. Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Aachen, November 19-20, 2018*, Hrsg. R. Schmitt & G. Schuh, Springer International Publishing, Cham, S. 551–562.

(Wübbeler et al. 2008)

Wübbeler, G.; Krystek, M. & Elster, C. (2008), „Evaluation of measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method“, *Measurement Science and Technology*, 19(8), S. 84009.

(Wübbeler et al. 2010)

Wübbeler, G.; Harris, P. M.; Cox, M. G. & Elster, C. (2010), „A two-stage procedure for determining the number of trials in the application of a Monte Carlo method for uncertainty evaluation“, *Metrologia*, 47(3), S. 317–324.

(Youn et al. 2011)

Youn, B. D.; Jung, B. C.; Xi, Z.; Kim, S. B. & Lee, W. R. (2011), „A hierarchical framework for statistical model calibration in engineering product development“, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(13-16), S. 1421–1431.

(Zhang 1993)

Zhang, P. (1993), „Model Selection Via Multifold Cross Validation“, *The Annals of Statistics*, 21(1), S. 299–313. <https://www.jstor.org/stable/3035592>.

(Zou et al. 2005)

Zou, H. & Hastie, T. (2005), „Regularization and variable selection via the elastic net“, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 67(2), S. 301–320.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1-1: Graphische Darstellung zum Inhalt der Arbeit | 4 |
| Abbildung 2-1: Funktionsdarstellung eines Produktes mit zugehörigen Umsatzprodukten (nach Ehrlenspiel et al. 2013) | 5 |
| Abbildung 2-2: Vereinfachte Systemdarstellung am Beispiel eines Einspritzsystems mit Elementen, Gesamt- und Teilfunktionen, eigene Darstellung | 6 |
| Abbildung 2-3: Unsicherheits- und Risiko Taxonomie (nach Morse et al. 2018; Thunissen 2005) | 8 |
| Abbildung 2-4: Unsicherheitsmanagement Taxonomie (nach Morse et al. 2018) | 11 |
| Abbildung 2-5: Wichtigkeit des Toleranzmanagement im PEP (nach Dantan 2014) | 12 |
| Abbildung 2-6: Unsicherheit und Verifikation der GPS im Produktentstehungsprozess (nach Weckenmann et al. 2013; ISO 2011) | 15 |
| Abbildung 2-7: Systematisches Modell einer Closed-Loop Qualitätssicherung im Produktionssystemen (nach Lanza et al. 2019) | 16 |
| Abbildung 2-8: Klassifizierung der Prozessmodelle in Stabilität und Fähigkeit nach zeitlichem Verhalten von Lage und Streuung (nach Pfeifer 1993) | 18 |
| Abbildung 2-9: Integrationsgrade produktionsintegrierter Fertigungsmesstechnik in die Produktionslinie (Lanza et al. 2019) | 20 |
| Abbildung 2-10: Beobachtete Fertigungsmesswerte als Überlagerung von Fertigungsabweichung und Messunsicherheit des Messverfahrens (eigene Darstellung) | 21 |
| Abbildung 2-11: Auswirkung der Messunsicherheit auf Konformitätsbewertung für Merkmale (nach DIN 2018) | 22 |
| Abbildung 2-12: Unsicherheitsquantifizierung mit dem GUM Framework für eine univariate, reale Modellgleichung mit unabhängigen Eingangsgrößen (nach Cox et al. 2010) | 24 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 2-13: Unsicherheitsquantifizierung mit der GUM Monte-Carlo Methode für eine univariate, reale Messfunktion (nach Cox et al. 2010) | 26 |
| Abbildung 2-14: Qualitätsbasierte Regelkreise zur Sicherstellung der Qualitätsanforderungen hochpräziser Produkte, eigene Darstellung | 30 |
| Abbildung 2-15: Framework möglicher Strategien zur Qualitätsregelung, eigene Darstellung | 31 |
| Abbildung 2-16: Prinzipdarstellung der konventionellen Montage und resultierenden Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiels im Düsenmodul, eigene Darstellung | 32 |
| Abbildung 2-17:Prinzipdarstellung der selektiven Montage und resultierenden Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiels im Düsenmodul, eigene Darstellung | 33 |
| Abbildung 2-18: Prinzipdarstellung der individuellen Montage und resultierender Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiels im Düsenmodul, eigene Darstellung | 33 |
| Abbildung 2-19: Prinzipdarstellung der statistisch adaptiven Fertigung und resultierenden Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiel im Düsenmodul, eigene Darstellung | 34 |
| Abbildung 2-20: Prinzipdarstellung der individuelle Fertigung und resultierenden Merkmalsstreuung am Beispiel des Passungsspiels im Düsenmodul, eigene Darstellung | 35 |
| Abbildung 4-1: Grundgedanke der funktionsorientierten Qualitätsregelung mittels Funktionsmodellen, eigene Darstellung | 50 |
| Abbildung 4-2: Methodischer Lösungsansatz der funktionsorientierten Qualitätsregelung zur wirtschaftlichen Erfüllung hoher Qualitätsanforderungen in der Serienproduktion, eigene Darstellung | 52 |
| Abbildung 5-1: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung von Metamodellen zur Echtzeit-nahen, funktionsorientierten Auswertung, eigene Darstellung | 53 |
| Abbildung 5-2: Strukturdarstellung zur DT-Modellierung für Produkte, eigene Darstellung | 56 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 5-3: Methodisches Vorgehen zur statistischen Kalibrierung der Zustandsraummodell-Parameter des Digitalen Zwillings, (nach A_Quasnitza 2019) | 57 |
| Abbildung 5-4: Ablaufdiagramm Hauptroutine der ereignisorientierten Ablaufsimulation eines Produktionssystems (nach A_Steinlein 2017) | 64 |
| Abbildung 5-5: Übersicht Standardbaustein selektive Montage für die Materialflusssimulation, eigene Darstellung | 70 |
| Abbildung 5-6: Übersicht Standardbaustein individuelle Montage für die Materialflusssimulation, eigene Darstellung | 72 |
| Abbildung 5-7: Übersicht Standardbaustein statistisch adaptive Fertigung für Materialflusssimulation, eigene Darstellung | 74 |
| Abbildung 5-8: Beispielhafte grafische Darstellung der Maximum-Likelihood-Schätzung für Gauß-Mischverteilung und $\eta = 3$ unter Varianzgleichheit $\sigma_\eta = 1,23$, eigene Darstellung | 76 |
| Abbildung 5-9: Übersicht Standardbaustein individuelle Fertigung für die Materialflusssimulation, eigene Darstellung | 76 |
| Abbildung 5-10: Kostenstruktur der Herstellkosten <i>KHK</i> zur aktivitätsbasierten Kostenbewertung, eigene Darstellung | 83 |
| Abbildung 5-11: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung alternativer Strategien der Qualitätsregelung (nach A_Wörner 2019) | 87 |
| Abbildung 6-1: Konstruktive Ausführung des Piezo-Inline-Injektors, (nach Reif 2020), Bildkennzeichnungen: UMK1974-1Y und UMK1985D | 92 |
| Abbildung 6-2: Einspritzmengenkennfeld des Piezo-Inline-Injektors für verschiedene Einspritzdrücke, a) 2.500 bar, b) 1.200 bar, c) 1.000 bar, d) 800 bar, e) 250 bar, (Reif 2020), Bildkennzeichnung: UMM0634Y | 93 |
| Abbildung 6-3: Systemzustandssequenzen zur Funktionsweise des Servoventils; a) Startzustand, b) Servoventil öffnet, c) Servoventil schließt; Servoventil (1), Ablaufdrossel (2), Steuerraum (3), Zulaufdrossel (4), Düsenadel (5) Bypass (6), (Reif 2020), Bildkennzeichnung: UMK050511-1D | 94 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 6-4: Modell der Montagelinie des bestehenden Produktionssystems im Status Quo, eigene Darstellung | 96 |
| Abbildung 6-5: Prinzipdarstellung der selektiven Montage für Bauteil E zur Kompensation des Bauteils B im Anwendungsfall des Piezo-Injektors, eigene Darstellung | 97 |
| Abbildung 6-6: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_1 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USGx_i = -1, OSGx_i = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | 99 |
| Abbildung 6-7: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{10} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USGx_i = -1, OSGx_i = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | 100 |
| Abbildung 6-8: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_1 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGx_i = -1, OSGx_i = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | 101 |
| Abbildung 6-9: Fehlerhäufigkeit der Serienproduktion zur Herstellung der Piezo-Injektoren im Status Quo, Auftragsdauer vier Monate, eigene Darstellung | 104 |
| Abbildung 6-10: Prozentuale Gesamtkostenstruktur je konformem Produkt KG in der Serienproduktion der Piezo-Injektoren (Status Quo), eigene Darstellung | 104 |
| Abbildung 6-11: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_1 (nach A_Kieninger 2019) | 108 |
| Abbildung 6-12: Grafische Analyse der Homoskedastizität der multiplen, linearen Regression $f_{Reg,q}$ im Betriebspunkt $q = 1$ (nach A_Kieninger 2019) | 108 |
| Abbildung 6-13: Übersicht der Systembereiche des Piezo-Injektor Zustandsraummodells (nach A_Wannenwetsch 2018) | 111 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 6-14: Verlauf der Durchflussrate Q unter Berücksichtigung des formabhängigen Kavitationseffekts am Beispiel der Fülldrossel (nach A_Wannenwetsch 2018) | 113 |
| Abbildung 6-15: CFD Simulation in der Zulaufdrossel unter Auftreten von Kavitation, Software Star-CMM+, Fluid Diesel, $\Delta p = 10$, zeitl. Diskretisierung $2 * 10^{-8}s$, Simulationsdauer $1 * 10^{-3}s$, 5.000 Iterationen bis Gleichgew. (nach A_Wannenwetsch 2018) | 114 |
| Abbildung 6-16: Vergleich der Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Durchflussrate Q in Drosseln (nach A_Wannenwetsch 2018) | 115 |
| Abbildung 6-17: Bestimmung der relativen Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}$ der Zustandsraummodelle im Ausgangszustand (nach A_Quasnitza 2019) | 116 |
| Abbildung 6-18: Sensitivitätsanalyse unsicherer Modellparameter p_i des Zustandsraummodells bezogen zur relativen Gesamtfunktion $y_{rel,q,n}$ (nach A_Quasnitza 2019) | 117 |
| Abbildung 6-19: Histogramm des relativen Modellfehlers RMSE der Kalibriermodelle $g_{Kal,1,z1}$ bezogen zur Toleranz $TOLq$ im Betriebspunkt $q = 1$ (nach A_Quasnitza 2019) | 119 |
| Abbildung 6-20: Relativer Prognosefehler ε_q bezogen zur Toleranz $TOLq$ im Betriebspunkt $q = 1$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2 (nach A_Quasnitza 2019) | 120 |
| Abbildung 6-21: Bestimmung der relativen Modellunsicherheit $u_{\varepsilon,q}$ der Zustandsraummodelle vor bzw. nach Kalibrierung im Betriebspunkt q (nach A_Quasnitza 2019) | 121 |
| Abbildung 6-22: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q bezogen zur Toleranz $TOLq$ in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 1$, eigene Darstellung | 125 |
| Abbildung 6-23: Analyse der erweiterten Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q mit Bestandteilen $u_{\varepsilon,q}$ und $u_{l,q}$, jeweils bezogen zur Toleranz $TOLq$ für $\alpha = 0,237$ in Abhängigkeit des Strafterms λ im Betriebspunkt $q = 1$, eigene Darstellung | 126 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 6-24: Vergleich der relativen Modellunsicherheit $u_{\varepsilon, q}$ der im Betriebspunkt q , eigene Darstellung | 127 |
| Abbildung 6-25: Entwickelte Strategiealternativen zur funktionsorientierten Qualitätsregelung des Anwendungsfall der Piezo-Injektor Herstellung, eigene Darstellung | 133 |
| Abbildung 6-26: Portfolioanalyse der entwickelten Strategiealternativen zur Abschätzung des Aufwandes und des Potentials der Strategiealternativen, eigene Darstellung | 134 |
| Abbildung 6-27: Visualisierung der Strategiealternative $\theta = S1 *$ zur funktionsorientierten, selektiven Montage ($M = 2$) im Anwendungsfall der Piezo-Injektor Produktion, eigene Darstellung | 135 |
| Abbildung 6-28: Visualisierung der Strategiealternative $\theta = S2 *$ zur funktionsorientierten, adaptiven Fertigung ($F = 2$) und funktionsorientierten, selektiven Montage ($M = 2$) im Anwendungsfall der Piezo-Injektor Produktion, eigene Darstellung | 137 |
| Abbildung 6-29: Visualisierung der Strategiealternative $\theta = S3 *$ zur funktionsorientierten, adaptiven Fertigung ($F = 2$) und funktionsorientierten, individuelle Montage ($M = 3$) im Anwendungsfall der Piezo-Injektor Produktion, eigene Darstellung | 139 |
| Abbildung 6-30: Gesamtmodell der Montagelinie im Status Quo in der Simulationsumgebung MATLAB © SimEvents, eigene Darstellung | 142 |
| Abbildung 6-31: Histogramme der Produktfunktionen yq als Ergebnis der ereignisgesteuerten Materialflusssimulation für $\theta = S2 *$ und Status Quo, eigene Darstellung | 144 |
| Abbildung 6-32: Kostenvergleich Gesamtkosten konformer Produkte KG der Strategiealternative $\theta = S2 *$ zu denen des Status Quo, eigene Darstellung | 145 |
| Abbildung 6-33: Erzielter First Pass Yield FPY der Strategiealternativen θ mit zugehörigen Konfidenzintervallen für $\gamma = 0,95$, eigene Darstellung | 147 |
| Abbildung 0-1: Grafische Analyse der Produkteigenschaft $x2$: Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten | |

| | |
|---|--------|
| normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XXIII |
| Abbildung 0-2: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_3 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XXIV |
| Abbildung 0-3: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_4 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XXV |
| Abbildung 0-4: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_5 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XXVI |
| Abbildung 0-5: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_6 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XXVII |
| Abbildung 0-6: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_7 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XXVIII |
| Abbildung 0-7: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_8 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XXIX |
| Abbildung 0-8: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_9 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XXX |
| Abbildung 0-9: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{11} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten | |

- normalisiert auf das Intervall $[USG_{xi} = -1, OSG_{xi} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) XXXI
- Abbildung 0-10: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{12} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{xi} = -1, OSG_{xi} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) XXXII
- Abbildung 0-11: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{13} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{xi} = -1, OSG_{xi} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) XXXIII
- Abbildung 0-12: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{14} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{xi} = -1, OSG_{xi} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) XXXIV
- Abbildung 0-13: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{15} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{xi} = -1, OSG_{xi} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) XXXV
- Abbildung 0-14: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{16} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{xi} = -1, OSG_{xi} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) XXXVI
- Abbildung 0-15: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_2 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{xi} = -1, OSG_{xi} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) XXXVII
- Abbildung 0-16: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_3 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{xi} = -1, OSG_{xi} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) XXXVIII
- Abbildung 0-17: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_4 , Daten

| | |
|--|-------|
| normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XXXIX |
| Abbildung 0-18: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_5 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XL |
| Abbildung 0-19: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_6 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XLI |
| Abbildung 0-20: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_7 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XLII |
| Abbildung 0-21: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_8 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XLIII |
| Abbildung 0-22: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_9 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XLIV |
| Abbildung 0-23: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{10} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XLV |
| Abbildung 0-24: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{11} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XLVI |
| Abbildung 0-25: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{12} , Daten | |

| | |
|--|--------|
| normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XLVII |
| Abbildung 0-26: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{13} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XLVIII |
| Abbildung 0-27: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{14} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | XLIX |
| Abbildung 0-28: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{15} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | L |
| Abbildung 0-29: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{16} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USGxi = -1, OSGxi = +1]$ (nach A_Kieninger 2019) | LI |
| Abbildung 0-30: Ursache-Wirkungsdiagramm zur De- und Re-Montage von Piezo-Injektoren, eigene Darstellung | LIII |
| Abbildung 0-31: Ursache-Wirkungsdiagramm zum Messprozess der Piezo-Injektor Funktionsprüfung, eigene Darstellung | LIII |
| Abbildung 0-32. Standardisierung De- und Re-Montageprozess von Piezo-Injektoren, eigene Darstellung | LIV |
| Abbildung 0-33: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_2 (nach A_Kieninger 2019) | LV |
| Abbildung 0-34: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_3 (nach A_Kieninger 2019) | LV |

| | |
|--|-------|
| Abbildung 0-35: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_4 (nach A_Kieninger 2019) | LVI |
| Abbildung 0-36: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_5 (nach A_Kieninger 2019) | LVI |
| Abbildung 0-37: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_6 (nach A_Kieninger 2019) | LVII |
| Abbildung 0-38: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_7 (nach A_Kieninger 2019) | LVII |
| Abbildung 0-39: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_8 (nach A_Kieninger 2019) | LVIII |
| Abbildung 0-40: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_9 (nach A_Kieninger 2019) | LVIII |
| Abbildung 0-41: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{10} (nach A_Kieninger 2019) | LIX |
| Abbildung 0-42: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{11} (nach A_Kieninger 2019) | LIX |
| Abbildung 0-43: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{12} (nach A_Kieninger 2019) | LX |
| Abbildung 0-44: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{13} (nach A_Kieninger 2019) | LX |

| | |
|--|--------|
| Abbildung 0-45: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{14} (nach A_Kieninger 2019) | LXI |
| Abbildung 0-46: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{15} (nach A_Kieninger 2019) | LXI |
| Abbildung 0-47: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{16} (nach A_Kieninger 2019) | LXII |
| Abbildung 0-48: Grafische Analyse der Homoskedastizität der multiplen, linearen Regression $f_{Reg,q}$ im Betriebspunkt $q = 2$ (nach A_Kieninger 2019) | LXIII |
| Abbildung 0-49: Grafische Analyse der Homoskedastizität der multiplen, linearen Regression $f_{Reg,q}$ im Betriebspunkt $q = 3$ (nach A_Kieninger 2019) | LXIII |
| Abbildung 0-50: Grafische Analyse der Homoskedastizität der multiplen, linearen Regression $f_{Reg,q}$ im Betriebspunkt $q = 4$ (nach A_Kieninger 2019) | LXIV |
| Abbildung 0-51: Düsennadelgeometrie der Nachfolgevariante, qualitative Darstellung (nach A_Wannenwetsch 2018) | LXV |
| Abbildung 0-52: Änderungen der Systemzustandssimulation im mechanischen Bereich, links Modellierung des Vorgängerproduktes, rechts Modellierung des Nachfolgerproduktes (aktuell) im Düsenmodul (nach A_Wannenwetsch 2018) | LXVI |
| Abbildung 0-53: Änderungen der Zustandsraummodells im hydraulischen Bereich, links Modellierung des Vorgängerproduktes, rechts Modellierung des Nachfolgerproduktes (aktuell) im Servoventil (nach A_Wannenwetsch 2018) | LXVII |
| Abbildung 0-54: Laufzeitdauer der Systemzustandssimulation in Abhängigkeit der Schrittweite zur zeitlichen Diskretisierung für Betriebspunkt $q = 1$ in Simulationsumgebung MATLAB© Simulink, auf Desktop PC (nach A_Quasnitza 2019) | LXVIII |

| | |
|--|--------|
| Abbildung 0-55: Prognoseabweichung der Systemzustandssimulation in Abhängigkeit der Schrittweite zur zeitlichen Diskretisierung für Betriebspunkt $q = 1$ in der Simulationsumgebung MATLAB© Simulink (nach A_Quasnitza 2019) | LXVIII |
| Abbildung 0-56: MATLAB© Regression Learner zur Anpassung der Kalibriermodelle in Abhängigkeit von $[p1, z1, p2, z1]$ für Betriebspunkt $q = 1$ und Datensatz $n = 1$ | LXIX |
| Abbildung 0-57: Histogramm des relativen Modellfehlers RMSE der Kalibriermodelle $gKal, 1, z1$ bezogen zur Toleranz $TOLq$ im Betriebspunkt $q = 2$ (nach A_Quasnitza 2019) | LXX |
| Abbildung 0-58: Relativer Prognosefehler εq bezogen zur Toleranz $TOLq$ im Betriebspunkt $q = 2$ in Abhängigkeit der Modellparameter $p1, p2$ (nach A_Quasnitza 2019) | LXXI |
| Abbildung 0-59: Histogramm des relativen Modellfehlers RMSE der Kalibriermodelle $gKal, 1, z1$ bezogen zur Toleranz $TOLq$ im Betriebspunkt $q = 3$ (nach A_Quasnitza 2019) | LXXI |
| Abbildung 0-60: Relativer Prognosefehler εq bezogen zur Toleranz $TOLq$ im Betriebspunkt $q = 3$ in Abhängigkeit der Modellparameter $p1, p2$ (nach A_Quasnitza 2019) | LXXII |
| Abbildung 0-61: Histogramm des relativen Modellfehlers RMSE der Kalibriermodelle $gKal, 1, z1$ bezogen zur Toleranz $TOLq$ im Betriebspunkt $q = 4$ (nach A_Quasnitza 2019) | LXXIII |
| Abbildung 0-62: Relativer Prognosefehler εq bezogen zur Toleranz $TOLq$ im Betriebspunkt $q = 4$ in Abhängigkeit der Modellparameter $p1, p2$ (nach A_Quasnitza 2019) | LXXIV |
| Abbildung 0-63: Gesamtunsicherheit Uq der linearen Metamodelle $f q$ bezogen zur Toleranz $TOLq$ in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 1$, Draufsicht, eigene Darstellung | LXXV |

Abbildung 0-64: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 2$, eigene Darstellung LXXV

Abbildung 0-65: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 2$, Draufsicht, eigene Darstellung LXXVI

Abbildung 0-66: Analyse der erweiterten Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q mit Bestandteilen $u_{\varepsilon,q}$ und $u_{l,q}$, jeweils bezogen zur Toleranz TOL_q für $\alpha = 0,026$ in Abhängigkeit des Strafterms λ im Betriebspunkt $q = 2$, eigene Darstellung LXXVI

Abbildung 0-67: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 3$, eigene Darstellung LXXVII

Abbildung 0-68: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 3$, Draufsicht, eigene Darstellung LXXVII

Abbildung 0-69: Analyse der erweiterten Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q mit Bestandteilen $u_{\varepsilon,q}$ und $u_{l,q}$, jeweils bezogen zur Toleranz TOL_q für $\alpha = 0,105$ in Abhängigkeit des Strafterms λ im Betriebspunkt $q = 3$, eigene Darstellung LXXVIII

Abbildung 0-70: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 4$, eigene Darstellung LXXVIII

Abbildung 0-71: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 4$, Draufsicht, eigene Darstellung LXXIX

Abbildung 0-72: Analyse der erweiterten Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle f_q mit Bestandteilen $u_{\varepsilon,q}$ und $u_{l,q}$, jeweils

| | |
|--|---------|
| bezogen zur Toleranz TOL_q für $\alpha = 0,105$ in Abhängigkeit des Strafterms λ im Betriebspunkt $q = 4$, eigene Darstellung | LXXIX |
| Abbildung 0-73: Funktionsblockübersicht der SimEvents Bibliothek zur Modellierung ereignisgesteuerter Materialflusssimulationen (MathWorks 2018) | LXXX |
| Abbildung 0-74: Übersicht Prozessbaustein Fertigungsprozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018) | LXXXI |
| Abbildung 0-75: Übersicht Prozessbaustein Messprozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018) | LXXXI |
| Abbildung 0-76: Übersicht Prozessbaustein Montageprozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018) | LXXXII |
| Abbildung 0-77: Übersicht Prozessbaustein Sortierprozess in Klassen in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018) | LXXXII |
| Abbildung 0-78: Übersicht Prozessbaustein Lagerungsprozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018) | LXXXIII |
| Abbildung 0-79: Übersicht Prozessbaustein Black Box Prozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018) | LXXXIII |
| Abbildung 0-80: Übersicht Standardbaustein zur Qualitätsregelung im Produktionssystem: selektive Montage ($M_{xi} = 2$) in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018) | LXXXIV |
| Abbildung 0-81: Übersicht Standardbaustein zur Qualitätsregelung im Produktionssystem: individuelle Montage ($M_{xi} = 3$) in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018) | LXXXV |

- Abbildung 0-82: Histogramme der Produktfunktionen yq als Ergebnis der ereignisgesteuerten Materialflusssimulation für $\theta = S1 *$ und Status Quo, eigene Darstellung LXXXVI
- Abbildung 0-83: Kostenvergleich Gesamtkosten konformer Produkte KG der Strategiealternative $\theta = S1 *$ zu denen des Status Quo in Bestandteilen, eigene Darstellung LXXXVI
- Abbildung 0-84: Histogramme der Produktfunktionen yq als Ergebnis der ereignisgesteuerten Materialflusssimulation für $\theta = S3$ und Status Quo, eigene Darstellung LXXXVII
- Abbildung 0-85: Kostenvergleich Gesamtkosten konformer Produkte KG der Strategiealternative $\theta = S3 *$ zu denen des Status Quo in Bestandteilen, eigene Darstellung LXXXVII

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 2-1: Klassifizierung der zeitabhängigen Verteilungsmodelle (DIN 2019) | 17 |
| Tabelle 3-1: Übersicht relevanter Forschungsarbeiten zur Einordnung der behandelten (●) bzw. in Ansätzen behandelten (○) Themenbereiche | 49 |
| Tabelle 5-1: Übersicht ausgewählter Ansätze zur datengetriebenen Metamodellierung und ihrer Eignung hinsichtlich der gestellten Anforderungen, (●) erfüllt, (○) nicht erfüllt | 60 |
| Tabelle 5-2: Übersicht Prozessbausteine zur ereignisorientierten Materialflusssimulation unter Einbeziehung von Produktmerkmalen und -Eigenschaften (nach VDI 1990) | 65 |
| Tabelle 6-1: Prozessmodelle und Kurzzeitfähigkeitskennwerte der Fertigungsprozesse zur Herstellung der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i im Anwendungsfall, blau hinterlegte Werte werden extern gefertigt (nach DIN 2019) | 102 |
| Tabelle 6-2: Messprozesseignung und Prüfhäufigkeit (● 100%, ○ Stichprobe, [] keine) der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i im Anwendungsfall, grau hinterlegte Werte basieren auf Annahme bedingt geeigneter Messprozesse | 102 |
| Tabelle 6-3: Prüfung der Voraussetzungen der multiplen linearen Regression (nach A_Kieninger 2019) | 107 |
| Tabelle 6-4: Variations-Inflationsfaktoren der Einflussgrößen für $y_{Reg,q=1}$, für $\gamma = 0,99$, bidirektionale Elimination, ohne Wechselwirkungen | 109 |
| Tabelle 6-5: Gesamtunsicherheit U_q der multiplen, lin. Regressionsmodelle $f_{q,Reg}$, bezogen zur jeweiligen Toleranz TOL_q im Betriebspunkt q auf Basis der DoE Versuchsdaten | 110 |
| Tabelle 6-6: Relativer Prognosefehler ε_q (absteigend) bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 1$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2 | 119 |

| | |
|--|--------|
| Tabelle 6-7: Ermittelte Modellparameter p_1, p_2 unter minimalen Prognosefehlern ε_q bezogen zur Toleranz TOL_q des Zustandsraummodells f_q, Kal im Betriebspunkt q | 120 |
| Tabelle 6-8: Übersicht der Metamodelle f_q unter minimaler erweiterter Gesamtunsicherheit U_q bezogen zur Toleranz TOL_q in den Betriebspunkten q | 126 |
| Tabelle 6-9: Identifikation geeigneter Regelgrößen im Anwendungsfall der funktionsorientierten Qualitätsregelung mittels Nutzwertanalyse, extern gefertigte Merkmale blau | 130 |
| Tabelle 6-10: Identifikation der Störgrößen im Anwendungsfall der funktionsorientierten Qualitätsregelung mittels Nutzwertanalyse, extern gefertigte Merkmale blau | 131 |
| Tabelle 6-11: Gegenüberstellung der technischen und wirtschaftlichen Kennzahlen je Strategiealternative θ nach ereignisorientierter Materialflusssimulation über $T_{Sim} = 14 Tage$ für $nrepl = 3, \gamma = 0,95$ | 146 |
| Tabelle 6-12: Sensitivität der Produktmerkmale und -eigenschaften x_i des Bauteils B und E auf die Produktfunktion y_q | 148 |
| Tabelle 0-1: Relativer Prognosefehler ε_q (absteigend) bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 2$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2 | LXX |
| Tabelle 0-2: Relativer Prognosefehler ε_q (absteigend) bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 3$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2 | LXXII |
| Tabelle 0-3: Relativer Prognosefehler ε_q (absteigend) bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 4$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2 | LXXIII |

Anhang

Im Anhang werden die sich aus der Arbeit ergebende größeren statistischen Analysen, Tabellen, Ergebnisse, etc. aufgenommen. Der Anhang ist von der normalen Nummerierung ausgenommen.

A1. Methodisches Vorgehen zur Bestimmung quantitativer Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen

Liegen ausreichend viele Produktionsdaten, mit einer bauteilindividuellen Zuordnung von Messdaten $m_{i,j}$ der Merkmalausprägungen $x_{i,j}$ und Funktionserfüllung y_i vor, können statistische Analysen auf dieser Datenbasis erfolgen. Voraussetzung für die Gewinnung statistisch signifikanter Ergebnisse ist ein messbarer Effekt durch die Variation von Einflussgrößen, der alle weiteren Unsicherheiten und Störgrößen im Effekt übersteigt. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, bietet die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) einen Ansatz, um mit wenigen Experimenten, existierende Haupteffekte und Interaktionen von Einflussfaktoren statistisch zu quantifizieren (Siebertz et al. 2017):

Zur Festlegung der Einflussgrößen und deren Versuchsniveaus in einer DoE liefern die zuvor durchgeführte Identifikation von Produktmerkmalen und die zugehörigen Fertigungsprozessanalysen den Informationsbeitrag. Abhängig von den zu erwartenden Modellzusammenhängen, ist ein entsprechender Modellansatz zu wählen, bevor der eigentliche Versuchsplan aufgestellt werden kann. In der Praxis hat sich standardmäßig der Modellansatz einer multiplen Regression als spezielles Polynom n -ten Grades etabliert (siehe Formel 0-1) (Morgenstern et al. 2008).

$$y_m = f(\vec{x}, \vec{\beta})_m = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i,p=1}^n \beta_{i,p} x_i x_p + \dots + \beta_{12\dots n} x_1 x_2 \dots x_n \quad \text{Formel 0-1}$$

Die Versuchsplanung selbst umfasst das Aufstellen eines Versuchsplanes, wobei bereits statistische Methoden zur Reduzierung nicht-stationärer, zufälliger Variabilität (aleatorische Unsicherheit) auf die systematischen Effekte, wie beispielsweise Randomisierung und Blockbildung, berücksichtigt werden müssen. Ebenfalls sind äußere Randbedingungen in der Durchführung, wie schwer einstellbare Faktorstufen durch sogenannte *Split Plot Designs* in der Planung zu berücksichtigen. Die Anzahl der Testwiederholungen (Replikationen) kann durch Trennschärfe- und Stichprobenanalysen in

Abhängigkeit des Konfidenzniveaus, der auftretenden Messunsicherheiten und dem gewünschten messbaren Effekt ermittelt werden. (Siebertz et al. 2017)

Liegt die Datenbasis aus Produktionsdaten oder DoE vor, kann die Näherung der Modellparameter einer multiplen Regressionsanalyse (OLS, engl. ordinary least squares regression) erfolgen. Haupt- b_i und Wechselwirkungen $b_{i,p}$ von Einflussgrößen werden durch den Wert der Einflussgröße x_i bzw x_p und der Zielgröße berechnet. Speziell für DoE Daten erfolgt die Berechnung anhand des Ergebnismittelwerts \bar{y} im j-ten Versuch aus c-Wiederholungen (siehe Formel 0-2 und Formel 0-3) (Morgenstern et al. 2008).

$$b_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J x_{i,j} \bar{y}_j \quad \text{Formel 0-2}$$

$$\text{mit } j = [1, \dots, J]; \bar{y}_j = \frac{1}{c} \sum_{z=1}^c y_{j,z};$$

$$b_{i,p} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (x_{i,j} x_{p,j})_j \bar{y}_j \quad \text{Formel 0-3}$$

$$\text{mit } j = [1, \dots, J]; \bar{y}_j = \frac{1}{c} \sum_{z=1}^c y_{j,z}; i < p$$

Anschließend erfolgen die Prüfung des Modells durch einen Signifikanztest für alle ermittelten Parameter, durch einen statistischen T-Test auf ein zuvor festgelegtes Signifikanzniveau, sowie ein Adäquatheitstest für das reduzierte Modell, durch einen statistischen F-Test. (Morgenstern et al. 2008)

Kontrollverfahren, wie beispielsweise Korrelations- (siehe Formel 0-4) und Varianzinflationsanalysen (siehe Formel 0-5, Bestimmtheitsmaß R_j , Residuenquadratsumme RSS und Totalquadratsumme TSS), erlauben es die Kollinearität der Einflussfaktoren untereinander zu überprüfen. Im Idealfall korrelieren die Effekte nur mit sich selbst, also zeigt die perfekte Korrelationsmatrix den Wert 1 in der Hauptdiagonalen (für $i = j$) und alle anderen Werte sind 0 (für $i \neq j$). Werte der Varianzinflation sollten den Wert 5 möglichst nicht überschreiten. (Siebertz et al. 2017)

$$\text{corr}(x_i, x_j) = \frac{\text{cov}(x_i, x_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad \text{Formel 0-4}$$

$$\text{VIF}_i = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad \text{Formel 0-5}$$

$$\text{mit } R_j = \frac{RSS}{TSS}$$

A2. Methoden der Kostenbewertung im Produktionssystem

Im Rahmen **aktivitätsbasierter Kostenbewertung** (engl. „Activity Based Costing“) werden alle Kosten K eines Erzeugnisses als Summe aller Aktivitäten in der Produktion berechnet (siehe Formel 0-6).

$$K = \sum_i^n K_{Ressourcen,i} * t_{Ressourcen,i} * t_{Kosten,i} * t_{Aktivität,i} \quad \text{Formel 0-6}$$

Dabei dient der Ressourcentreiber $t_{Ressource}$ der Zuordnung einer Ressource zwischen Aktivitäten. Der Kostentreiber t_{Kosten} beschreibt die Leistungsfähigkeit sowie den Ressourcenverbrauch einer Aktivität i , der Aktivitätstreiber $t_{Aktivität}$ verteilt die Kosten der Aktivitäten auf die Kostenobjekte (Arbeitsstunden, gefertigte Werkstücke, etc.). Auf diese Weise werden sowohl direkte als auch indirekte Kosten berücksichtigt und individuellen Erzeugnissen zugeordnet. Ein Vergleich verschiedener Produktionsvarianten wird durch ergänzende Informationen, wie beispielsweise der Auftrittswahrscheinlichkeit von Abweichungen, gewählter Toleranzen und der Effizienz einer Aktivität möglich. (Etienne et al. 2017)

Zur Bestimmung der **Kosten im Umlaufbestand** stellen Windmark et al. (2018) eine Methode vor, die eine Ermittlung der aktivitätsbasierten Kosten eines Produktes zu jedem Wertschöpfungszustand W im Produktionssystem erlaubt. Produkte, die an verschiedenen Stellen des Wertstroms ein- und ausgehen, führen ihre eigenen Kosten mit sich. Dazu werden jedem Bauteil Materialkosten, Prozesskosten, Personalkosten, Kosten für das Materialhandling sowie für gebundenes Material individuell zugewiesen. Diese Kosten treten in jedem Schritt der Wertschöpfungskette auf und werden Schritt für Schritt im Produkt aggregiert. Dabei entsprechen die Materialkosten für Schritt W der Summe sämtlicher aktivitätsbasierter Kosten, die in Schritt $W - 1$ angefallen sind. Die Methode wird beispielhaft in einem Anwendungsfall der Produktion mit hohen Rohmaterialkosten angewendet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine erhöhte Kapazität im Umlaufbestand und eine geringere Anzahl aktiver Aufträge eine Verkürzung der Lieferzeit ermöglicht, während eine Senkung der Kosten hauptsächlich von Betriebsverbesserungen abhängen. (Windmark et al. 2018a)

Werden ganze Prozesskettenalternativen eines Produktes betrachtet, sind auch **aktivitätsbasierte Kostenoptimierungen abhängiger Fertigungs- und Montageketten**

möglich. Hierzu ist das zusätzliche Verständnis über technische und finanzielle Auswirkungen jedes Prozesses in der Produktionskette notwendig. Folglich ergibt sich die Möglichkeit das Relaxieren der Genauigkeitsanforderungen und die Vereinfachung komplexer Fertigungsketten, unter wirtschaftlichen Aspekten alternativer Produktionskonfigurationen für gleichbleibende Funktionsanforderungen, zu prüfen. McKenna et al. (2019) nutzen, im beispielhaften Anwendungsfall der Flugzeugflügel-Holmfertigung und –montage, eine Abweichungssimulation zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung verschiedener Fertigungs- und Montageketten, mittels Monte-Carlo Experimenten. (McKenna et al. 2019)

A3. Statistischer Test auf Normalverteilung

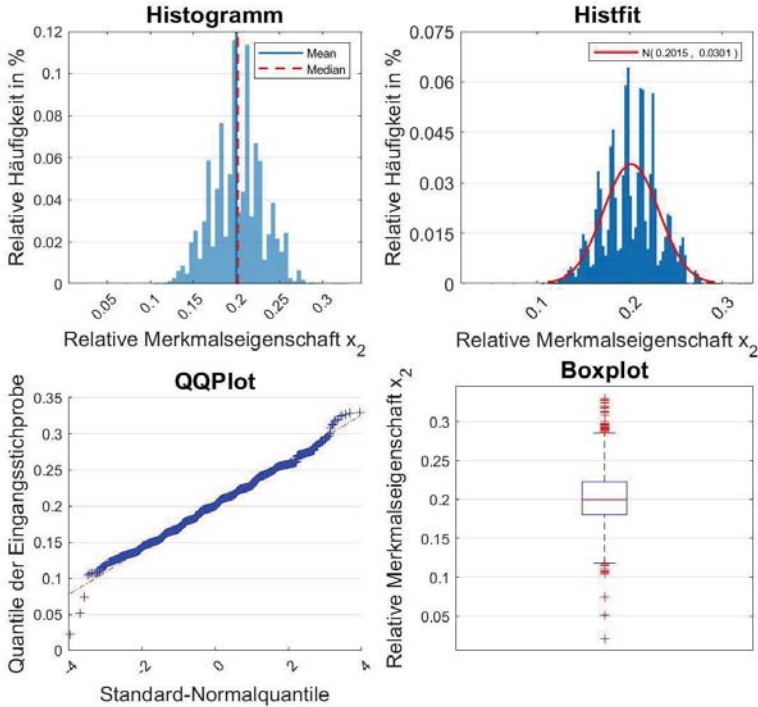


Abbildung 0-1: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_2 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, 0SG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

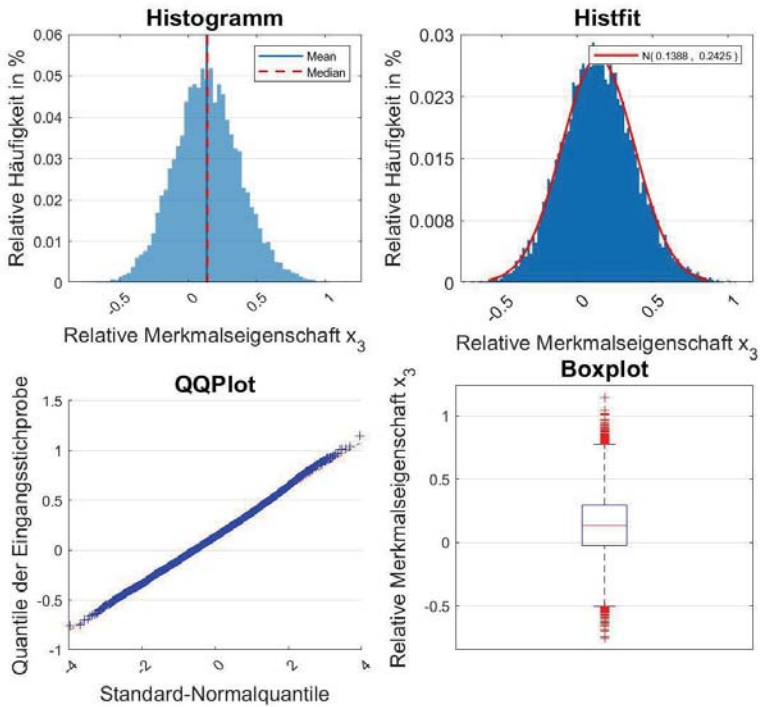


Abbildung 0-2: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_3 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

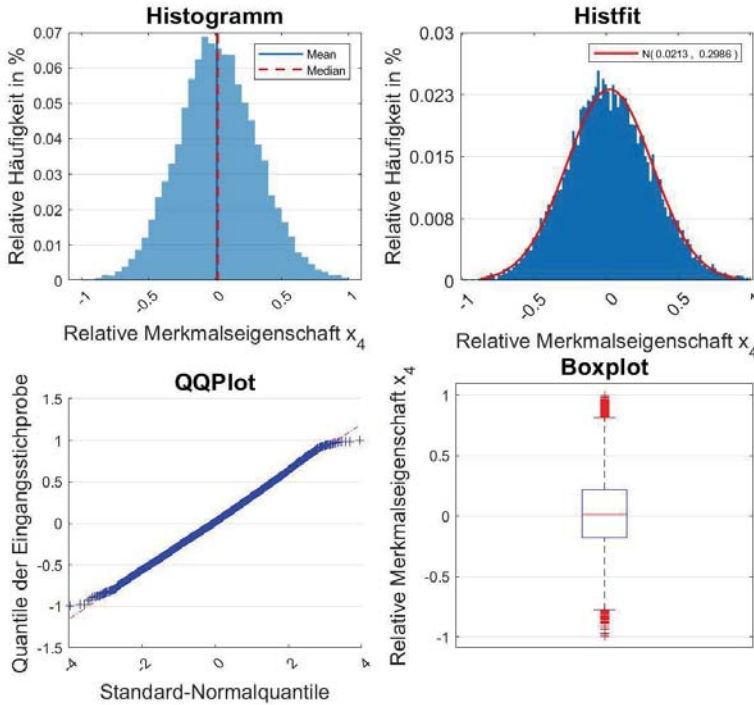


Abbildung 0-3: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_4 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

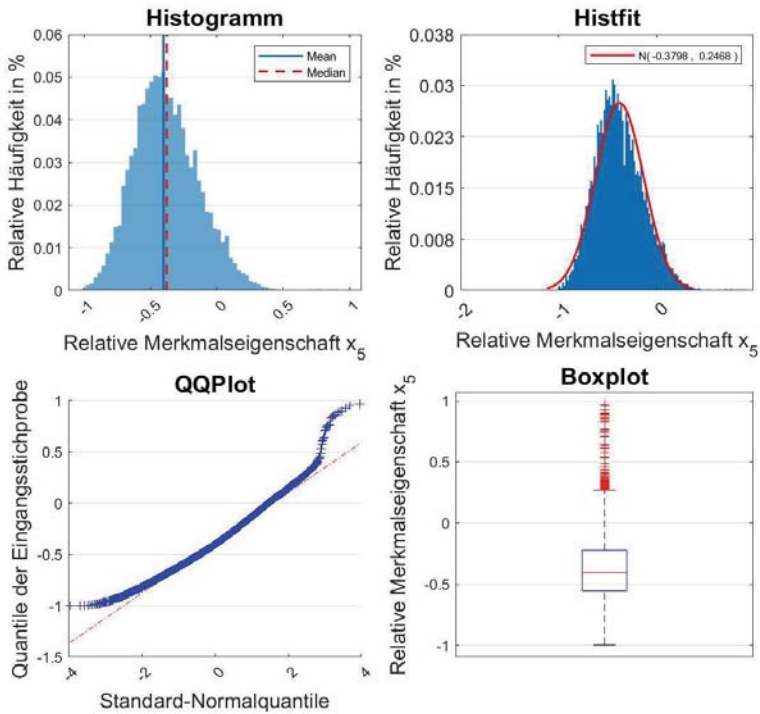


Abbildung 0-4: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_5 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

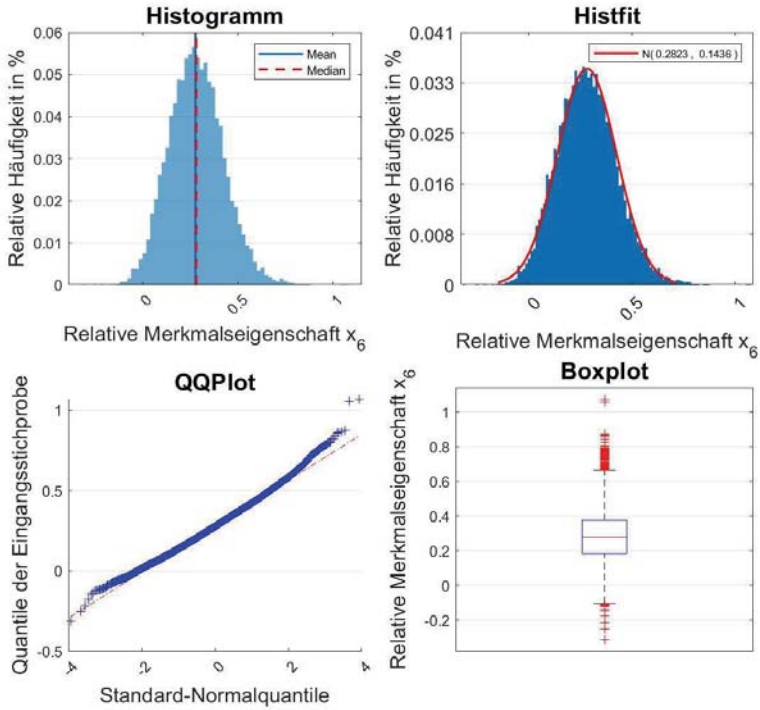


Abbildung 0-5: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_6 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

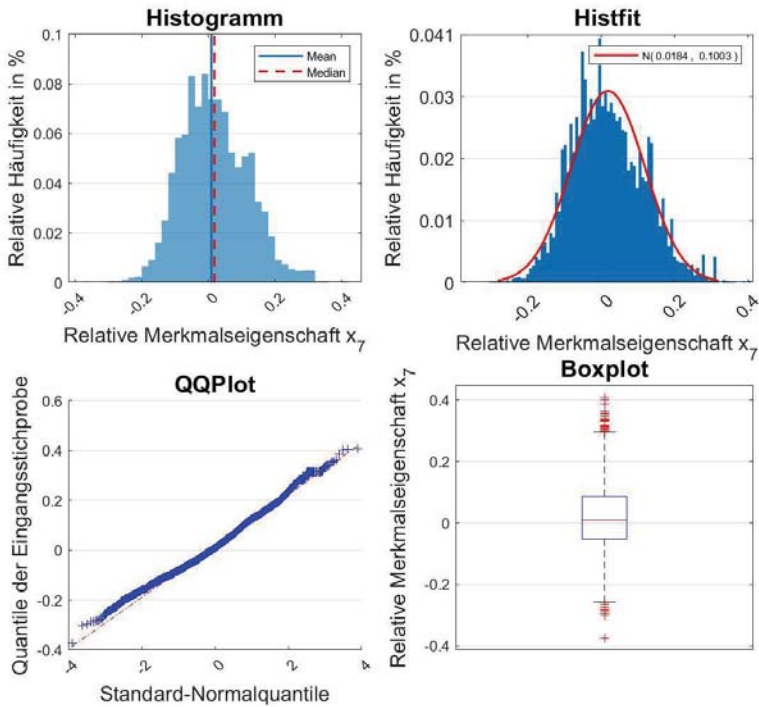


Abbildung 0-6: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_7 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

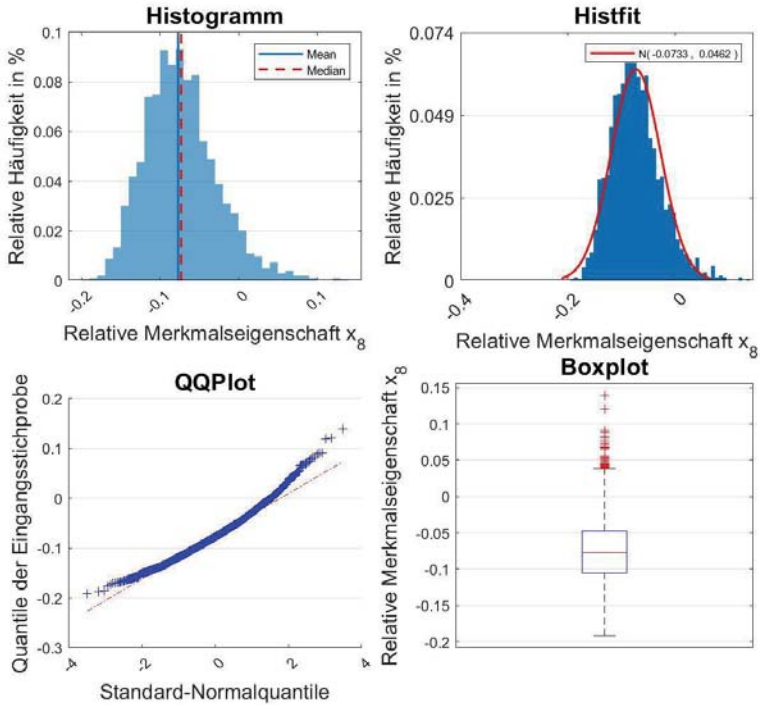


Abbildung 0-7: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_8 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

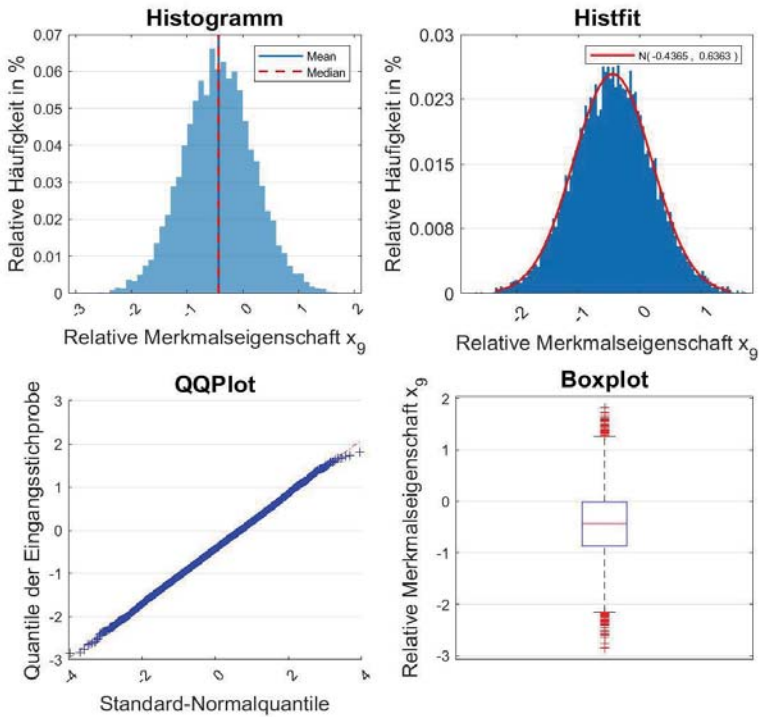


Abbildung 0-8: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_9 : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

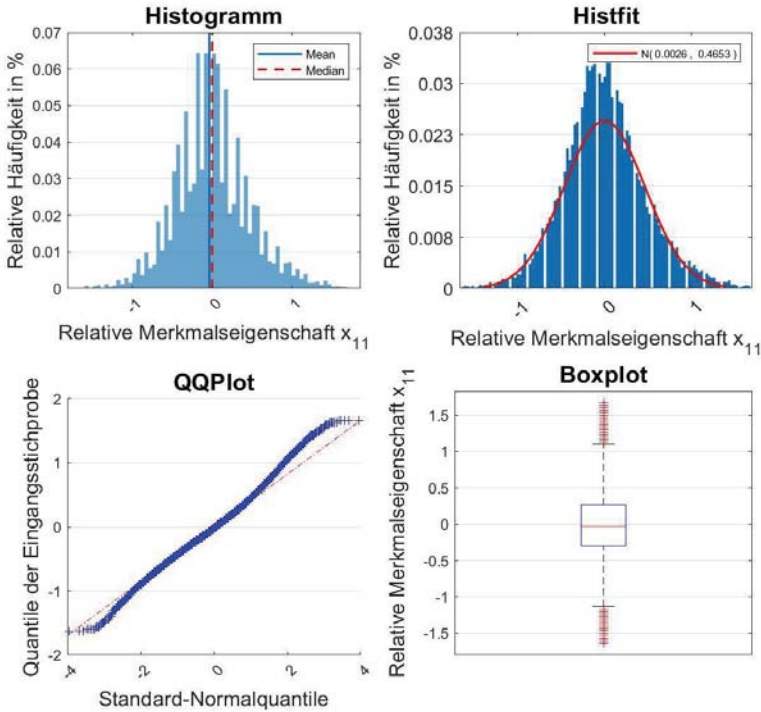


Abbildung 0-9: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{11} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

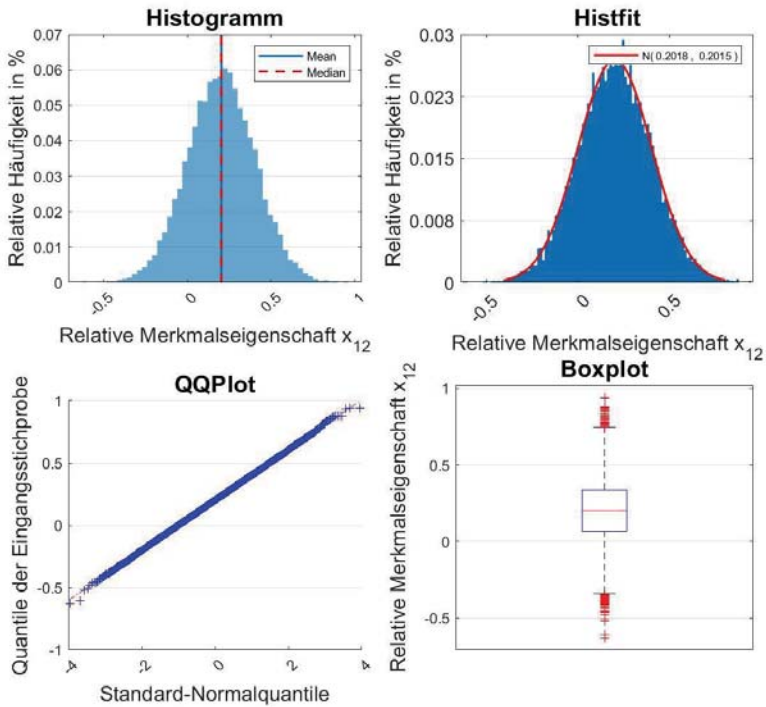


Abbildung 0-10: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{12} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

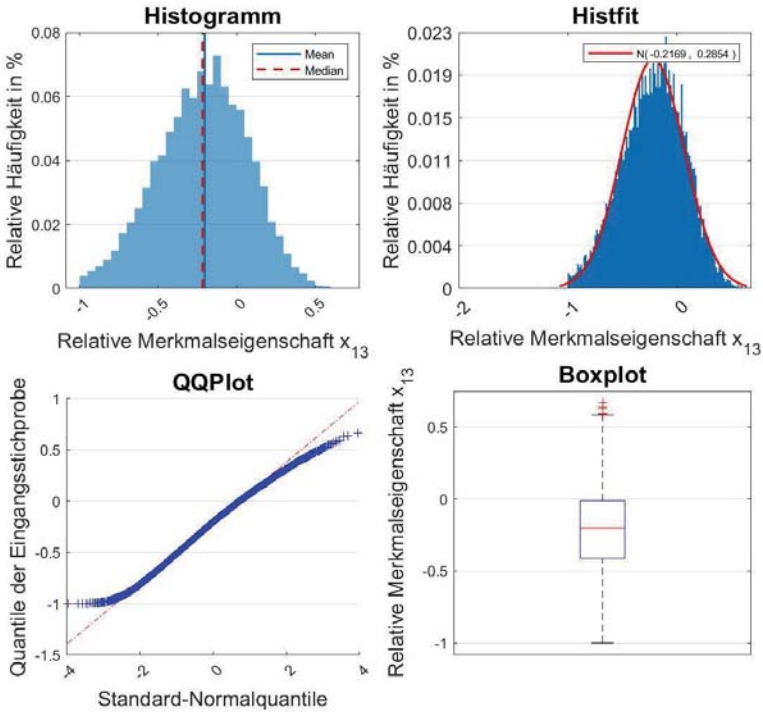


Abbildung 0-11: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{13} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

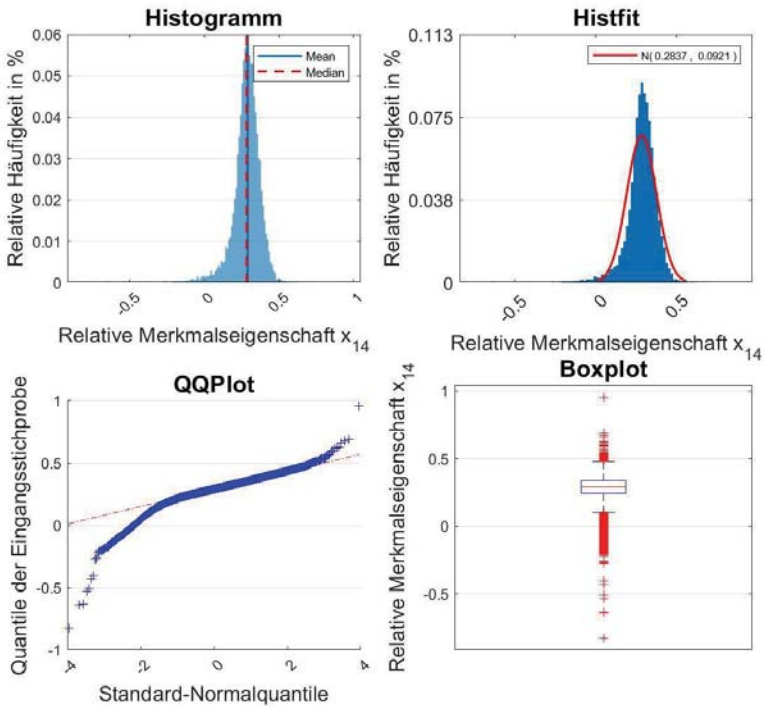


Abbildung 0-12: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{14} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

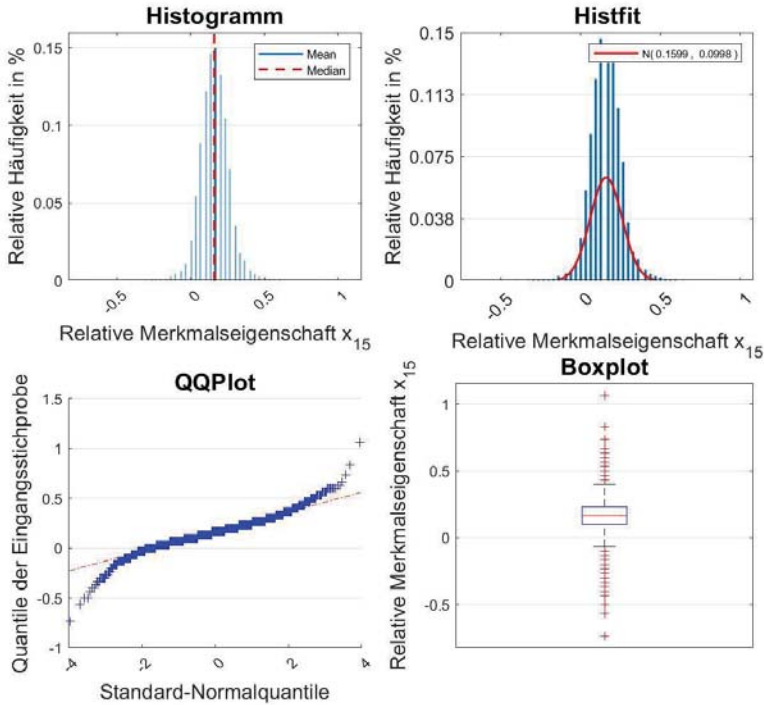


Abbildung 0-13: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{15} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

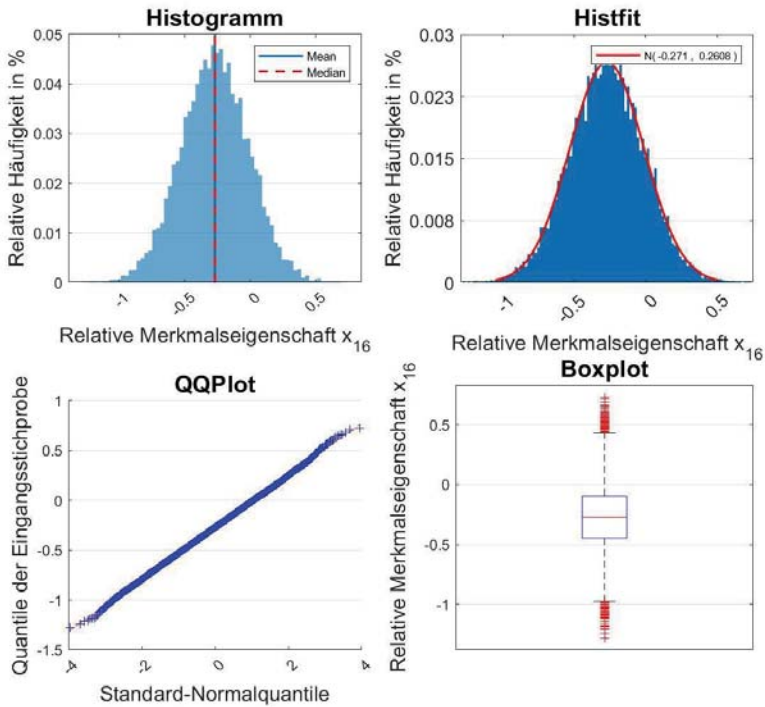


Abbildung 0-14: Grafische Analyse der Produkteigenschaft x_{16} : Histogramm, angepasste Normalverteilung, Q-Q-Plot, Boxplot, Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

A4. Prüfung des Langzeitverhaltens

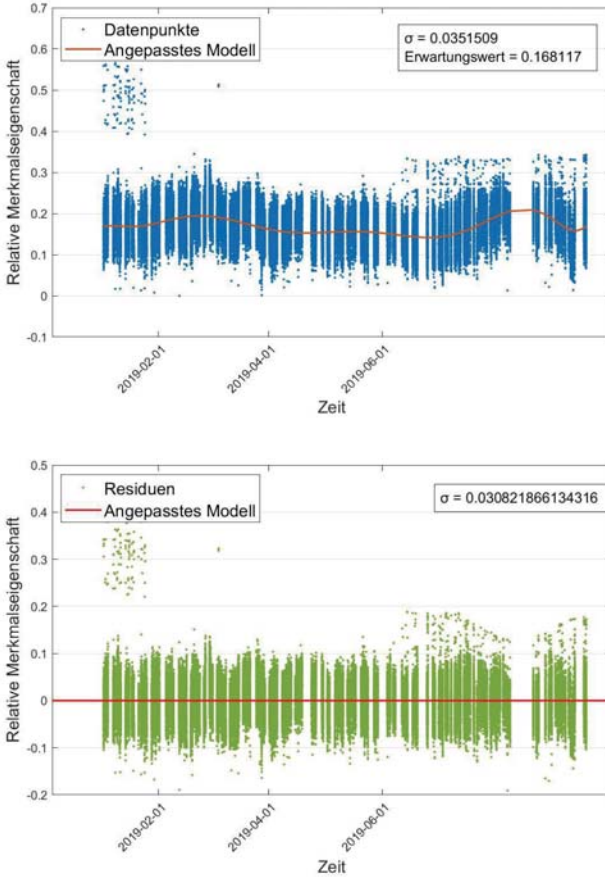


Abbildung 0-15: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_2 , Daten normalisiert auf das Intervall [$USG_{x_i} = -1$, $OSG_{x_i} = +1$] (nach A_Kieninger 2019)

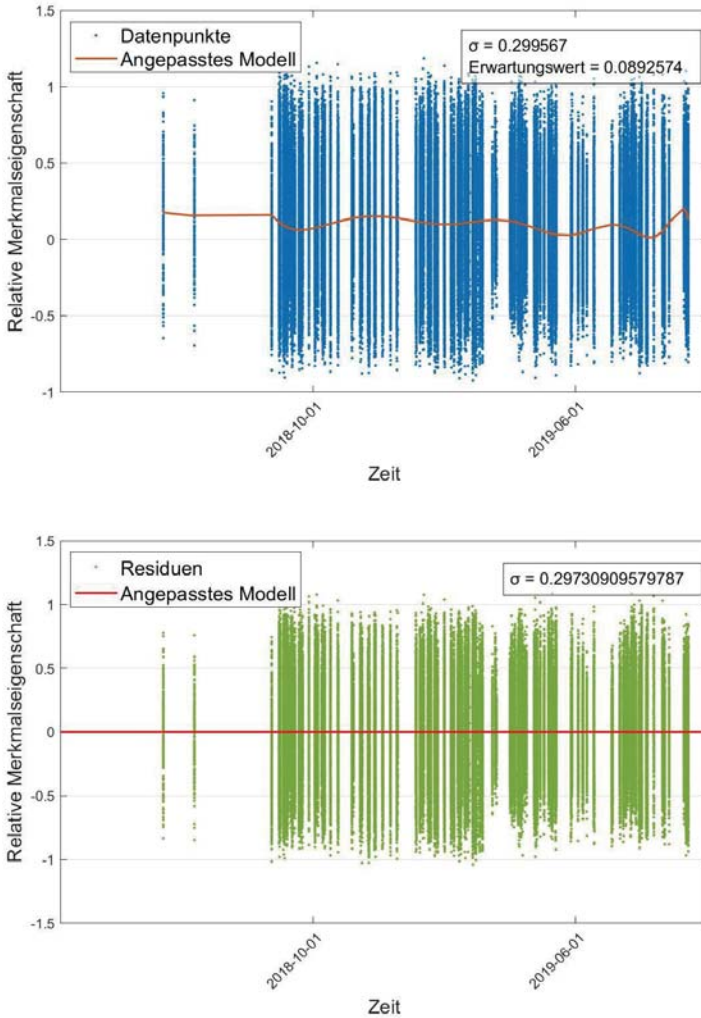


Abbildung 0-16: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_3 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

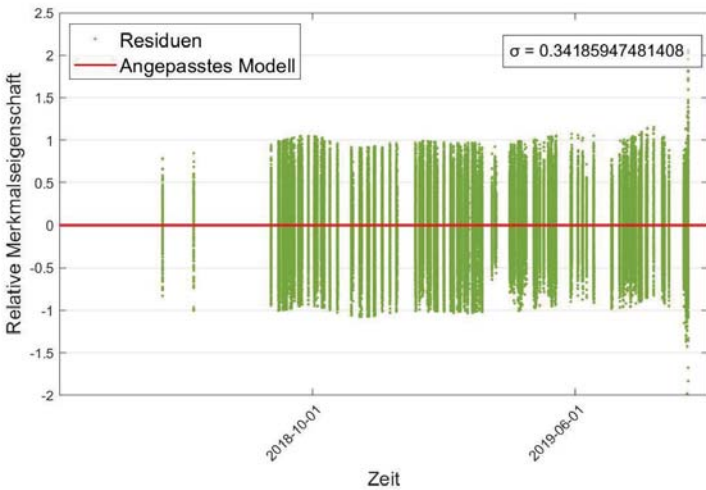
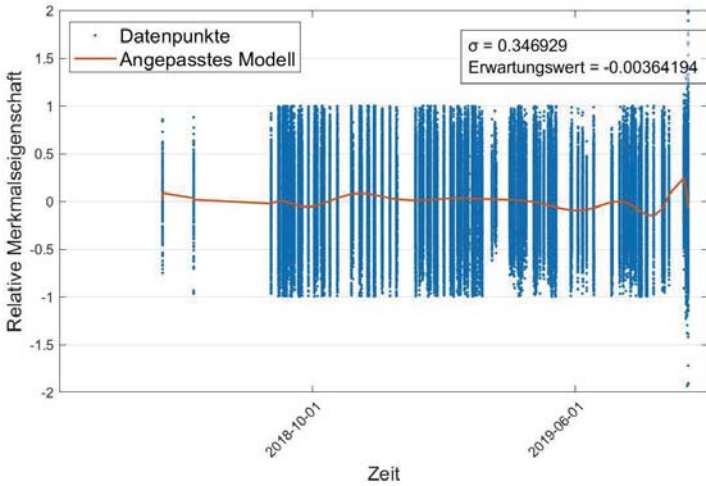


Abbildung 0-17: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_4 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

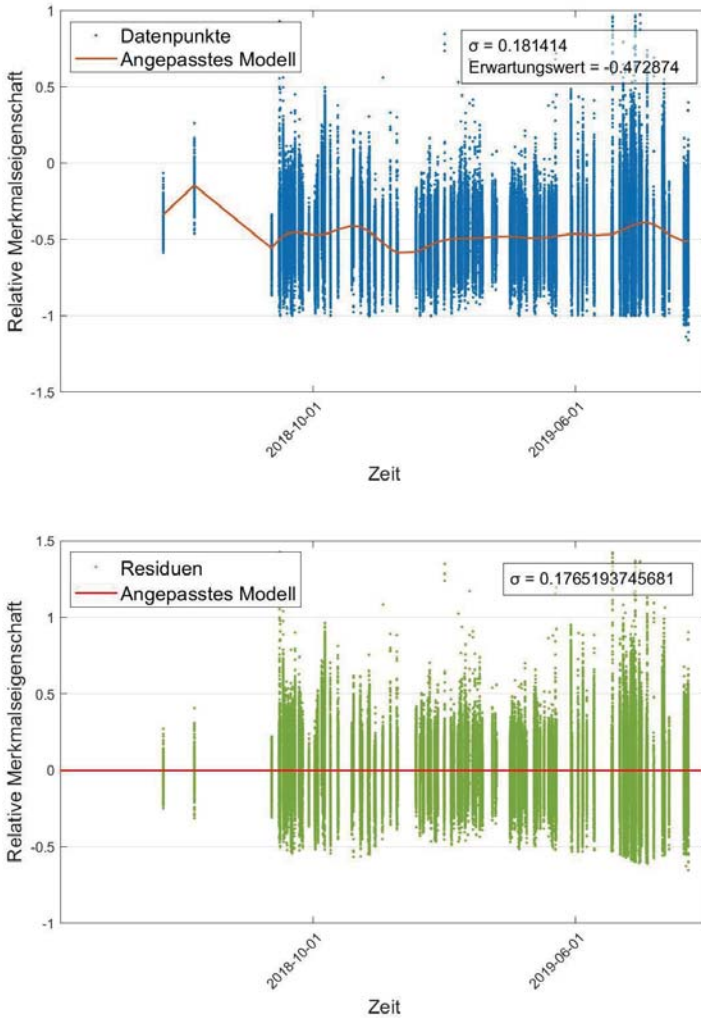


Abbildung 0-18: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_5 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

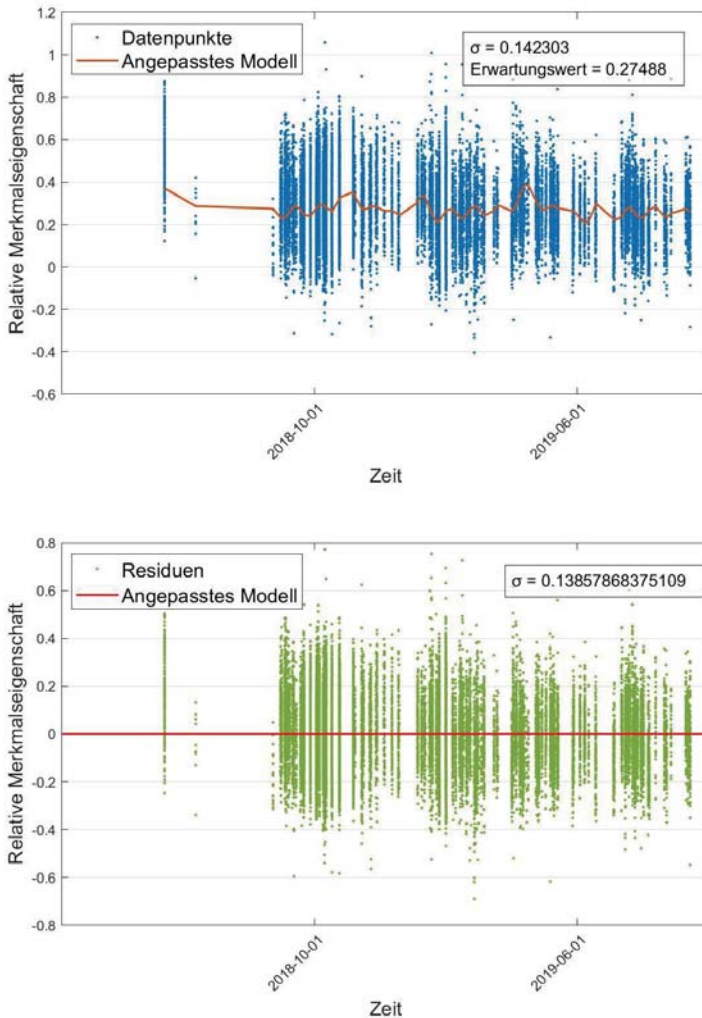


Abbildung 0-19: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_6 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

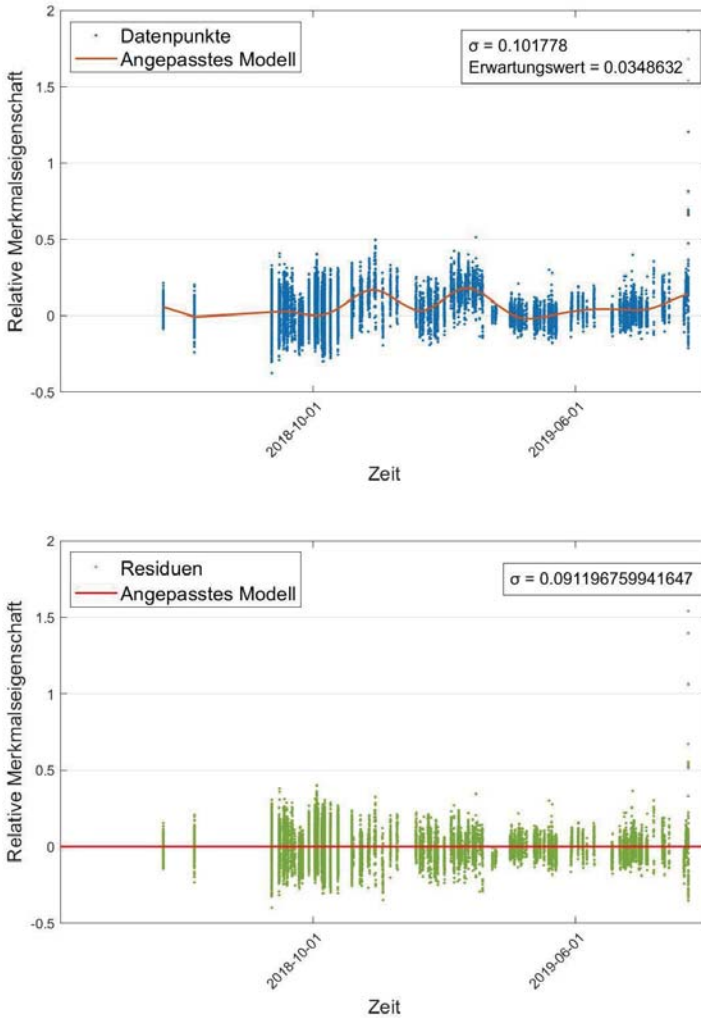


Abbildung 0-20: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_7 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

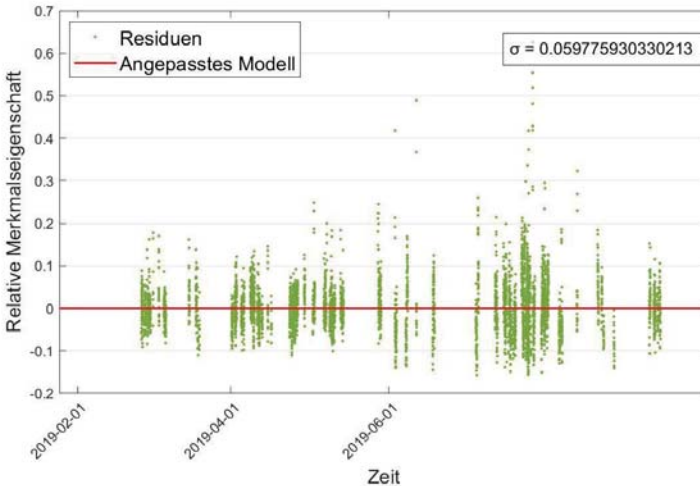
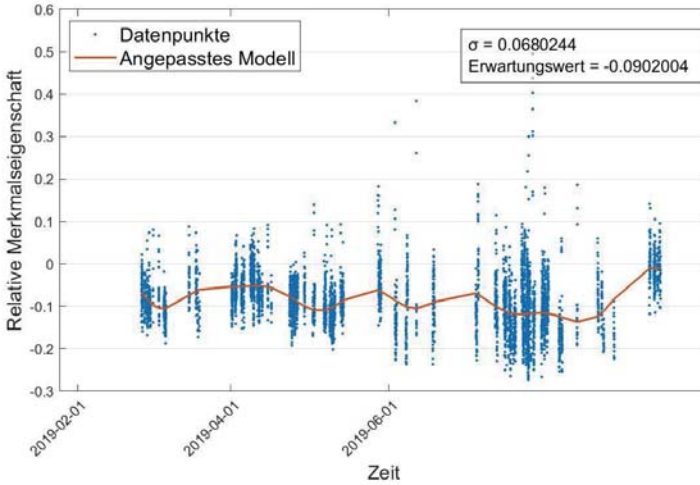


Abbildung 0-21: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_8 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

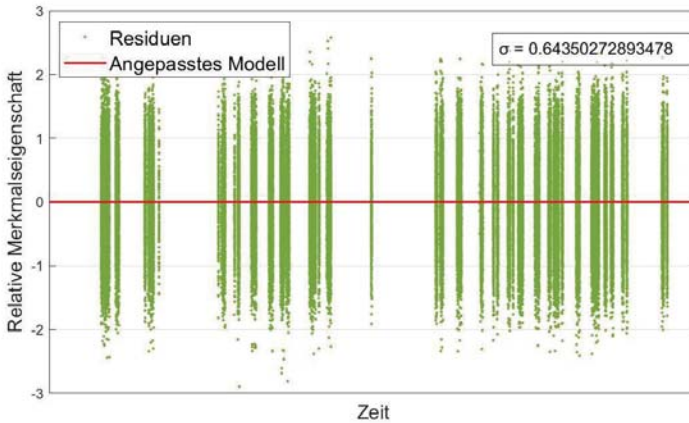
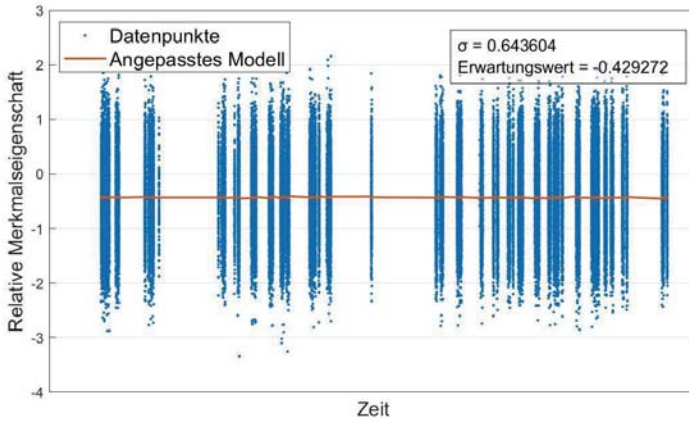


Abbildung 0-22: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_9 , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

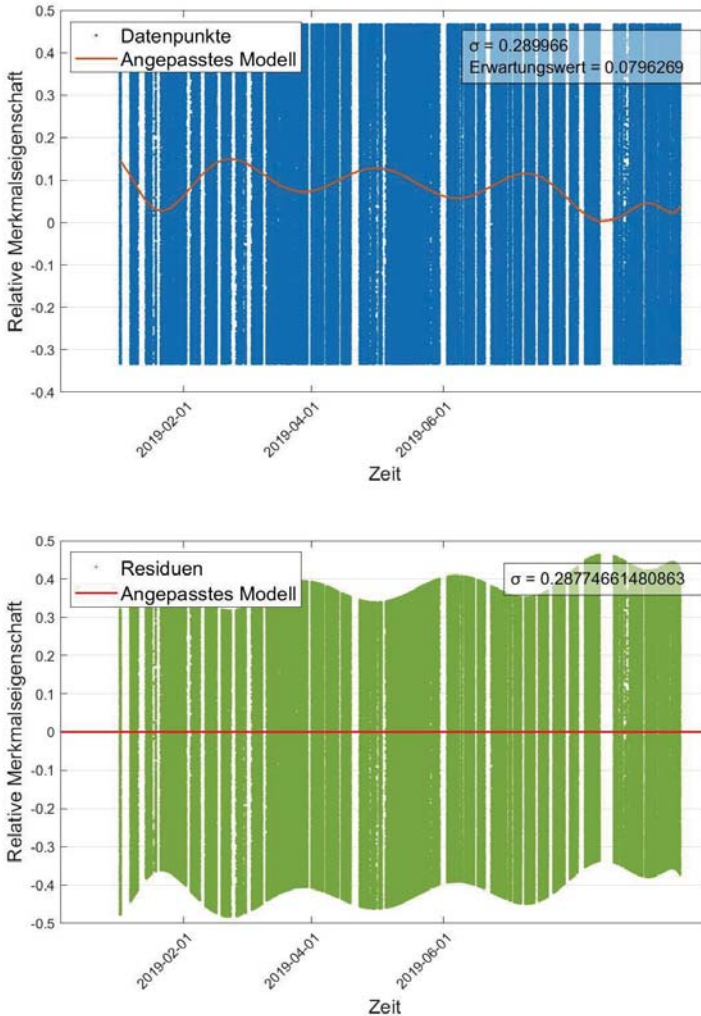


Abbildung 0-23: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{10} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

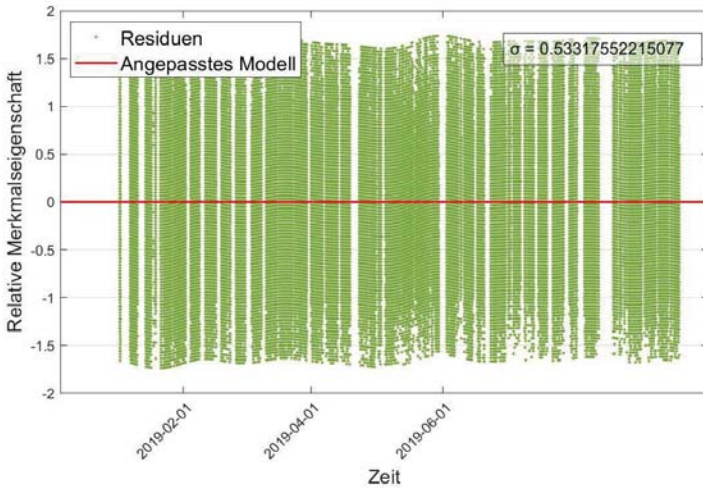
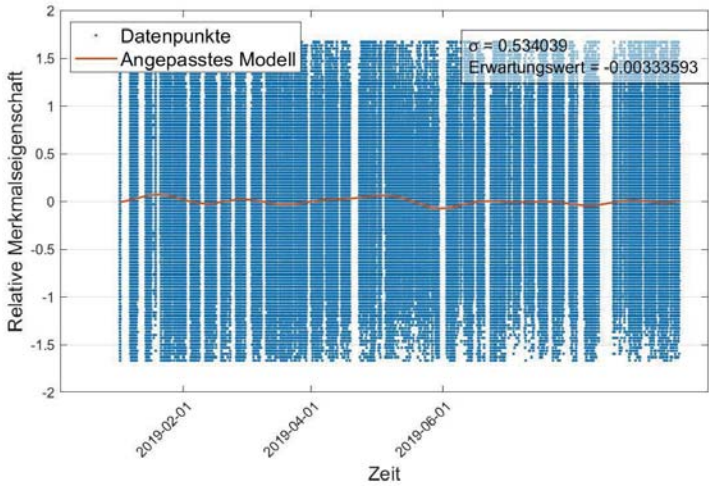


Abbildung 0-24: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{11} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

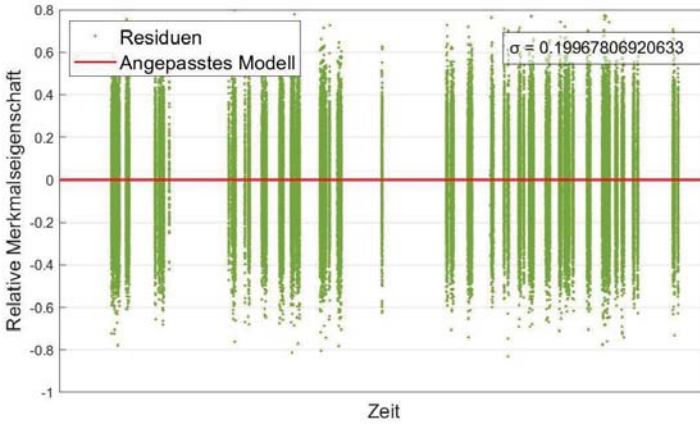
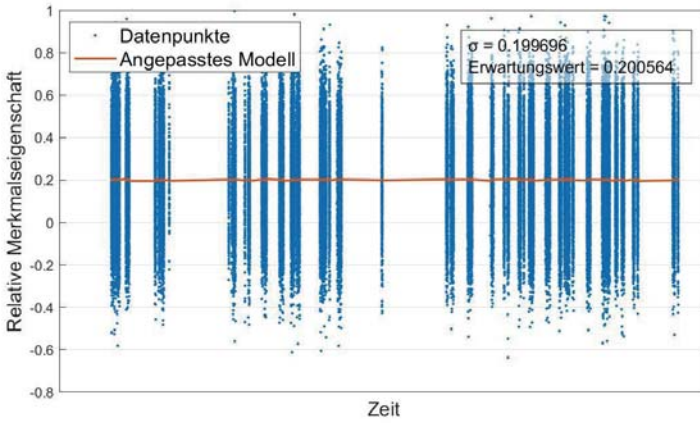


Abbildung 0-25: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{12} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

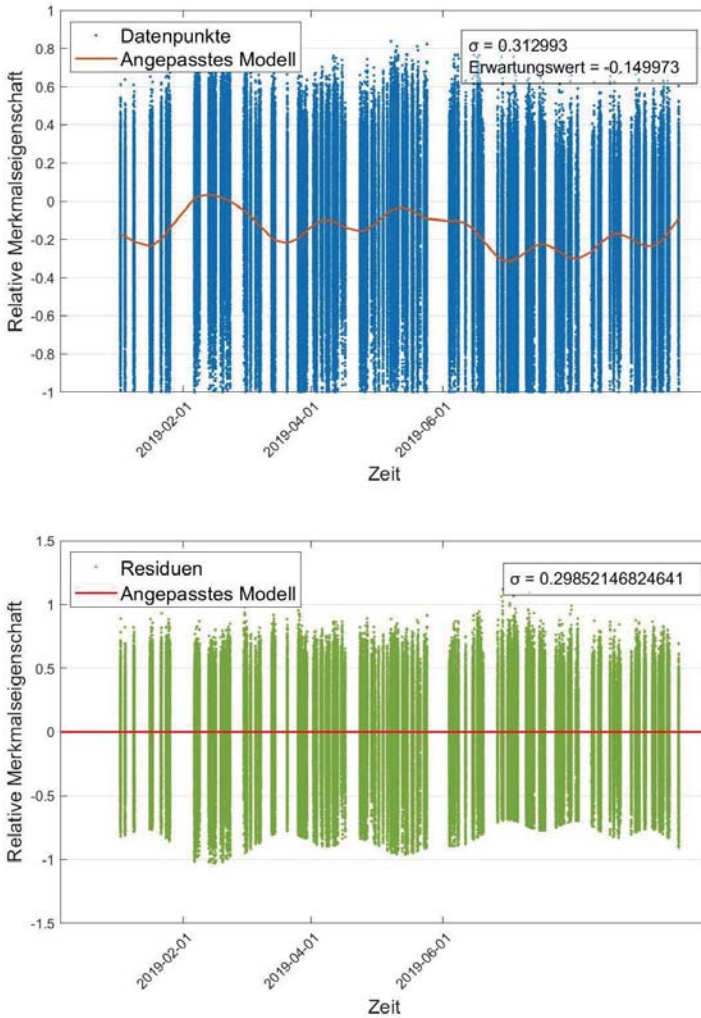


Abbildung 0-26: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{13} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

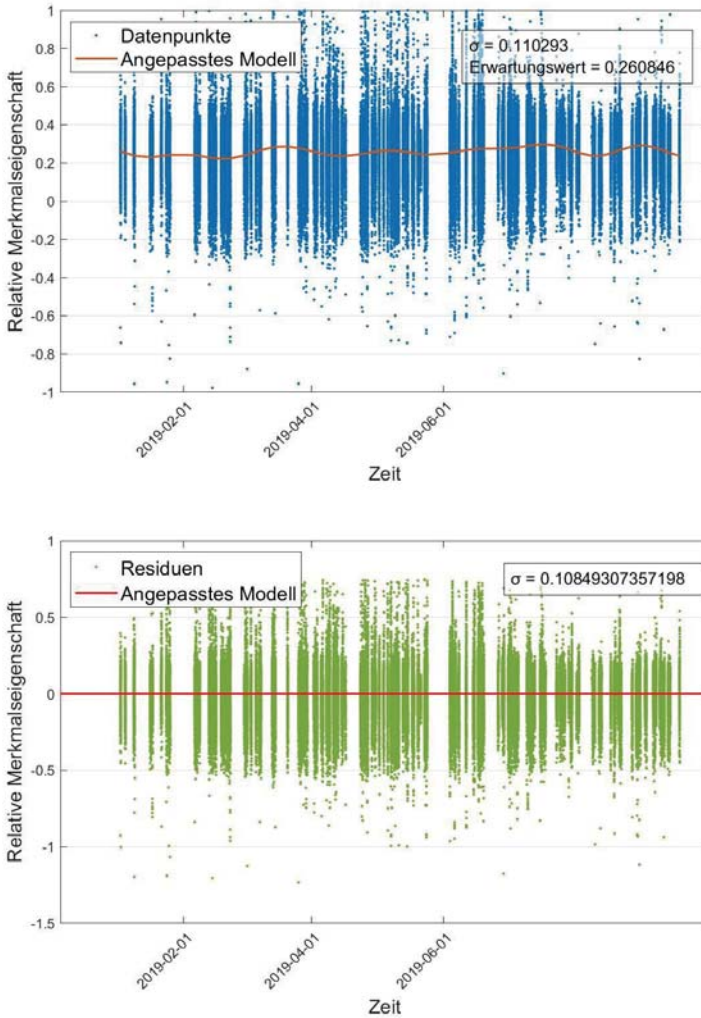


Abbildung 0-27: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{14} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

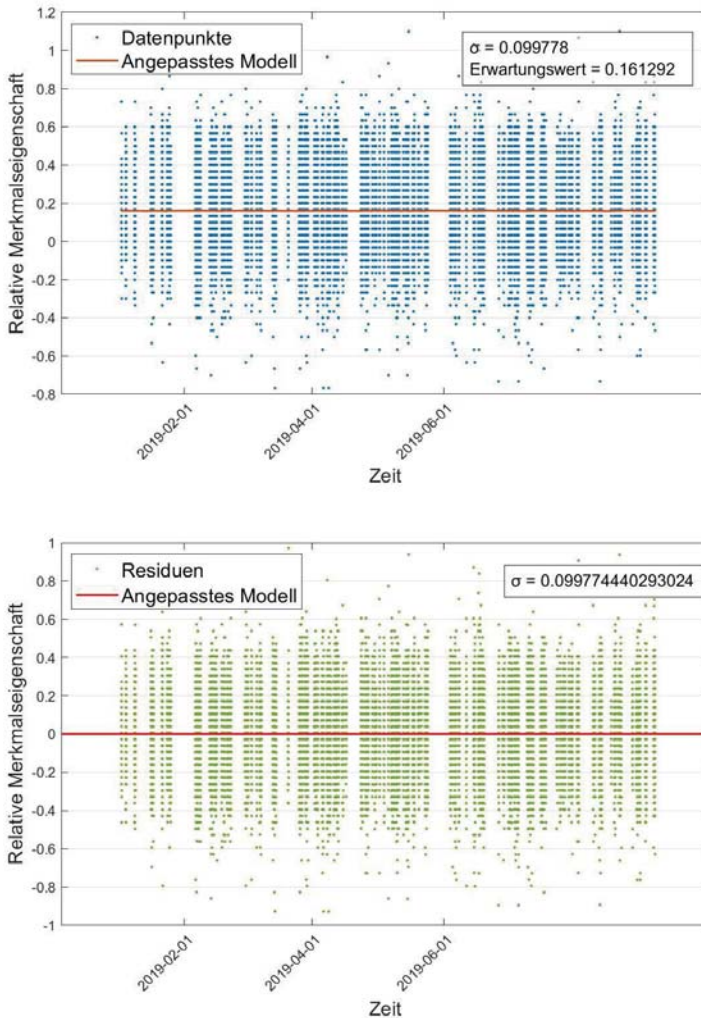


Abbildung 0-28: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{15} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

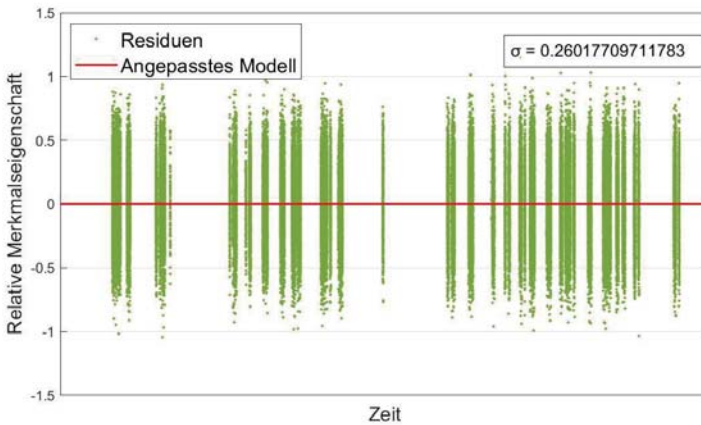
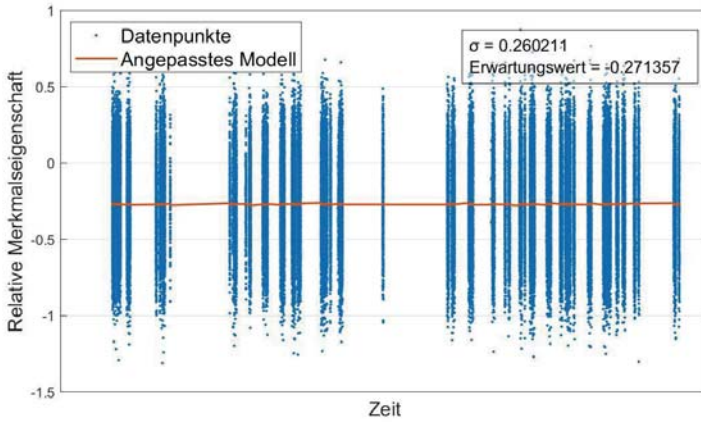


Abbildung 0-29: Analyse der Langzeitschwankung des Prozessmittelwerts in der Fertigung der Produkteigenschaft x_{16} , Daten normalisiert auf das Intervall $[USG_{x_i} = -1, OSG_{x_i} = +1]$ (nach A_Kieninger 2019)

A5. Maßnahmen zur Streuungsreduzierung in der DoE Versuchsdurchführung

Zur Erzeugung einer Datenbasis mit Variation in den identifizierten Einflussgrößen wurde eine Versuchsplanung durchgeführt (siehe Kapitel 6.1.1).

Auf Basis des Versuchsplans wurden die Bauteile **B - G** der Piezo-Injektoren aus den verfügbaren Teilen selektiert, die möglichst den Faktorstufen der Versuchsplanung entsprachen. Die Beschaffung der Bauteile bzw. Baugruppen, mit mehreren Produktmerkmalen bzw. -eigenschaften oder einer geringen temporäre Varianz der Produktmerkmale bzw. -eigenschaften, stellte sich teilweise als schwierig dar. Konnten keine passgenauen Produktmerkmale gefunden bzw. beschafft werden, wurden diese teilweise gezielt Nachgearbeitet.

Nachdem alle Bauteile und Baugruppen beschafft waren, erfolgte die Versuchsdurchführung der $n = 442$ Experimente. Dazu wurden die Piezo-Injektor an einem seriennahen, manuellen Montageplatz aufgebaut. Die Piezo-Injektoren wurden dabei als Kombination der dafür selektierten Bauteil und Baugruppen montiert. Nach erfolgreichem Experiment erfolgte die De-Montage des Piezo-Injektors. Die Bauteile und Baugruppen standen nachfolgend der Re-Montage weiterer Experimente zur Verfügung. Zur Reduzierung auftretender Störgrößen erfolgte eine Ursachen-Wirkungsanalyse (siehe Abbildung 0-30) Als Abhilfemaßnahme wurden Montagevorrichtungen optimiert und eine Standardisierung der De- und Re-Montage durchgeführt, um Einflüsse verschiedener Werker zu reduzieren (siehe Abbildung 0-32).

Die Prüfung der Piezo-Injektoren erfolgte für alle $n = 442$ Experimente an einer vollautomatisierten Serienprüfbank über alle Betriebspunkte q . Zur Reuzierung auftretender Messabweichungen wurde ebenfalls eine Ursachen-Wirkungsanalyse durchgeführt (siehe Abbildung 0-31). Durch die automatisierte Zuführung, Einspannung und Versuchsdurchführung konnte eine hohe Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit bereits sichergestellt werden. Um konstante Umgebungsbedingungen für die Piezo-Injektoren zu schaffen, erfolgte die Temperierung der Produkte nach deren Montage in einem Ölbad für 15 Minuten, sowie das Durchspülen der Piezo-Injektoren mit Kraftstoff auf der Prüfbank für 5 Minuten. In Wiederholmessungen konnte somit wiederholbare Messer-

gebnisse durch eine einheitliche Betriebstemperatur sichergestellt werden. Die gemessene Einspritzmenge y_q wurde als Mittelwert von 25 Wiederholmessungen erhoben, um auftretende Messabweichungen zu kompensieren.

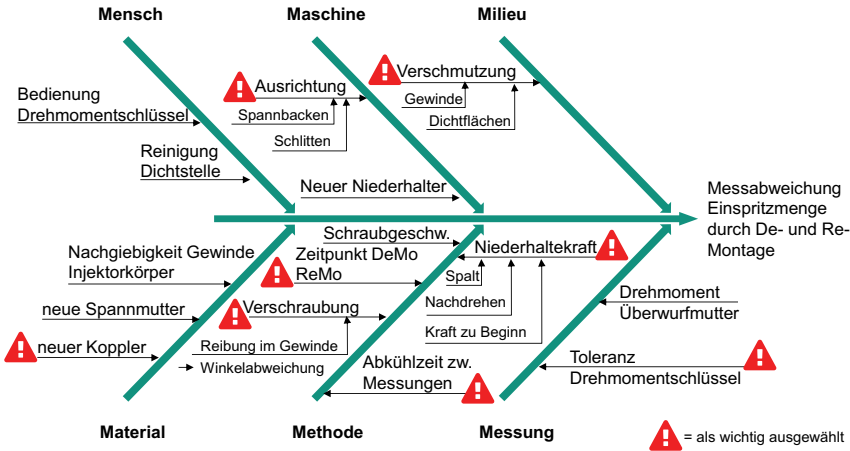


Abbildung 0-30: Ursache-Wirkungsdiagramm zur De- und Re-Montage von Piezo-Injektoren, eigene Darstellung

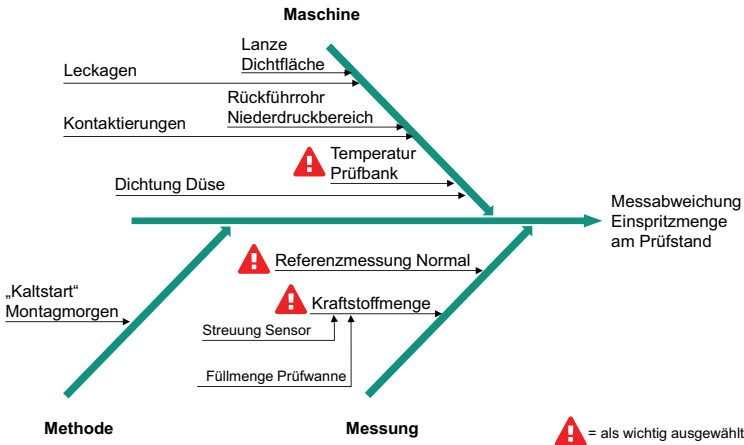


Abbildung 0-31: Ursache-Wirkungsdiagramm zum Messprozess der Piezo-Injektor Funktionsprüfung, eigene Darstellung

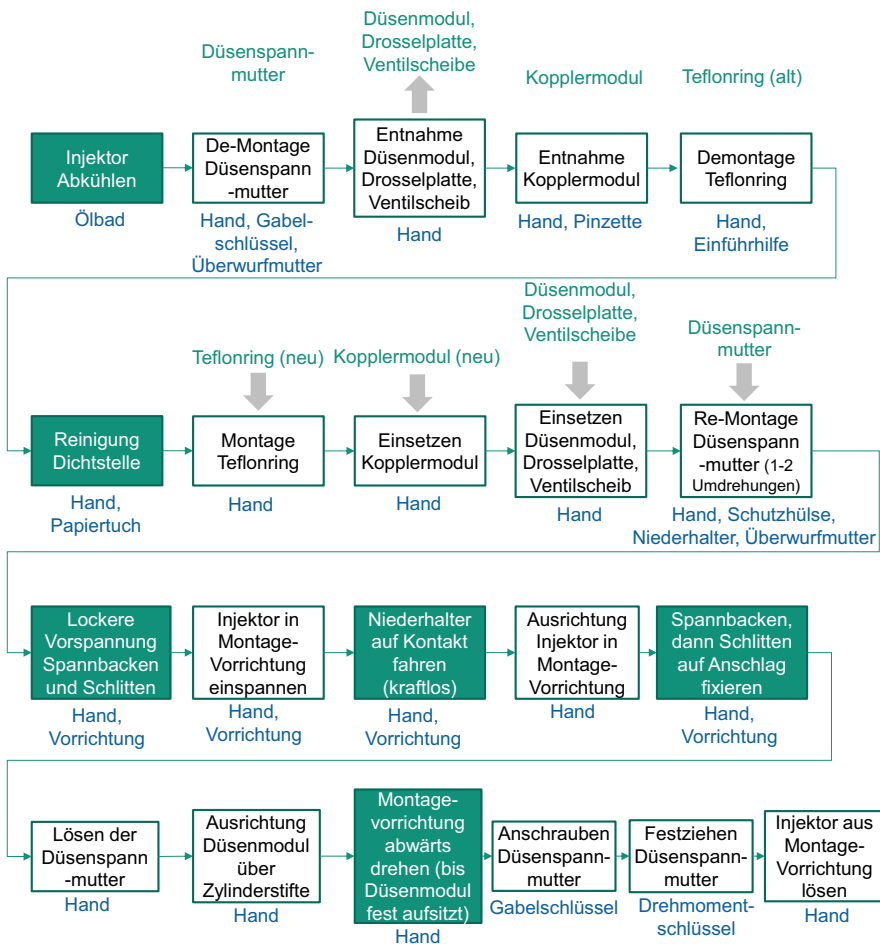


Abbildung 0-32. Standardisierung De- und Re-Montageprozess von Piezo-Injektoren, eigene Darstellung

A6. Prüfung der Linearität des Zusammenhangs

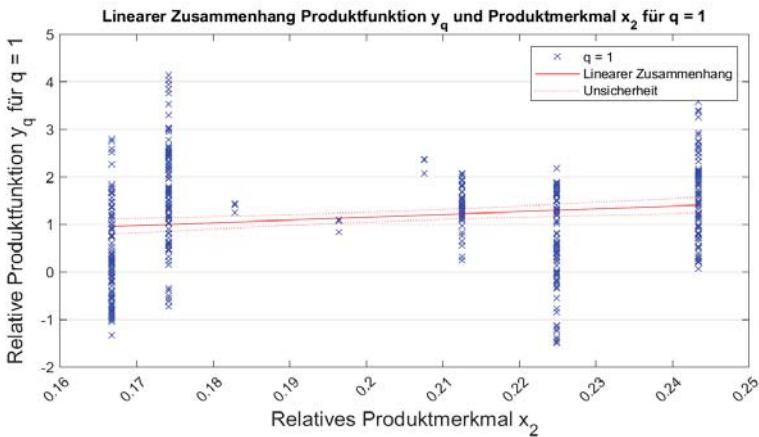


Abbildung 0-33: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_2 (nach A_Kieninger 2019)

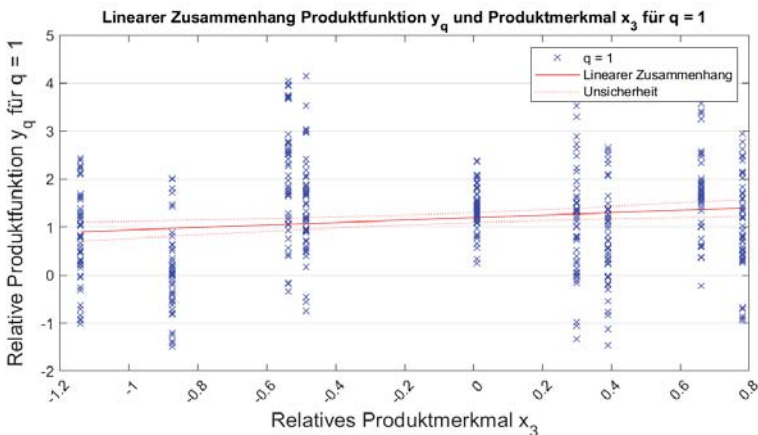


Abbildung 0-34: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_3 (nach A_Kieninger 2019)

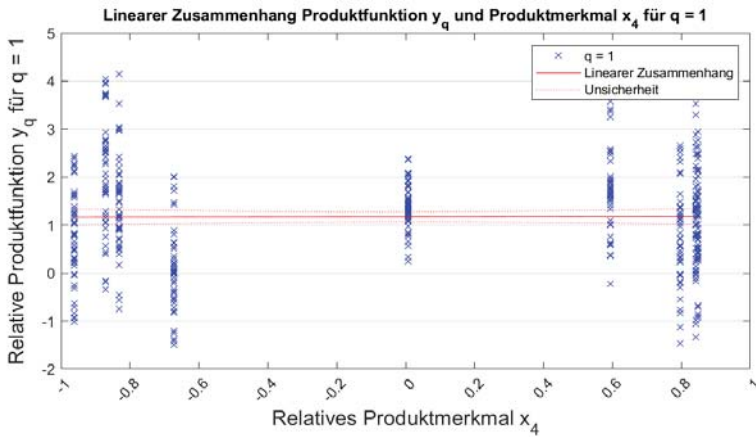


Abbildung 0-35: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_4 (nach A_Kieninger 2019)

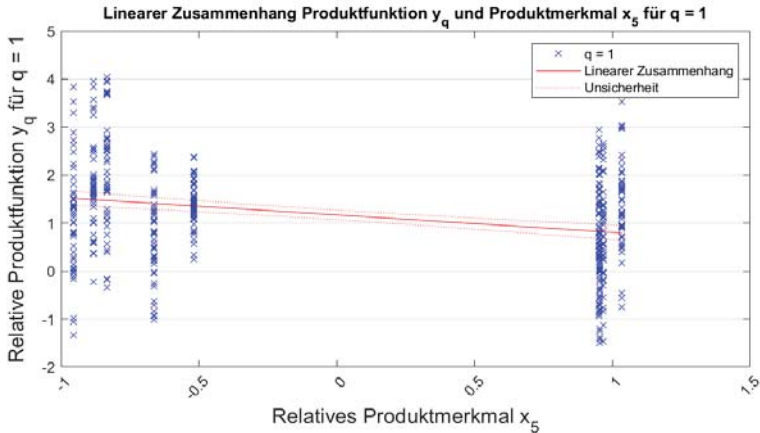


Abbildung 0-36: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_5 (nach A_Kieninger 2019)

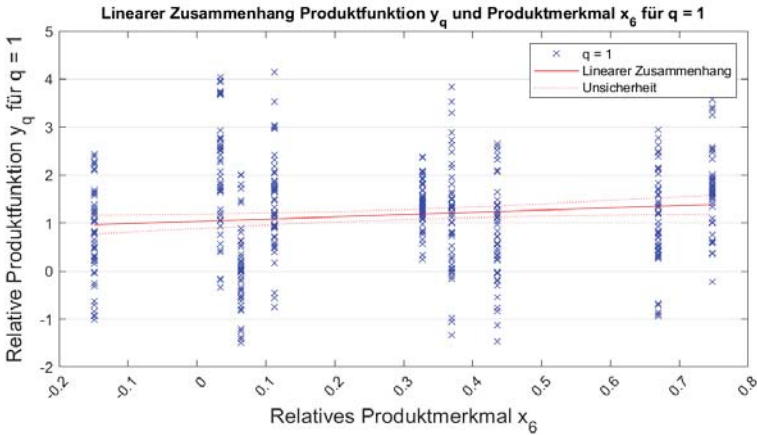


Abbildung 0-37: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_6 (nach A_Kieninger 2019)

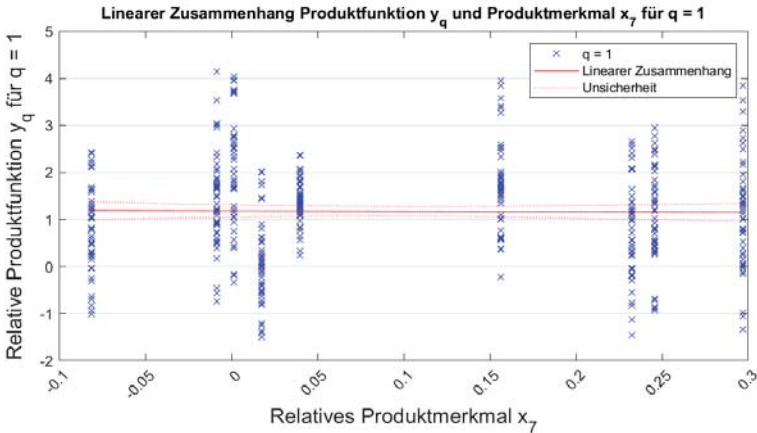


Abbildung 0-38: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_7 (nach A_Kieninger 2019)

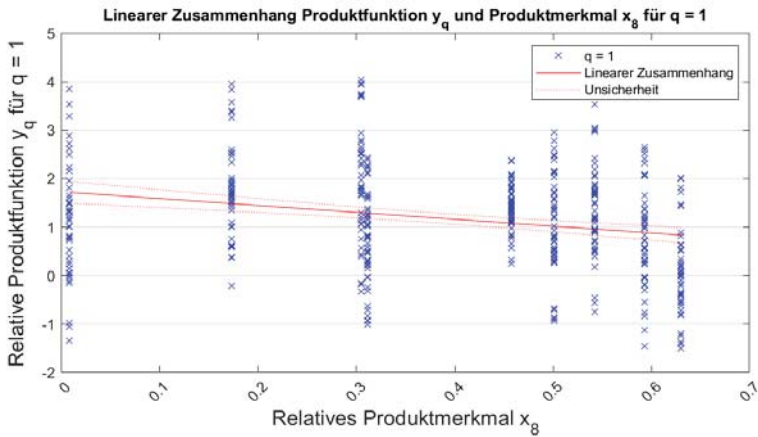


Abbildung 0-39: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_8 (nach A_Kieninger 2019)

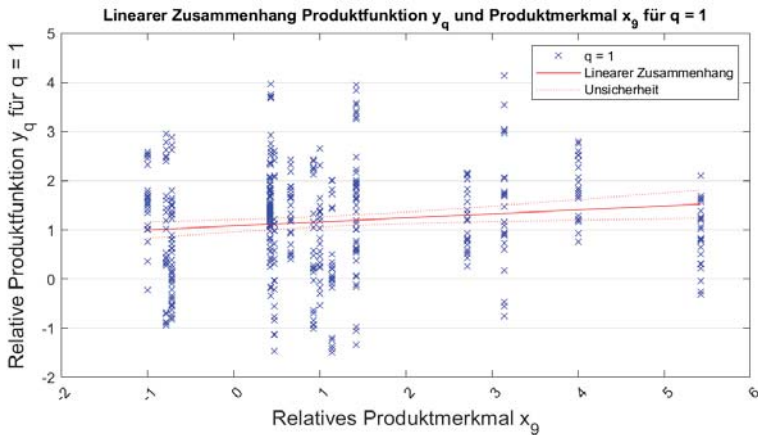


Abbildung 0-40: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_9 (nach A_Kieninger 2019)

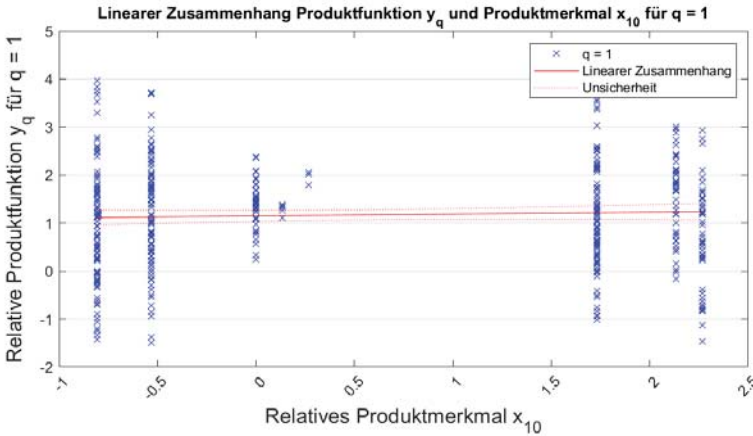


Abbildung 0-41: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{10} (nach A_Kieninger 2019)

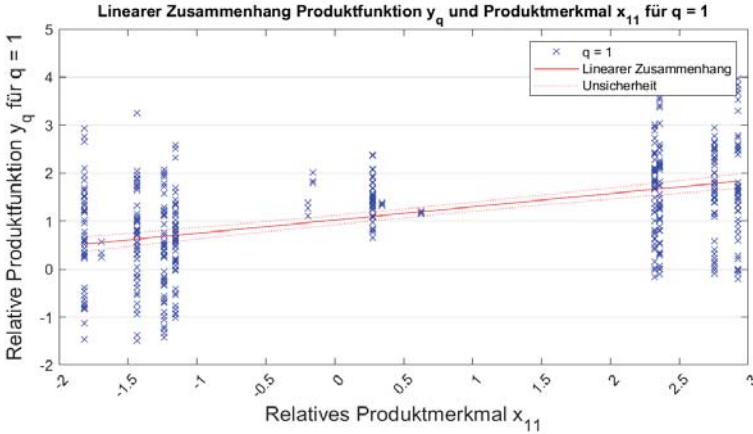


Abbildung 0-42: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{11} (nach A_Kieninger 2019)

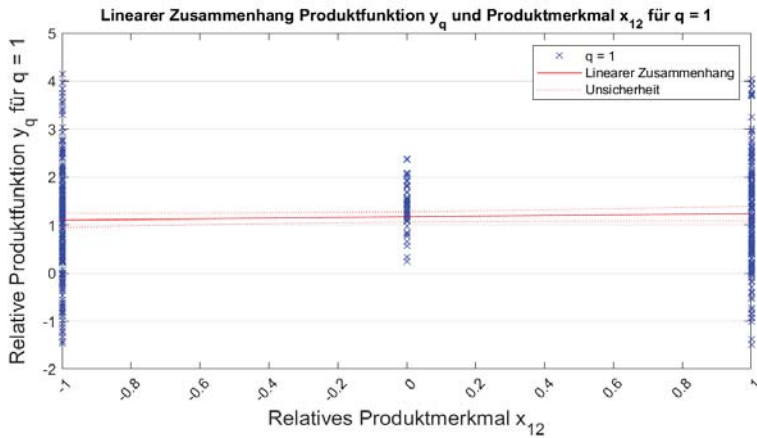


Abbildung 0-43: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{12} (nach A_Kieninger 2019)

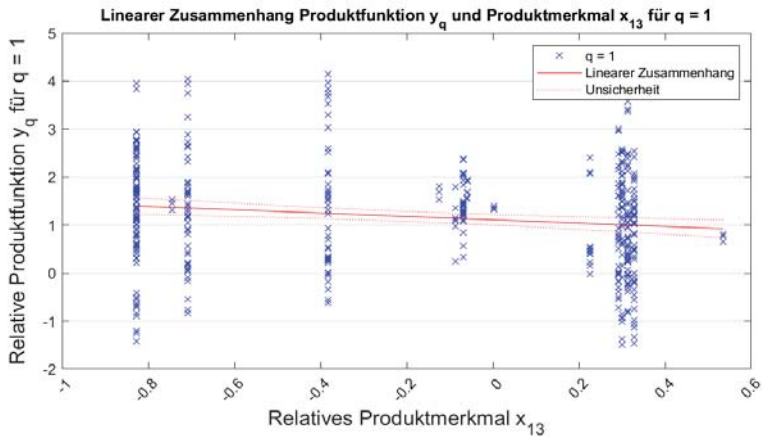


Abbildung 0-44: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{13} (nach A_Kieninger 2019)

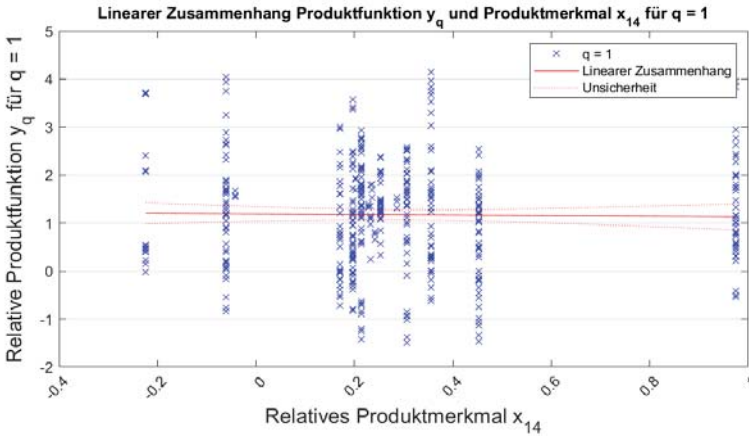


Abbildung 0-45: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{14} (nach A_Kieninger 2019)

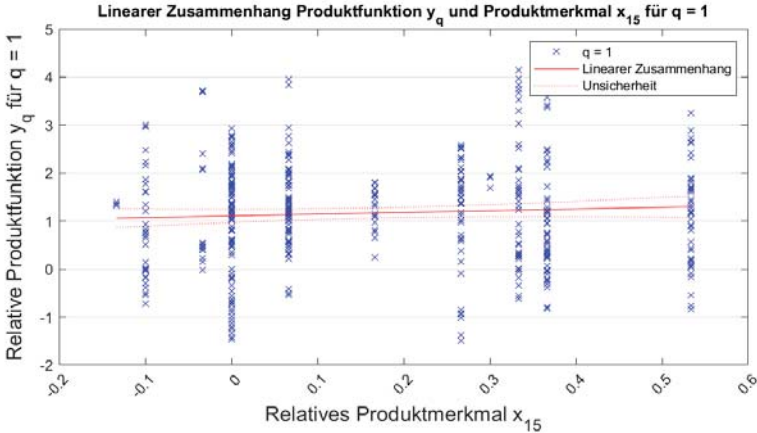


Abbildung 0-46: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{15} (nach A_Kieninger 2019)

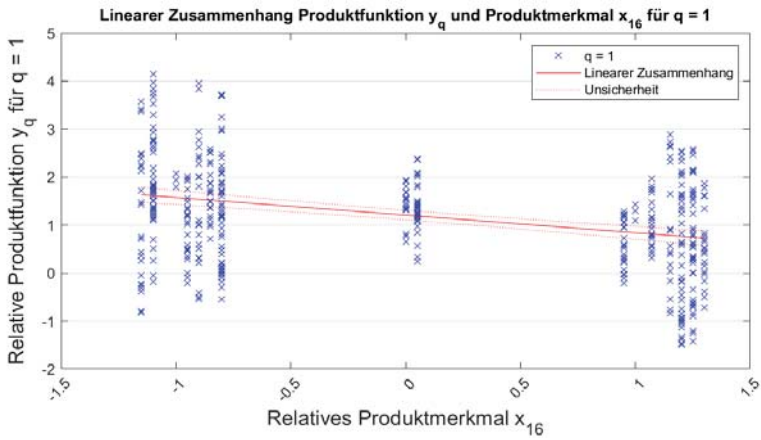


Abbildung 0-47: Grafische Analyse der Linearität des Zusammenhangs zwischen der Produktfunktion im Betriebspunkt $q = 1$ und der Produkteigenschaft x_{16} (nach A_Kieninger 2019)

A7. Prüfung der Homoskedastizität

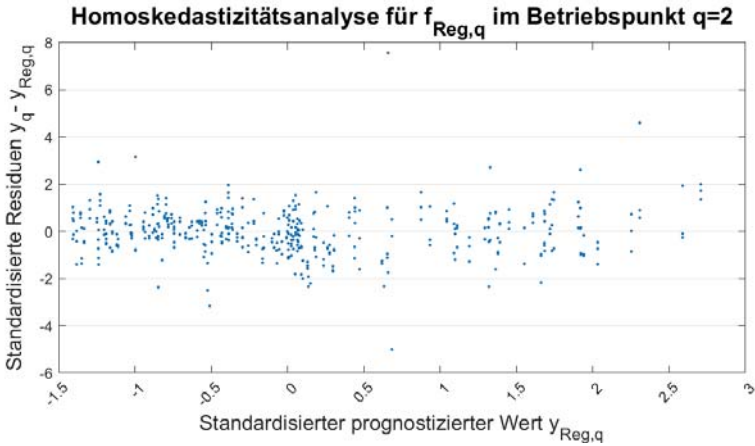


Abbildung 0-48: Grafische Analyse der Homoskedastizität der multiplen, linearen Regression $f_{\text{Reg},q}$ im Betriebspunkt $q = 2$ (nach A_Kieninger 2019)

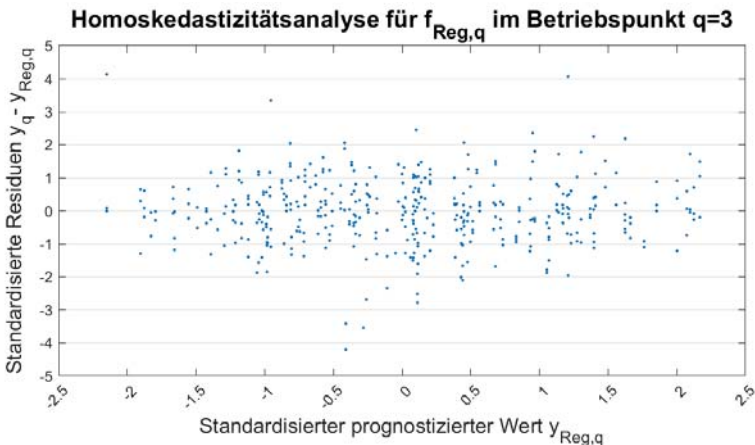


Abbildung 0-49: Grafische Analyse der Homoskedastizität der multiplen, linearen Regression $f_{\text{Reg},q}$ im Betriebspunkt $q = 3$ (nach A_Kieninger 2019)

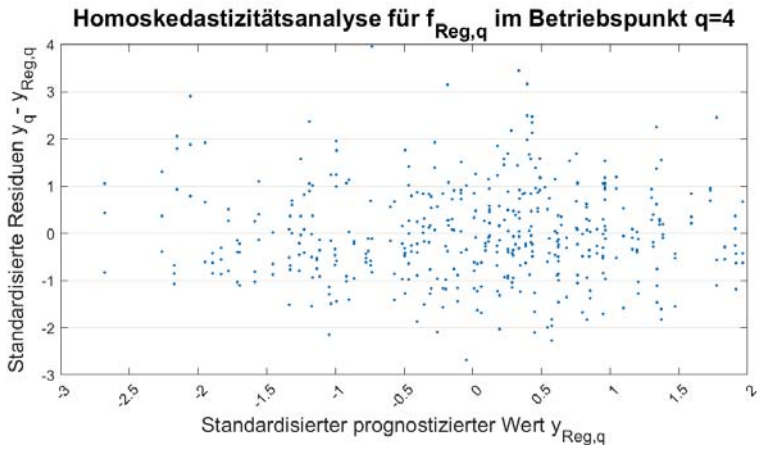


Abbildung 0-50: Grafische Analyse der Homoskedastizität der multiplen, linearen Regression $f_{\text{Reg},q}$ im Betriebspunkt $q = 4$ (nach A_Kieninger 2019)

A8. Anpassung Zustandsraummodell des Piezo-Injektors

Anpassung der Düsenadelgeometrie

Mit der Nachfolgeversion des Piezo-Injektors wurde die Düsenadelgeometrie verändert. Im Gegensatz zum Vorgängermodell ähnelt der Querschnitt der Nadel einem Dreieck mit, durch einen Kreis beschnittenen, abgerundeten Ecken. Innerhalb des Bereichs mit dieser Querschnittsfläche sind keine weiteren Abstufungen des effektiven Radius vorhanden (siehe Abbildung 0-51). Durch diese Form ergibt sich eine hydraulisch wirksame Fläche, welche sich in eine relativ kleine Fläche am oberen Ende der Nadel (rot) und einer relativ großen Fläche im unteren Bereich der Nadel (grün) aufteilt. An der Spitze der Nadel befindet sich eine konisch verlaufende Fläche (lila), welche direkt auf dem Nadelkörper aufliegt. Diese Fläche wird erst mit dem Kraftstoffdruck beaufschlagt, sobald sich die Nadel gehoben hat und Kraftstoff zwischen Nadel und Nadelkörper gelangt. Für die initiale Bewegung der Nadel trägt dieser Bereich keine Kräfte bei. Am Ende der Nadel befindet sich eine weitere Fläche (blau), welche bei geschlossener Nadel nur mit dem Sacklochdruck beaufschlagt wird.

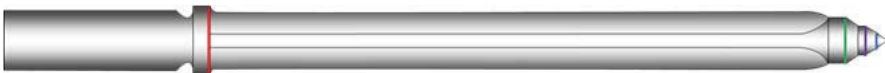


Abbildung 0-51: Düsenadelgeometrie der Nachfolgevariante, qualitative Darstellung (nach A_Wannenwetsch 2018)

Aufgrund der veränderten Querschnittsfläche der Nadel ergibt sich ein höheres Volumen zwischen Nadel und Nadelkörper, sodass der Kraftstoff mit geringerem hydraulischen Widerstand von der oberen Zustellkammer in die untere Zustellkammer fließen kann. Daher wurde diese zu einem gemeinsamen Volumen zusammengefasst (siehe Abbildung 0-52). Das Zustandsraummodell wurde daraufhin im mechanischen Teil (rot) die hydraulisch wirksame Fläche der Düsenadel abgepasst und im hydraulischen Teil (blau) die obere und untere Zustellkammer zu einem gemeinsamen Volumen zusammengefasst.

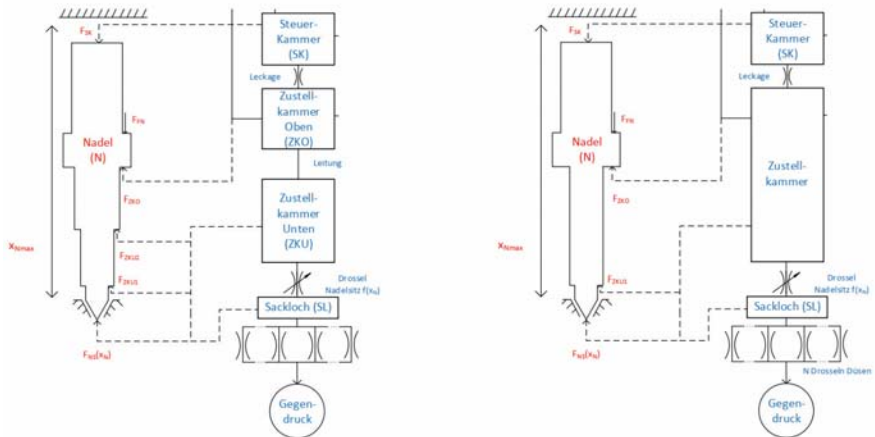


Abbildung 0-52: Änderungen der Systemzustandssimulation im mechanischen Bereich, links Modellierung des Vorgängerproduktes, rechts Modellierung des Nachfolgerproduktes (aktuell) im Düsenmodul (nach A_Wannenwetsch 2018)

Integration von Fülldrossel und Bypass

In der Vorgängerversion des Piezo-Injektors liegt zwischen der Zustellkammer und der Kammer des Steuerventils ein Bypass. Ist das Ventil geschlossen liegt der Bypass frei und der Kraftstoff kann von der Zustellkammer in die Kammer des Steuerventils fließen. Wird das Ventil geöffnet, verschließt das Steuerventil die obere Öffnung des Bypasses und es kann kein Kraftstoff in die Kammer des Steuerventils fließen. Bei der Nachfolgerversion wird dieser Bypass durch die sogenannte Fülldrossel ersetzt. Diese bleibt immer durchlässig und führt dazu, dass der hohe Druck in der Kammer des Steuerventils beim Schließen des Ventils schneller wieder aufgebaut werden kann. Damit ist es möglich, dass der Druck in der Steuerkammer schneller steigt und der Schließvorgang der Nadel rascher abgeschlossen werden kann. Außerdem kann die Kraft, welche auf das Steuerventil wirkt, stark reduziert werden, da dieses nur noch mit dem niedrigen Rücklaufdruck beaufschlagt wird. (Tschöke, Mollenhauer & Maier 2018) Um diese Änderung zu realisieren wurde die Dichthülse eingeführt. Zwischen dieser und dem Steuerventil besteht eine Leckagestelle, die mit dem Rücklauf verbunden ist. Ein Nebeneffekt der Fülldrossel ist, dass beim Öffnen des Steuerventils der Druck langsamer abfällt, da weiterhin Kraftstoff durch die Fülldrossel in die Kammer des Steuerventils fließt (siehe Abbildung 0-53).

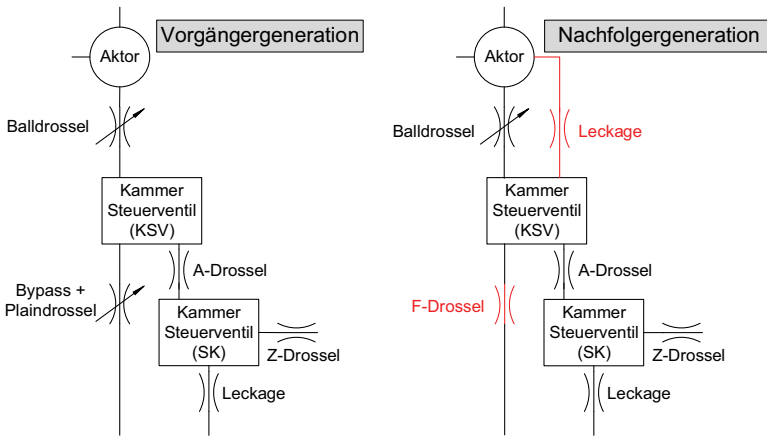


Abbildung 0-53: Änderungen der Zustandsraummodells im hydraulischen Bereich, links Modellierung des Vorgängerproduktes, rechts Modellierung des Nachfolgerproduktes (aktuell) im Servoventil (nach A_Wannenwetsch 2018)

In der Modellierung wurde die Änderung von Bypass zu Fülldrossel umgesetzt, indem die Modellierung des Bypasses durch die Standardmodellierung der Drosseln ersetzt wurde. Somit wird die zeitweise auftretende Kavitation im Strömungsverlustwert (C_d -Wert) berücksichtigt. Der Durchfluss für die Drosseln berechnet sich wie folgt:

$$Q = C_d * A * \text{sign}(p - p_v) * \sqrt{\frac{2 * |p - p_v|}{\rho}} \tag{Formel 0-7}$$

Für die Modellierung der zusätzlichen Leckage wurde ein neuer Baustein äquivalent zur Leckage zwischen Steuerkammer und Zustellkammer implementiert. Der Abfluss der Leckage wurde mit dem Niederdruckbereich im Aktor verbunden. Obwohl das Steuerventil nach unten hin leicht konisch verläuft, wird hier ein konstanter Radius für den Freiraum der Leckagestelle gewählt. Ebenso wird eine feste Länge der Leckagestelle angenommen, obwohl sich das Steuerventil bewegt und damit die Länge der Leckagestelle variiert. Diese Vereinfachung ist aufgrund der marginalen Auswirkungen von $0,898 * 10^{-3} \%$ auf die Leckagemenge vertretbar. Damit ergibt sich für die Leckage folgende Formel (Salvador et al. 2014):

$$Q = (p - p_v) * \frac{\pi * d * r^3}{12 * v * \rho * l} \tag{Formel 0-8}$$

A9. Schrittweisenanalyse der zeitlichen Diskretisierung

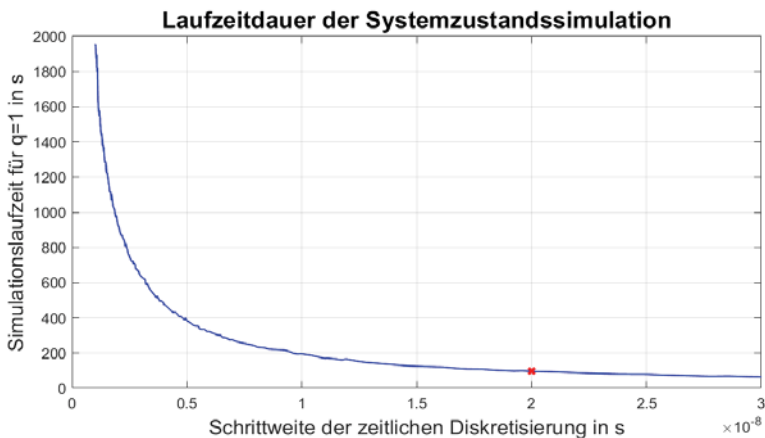


Abbildung 0-54: Laufzeitdauer der Systemzustandssimulation in Abhängigkeit der Schrittweite zur zeitlichen Diskretisierung für Betriebspunkt $q = 1$ in Simulationsumgebung MATLAB© Simulink, auf Desktop PC (nach A_Quasnitza 2019)

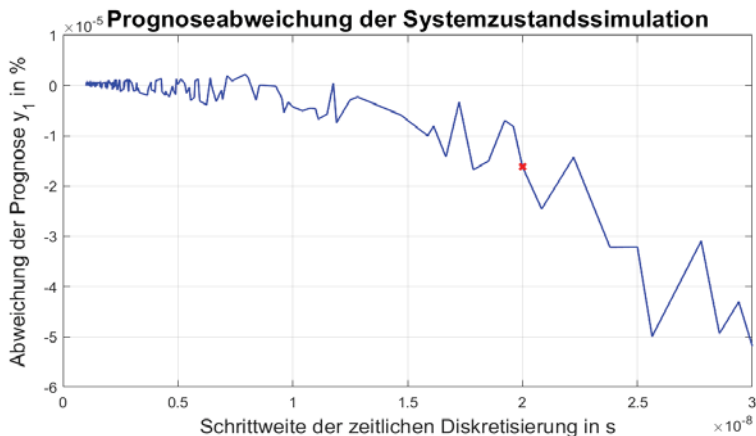


Abbildung 0-55: Prognoseabweichung der Systemzustandssimulation in Abhängigkeit der Schrittweite zur zeitlichen Diskretisierung für Betriebspunkt $q = 1$ in der Simulationsumgebung MATLAB© Simulink (nach A_Quasnitza 2019)

A10. Statistisches Kalibrierungsverfahren

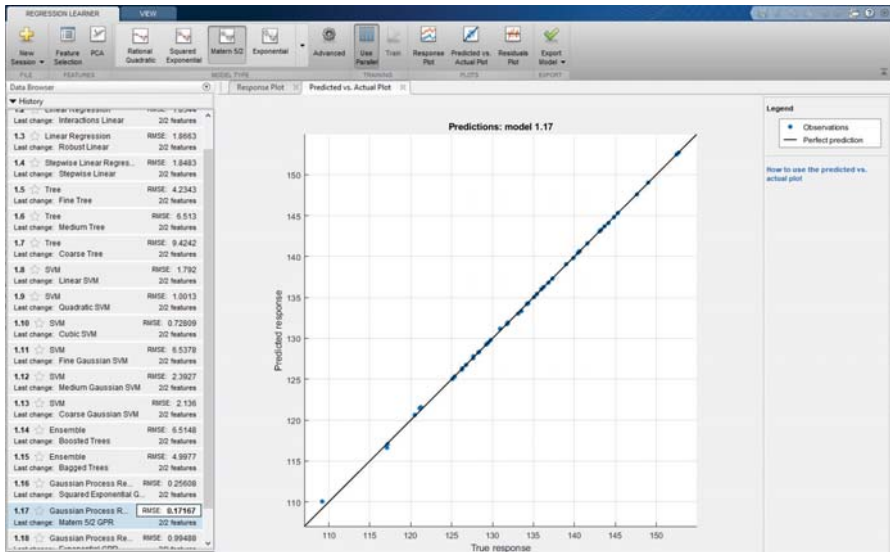


Abbildung 0-56: MATLAB® Regression Learner zur Anpassung der Kalibriermodelle in Abhängigkeit von $[p_{1,z_1}, p_{2,z_1}]$ für Betriebspunkt $q = 1$ und Datensatz $n = 1$

Ergebnisse der statistischen Kalibrierung im Betriebspunkt $q = 2$

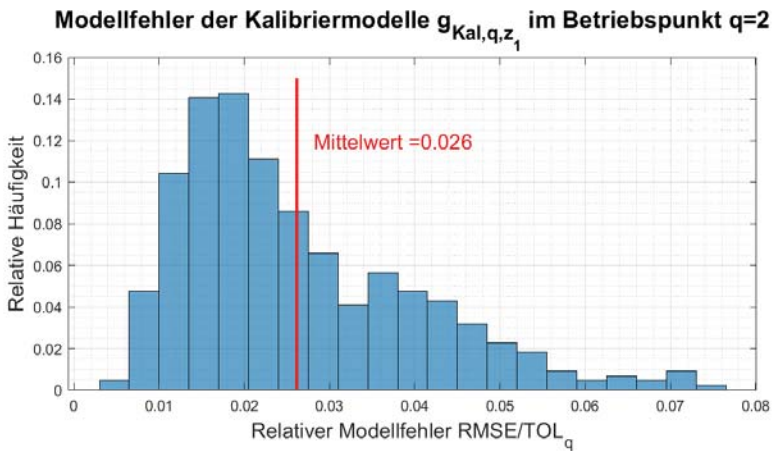


Abbildung 0-57: Histogramm des relativen Modellfehlers RMSE der Kalibriermodelle $g_{Kal,1,z_1}$ bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 2$ (nach A_Quasnitza 2019)

Tabelle 0-1: Relativer Prognosefehler ε_q (absteigend) bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 2$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2

| Rang | $p_1 = CdBall$ | $p_2 = CdNS$ | $\varepsilon_{q=2}/TOL_q$ |
|------|----------------|--------------|---------------------------|
| 1 | 0,505 | 0,800 | 0,543 |
| 2 | 0,509 | 0,821 | 0,544 |
| 3 | 0,511 | 0,791 | 0,545 |
| 4 | 0,502 | 0,789 | 0,546 |
| 5 | 0,504 | 0,853 | 0,546 |
| 6 | 0,520 | 0,785 | 0,548 |
| 7 | 0,519 | 0,777 | 0,549 |
| 8 | 0,520 | 0,774 | 0,549 |
| 9 | 0,521 | 0,809 | 0,551 |
| 10 | 0,528 | 0,773 | 0,551 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

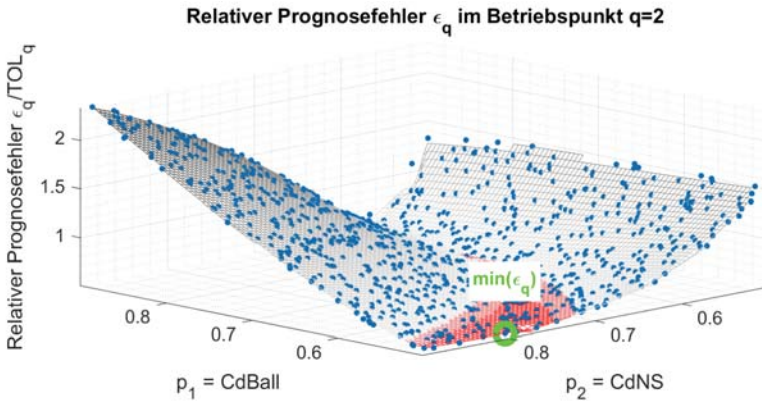


Abbildung 0-58: Relativer Prognosefehler ϵ_q bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 2$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2 (nach A_Quasnitza 2019)

Ergebnisse der statistischen Kalibrierung im Betriebspunkt $q = 3$

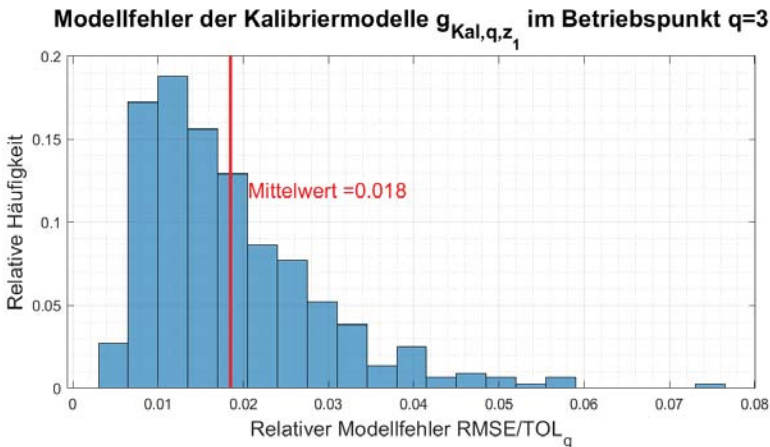


Abbildung 0-59: Histogramm des relativen Modellfehlers $RMSE$ der Kalibriermodelle $g_{\text{Kal},1,z_1}$ bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 3$ (nach A_Quasnitza 2019)

Tabelle 0-2: Relativer Prognosefehler ϵ_q (absteigend) bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 3$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2

| Rang | $p_1 = CdBall$ | $p_2 = CdNS$ | $\epsilon_{q=3}/TOL_q$ |
|------|----------------|--------------|------------------------|
| 1 | 0,501 | 0,631 | 0,295 |
| 2 | 0,508 | 0,639 | 0,297 |
| 3 | 0,535 | 0,611 | 0,297 |
| 4 | 0,550 | 0,598 | 0,297 |
| 5 | 0,539 | 0,608 | 0,298 |
| 6 | 0,558 | 0,593 | 0,298 |
| 7 | 0,569 | 0,587 | 0,299 |
| 8 | 0,555 | 0,588 | 0,299 |
| 9 | 0,506 | 0,615 | 0,299 |
| 10 | 0,530 | 0,621 | 0,299 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

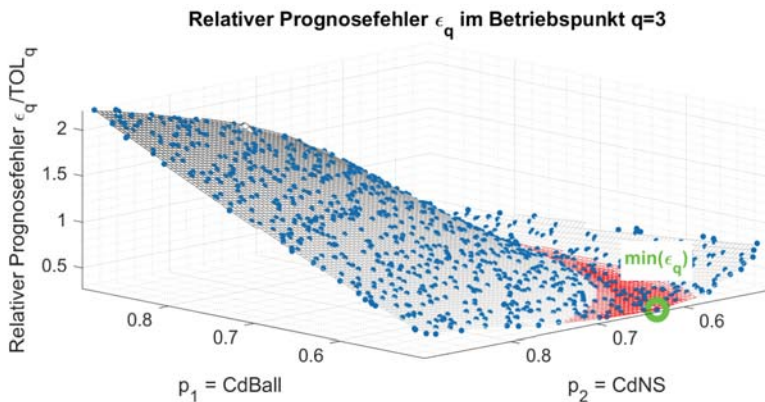


Abbildung 0-60: Relativer Prognosefehler ϵ_q bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 3$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2 (nach A_Quasnitza 2019)

Ergebnisse der statistischen Kalibrierung im Betriebspunkt $q = 4$

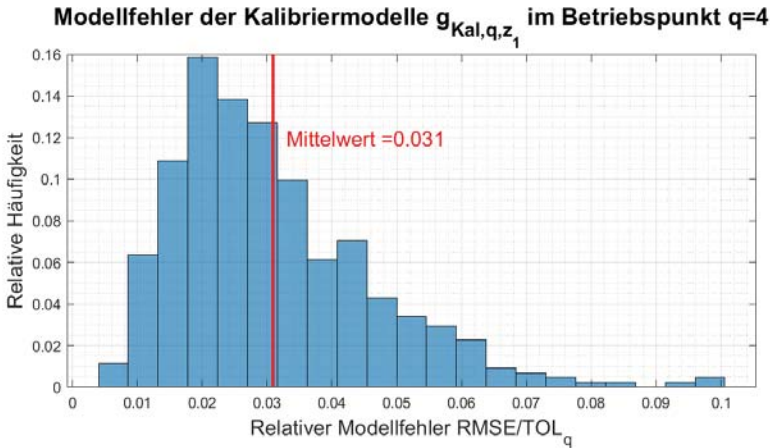


Abbildung 0-61: Histogramm des relativen Modellfehlers $RMSE$ der Kalibriermodelle $g_{\text{Kal},1,z_1}$ bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 4$ (nach A_Quasnitza 2019)

Tabelle 0-3: Relativer Prognosefehler ε_q (absteigend) bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 4$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2

| Rang | $p_1 = CdBall$ | $p_2 = CdNS$ | $\varepsilon_{q=4}/TOL_q$ |
|------|----------------|--------------|---------------------------|
| 1 | 0,890 | 0,737 | 0,113 |
| 2 | 0,876 | 0,741 | 0,113 |
| 3 | 0,869 | 0,743 | 0,113 |
| 4 | 0,867 | 0,748 | 0,113 |
| 5 | 0,854 | 0,749 | 0,113 |
| 6 | 0,895 | 0,748 | 0,113 |
| 7 | 0,845 | 0,752 | 0,114 |
| 8 | 0,900 | 0,728 | 0,114 |
| 9 | 0,895 | 0,750 | 0,114 |
| 10 | 0,885 | 0,753 | 0,114 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

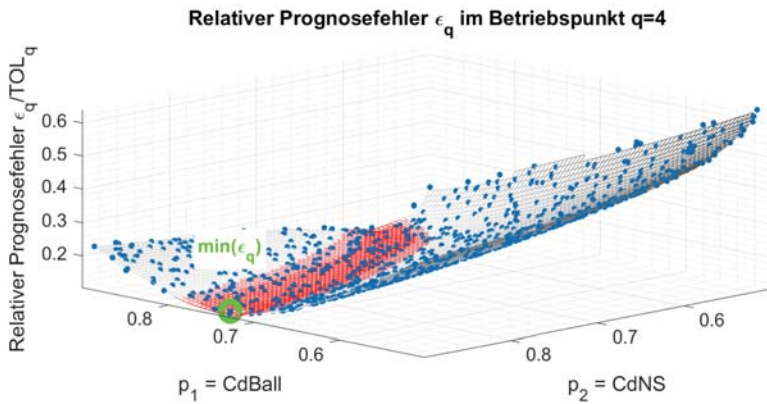


Abbildung 0-62: Relativer Prognosefehler ϵ_q bezogen zur Toleranz TOL_q im Betriebspunkt $q = 4$ in Abhängigkeit der Modellparameter p_1, p_2 (nach A_Quasnitza 2019)

A11. Gesamtunsicherheit und Auswahl der Metamodelle

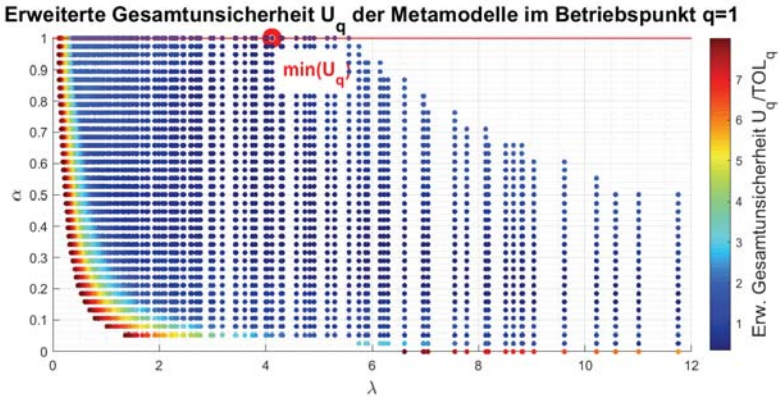


Abbildung 0-63: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 1$, Draufsicht, eigene Darstellung

Gesamtunsicherheit der Metamodelle im Betriebspunkt $q = 2$

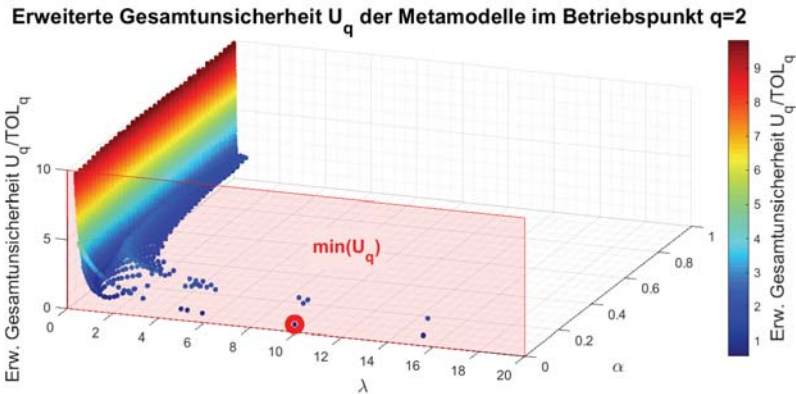


Abbildung 0-64: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 2$, eigene Darstellung

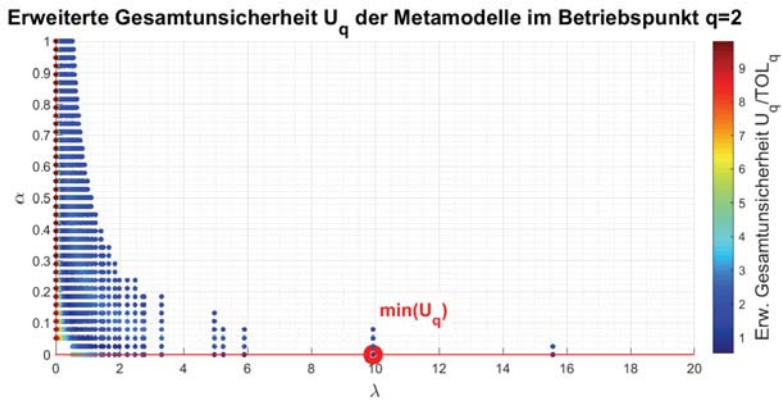


Abbildung 0-65: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 2$, Draufsicht, eigene Darstellung

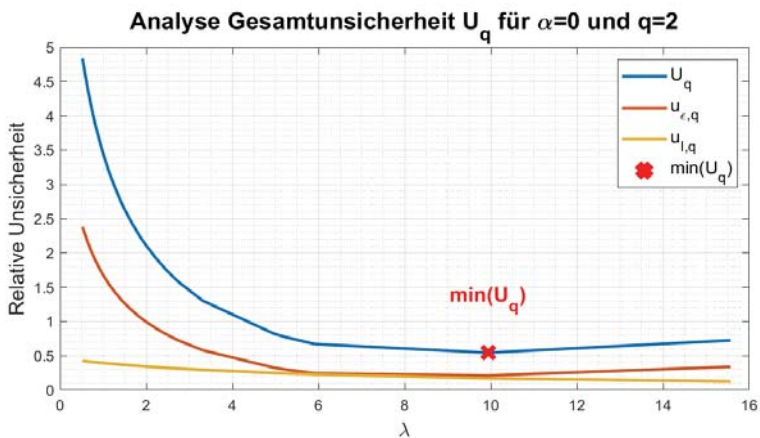


Abbildung 0-66: Analyse der erweiterten Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q mit Bestandteilen $u_{e,q}$ und $u_{l,q}$, jeweils bezogen zur Toleranz TOL_q für $\alpha = 0,026$ in Abhängigkeit des Strafterms λ im Betriebspunkt $q = 2$, eigene Darstellung

Gesamtunsicherheit der Metamodelle im Betriebspunkt $q = 3$

Erweiterte Gesamtunsicherheit U_q der Metamodelle im Betriebspunkt $q=3$

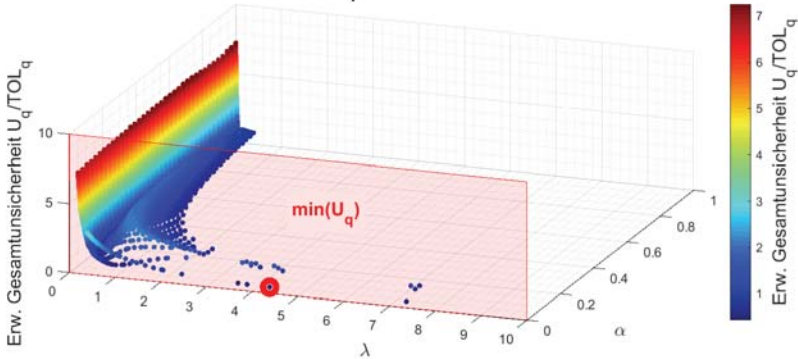


Abbildung 0-67: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 3$, eigene Darstellung

Erweiterte Gesamtunsicherheit U_q der Metamodelle im Betriebspunkt $q=3$

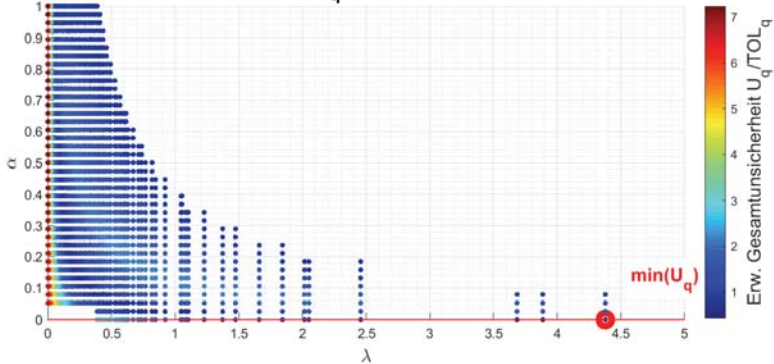


Abbildung 0-68: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 3$, Draufsicht, eigene Darstellung

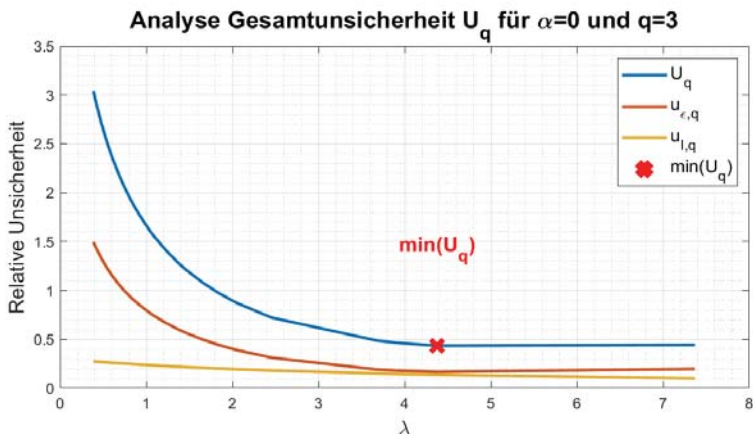


Abbildung 0-69: Analyse der erweiterten Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q mit Bestandteilen $u_{\epsilon,q}$ und $u_{l,q}$, jeweils bezogen zur Toleranz TOL_q für $\alpha = 0,105$ in Abhängigkeit des Strafterms λ im Betriebspunkt $q = 3$, eigene Darstellung

Gesamtunsicherheit der Metamodelle im Betriebspunkt $q = 4$

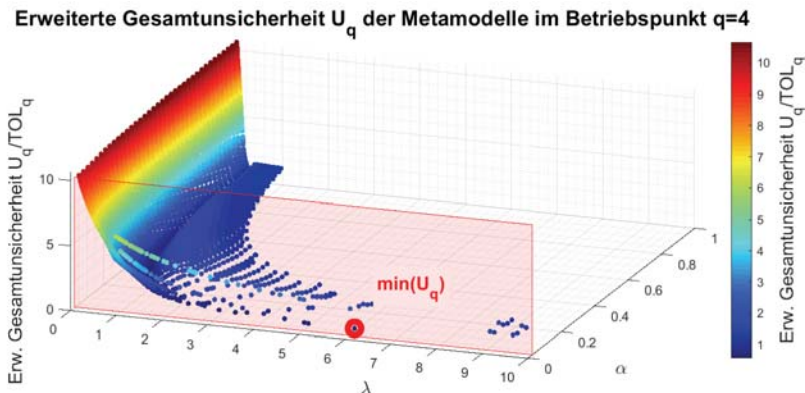


Abbildung 0-70: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 4$, eigene Darstellung

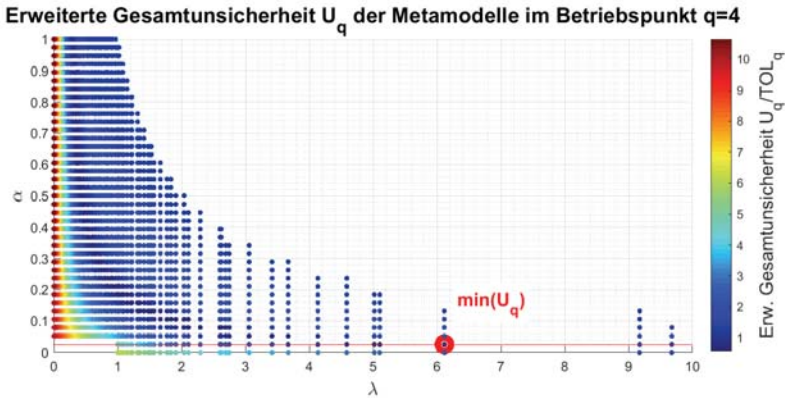


Abbildung 0-71: Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q bezogen zur Toleranz TOL_q in Abhängigkeit der Elastic Net Hyperparameter λ und α im Betriebspunkt $q = 4$, Draufsicht, eigene Darstellung

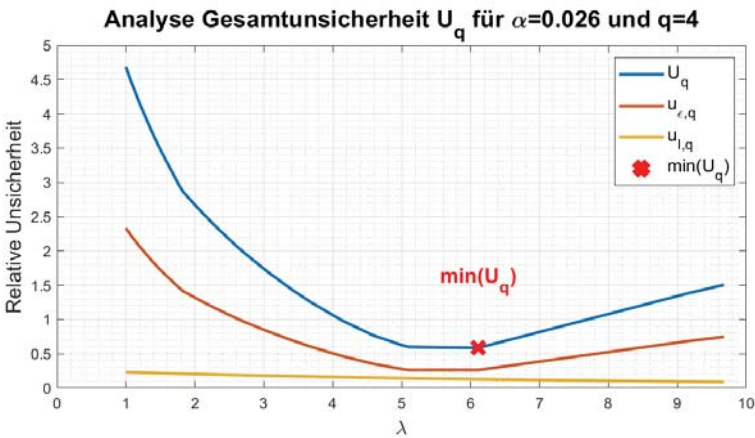


Abbildung 0-72: Analyse der erweiterten Gesamtunsicherheit U_q der linearen Metamodelle \tilde{f}_q mit Bestandteilen $u_{\epsilon,q}$ und $u_{l,q}$, jeweils bezogen zur Toleranz TOL_q für $\alpha = 0,105$ in Abhängigkeit des Strafterms λ im Betriebspunkt $q = 4$, eigene Darstellung

A12. Ereignisgesteuerte Materialflusssimulation in SimEvents

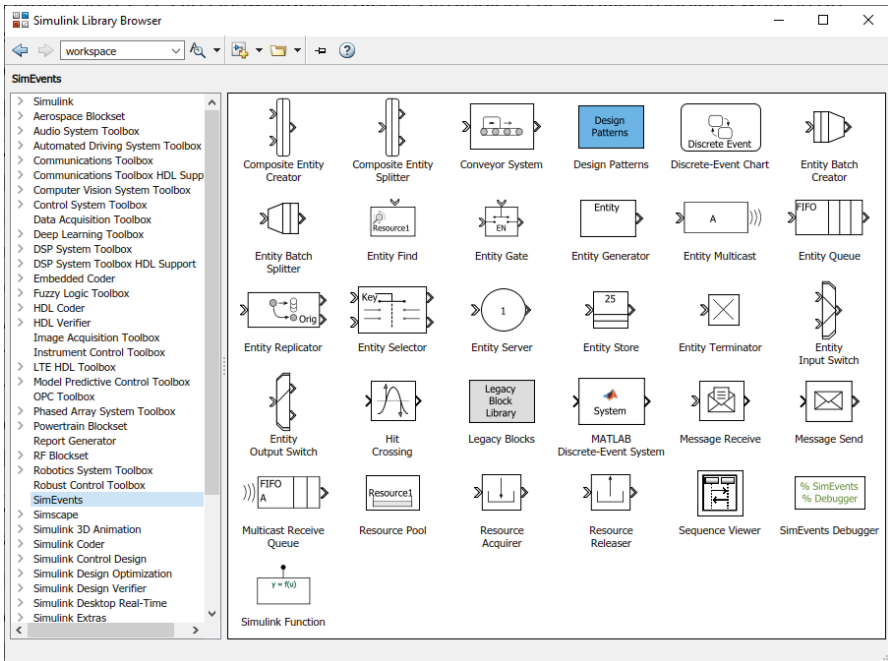


Abbildung 0-73: Funktionsblockübersicht der SimEvents Bibliothek zur Modellierung ereignisgesteuerter Materialflusssimulationen (MathWorks 2018)

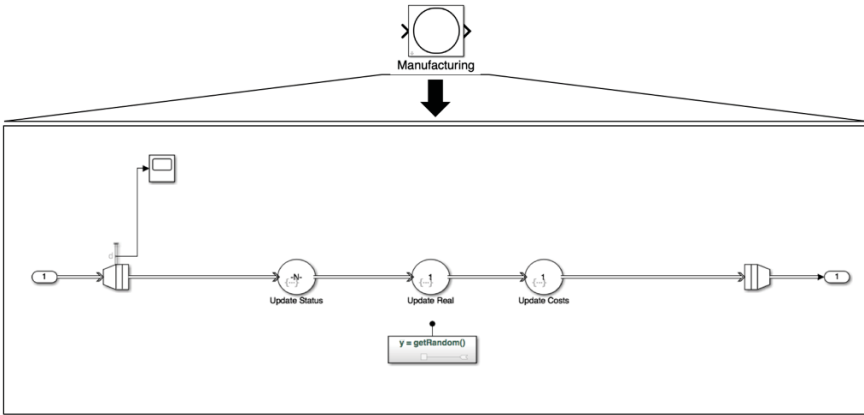


Abbildung 0-74: Übersicht Prozessbaustein Fertigungsprozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018)

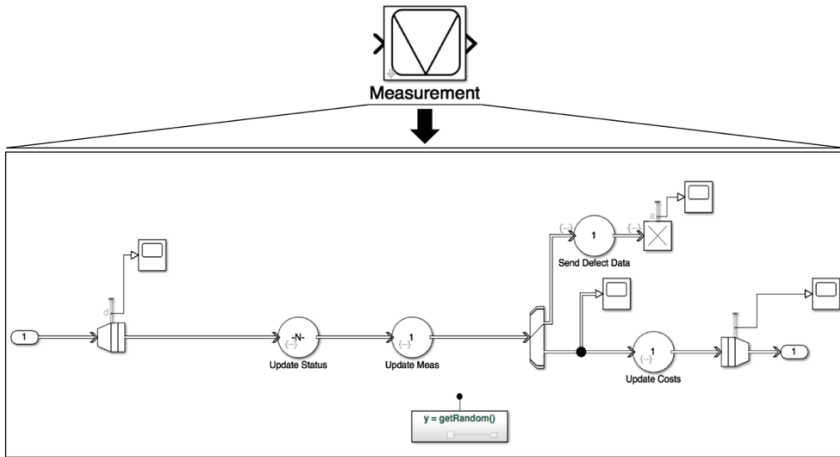


Abbildung 0-75: Übersicht Prozessbaustein Messprozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018)

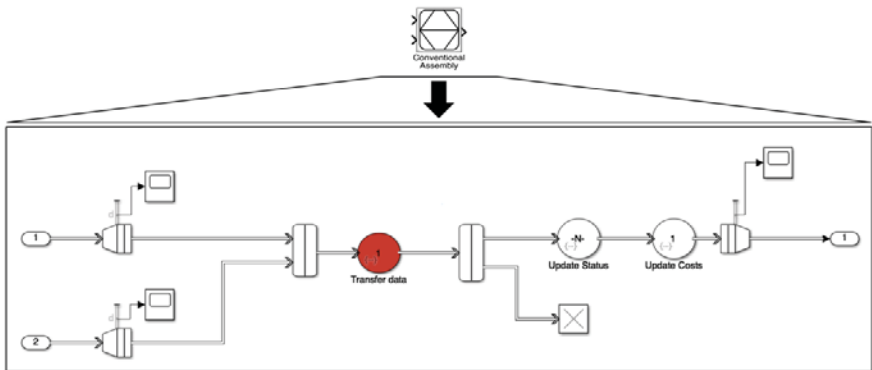


Abbildung 0-76: Übersicht Prozessbaustein Montageprozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018)

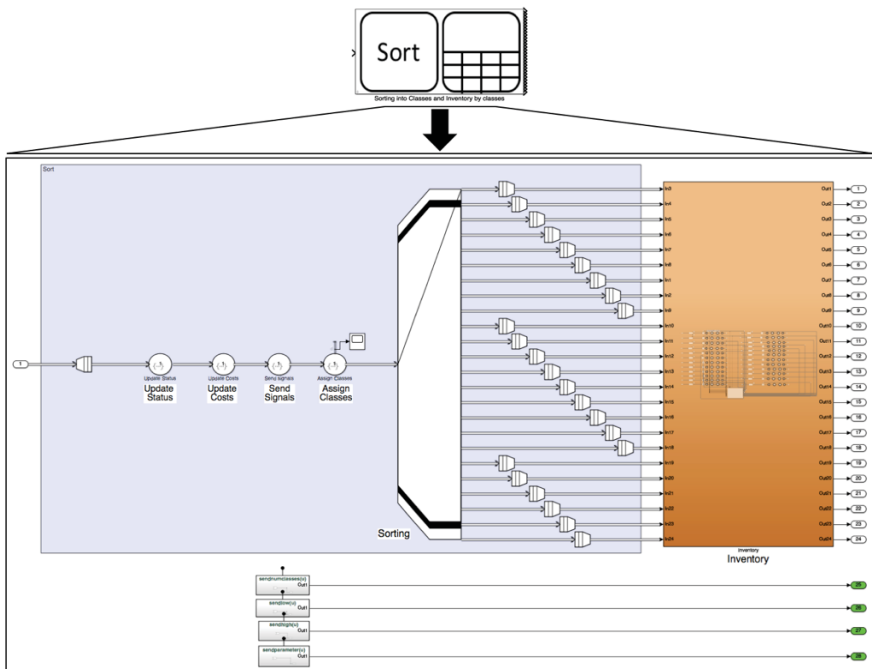


Abbildung 0-77: Übersicht Prozessbaustein Sortierprozess in Klassen in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018)

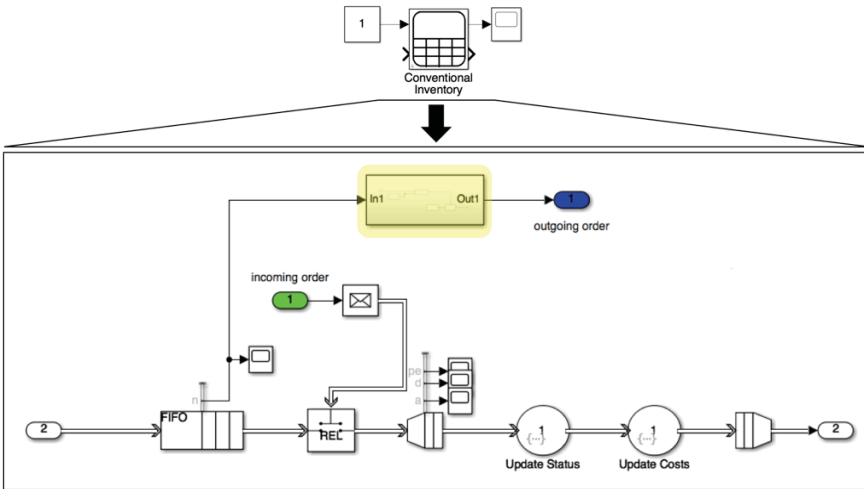


Abbildung 0-78: Übersicht Prozessbaustein Lagerungsprozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018)

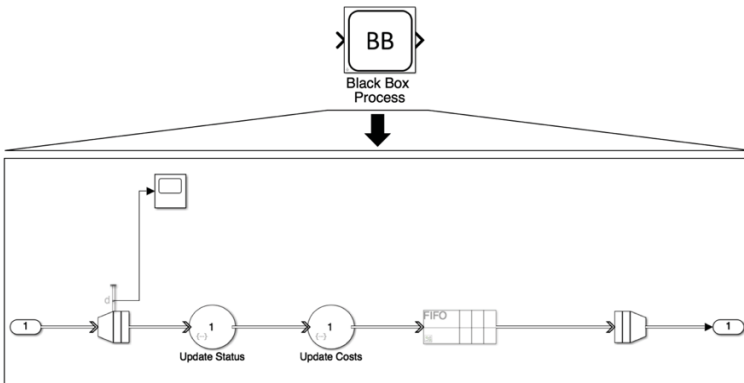


Abbildung 0-79: Übersicht Prozessbaustein Black Box Prozess in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018)

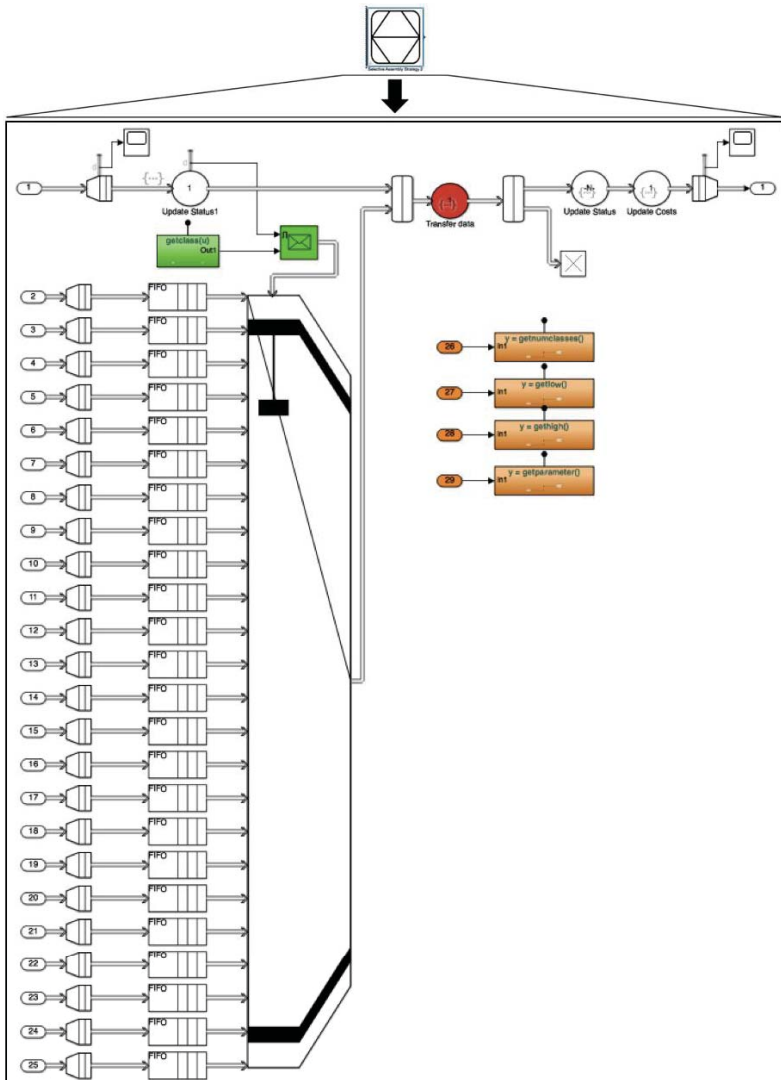


Abbildung 0-80: Übersicht Standardbaustein zur Qualitätsregelung im Produktionssystem: selektive Montage ($M(x_i) = 2$) in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018)

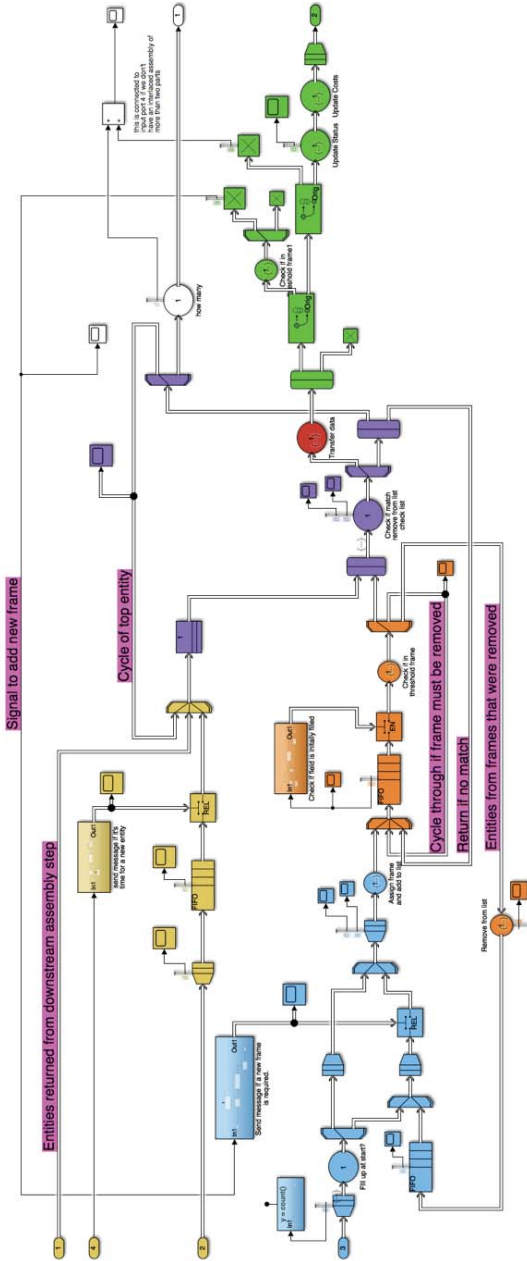


Abbildung 0-81: Übersicht Standardbaustein zur Qualitätsregelung im Produktionssystem: individuelle Montage ($M(x_i)$) = 3) in der Simulationsumgebung MATLAB © Simulink SimEvents (nach A_Diemer 2018)

A13. Simulationsergebnisse der Strategiealternative $\theta = S1^*$

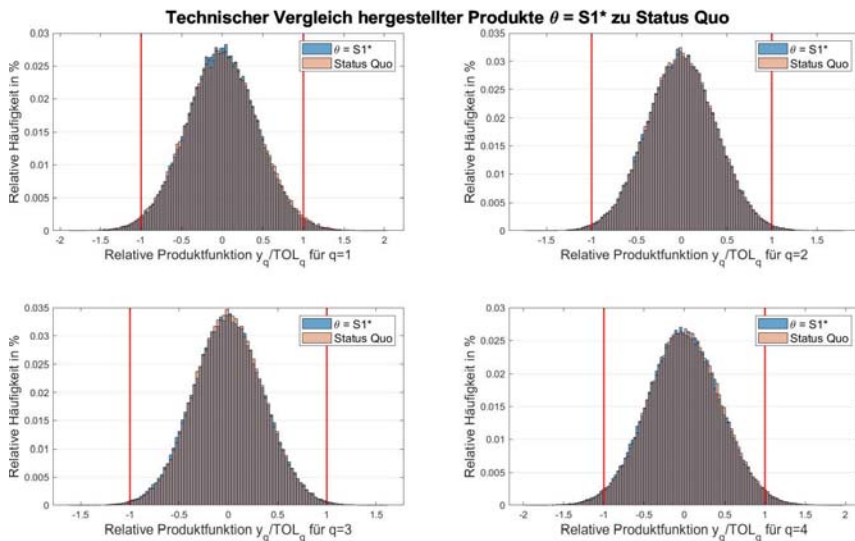


Abbildung 0-82: Histogramme der Produktfunktionen \tilde{y}_q als Ergebnis der ereignisgesteuerten Materialflusssimulation für $\theta = S1^*$ und Status Quo, eigene Darstellung

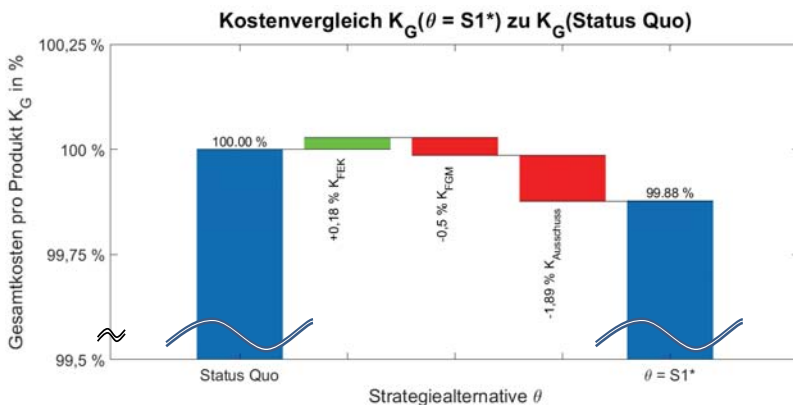


Abbildung 0-83: Kostenvergleich Gesamtkosten konformer Produkte K_G der Strategiealternative $\theta = S1^*$ zu denen des Status Quo in Bestandteilen, eigene Darstellung

A14. Simulationsergebnisse der Strategiealternative $\theta = S3^*$

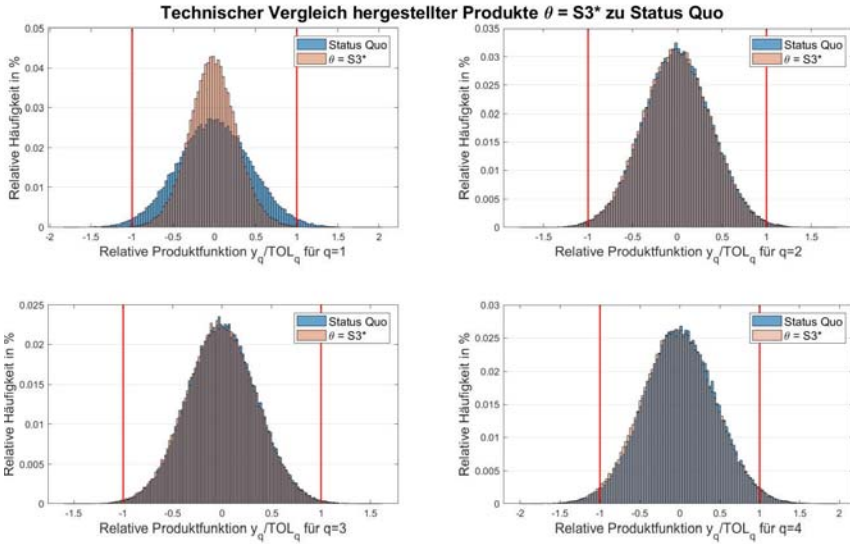


Abbildung 0-84: Histogramme der Produktfunktionen \tilde{y}_q als Ergebnis der ereignisgesteuerten Materialflusssimulation für $\theta = S3$ und Status Quo, eigene Darstellung

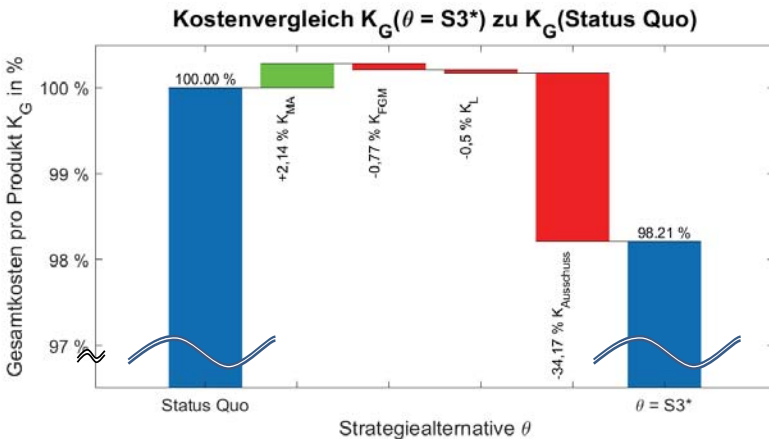


Abbildung 0-85: Kostenvergleich Gesamtkosten konformer Produkte K_G der Strategiealternative $\theta = S3^*$ zu denen des Status Quo in Bestandteilen, eigene Darstellung

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahleregelten
Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsigen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälén

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen
von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspannung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügspalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen
Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner
Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der
Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten
Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und
Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter
Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtcher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

**Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der
Serienproduktion**

