

Stefan Kemmler

Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten

D 93
ISBN 978-3-936100-85-3

Institut für Maschinenelemente

Antriebs-, Dichtungs-, Schienenfahrzeug- u. Zuverlässigkeitstechnik

Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität
Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Stefan Kemmler
geboren in Tübingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Mitberichter: Prof. Dr. h. c. Dr. h. c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juni 2018

Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart

2018

„Unsere Hauptaufgabe ist nicht, zu erkennen, was unklar in weiter Entfernung liegt, sondern zu tun, was klar vor uns liegt.“

Thomas Carlyle

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA) im Bereich der Zuverlässigkeitstechnik der Universität Stuttgart.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Ordinarius und Direktor des Instituts, für die mir gewährte Möglichkeit zur Promotion und das damit entgegengebrachte Vertrauen sowie die großzügige Gestaltungsfreiheit dieser Arbeit. Sein stets offenes Ohr und die mir gegebene wissenschaftliche Freiheit trugen entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr. h. c. Dr. h. c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer, ehemaliger Leiter des Instituts für Produktentwicklung und Maschinenelemente (PMD) der Technischen Universität Darmstadt, danke ich sehr für die Übernahme des Korreferats, die äußerst konstruktiven Hinweise sowie für die interessanten und anregenden Diskussionen.

Der Knorr-Bremse - Systeme für Nutzfahrzeuge (SfN) GmbH, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Alexander Dobry und dem Centre-of-Competence 3.1 (CoC 3.1), stellvertretend Herrn Dipl.-Ing. Werner Koch, sowie der Entwicklungsleitung unter Herrn Dipl.-Ing. Jens Fricke, gilt mein Dank für die Ermöglichung meiner wissenschaftlichen Arbeit und Bereitstellung des Anwendungsbeispiels. Zudem möchte ich mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilungen der Simulation, der Erprobung, der Vorentwicklung, der Konstruktion, des Einkaufs und der Qualität sowie bei der Projektleitung für die stetige und äußerst konstruktive Unterstützung bedanken. Allen voran Herrn Dr.-Ing. Tobias Leopold, der mich stets mit seinem fachlichen und wissenschaftlichen Wissen während der Arbeit sowie bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützte.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Institut danke ich für die sehr positive Zusammenarbeit, für das freundliche und offene Klima sowie für die gute Zeit am IMA.

Insbesondere danke ich Herrn Prof. assoc. Dr.-Ing. Dipl.-Wirts. Tobias Eifler, Herrn Dr.-Ing. Tobias Leopold, Herrn Martin Dazer (M.Sc.) und Herrn Alexander Fuchs (M.Sc.) für die Durchsicht meiner Arbeit sowie für die konstruktiven Diskussionen und Anregungen.

Allen Studentinnen und Studenten sowie studentischen Hilfskräften danke ich für ihre Unterstützung und ihren konstruktiven Beiträgen.

Bei meiner Familie bedanke ich mich herzlichst für die fortwährende und selbstlose Förderung während meiner gesamten Ausbildung.

Mein wärmster Dank geht an meine Ehefrau Lena und meine Tochter Ella für die stete Motivation und den Rückhalt während des Erstellens dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Nomenklatur	XI
Kurzfassung	XXI
AbstractXXIII
GlossarXXV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziele dieser Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Grundlagen zur Beschreibung von Unsicherheiten	5
2.1.1 Aleatorische und epistemische Unsicherheit	5
2.1.2 Wahrscheinlichkeitstheorie	7
2.1.3 Möglichkeitstheorie	14
2.1.4 Evidenztheorie	16
2.1.5 Zusammenfassung der bestehenden Methoden	17
2.2 Modellierung von Abhängigkeiten und Unsicherheiten	18
2.2.1 Mathematische Surrogate-Modellierung	18
2.2.2 Physikalische Surrogate-Modellierung	29
2.2.3 Approximationsverfahren - <i>META</i> -Modellierung	31
2.2.4 Statistische Bewertungs- und Gütemaße zur Approximation	35
2.2.5 Zusammenfassung und Fazit	36
2.3 Komplexität	37
3 Robustheit und Zuverlässigkeit	39
3.1 Robust Design Methodik	39
3.1.1 Definition der Robustheit und des Robust Design	39

3.1.2	Taguchi Methode	40
3.1.3	Axiomatic Design	45
3.1.4	Robust Design Optimization	50
3.1.5	Zusammenfassung und Fazit der Robust Design Methodik	53
3.2	Zuverlässigkeit	54
3.2.1	Grundgedanke und Definition der Zuverlässigkeit	54
3.2.2	Methoden der Zuverlässigkeit	56
3.2.3	Nachweisverfahren zur Zuverlässigkeit	57
3.2.4	Möglichkeiten zur Integration von Vorwissen	58
3.2.5	Zusammenfassung und Fazit der Zuverlässigkeit	59
4	Zielsetzung und Forschungsbedarf	61
4.1	Zuverlässigkeit und Robustheit	61
4.2	Bewertung bisheriger Ansätze	62
4.2.1	Bisherige Ansätze zur <i>Robusten Zuverlässigkeit</i> R^2	62
4.2.2	Methodenbetrachtung des Robust Design und der Zuverlässigkeit	63
4.2.3	Ansätze zur robusten, zuverlässigen Methodik	64
4.3	Qualität, Kosten und <i>Robuste Zuverlässigkeit</i> R^2	65
4.4	Zusammenfassung und Fazit	66
5	Die Theorie der <i>Robusten Zuverlässigkeit</i> R^2	69
5.1	Motivation	69
5.2	Definition der <i>Robusten Zuverlässigkeit</i> R^2	70
5.3	Validierung von Theorie, Modell und Methodik	71
5.4	Das R^2 -Modell	73
5.5	Betrachtung von Unsicherheiten mit R^2	80
5.5.1	Unsicherheiten und Einflüsse auf die Übertragungsfunktion	81
5.5.2	Zeitliche Unsicherheiten der Produkteigenschaften	81
5.5.3	Unsicherheit unvorhersehbarer Ereignisse	81
5.6	Das modifizierte R^2 -Modell	81
5.6.1	Prozess-orientiertes R^2 -Modell	81
5.6.2	Feld-orientiertes R^2 -Modell	84
5.7	Fazit zur <i>Robusten Zuverlässigkeit</i> R^2 und deren Modellierung	85
6	Methodik zur Entwicklung robuster, zuverlässiger Produkte mit Anwendungsbeispielen	87
6.1	Einordnung von <i>SMAR²T</i> zu bisherigen Methodiken	88
6.1.1	Abgrenzung zu adäquaten Methodiken	89
6.1.2	Vergleich zu bisherigen Qualitätsmanagement-Methodiken	90
6.1.3	Betrachtung von <i>SMAR²T</i> und <i>RDM</i>	92
6.1.4	Schnittmenge von <i>SMAR²T</i> mit <i>RDM</i> und <i>ZUV</i> -Methoden	93
6.1.5	Zusammenfassung und Fazit zur Methodik-Abgrenzung	94
6.2	System Design nach <i>SMAR²T</i>	96
6.2.1	Anwendungsbeispiel für das System Design	96
6.2.2	Systemanalyse - Dömanenzuordnung	98

6.2.3	Konzeptfindungsmöglichkeiten	98
6.2.4	Wirkzusammenhangsdiagramm	99
6.2.5	Erste Modellierungsmöglichkeiten	102
6.2.6	Design-Matrix und Gewichtungsfaktoren	102
6.2.7	Reorganisation	106
6.2.8	Unabhängigkeitsaxiom	106
6.2.9	Informationsaxiom	107
6.3	Parameter Design nach <i>SMAR²T</i>	109
6.3.1	Anwendungsbeispiel des Parameter Design	111
6.3.2	P-Diagramm	112
6.3.3	Simulationsstrategie	112
6.3.4	Simulationsmodellierung	113
6.3.5	Interpretation der Analyse	114
6.3.6	Optimierungspotential hinsichtlich Streuungsminimierung	116
6.3.7	Robustheitsbewertung	118
6.3.8	Virtuelle Lebensdauererprobung	120
6.3.9	Robuste Zuverlässigkeitsabschätzung mittels <i>R²</i> -Modell	123
6.3.10	Festlegung der nominellen Parameterstufen	124
6.4	Toleranz Design nach <i>SMAR²T</i>	125
6.4.1	Anwendungsbeispiel des Toleranz Design	125
6.4.2	Toleranzanalyse- und synthese	125
6.4.3	Statistische Versuchsplanung und Durchführung	128
6.4.4	Robustheitsanalyse	129
6.4.5	Kostenmodelle und Kostenanalyse	130
6.4.6	Optimierung mittels Varianzzerlegung	134
6.4.7	Ableitung des prozessorientierten <i>R²</i> -Modells	135
6.4.8	Handlungsempfehlungen	136
6.5	Robuste Zuverlässigkeitsabsicherung	137
6.5.1	Zuverlässigkeitsanalyse	137
6.5.2	Allgemeine Planung der Teststrategie	140
6.5.3	Zuverlässigkeits- und Robustheits-Nachweis	143
6.5.4	Weitere Vorgehensweise und finale Schritte	144
6.6	Adaptive Simulationsmethode für effektive Parameterstudien	144
6.6.1	Optimierungsplan nach <i>RDO</i> und Taguchi	144
6.6.2	Quantitativer Vergleich beider Methoden	145
6.6.3	Vorgehensweise <i>SIM-SMAR²T</i>	147
6.7	Grundphilosophie der Arbeit	149
6.8	Zusammenfassung und Bewertung von <i>SMAR²T</i>	151
7	Anwendungsbeispiel: Nachstelleinheit <i>N3G⁺</i>	153
7.1	Das Anwendungsbeispiel: Eine kurze Vorstellung	153
7.1.1	Die Betriebsbremse und ihre Funktionsweise	153
7.1.2	Die Nachstelleinheit	153
7.2	System Design der Nachstelleinheit nach <i>SMAR²T</i>	155
7.3	Parameter Design der Nachstelleinheit nach <i>SMAR²T</i>	156

7.3.1	P-Diagramm der Nachstelleinheit	157
7.3.2	Simulationsstrategie	157
7.3.3	Durchführung der Simulation	157
7.3.4	Interpretation der Ergebnisse	158
7.3.5	Robuste Zuverlässigkeitsbetrachtung	161
7.4	Toleranz Design der Nachstelleinheit nach <i>SMAR²T</i>	163
7.4.1	Definition und Durchführung der Toleranzsimulation	164
7.4.2	Versuchsauswertung	164
7.4.3	Semi-quantitative Kostenbetrachtung	164
7.4.4	Handlungsempfehlungen zur Robustheit und Wirtschaftlichkeit	167
7.5	Robuster <i>ZUV</i> -Nachweis der Nachstelleinheit nach <i>SMAR²T</i>	168
7.5.1	Integration des virtuellen Vorwissens	168
7.5.2	Planung der Teststrategie	169
7.5.3	Zuverlässigkeits- und Robustheitsnachweis	170
7.5.4	Ergebnis <i>Robuste Zuverlässigkeitserprobung N3G⁺</i>	170
7.6	Ergebnis der Nachsteller-Untersuchung nach <i>SMAR²T</i>	171
8	Zusammenfassung und Ausblick	173
	Literaturverzeichnis	175
	Eigene Veröffentlichungen	193
	Betreute studentische Arbeiten	195
	Lebenslauf	199
	Anhang	201
A	Tabellen	202
B	Diagramme	226

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1:	Schematischer Aufbau der Arbeit	4
Bild 2.1:	Modell zur Abgrenzung aleatorischer und epistemischer Unsicherheit .	6
Bild 2.2:	Nomierte Darstellungen der Normalverteilung	10
Bild 2.3:	Nomierte Darstellungen der Log-Normalverteilung	11
Bild 2.4:	Nomierte Darstellungen der Weibullverteilung	12
Bild 2.5:	Nomierte Darstellungen der Binomialverteilung	13
Bild 2.6:	Qualitativer Vergleich zwischen Möglichkeits- und Wahrscheinlichkeits- theorie	15
Bild 2.7:	Beispiele für Zugehörigkeitsfunktionen unscharfer Mengen	15
Bild 2.8:	Aufteilung der Wahrscheinlichkeit	17
Bild 2.9:	Generierung von normalverteilten Beobachtungswerten mittels Monte- Carlo Methode	20
Bild 2.10:	Latin Hypercube Design und Latin Hypercube Sampling Methode im Vergleich zur Monte-Carlo Methode	21
Bild 2.11:	Begriffsübersicht der statistischen Versuchsplanung	23
Bild 2.12:	Darstellung der Wechselwirkung bei zwei Faktoren	25
Bild 2.13:	Überprüfung auf Nicht-Linearität und Aufbau eines <i>CCD</i>	25
Bild 2.14:	Übersicht eines Taguchis Versuchsplans mit äußeren und inneren Störgrößen	28
Bild 3.1:	Zeitliche Einteilung von <i>RDM</i> -Definitionen	41
Bild 3.2:	Häufigkeitsverteilung von <i>RDM</i> -Definitionen	41
Bild 3.3:	P-Diagramm	43
Bild 3.4:	Zwei-Schritt Optimierung nach Taguchi	44
Bild 3.5:	Design Domänen des Axiomatic Designs	46
Bild 3.6:	Graphentheoretische Interpretation von Transfermatrizen	48
Bild 3.7:	Schematische Darstellung des Informationsgehalts	50
Bild 3.8:	Robustheit der Zielfunktion und der Randbedingungen	53
Bild 3.9:	Robustheit und Quality Loss Function	54
Bild 3.10:	Zeitliche Einteilung von <i>ZUV</i> -Definitionen	56
Bild 3.11:	Häufigkeitsverteilung von <i>ZUV</i> -Definitionen	57
Bild 3.12:	Nachweisverfahren zur Bestimmung der Zuverlässigkeit	58
Bild 3.13:	Stress-Strength-Interference	60

Bild 4.1:	Abgrenzungsmodell	64
Bild 4.2:	Methodeneinsatz	64
Bild 4.3:	Hierarchische Einteilung der Begrifflichkeiten	66
Bild 5.1:	Schematischer Vergleich der Theorien	69
Bild 5.2:	Validierungsquadrat für Methoden	72
Bild 5.3:	Schematischer Aufbau zur Ermittlung der Gesamtfunktion	74
Bild 5.4:	Das R^2 -Modell	79
Bild 5.5:	Zeitliche Einordnung des modifizierten R^2 -Betrachtungsmodells	82
Bild 5.6:	Schematischer Aufbau zur Ermittlung der Gesamtfunktion und -kosten	83
Bild 5.7:	Das modifizierte, Prozess-orientierte R^2 -Modell	83
Bild 5.8:	Das modifizierte, Feld-orientierte R^2 -Modell	84
Bild 6.1:	<i>SMAR²T</i> mit Design Phasen und Musterständen sowie Einordnung in den <i>PEP</i>	87
Bild 6.2:	Direkter Phasenvergleich von <i>SMAR²T</i> mit der Taguchi Methode	93
Bild 6.3:	Methodenschnittmenge von <i>SMAR²T</i> , <i>RDM</i> und <i>ZUV</i>	94
Bild 6.4:	Schematische Gesamtansicht von <i>SMAR²T</i>	95
Bild 6.5:	System Design in <i>SMAR²T</i>	97
Bild 6.6:	Freilaufvarianten der Nachstelleinheit	98
Bild 6.7:	Funktionsblockdiagramm der Freilaufvarianten	100
Bild 6.8:	Wirkzusammenhangsdiagramm der Freilaufvarianten	101
Bild 6.9:	Design Matrix des Kegelkonus-Freilaufs	103
Bild 6.10:	Design Matrix des Klemmrollen-Freilaufs	103
Bild 6.11:	Gewichtungslandschaft der <i>DM</i>	106
Bild 6.12:	Entkopplungsmöglichkeit der <i>DM</i> des Kegelkonus-Freilaufs	108
Bild 6.13:	Informationsgehalt des <i>Klemmrollen-Freilaufl</i>	109
Bild 6.14:	Parameter Design in <i>SMAR²T</i>	110
Bild 6.15:	Anwendungsbeispiel der <i>PD</i> -Phase: Überlastkupplung	111
Bild 6.16:	Lokales P-Diagramm des Betriebsmodus: Überlast - Kugelrampe	113
Bild 6.17:	Parametersensitivitäten	115
Bild 6.18:	Korrelationsmatrix und Ausfalltendenzen	116
Bild 6.19:	Berücksichtigung innerer Störgrößen am Beispiel des Bahnradius	117
Bild 6.20:	Wirkungsdiagramm nach <i>ANOM</i>	118
Bild 6.21:	Optimierungsverlauf des Überlastmoments	119
Bild 6.22:	Ablaufdiagramm Virtuelle Lebensdauerermittlung	121
Bild 6.23:	Allgemein funktionale Degradationsbetrachtung und Verschleißmechanismen	122
Bild 6.24:	Funktionale Degradationsbetrachtung der Überlastkupplung	123
Bild 6.25:	Das R^2 -Modell der Überlastkupplung	124
Bild 6.26:	Toleranz Design in <i>SMAR²T</i>	126
Bild 6.27:	Anwendungsbeispiel des <i>TD</i> : Kulissenspiel	127
Bild 6.28:	Qualitative Kostenentwicklungsannahme je Toleranzklasse	131
Bild 6.29:	Semi-quantitative Kostenfunktion von <i>SG</i> und <i>ZS</i>	134
Bild 6.30:	Prozessorientiertes R^2 -Modell des Kulissenspiels	136

Bild 6.31:	Robuste Zuverlässigkeitserprobung in $SMAR^2T$	138
Bild 6.32:	V-Diagramm: System-Funktion-Komponente	139
Bild 6.33:	Stichprobenumfang im Verhältnis zur ZUV und auf Basis des jeweiligen Vorwissens	140
Bild 6.34:	Übersicht der einzelnen Teststrategien	141
Bild 6.35:	Globale Simulationsstrategie	147
Bild 6.36:	Vorgehensweise der Robustheitsoptimierung und simulativen Taguchi-Methode	149
Bild 6.37:	R^2 im Qualitätsmanagement	150
Bild 6.38:	R^2 im Zusammenhang	150
Bild 7.1:	Isometrische Darstellung einer Scheibenbremse	154
Bild 7.2:	Schnittdartstellung der Nachstelleinheit $N3G^+$	155
Bild 7.3:	Exemplarische Darstellung eines Momentverlaufs und einer Eintaktkurve	158
Bild 7.4:	Validierung der Simulation bezüglich Eintaktverhalten	159
Bild 7.5:	Ergebnisse des Bestätigungsexperiments	160
Bild 7.6:	Degradationsmerkmale des $N3G^+$	162
Bild 7.7:	Die Zuverlässigkeitsabschätzung und das R^2 -Modell des Lüftspiels	163
Bild 7.8:	Ergebnis Toleranz Design	166
Bild 7.9:	Degradationsauswertung der Funktionsmerkmale des $N3G^+$	171
Bild 7.10:	Zuverlässigkeitsprognose des $N3G^+$	172
Bild B.1:	Methodenübersicht zur Integration von Vorwissen	226
Bild B.2:	Schematischer Ablauf des $DCOV$ -Modells	227
Bild B.3:	Funktionsblockdiagramm $N3G^+$	228
Bild B.4:	Wirkzusammenhangsdiagramm $N3G^+$	229
Bild B.5:	Design Matrix des $N3G^+$	230
Bild B.6:	Das P-Diagramm des $N3G^+$	231
Bild B.7:	Semi-quantitative Kostenfunktionen des $N3G^+$	232
Bild B.8:	Mittelwerte und S/N -Ratios nach Taguchi	233
Bild B.9:	Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten bezüglich Stichprobenanzahl	233
Bild B.10:	Vorgehensweise der Robustheitsoptimierung und simulativen Taguchi-Methode	234

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Unsicherheitsbetrachtung der <i>Robusten Zuverlässigkeit</i> R^2	7
Tab. 2.2:	Übersicht gängiger Versuchsplanungstypen für die Matrixexperimente	23
Tab. 2.3:	Auflösung von Effekten am Beispiel von fraktionell faktoriellen Versuchsplänen	24
Tab. 2.4:	Aufbau und Übersicht orthogonaler Versuchsfelder	26
Tab. 2.5:	Modelltypenvergleich der physikalischen Modellierung	31
Tab. 2.6:	Definitionen der Komplexität	38
Tab. 3.1:	Statische Signal-Rausch-Verhältnisse	44
Tab. 3.2:	Design-Matrizen zur Beschreibung der Dekomposition	47
Tab. 4.1:	Gegenüberstellung Zuverlässigkeit, Robustheit, Komplexität, Unsicherheit	68
Tab. 6.1:	Musterstände der Automobilindustrie	88
Tab. 6.2:	Vergleich <i>SMAR²T</i> mit <i>DCOV</i>	89
Tab. 6.3:	Vergleich des Methodeneinsatzes von <i>SMAR²T</i> und <i>DCOV</i>	90
Tab. 6.4:	Vergleich <i>SMAR²T</i> mit <i>DFSS</i> und <i>DFR</i>	91
Tab. 6.5:	Vergleich der Werkzeuge von <i>SMAR²T</i> , <i>DFSS</i> und <i>DFR</i>	92
Tab. 6.6:	Qualitative Kundenanforderungen an das Freilauf-Konzept	98
Tab. 6.7:	Methodenauswahl zur Konzeptfindung	99
Tab. 6.8:	Zuordnung von <i>FRs</i> und <i>DPs</i> des Kegelkonus-Freilaufs	104
Tab. 6.9:	Zuordnung von <i>FRs</i> und <i>DPs</i> des Klemmrollen-Freilaufs	105
Tab. 6.10:	Entkopplungsmöglichkeiten der <i>DM</i>	107
Tab. 6.11:	Statistische Ergebniskennwerte der Optimierung	119
Tab. 6.12:	Robustheits- und Kostenkriterien für das Kulissenspiel	125
Tab. 6.13:	Parameter des Zahnrads und der Schaltgabel	128
Tab. 6.14:	<i>DOE</i> -Einstellstufen <i>KLS</i>	129
Tab. 6.15:	Einkaufskosten der <i>SG</i> und <i>ZS</i>	133
Tab. 6.16:	Kostenverhalten der <i>SG</i> und <i>ZS</i> bei Toleranzänderung	134
Tab. 6.17:	Gründe für Lebensdauertests	142
Tab. 6.18:	Übersicht zur Vorgehensweise der <i>RDO</i> und <i>TM</i> im Vergleich	145
Tab. 6.19:	Grundlegender Unterschied von <i>RDO</i> und <i>TM</i>	146

Tab. 7.1:	Randbedingungen zur Funktionserfüllung im Einsatzzeitraum des $N3G^+$	162
Tab. 7.2:	Robustheits- und Kostenkriterien für das Toleranz Design	164
Tab. 7.3:	Einkaufskosten der $N3G^+$ -Bauteile	165
Tab. 7.4:	Einkaufskosten der $N3G^+$ -Bauteile	166
Tab. 7.5:	Ergebnisse der R^2T -Phase des $N3G^+$	170
Tab. A.1:	Modellübersicht zur Klassierung von Unsicherheiten	202
Tab. A.2:	Chronologische Übersicht der Begriffsdefinition Zuverlässigkeit	202
Tab. A.3:	Definition reliability, maintainability, availability nach <i>IEC 60050-191</i>	204
Tab. A.4:	Definitionen der Zuverlässigkeit nach DIN	204
Tab. A.5:	Zuverlässigkeits-Definitionen der freien Literatur	206
Tab. A.6:	Zuverlässigkeits-Definitionen nach <i>IEC</i>	208
Tab. A.7:	Zuverlässigkeits-Definitionen des <i>VDA</i>	209
Tab. A.8:	Zuverlässigkeits-Definitionen des <i>VDI</i>	209
Tab. A.9:	Übersicht der Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit	210
Tab. A.10:	Erweiterte Methodenübersicht zur Bestimmung der Zuverlässigkeit	212
Tab. A.11:	Chronologische Übersicht zur Begriffsdefinition der Robustheit	212
Tab. A.12:	Robustheits-Definitionen der freien Literatur	214
Tab. A.13:	Auszug von <i>RDM</i> -Methoden	219
Tab. A.14:	Ergebnisse der Versuchsplanung	219
Tab. A.15:	Design-Historie der Einstellstufen	220
Tab. A.16:	Gesamte Parametertabelle im <i>PD</i>	221
Tab. A.17:	Eingangsparameter für Teststrategieplanung	222
Tab. A.18:	<i>DOE</i> -Einstellstufen $N3G^+$	222
Tab. A.19:	Herstellungsprozess und Toleranzklasse der $N3G^+$ -Bauteile	223
Tab. A.20:	Fertigungsverfahren und erreichbare Toleranzklassen	223
Tab. A.21:	Kostenverhalten der $N3G^+$ -Bauteile bei Toleranzänderung	224
Tab. A.22:	Signifikanzanalyse der Parameter im Toleranz Design	224
Tab. A.23:	Vergleich wissenschaftlicher Literatur zu Testplanungsstrategien	225

Nomenklatur

Abkürzungsverzeichnis

AB	Abweichung
AD	Axiomatic Design
ALHS	Advanced Latin Hypercube Sampling
ANOM	Analyse of mean
ANOVA	Analyse of variance
BHR	Bahnradius
BIR	Built-In Reliability
CA	Kundenanforderung (<i>engl. Customer Attribute</i>)
CAE	Computer-aided engineering
CCD	Central-Composite-Design
COD	Determinationskoeffizient (<i>engl. Coefficient of Determination</i>)
COP	Prognosekoeffizient (<i>engl. Coefficient of Prognosis</i>)
CF	Steuergröße (<i>engl. Control Factor</i>)
DCOV	Define, Characterize, Optimize and Verify Model
DF	Druckfeder
DFMA	Design for Manufacture and Assembly
DFR	Design for Reliability
DFSS	Design for Six Sigma
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOE	Statistische Versuchsplanung (<i>engl. Design of Experiments</i>)
DOF	Degree of Freedom
DM	Design Matrix
DP	Design Parameter
DRBFM	Design Review Based on Failure Mode
ESS	Environmental Stress Screening
EOL	End of Life
FBD	Funktionsblockdiagramm
FEM	Finite-Elemente-Methode

FGK	Fertigungsgemeinkosten
FK	Fertigungskosten
FLK	Fertigungslohnkosten
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse (<i>engl. Failure Mode and Effects Analysis</i>)
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis
FR	Funktionsanforderung (<i>engl. Functional Requirement</i>)
FRACAS	Failure Reporting and Corrective Actions System
FST	Flache Steigung
FTA	Fehlerbaumanalyse (<i>engl. Fault Tree Analysis</i>)
GI	Graphentheoretische Interpretation
GS	Gewindespindel
HALT	Highly Accelerated Life Testing
HASS	Highly Accelerated Stress Screening
HMKS	Hybride Mehrkörpersysteme
HE	Haupteffekt
IEC	International Electrotechnical Vocabulary
K35	Kugeln mit 3,5 mm Durchmesser
K54	Kugeln mit 5,4 mm Durchmesser
K55	Kugeln mit 5,5 mm Durchmesser
KA	Konzeptalternativen
KKF	Kegelkonus-Freilauf
KLS	Kulissenspiel
KOS	Kontinuierliche Systeme
KRF	Klemmrollen-Freilauf
KR	Kugelrampe / Überlastkupplung
KS	Kegelscheibe
LB	Lagerbuchse
LW	Lastwechsel
LHD	Latin Hypercube Design
LHS	Latin Hypercube Sampling
MC	Monte-Carlo Methode
MN	Mitnehmer
MK	Materialkosten
MKS	Mehrkörpersysteme
MLS	Moving Least Squares

MOP	Metamodel of Optimal Prognosis
MRO	Möglichkeitsbasierte, robuste Optimierung
MSA	Messsystemanalyse
MTTF	Mean Time to Failure
MU	Reibwert
N3G	Nachstelleinheit der dritten Generation
N2G	Nachstelleinheit der zweiten Generation
N3G⁺	Modifizierte Nachstelleinheit der dritten Generation
NF	Störgröße (<i>engl. Noise Factor</i>)
NR	Nadelrolle
OF	Orthogonale Felder
OSG	Obere Spezifikationsgrenze
pDGL	Partielle Differentialgleichung
PD	Parameter Design
PEP	Produktentwicklungsprozess
POF	Physics of Failures
PS	Passscheibe
QFD	Quality Function Deployment
QLF	Quality Loss Function
QM	Qualitätsmanagement
RDO	Robust Design Optimization
RDM	Robust Design Methodik
RD	Robust Design
RE	Zuverlässigkeitstechnik (<i>engl. Reliability Engineering</i>)
RG	Reliability Growth
RP	Rastpunkt
RPD	Rastpunktdurchmesser
RPT	Rastpunkttiefe
R²	Robuste Zuverlässigkeit (<i>engl. Robust Reliability</i>)
RS	Rampenscheibe
R²T	Robuste Zuverlässigkeitserprobung (<i>engl. Robust Reliability-Testing</i>)
SEK	Sondereinzelkosten
SF	Stellgröße (<i>engl. Signal Factor</i>)
SG	Schaltgabel
SD	System Design
SIM	Simulation

SIM-SMAR²T	Simulationsmethodik in <i>SMAR²T</i>
SMAR²T	Systematic Methodology for Axiomatic Robust Reliability-Testing
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (<i>engl. Signal-to-Noise Ratio</i>)
SOP	Start of Production
SPC	Statistische Prozesskontrolle (<i>engl. Statistical Process Control</i>)
SST	Steile Steigung
TCO	Total Cost of Ownership
TD	Toleranz Design
TM	Taguchi Methode
TRIZ	Theorie des erfinderischen Problemlösens (<i>engl. Theory of Inventive Problem Solving</i>)
USG	Untere Spezifikationsgrenze
VDA	Verein der Automobilindustrie e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VLE	Virtuelle Lebensdauerermittlung
VOC	Voice of Customer
VR	Verbindungsradius
VRO	Varianzbasierte, robuste Optimierung
WNV	Wellen-Naben-Verbindung
WCO	Worst-Case-basierte, robuste Optimierung
WW	Wechselwirkung
WZD	Wirkzusammenhangsdiagramm
ZP	Zentralpunkt
ZFS	Zahnflankenspiel
ZR	Zahnrad
ZS	Zwischenscheibe
ZUV	Zuverlässigkeit, Zuverlässigkeitstechnik
ZVO	Zuverlässigkeitsbasierte robuste Optimierung

Formelverzeichnis

lateinische Buchstaben

a	–	Gewichtsfunktion
A	–	Ereignis; Transfermatrix; Menge; Fläche
AK	–	Normierte Ausschusskosten
b	–	Weibull Formparameter
B_q	–	Lebensdauer bei Ausfallwahrscheinlichkeit von q %
Bel	–	Belief-Funktion
C	–	Kovarianzfunktion
C_{pK}	–	Prozessfähigkeitsindex
Dou	–	Doubt-Funktion
D	m	Durchmesser
DOF	–	Freiheitsgrad
E	–	Erwartungswert
EK	–	Normierte Einkaufskosten
EM	MPa	E-Modul
f	–	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
\tilde{F}	–	Unscharfe Menge
g	–	Gewicht
h	–	Relative Häufigkeit
HK	–	Normierte Herstellungskosten
I	bit	Informationsgehalt
K	–	Kosten
L	–	Verlustfunktion, Grenzwert
L_V	–	Lebensdauer Verhältnis
m	–	Anzahl von Dimension; Faktorstufe; charakteristische Funktion
M	Nm	Drehmoment
MaK	–	Normierte Maschinenkosten
MS_E	–	Mittlere Fehlerquadratsumme (<i>engl. Mean Squared Error</i>)
N	–	Kombinationszahl
NSG	–	Nachstellgeschwindigkeit
p	–	polynomische Basisfunktion, Anzahl der Regressionskoeffizienten
P	–	normiertes, statistisches Gewicht; Erfolgswahrscheinlichkeit
P_A	–	Aussagewahrscheinlichkeit
PK	–	Normierte Prüfkosten

P_q	–	prozentuale Bedeutung
Pr	–	Wahrscheinlichkeit
Pr^*	–	Plausibilität; obere Wahrscheinlichkeit
$P_{\{m\}}$	–	Verbundwahrscheinlichkeit
R	–	Zuverlässigkeit
\tilde{R}	–	Unscharfe Restriktion
Rd	m	Rundung
RMS_E	–	Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (<i>engl. Root Mean Squared Error</i>)
R_{Δ_i}	–	Rangzahl
s	–	Streuung; Standardabweichung
s_{LS}	m	Lüftspiel
ss	–	Systemspanne
SS_E	–	Fehlerquadratsumme
SS_P	–	Parameterquadratsumme
SS_T	–	Gesamte Systemvariation
T	–	Charakteristische Lebensdauer
t_0	–	Ausfallfreie Zeit
u	–	Unabhängige Zufallsvariable
U	–	Raum
Var	–	Varianz
W	$^\circ$	Stufenwinkel
X	–	Zufallsvariable
Y	–	Gemessene Leistung; Produktqualität
Z	–	Normierte Lastwechselanzahl
zs	–	Zielspanne
Z_t	m	Verschiebung in Z-Richtung

griechische Buchstaben

α	–	Abstandsmaß zwischen zwei Faktoren
B	–	Binomialverteilung
γ	–	Schiefe
ζ	–	Kurtosis (Wölbung)
η	–	Durchschnittliches S/N -Ratio
ϕ	–	Normalverteilung

Φ	°	Verdrehwinkel
Γ	–	Log-Normalverteilung
μ	–	Mittelwert
μ_R	–	Reibwert
$\mu_{\tilde{F}}$	–	Zugehörigkeitsfunktion
ψ	–	Normierter Verdrehwinkel
ξ	–	Transformationsfaktor
Ω	–	Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion
π_x	–	Möglichkeitsfunktion
Ψ	–	Gleichverteilung
Ξ	–	Weibullverteilung
σ	–	Standardabweichung
Θ	–	Endliche Menge
ϑ	°C	Temperatur
ϖ	–	Gewichtungsfaktor

Indices

<i>a</i>	Amplitude
<i>A</i>	Aussage
<i>AS</i>	Antriebsspiel
<i>aus</i>	Außen
<i>D</i>	Duplikat
<i>E</i>	einzel, singular
<i>f</i>	Faktor
<i>FK</i>	Faktorstufenkombination
<i>FL</i>	Freilauf
<i>FS</i>	Faktorstufen
<i>FV</i>	Folgeverfahren
<i>ges</i>	gesamt
<i>glob</i>	global
<i>HW</i>	Hebelwinkel
<i>i</i>	Zählvariable
<i>in</i>	Innen
<i>ideal</i>	ideal
<i>j</i>	Zählvariable
<i>k</i>	Faktoranzahl
<i>lim</i>	Grenze
<i>K</i>	Kugel
<i>KF</i>	Kopfreib- und Freilaufmoment
<i>KES</i>	Kegelspiel
<i>KZS</i>	Übersetzung - Kronrad-Zahnrad
<i>m</i>	Zählvariable
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>MOP</i>	META-Modell
<i>N</i>	Nachstellung
<i>NS</i>	Nachstell-Sicherheit
<i>o</i>	Raumrichtung: oben
<i>p</i>	Anzahl hinzugefügter Parameter
<i>PL</i>	Prüfling
<i>PS</i>	Prüfstand

<i>pre</i>	Prognose, Schätzung
<i>R</i>	Referenz
<i>RM</i>	Ratschmoment
<i>RS</i>	Überlast-Sicherheit
<i>SB</i>	Schnittbereich
<i>SM</i>	Sondermaßnahmen
<i>SS</i>	Sicherheits-Spiel
<i>T</i>	total
<i>TS</i>	Ratsch-Sicherheit
<i>sys</i>	System
<i>u</i>	Raumrichtung: unten
<i>UM</i>	Überlastmoment
<i>var</i>	variabel
Δ	Abweichung
-	Gemittelte Größe, Komplementär
$\hat{}$	Statistischer Schätzwert, Punktschätzung

Kurzfassung

Produktanforderungen prosperieren mit Kundenanforderungen, die auf Basis einer immer rasanteren und stetig ansteigenden Funktionserfüllung wachsen. Infolge dieses Trends steigt der Komplexitätsgrad mit zunehmender Funktionsdichte in Systemen, Produkten und Prozessen, wodurch wiederum die Forderungen nach Qualität bezüglich der Zuverlässigkeit, der Robustheit, der Sicherheit und der Energieeffizienz zunehmen. Um den gesamten, vorgenannten Ansprüchen gerecht zu werden, muss die Priorität im Produktentwicklungsprozess auf dem Gestalten von robusten, zuverlässigen Produkten und Prozessen mit deren Derivaten sowie deren Design-Parametern liegen, damit diese innerhalb der geforderten Einsatzzeit gegenüber Markt-/ oder Anforderungsschwankungen unempfindlicher reagieren.

Um diese Unempfindlichkeit gegenüber internen sowie externen Störeinflüssen innerhalb einer geforderten Einsatzzeit mit geringster Varianz aufrecht zu erhalten, wird nach der in dieser Arbeit vorgestellten Theorie der *Robusten Zuverlässigkeit*, eine Definition festgelegt, die die beiden Qualitätsanforderungen und Theorien *Zuverlässigkeit* und *Robustheit* vereint. Mit dem Erklärungs- und Modellierungsmodell R^2 -Modell und dessen Derivate R^2_{Prozess} - und R^2_{Feld} -Modell wird die Theorie visualisiert und dem Ingenieur¹ ein entwicklungsbegleitendes Werkzeug zur Verfügung gestellt. Die bislang fehlende, methodisch geführte Entwicklungsabfolge des *Robust Designs* sowie die mangelnde Kombination und der unberücksichtigte Zusammenschluss von Methoden der *Zuverlässigkeitstechnik*, geben Anlass zur Festlegung und Definition einer integralen Methodik zur Entwicklung robuster, zuverlässiger Produkte: die *Systematic Methodology for Axiomatic Robust Reliability-Testing (SMAR²T)*. Die Methodik behandelt neben der beschreibenden, chronologischen Entwicklungsabfolge mit den vier Phasen: *System Design*, *Parameter Design*, *Toleranz Design* und *Robuste Zuverlässigkeitserprobung*, den Aspekt der frühzeitigen Erkennung von unerwünschten Resultaten, wie Früh- und Zufallsausfällen, sowie deren Berücksichtigung im Design. Die Validierung des Modells, der Methodik und der Theorie erfolgt nach dem *Validating Square*. Mit der durchgeführten Literaturarbeit sowie des Benchmarks wird auf den Neuheitsgrad und das bisherige Defizit einer ganzheitlichen Methodik hingewiesen. Mit der Modellierung und der Definition der Thematik wird deren Relevanz überprüft sowie deren Methodenanwendung im ersten Schritt auf einfache Maschinenelement-Aufgaben und im zweiten Schritt auf ähnliche und komplexere Problemstellungen mit einer punktuell abschließenden Lösungsbewertung übertragen.

Tendenzen für heutige Herausforderungen zur effizienten Produktentwicklung weisen in die Richtung der simulativ gestützten virtuellen Herangehensweise. Eine solche potentielle Herangehensweise ist die Betrachtung des Produktverhaltens unter Schwankungseinflüssen sowie deren Quantifizierung. Zur Unterstützung einer effizienten und nachhaltigen Parameterstudie zur Identifikation signifikanter Einflussgrößen für die robuste, zuverlässige Entwicklung des Designs nach *SMAR²T*, wird eine adaptive, funktionsbasierte Simulationsstrategie entwickelt und anhand einzelner Anwendungsbeispiele umgesetzt. Auf Basis dieser Strategie können bislang aufwendige Simulationsstudien ressourcenschonend mit steigendem Informationsgehalt durchgeführt und betrachtet werden.

¹ Die vorliegende Dissertation verwendet sprachlich das generische Maskulinum zur sprachlichen Vereinfachung und impliziert gleichermaßen die weibliche Form.

Abstract

Integral methodology for the development of robust, reliable products

Product requirements thrive with customer requirements that are based on increasingly rapid and continuously increasing fulfilment of functions. As a result of this trend, the degree of complexity rises in line with increasing functional density in systems, products and processes, which in turn increases the demand for quality in terms of reliability, robustness, safety and energy efficiency. In order to satisfy all of the aforementioned requirements, the priority in the product development process must be to design robust, reliable products and processes, including their derivatives and their design parameters, so that they are less sensitive to market or demand fluctuations within the required operating time.

In order to maintain this imperviousness to internal and external disturbances within a required operating time with the lowest possible variance, the definition of *Robust Reliability* presented in this work comprises a definition that combines the two quality requirements and theories of *reliability* and *robustness*. Using the R^2 explanatory and modeling model and its derivatives (the $R^2_{process}$ - and R^2_{field} -model), the theory is visualized, and the engineer is provided with a tool which accompanies development. The present lack of a methodologically driven robust design development sequence, as well as the lack of combination and disregarded consolidation of reliability techniques, has given rise to the determination and definition of an integral methodology for developing robust, reliable products: The *Systematic Methodology for Axiomatic Robust Reliability-Testing (SMAR²T)*. In addition to the descriptive, chronological development sequence with the four phases *System Design*, *Parameter Design*, *Tolerance Design* and *Robust Reliability Testing*, the methodology addresses the aspect of early recognition of undesirable results, such as early and random failures, as well as their design considerations. The validation of the model, the methodology and the theory takes place as per the *Validating Square*. The literature work and the benchmark refer to the degree of novelty and the previous deficit of a holistic methodology. With the modeling and the definition of the topic, its relevance is examined, and its method application transferred in the first step to simple machine-element tasks and - in the second step - to similar and more complex problems, concluding with a point-by-point solution evaluation.

Trends for today's challenges for efficient product development point in the direction of the simulatively supported virtual approach. One such potential approach is the consideration of product behavior amid fluctuating influences and their quantification. To support an efficient and sustainable parametric study for the identification of significant influencing factors for the robust, reliable development of the design according to *SMAR²T*, an adaptive, function-based simulation strategy is developed and implemented on the basis of individual application examples. Based on this strategy, simulation studies which have thus far been complex can be carried out and considered in a resource-conserving manner with increasing information content.

Glossar

Additivität Möglichkeit einer Linearkombination mehrerer Aktivitäten

Antwortmatrix Ergebnismatrix der Einzelversuche

Derivat Modifizierte, abgeleitete Methode, Methodik oder Design

Diskretisierung Einteilung von kontinuierlichen, stetigen Objekten und Funktionen

Effekt Information über die Auswirkung von Faktoren auf die Ergebnisse

Eigenschaft Größe in Naturwissenschaft und Technik, wobei Körper-Eigenschaft abhängig und stoffliche Eigenschaft unabhängig von der Größe eines Körpers ist.

Ereignis Eine Teilmenge der Ergebnismenge, dessen Elemente Ergebnisse sind, die für einen bestimmten Standpunkt als günstig betrachtet werden können.

Faktor Unabhängig einstellbare, quantitative oder qualitative Größe, auch Versuchsparameter, Variable oder Einflussgröße genannt.

Faktorstufe Einstellwert im Versuchsplan, der variiert wird.

Grundgesamtheit Menge aller statistischen Einheiten mit übereinstimmenden Identifikationskriterien

Kovarianz Nichtstandardisiertes Zusammenhangsmaß für einen monotonen Zusammenhang zweier Zufallsvariablen

Matrixexperiment Versuchsbedingungen in Matrixformat

Merkmal Produktausprägung(en), die eine erkennbare Eigenschaft definiert, die sich von anderen unterscheidet. Merkmale können quantitativ gemessen oder gezählt sowie qualitativ in Worte oder Zahlen beschrieben werden.

Methode Beschreibung eines planmäßigen, regelbasierten Vorgehens, welches bestimmte Tätigkeiten zur Zielerreichung vorgibt. Sie kann als Denk- und Handlungsempfehlung beziehungsweise als Handlungsanweisung verstanden werden.

Methodik Sie bildet eine Abfolge von Methoden und Arbeitsmitteln und verknüpft diese in einer planmäßigen Vorgehensweise zusammen.

Permutation Gesamtheit der möglichen Kombinationen von Elementen einer gegebenen Menge

Population Gesamtheit aller Individuen einer Art, die an einem Ort leben.

Qualität Güte aller Eigenschaften, die die geforderte Funktion(en) innerhalb der definierten Einsatzzeit erfüllt.

Randomisierung Zufällige Zuordnung von Einzelversuchen zu den Versuchseinheiten

Residuen Anteile der Variabilität, die durch ein gegebenes Modell nicht erklärt werden können sowie die Abweichung zwischen der Datenbasis und dem Regressionsmodell.

Restriktion Verringerung der Handlungs- und Wahlmöglichkeit

Sampling Entnahme oder Ziehung von Stichproben

Schwankung Zufällige Varianz innerhalb eines Definitionsbereichs

Stetigkeit Beschränkung der Änderung von Funktionswerten auf hinreichend kleine Änderungen im Argument

Störgröße Versuchsparameter, deren Wirkung als eine zufällige Einflussgröße zu verstehen ist.

Theorie Möglichkeiten zur Erklärung eines Themas, basierend auf wissenschaftlichen Daten, die sich ändern können und dabei kontinuierlich unsere Erfahrung und Wissen formen.

Ursprungsunsicherheit Herausforderung in der Probabilistik zur Aufdeckung der Gründe für die Einbringung der Unsicherheit

Validierung Nachweis über die Einsatzzeignung einer analytischen Methode und Prüfung, ob das Verhalten beziehungsweise die Ergebnisse des Simulationsmodells mit der Realität hinreichend genug und fehlerfrei abgebildet werden.

Variabilität Veränderlichkeit sowie mehr oder minder große Verschiedenheit in der Ausprägung von Eigenschaften

Vermengung Überlagerung von Faktoren und Wechselwirkung, keine Trennung von Haupt- und Wechselwirkungseffekt möglich

Versuch Gesamtheit aller Einzelversuche, die in einem Versuchsplan festgelegt sind, auch Experiment genannt.

Versuchsparameter Vergleichsbeschreibung: Faktor

Versuchsplan Auflistung aller Einzelversuche mit den einzelnen Faktorstufen der Versuchsparameter

Wechselwirkung Einfluss eines Faktors mit einem anderen Faktor auf die Zielgröße

Zielgröße Quantitative oder qualitative Größe zur Dokumentation des Versuchsergebnisses

Zufallsexperiment Experiment, dessen Ausgang einzig vom Zufall bestimmt wird. Es ist unter konstanten Bedingungen beliebig oft wiederholbar.

1 Einleitung

Um sich am Markt zu behaupten, müssen Produkte ihre Funktion unter Einfluss von inneren und äußeren Störgrößen innerhalb der geforderten Einsatzzeit gewährleisten. Zudem verlangen diese Produkthanforderungen bei gleichbleibendem Bauraum und meist gleichbleibender Anzahl von Bauteilen, eine stetig zunehmende Funktionalität und Funktionsdichte. Dabei sollen die Qualität, die *Zuverlässigkeit* und die *Robustheit* dieser Produkte beibehalten, bestenfalls gesteigert werden. Dieser Zielkonflikt lässt sich mit der Gestaltung von robusten, zuverlässigen Produkten bereits in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses bewerkstelligen, da dort das höchste Potential zur Zielkonfliktlösung besteht. Um dieses Potential auszuschöpfen, muss dem Entwickler eine ganzheitliche, zeitlich geordnete Methodik an die Hand gegeben werden. Um diese Herausforderungen zur effizienten Produktentwicklung zu bewältigen, weisen Tendenzen in Richtung simulativ gestützten, virtuellen Herangehensweisen unter Zuhilfenahme von ressourcenschonenden CAE-Methoden¹. Hierfür werden in der industriellen Entwicklung komplexer Produkte zunehmend Methoden angewandt, die unter Einsparung von notwendigen Ressourcen umfassende, realitätsnahe Ergebnisse liefern und zielgerichtet an die robusten, zuverlässigen Anforderungen optimiert werden.

1.1 Problemstellung

Zur Gestaltung von robusten, zuverlässigen Produkten müssen zwei Aspekte berücksichtigt werden. Zum einen müssen *Design Parameter (DP)* hinreichend definiert werden, damit das Design möglichst unempfindlich (robust) gegenüber in der Praxis ausgesetzten Störeinflüssen ist, da sich beispielsweise der geforderte Nennwert beziehungsweise die vorgegebene Toleranz durch den Konstrukteur in der Produktion anders verhält. Zum anderen muss geklärt werden, ob ein Optimum dieser Parameter hinsichtlich der Produkt- beziehungsweise der Kundenanforderungen existiert. Zudem soll daraus eine, dem Kunden gegenüber einzuhaltende, Qualität im geforderten Einsatzzeitraum und folglich eine Strategie der Offline-Qualität² erreicht werden. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es zur Orientierung einer umfangreichen, zeitlich geordneten Vorgehensweise. Das erste Teilergebnis einer zuvor durchgeführten Literaturarbeit beschreibt den bestehenden Mangel an Vorgaben für die industrielle Umsetzung von bekannten Methoden, wie etwa der *Robust Design Methodik (RDM)* oder der *Zuverlässigkeit (ZUV)*³, weshalb eine ganzheitliche Methodik zur Umsetzung der robusten, zuverlässigen Anforderungen entwickelt werden sollte. Die genannte zunehmend

¹ *Computer-aided engineering*, angelsächsisch für *rechnergestützte Entwicklung*

² Qualitätssteuerung während der Entwicklung

³ *Zuverlässigkeit* wird dem Begriff *Zuverlässigkeitstechnik* in dessen Bedeutung gleich gesetzt.

computergestützte Produktentwicklung muss komplexe Wirkzusammenhänge nach geeigneten Simulationsstrategien umsetzen, um dabei schwankende Einflüsse von außerhalb und innerhalb des Produktes sowie deren geforderte Lebensdauer zu untersuchen und zu prognostizieren. Die hierfür notwendige Herangehensweise wird zwar durch bereits vorhandene hard- und softwarebasierte Ressourcen verstärkt unterstützt, dennoch müssen geeignete Modelle zu Einfluss- und Lebensdaueranalysen, beispielsweise durch streuende Parameterstudien, entwickelt beziehungsweise ergänzt werden.

Das zweite Teilergebnis der Literaturarbeit ist die Betrachtung der Theorien *Robustheit* und *Zuverlässigkeit* im allgemeinen Verständnis. Die Begriffe „robust“ und „zuverlässig“ werden sowohl für Produkte als auch für Prozesse verwendet, die den vom Kunden gestellten Qualitätsansprüchen entsprechen. Gleichzeitig sind die Definitionen der *Robustheit* und der *ZUV* unterschiedlich und haben keine gemeinsame, theoretische Basis. Robuste Produkte oder Prozesse verhalten sich unempfindlich gegenüber variierenden Einflussgrößen und erfüllen somit auch im Fall von schwankenden Produktionstoleranzen und/oder äußeren/inneren Einwirkungen, die vorgesehene Funktion. Die *ZUV* ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass Produkte oder Prozesse unter gegebenen Bedingungen innerhalb eines definierten Zeitraums nicht ausfallen. Es stellt sich somit die Frage, inwieweit ein robustes Design der geforderten *ZUV* entspricht. Das Teilergebnis der Literaturarbeit legt dabei die Schlussfolgerung nahe, dass robuste Produkte oder Prozesse nicht zwingend zuverlässig sein müssen, da sie unter Umständen innerhalb der geforderten Lebensdauer ausfallen können. Im Gegensatz dazu sind zuverlässige Produkte oder Prozesse nicht zwangsläufig robust. Eine Vermeidung von Produktausfällen durch Überdimensionierung überdeckt beispielsweise konstruktive Mängel und kann zu einer, durch reduzierte Effizienz sowie erhöhtem Ressourcenverbrauch, „erkauften“ *ZUV* führen.

1.2 Ziele dieser Arbeit

Um den zwischen *Robustheit* und *ZUV* bestehenden Zusammenhang sowie deren Synergien gezielt auszunutzen, werden in dieser Promotionsarbeit Vorteile vorhandener *RD*- und *ZUV*-Ansätze auf Basis der durchgeführten, strukturierten Literaturarbeit diskutiert. Nach Festlegung von grundlegenden Zielsetzungen wird die Definition der *RDM* um die Einsatzzeit der definierten Zeitdauer erweitert sowie eine verallgemeinernde Definition beider Theorien formuliert und dem Begriff der *Robusten Zuverlässigkeit* (R^2) zugeordnet. Zur Veranschaulichung der R^2 -Theorie wird das R^2 -Modell entwickelt, welches bestehende Unsicherheiten sowie die Komplexität von Abhängigkeiten plastisch darstellt.

In einem weiteren Teil der Arbeit wird auf Basis der R^2 -Theorie sowie auf dem bestehenden Defizit einer ganzheitlichen und in der Praxis unzureichenden Umsetzbarkeit von *RD*- und *ZUV*-Methodiken, die ganzheitliche, zeitlich geordnete Vorgehensweise: *Systematic Methodology for Axiomatic Robust Reliability-Testing (SMAR²T)* entwickelt. Sie zeigt eine zielführende Abfolge anhand bestehender Methoden auf und ermöglicht mit einer gezielten *Robusten Erprobung (Robuste Zuverlässigkeitserprobung (R²T))*, Produkte nach den genannten Qualitätskriterien zu gestalten.

Die Forschungsk Kooperation zwischen dem *Institut für Maschinenelemente (IMA)* der Universität Stuttgart und der *Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH (SfN GmbH)* forscht

nach neuen Lösungsansätzen zur Gestaltung von robusten und zuverlässigen Produkten, die direkt an einem aktuellen Entwicklungsprojekt, einer innovativen Nachstelleinheit für Nutzfahrzeuggremssysteme, angewandt umgesetzt werden. Die Validierung des Ansatzes, der Theorie, der Methodik sowie des Modells einer *Robusten Zuverlässigkeit* wird nach dem *Validating Square*⁴ erbracht. Zusammengefasst können die Ziele dieser Arbeit wie folgt definiert werden:

- ▶ Umfassende Bewertung von Unsicherheiten im Produktentwicklungsprozess,
- ▶ Zusammenschluss von *RDM* und *ZUV* zu einer kombinierten Theorie der *Robusten Zuverlässigkeit*,
- ▶ Definition und Darstellung des direkten Zusammenhangs der Theorie am Erklärungsmodell durch Erfassung der *Robustheit* im Neuzustand und deren zeitlichen Änderung sowie die daraus folgende Erfassung der *ZUV*-Entwicklung,
- ▶ Integration der Qualitätsmerkmale *Robustheit* und *ZUV* in eine ganzheitliche Methodik unter Berücksichtigung der Kosten,
- ▶ Überwindung der Defizite heuristischer Methodiken mit der maßgeblichen Unterstützung von formalen Beurteilungs- und Gestaltungsroutinen sowie durch die Vorgabe einer zeitlichen Produktentwicklungsabfolge,
- ▶ Modell-, Methodik- und Theorie-Validierung infolge Literaturarbeit, Überprüfung des Neuheitsgrads und Umsetzung an Anwendungsbeispielen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Einen schematischen Aufbau dieser Arbeit zeigt Bild 1.1. Beginnend in **Kapitel 1** mit der *Einleitung* hinsichtlich *Problemstellung* werden die Ziele dieser Arbeit vorgestellt. Zudem sollen Anmerkungen zur durchgeführten Literaturarbeit auf deren Umfang und Qualität hinweisen. In **Kapitel 2** werden Teile der systematischen Literaturarbeit zum *Stand der Forschung und Technik* sowie zu den jeweiligen Grundlagen, die als Basis dieser Arbeit und für die Aufgabenstellung der *Robusten Zuverlässigkeit* dienen, eingeordnet. Zudem werden zeitliche Definitionseinordnungen der Theorien zu *Unsicherheit* und *Komplexität* sowie getrennt in **Kapitel 3** zur *Robust Design Methodik* und *Zuverlässigkeit* aufgezeigt und deren Methoden bewertet. Diese Aufteilung der beiden Grundlagenkapitel dient der direkten Einordnung und Gegenüberstellung beider Theorien. Dem Leser soll dadurch die R^2 -Theorie im Vergleich zu beiden genannten Theorien sowie deren Werkzeuge für die Methodik *SMAR²T* aufgezeigt und daraus die benötigten Grundlagen-Werkzeuge zur Modellierung des Erklärungsmodells R^2 -Modell abgeleitet werden.

Das Fazit der Literaturarbeit leitet in das **Kapitel 4** *Zielsetzung und Forschungsbedarf* über, welches die Notwendigkeit eines Zusammenschlusses der beiden Theorien *Robustheit* und *Zuverlässigkeit* aufzeigt und gleichermaßen die Notwendigkeit einer ganzheitlichen, zeitlich eingeordneten Methodik zur Entwicklung solcher Produkte hinweist.

Auf Basis der genannten Defizite wird der Zusammenschluss beider Theorien in **Kapitel 5** diskutiert und erörtert. Hierfür wird eine Definition der *Robusten Zuverlässigkeit* (*Robust*

⁴ Eine Validierungsmethode nach [PEB⁺00], die in Kapitel 5.3 ausführlicher beschrieben wird.

Reliability R^2) aufgestellt und mit dem Erklärungsmodell (*R^2 -Modell*) unterstützend vorgestellt. Für die Validierung der Theorie wird die Vorgehensweise nach dem *Validation Square* aufgezeigt, nach der in den nachfolgenden Kapiteln die Anwendung der *Robusten Zuverlässigkeit (Robust Reliability R^2)* sowie deren Methodik erfolgt.

In **Kapitel 6** wird die Validierung der ganzheitlichen, zeitlich definierten Entwicklungsmethodik *SMAR²T* mit deren vier Phasen an Beispielen von Funktionsbaugruppen, des in **Kapitel 7** folgenden, komplexen Anwendungsbeispiels, einer Nachstelleinheit für Nutzfahrzeugbremsysteme der Firma *Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH*, abgerundet.

Ergänzend wird in den letzten beiden Kapiteln eine für die Bewertung der *Robusten Zuverlässigkeit* notwendigen Simulationsmethodik, zuzüglich Strategien, angewandt vorgestellt, indem der Zielkonflikt bezüglich dem hohen Aufwand der Modellierung aufgrund der Funktionskomplexität und dem Detaillierungsgrad berücksichtigt und eine Vorgehensweise zur Gestaltung eines angepassten Simulationsmodells beschrieben wird.

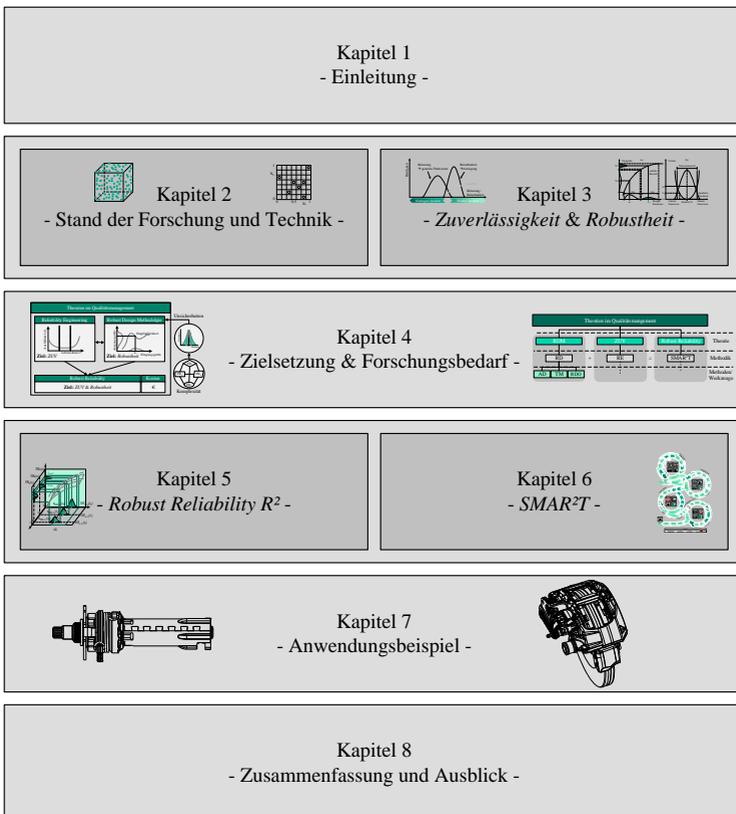


Bild 1.1: Schematischer Aufbau der Arbeit

2 Stand der Forschung und Technik

Der Stand der Forschung und Technik beschränkt sich in der vorliegenden Dissertation auf die qualitätslenkenden Domänen der *Unsicherheit* und der *Komplexität* sowie deren Modellierungsmöglichkeiten. Hierfür werden deren Grundtheorien und Methoden betrachtet und bewertet. Für eine verbesserte Veranschaulichung werden ergänzende Grundlageninformationen an den benötigten Stellen in den jeweiligen Kapiteln zur Verfügung gestellt.

2.1 Grundlagen zur Beschreibung von Unsicherheiten

In diesem Teilkapitel wird die Problematik von nie exakt erfassbaren Informationen diskutiert. Dies wird beginnend mit den Grundlagen zur Erfassung von Unsicherheiten beschrieben, aus denen die notwendige Abgrenzung zur Betrachtung von Unsicherheiten abgeleitet wird, damit bestehende Qualitätseinflüsse auf das Produkt berücksichtigt werden können. Zudem werden die entsprechenden Methoden zur Quantifizierung von Unsicherheiten diskutiert sowie deren Potentiale aufgezeigt.

2.1.1 Aleatorische und epistemische Unsicherheit

Ausgehend von der Ursprungsunsicherheit¹ nach [Apo90] kann von einer Funktion ausgegangen werden, die vom Wissens- und Informationsstand abhängig ist und damit entweder subjektive oder objektive Informationen umfasst. Infolgedessen werden Unsicherheiten in *aleatorische* und in *epistemische* Unsicherheiten unterteilt.

Unter *aleatorischer Unsicherheit* wird die systemimmanente, nicht vorhersehbare und rein statistische Abweichung verstanden. Sie resultiert aus der natürlichen Variabilität eines zu untersuchenden Prozesses und ist folglich eine nicht reduzierbare Unsicherheit. In diesem Zusammenhang sind die natürlichen Abweichungen, wie beispielsweise die Material- und Temperaturschwankungen sowie die natürliche Variabilität, auf die der Mensch keinen Einfluss hat.

Die *epistemische* Unsicherheiten sind hingegen Abweichungen, die durch Erhöhung des Informations- und Wissensgehalts reduziert werden. Entsprechend lassen sich diese Unsicherheiten auf ein Informationsdefizit bezüglich des zu betrachteten Produkts oder Prozesses, der dazugehörigen Modellkette sowie der entsprechenden Parameterinteraktionen schließen [Kne03]. Die *epistemischen Unsicherheiten* treten in der frühen, virtuell geprägten Entwicklungsphase auf.

Zusammenfassend sind *aleatorische* Unsicherheiten objektive, sogenannte Typ A, Unsicherheiten und *epistemische Unsicherheiten* subjektive, sogenannte Typ B, Unsicherheiten. Diese

¹ Herausforderung in der Probabilistik zur Aufdeckung der Gründe zur Einbringung der Unsicherheit

Unterteilung hat den Vorteil zur Trennung der reduzierbaren, durch die Stochastik bedingten, Unsicherheiten [Dan04]. Eine Übersicht über die Definition und Abgrenzung von *aleatorischer* und *epistemischer Unsicherheit* bezüglich des Informationsgehalts bietet Bild 2.1. Hier wird der größte Informationsgehalt bei Kennung aller Einflussgrößen und Modelldaten aufgezeigt, vergleiche Bild 2.1 (a). In Bild 2.1 (d) hingegen besteht nahezu keine Information bei einer vollkommenen Unkenntnis dieser Größen. Innerhalb dieser Grenzfälle besteht eine unvollkommene Information (c) bezüglich des Einflusses und der Modelldaten, wobei bei (b) eine vollkommene Information von bestimmaren Einflussgrößen und Modelldaten herrscht. Dieser im besten Fall zu erreichende Punkt, steht für die maximale Reduzierung der *epistemischen Unsicherheit* und sollte im Idealfall erreicht werden, auch wenn immer eine Restunsicherheit, *aleatorische Unsicherheit*, vorhanden ist [Mag90], [Apo90].

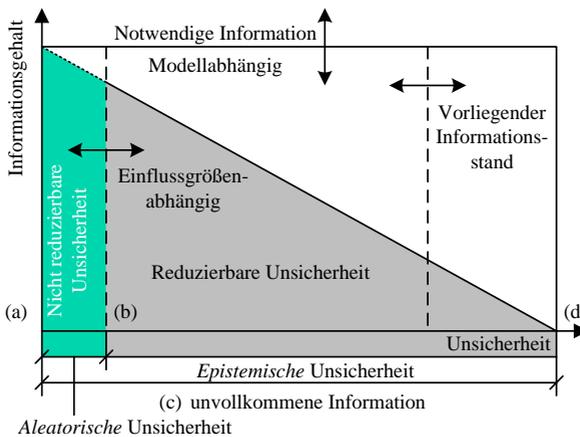


Bild 2.1: Modell zur Abgrenzung *aleatorischer* und *epistemischer* Unsicherheit in Anlehnung an [Mag90] und [Kne03]

Für eine systematische Herangehensweise zur Erfassung von sämtlichen Unsicherheiten und zur Erreichung maximaler Unsicherheitsreduzierung ist die Unsicherheitsklassierung ein sehr hilfreiches Werkzeug. In Tabelle A.1² ist eine Auswahl an Klassierungsmodellen nach [Thu05] gelistet, deren Beschreibung in den entsprechenden Quellen zu finden ist. Weitere wichtige Klassierungsmöglichkeiten sowie das Unsicherheitsmodell des *SFB 805*³ sind beispielsweise in [EKE⁺10] und in [EKB⁺12] veröffentlicht. Die in Tabelle A.1 zusammengefasste Klassierungen treffen nicht umfassend die Betrachtung der Unsicherheiten für die in Kapitel 5 vorgestellte Theorie der *Robusten Zuverlässigkeit* und dessen R^2 -Modell sowie deren Methodik in Kapitel 6. Infolgedessen wird eine für die R^2 -Theorie zusammenfassende Aufstellung für die Phasen des Produktlebenslaufes in Tabelle 2.1 gezeigt, wobei sowohl

² Tabellenreferenz mit vorangestellten Buchstaben A und Bildreferenz mit vorangestellten Buchstaben B befinden sich im Anhang.

³ Sonderforschungsbereich 805: *Beherrschung von Unsicherheit in lastragenden Systemen des Maschinenbaus* der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

aleatorische als auch *epistemische Unsicherheiten* betrachtet werden, um möglichst einen hohen Informationsgehalt zu erhalten.

Tabelle 2.1: Zusammenfassende Aufstellung der Unsicherheitsbetrachtung der *Robusten Zuverlässigkeit* R^2

Phase	Unsicherheit
Produktentwicklung	Auswahl aussichtsreicher Wirkprinzipien, Funktionen und Effekte
	Produkteigenschaften (<i>Geometrie, Werkstoff, Wirkungsgrad, etc.</i>)
	Erfassen von Entwicklungszielen (<i>Leistung, Lebensdauer, Kosten, Qualität, etc.</i>)
	Modellierung und Simulation (<i>Modellgenerierung, Vereinfachungsgrad, etc.</i>)
	Stochastische Annahmen sowie Quantifizierung von Expertenwissen
Herstellung	Werkstoffe (<i>Materialanisotropie und -inhomogenitäten, Reinheit, Eigenspannung, Lunkerbildung, chemische Beständigkeit, etc.</i>)
	Produktionsprozess (<i>Tribologische Eigenschaften, Verschleiß an Werkzeugen und Werkzeugmaschinen, mechanische und thermische Schwankungen, Toleranzen, Messunsicherheiten, etc.</i>)
	Produktionsverfahren (<i>Qualität, Marktakzeptanz, Verfügbarkeit, Auslastung, Preise, Toleranzen, etc.</i>)
Nutzung	Beanspruchung und Lastkollektive
	Ausfallarten und Auftretenswahrscheinlichkeit
	Umweltbedingungen (<i>Temperatur, Feuchtigkeit, etc.</i>)

Auf Basis der Klassierung in *aleatorische* und *epistemische Unsicherheiten* werden in den folgenden Teilkapiteln drei Theorien zur Erfassung von Unsicherheiten beschrieben.

2.1.2 Wahrscheinlichkeitstheorie

Die Probabilistik (Wahrscheinlichkeitstheorie) ist eine mathematische Theorie zur Beschreibung von objektiven Sachverhalten basierend auf beispielsweise detaillierten und Messung beruhenden Aussagen sowie *aleatorischen Unsicherheiten*. Basis der Probabilistik sind Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen, die ein Grad an Sicherheit beschreiben und sich von der absoluten Sicherheit in gleichem Maße unterscheiden, wie ein Teil vom Ganzen [KF88]. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion (Ω) beschreibt nach den *Axiomen* von *Kolmogoroff*⁴ die Wahrscheinlichkeit $Pr(A)$ des Ereignisses A als Grenzwert der relativen Häufigkeit $h_N(A)$ für $N \rightarrow \infty$ [Kol33]. Zudem gibt die Wahrscheinlichkeit (Pr) an, mit der ein zufälliger Wert (Zufallsvariable (X)) kleiner als ein deterministisch festgelegter Referenzwert X_R ist [KF88]:

$$F(X_R) = Pr[X_R - X] \in [0, 1] \quad , \quad (2.1)$$

⁴ Andrei Nikolajewitsch Kolmogoroff (*25. April 1903 - †20. Oktober 1987); Sowjetischer Mathematiker und Statistiker. Bekannteste Beiträge auf den Gebieten der *Wahrscheinlichkeitstheorie* und der *Topologie* [FW07].

mit dem Integral der Funktion f nach X_R :

$$f(X_R) = \frac{d}{dX_R} F(X_R) \quad . \quad (2.2)$$

Deskriptive Statistik

Zur Beschreibung von Unsicherheiten in Form von Verteilungsfunktionen zur Bewertung von Simulationen in frühen Phasen beziehungsweise von realen Tests in der Validierungs- oder Erprobungsphase in *SMAR²T* oder im R^2 -Modell sind die statistischen Momente der deskriptiven Statistik: Mittelwert, Standardabweichung (Varianz), Schiefe und Kurtosis (Wölbung) unterstützend.

Mittelwert

Das erste und bedeutendste, empirische Moment ist der arithmetische Mittelwert. Er beschreibt im Allgemeinen die Lage (statistischer Durchschnittswert) einer Verteilung. Zudem werden mit dem Mittelwert weitere Kenngrößen (wie Streuung, höhere Momente, Kovarianz) gebildet. Liegen n Beobachtungswerte t_i vor, ergibt sich der arithmetische (empirische) Mittelwert μ zu [BS58]:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad . \quad (2.3)$$

Bildlich entspricht der arithmetische Mittelwert dem Massenschwerpunkt eines Körpers. Zudem ist der Mittelwert ein *Schätz-* oder *Näherungswert* für den *wahren* Wert der Größe t [Pap15].

In der Wahrscheinlichkeitstheorie wird der Mittelwert einer *diskreten* Zufallsvariablen X mit der Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(t)$ als Erwartungswert bezeichnet [Pap14], [BS58]:

$$\bar{X} = E(X) := \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt = \sum_i t_i \cdot f(t_i) \quad . \quad (2.4)$$

Standardabweichung und Varianz

Die empirische Standardabweichung s oder Varianz s^2 ist ein geeignetes, genaueres Maß für die Bestimmung einer Stichprobenverteilung [Pap15]. Sie bestimmt die Abweichung der einzelnen Beobachtungswerte t_i vom Mittelwert μ und wird wie folgt gebildet:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2} \quad (t \geq 2) \quad . \quad (2.5)$$

Für die Beschreibung der Varianz Var oder dem Streuungsquadrat und die nichtnegative Zahl s als Streuung der *diskreten* Zufallsvariablen X gilt nach [BS58]:

$$s^2 = Var(X) := \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \bar{X})^2 f(t) dt = \sum_i (t_i - \bar{X})^2 \cdot f(t_i) \quad . \quad (2.6)$$

Schiefe

Das dritte empirische Moment, die Schiefe γ , dient zur Beschreibung der Form der Verteilung und ist ein Maß für die Asymmetrie [BL04]:

$$\gamma = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \cdot \frac{1}{s^3} \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^3 \quad . \quad (2.7)$$

Kurtosis (Wölbung)

Die Kurtosis ζ einer Verteilung beschreibt deren relative Abweichung von der *Normalverteilung*, die eine Kurtosis von null aufweist. Eine negative Kurtosis beschreibt eine flache (platykurtische), eine positive (leptokurtische) Kurtosis hingegen eine spitz zulaufende Verteilung. Die Kurtosis einer Stichprobe ist nach [BS58] wie folgt definiert:

$$\zeta = \frac{\mu^4}{s^4} - 3 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i - \bar{X}}{s} \right)^4 \right) - 3 \quad . \quad (2.8)$$

Verteilungen

Für die Beschreibung von Ereignissen, wie in der ZUV überwiegend angewandt, werden Verteilungsfunktionen als Werkzeug eingesetzt. An dieser Stelle wird nur auf die für diese Arbeit wichtigsten Verteilungsfunktionen eingegangen, das sind: die *Gleichverteilung* (Ψ), die *Normalverteilung* (ϕ), die *Log-Normalverteilung* (Γ), die *Weibullverteilung* (Ξ) und die *Binomialverteilung* (B).

Gleichverteilung

Die *Gleichverteilung* (Ψ)⁵ wird im Allgemeinen verwendet, wenn keine genaue Kenntnis über einen Sachverhalt besteht beziehungsweise das Eintreten einer Wahrscheinlichkeit nicht genau vorhersehbar ist und entsprechend zu jedem Ereignis eintreten kann. Die stetige Gleichverteilung ist nach [BS58] mit $a, b \in \mathbb{R}$ definiert zu:

$$\text{Dichtefunktion} \quad \Psi(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq t \leq b \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad , \quad (2.9)$$

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} \quad F(t) = \begin{cases} 0 & t < a \\ \frac{t-a}{b-a} & a \leq t \leq b \\ 1 & t > b \end{cases} \quad . \quad (2.10)$$

Normalverteilung

Die *Normalverteilung* (ϕ)⁶ hat eine große Bedeutung in der Naturwissenschaft und Technik. Sie nimmt eine zentrale Rolle in den Anwendungsgebieten, wie der Messtechnik, der

⁵auch Rechteckverteilung oder Uniformverteilung genannt

⁶auch bekannt als *Gaußsche Normalverteilung* oder *Gauß-Verteilung*. Benannt nach Johann Carl Friedrich Gauß (*30. April 1777 - †23. Februar 1855): Deutscher Mathematiker, Astronom, Geodät und Physiker. Bekannteste Beiträge wie die *Methode der Feinsten Fehlerquadrate*, die *nichteuklidische Geometrie*, die *Integralsätze* oder zum *Erdmagnetfeld* [FW07].

Produktion, der Qualitäts- und Fertigungskontrolle ein und dient als einfache Approximationsverteilung für die Binomial-, hypergeometrische und Poisson-Verteilung [Pap16]. Ihre Dichtefunktion und Ausfallwahrscheinlichkeit kann wie folgt beschrieben werden [BS58]:

$$\text{Dichtefunktion} \quad \phi(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad , \quad (2.11)$$

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} \quad F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^t e^{-\frac{(\tau-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \delta \tau \quad . \quad (2.12)$$

Die Kennwerte der *deskriptiven* Statistik der *Normalverteilung* sind der Mittel- oder Erwartungswert μ , die Standardabweichung σ und die Varianz σ^2 . Eine normierte Übersicht der *Normalverteilung* mit ihren Derivaten für unterschiedliche Standardabweichungen ist in Bild 2.2 gegeben.

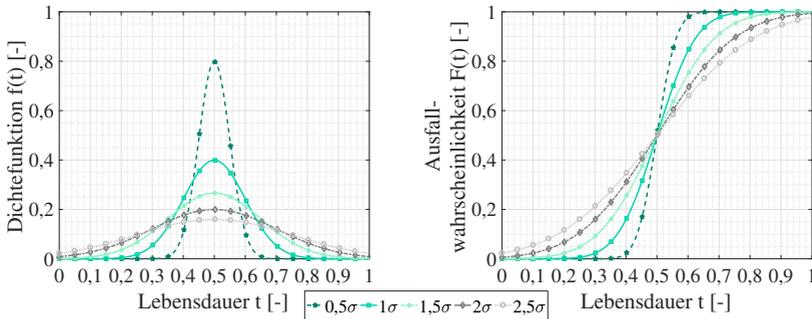


Bild 2.2: Normierte Darstellungen der *Normalverteilung* (ϕ)

Log-Normalverteilung

Die einseitig positiv schiefe, linkssteile *Log-Normalverteilung* (Γ) beschreibt anschaulich Eigenschaften, die einige Verteilungen in der Natur aufweisen. Dies ist bedingt durch die nicht symmetrische Verteilung eines Merkmals, welches einen bestimmten Schrankenwert nicht unter- beziehungsweise überschreiten kann. Entsprechend ist dieses Merkmal zur dieser steilen Seite hin in seiner Variationsmöglichkeit gehemmt. Ist die *Log-Normalverteilung* zur unteren Grenze hin durch den Wert Null begrenzt, führt das *Logarithmieren* dieser zur vorgestellten *Normalverteilung* (ϕ). Nach [AB57] entsteht die *Log-Normalverteilung* durch das multiplikative Zusammenwirken vieler Zufallsgrößen (im Gegensatz zur *Normalverteilung* durch additives Zusammenwirken von Zufallsgrößen). Die *Log-Normalverteilung* wird häufig für Aufgabenstellungen aus der klassischen Betriebsfestigkeit zur Beschreibung von Materialeigenschaften, wie Biegewechselbeanspruchung, oder für das Ausfallverhalten, wie Rißfortschritt, oder für Laufstreckenverteilungen von Fahrzeugen, angewandt [Sac97],

[BL04]. Ihre Ausfallwahrscheinlichkeit sowie deren Derivat sind in Gleichung 2.13 und 2.14 angegeben.

$$\text{Dichtefunktion} \quad \Gamma(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\log t - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad , \quad (2.13)$$

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} \quad F(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^t \frac{1}{\tau} e^{-\frac{(\tau - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \delta \tau \quad . \quad (2.14)$$

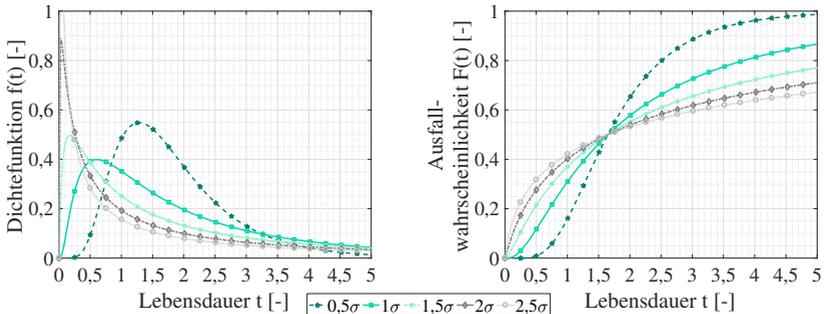


Bild 2.3: Normierte Darstellungen der *Log-Normalverteilung* (Γ)

Weibullverteilung

Zur Beschreibung von Ermüdungserscheinungen bei Werkstoffen oder von zeitabhängigen Ausfallwahrscheinlichkeiten von Komponenten wird häufig die *Weibullverteilung* (Ξ)⁷ herangezogen, deren Maßzahlen für die Streuung der Formparameter b , für die Lage der Verteilung die charakteristische Lebensdauer T und für die ausfallfreie Zeit t_0 sind. Es wird zwischen der *zweiparametrischen* und der *dreiparametrischen Weibullverteilung* unterschieden. Der Unterschied besteht in der Beschreibung des Ausfallverhaltens mit einer vorhandenen ausfallfreien Zeit t_0 . Die Ausfallwahrscheinlichkeiten können durch den Formparameter b in drei charakteristische Bereiche, die sogenannte *Badewannenkurve*, eingeteilt werden [Moc95], [BL04]:

- ▶ $b < 1$: Frühausfälle, wie Konstruktions- oder Montagefehler,
- ▶ $b \approx 1$: Zufallsausfälle, wie Bedienungs- oder Wartungsfehler,
- ▶ $b > 1$: Ermüdungsausfälle, wie Dauerbruch oder Alterung .

⁷ nach Ernst Hjalmar Waloddi Weibull (*18. Juni 1887 - †12. Oktober 1979): Schwedischer Ingenieur und Mathematiker. Bekannteste Beiträge auf den Gebieten *Materialfestigkeit*, *Materialermüdung* oder *Bruchverhalten von Festkörpern* [Abe00].

Gleichungen 2.15 und 2.16 beschreiben das Wahrscheinlichkeitsmodell der *Weibullverteilung* (Ξ) mittels Dichtefunktion und Ausfallwahrscheinlichkeit.

$$\text{Dichtefunktion} \quad \Xi(t) = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^{(b-1)} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^b}, \quad (2.15)$$

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^b}. \quad (2.16)$$

Besonderheit der *Weibullverteilung* ist für den Formparameter b gegeben, indem sie in andere Verteilungen, wie die *Exponentialverteilung* für $b = 1$ oder die *Normalverteilung* für $b = 3,5$, überführt werden kann. In Bild 2.4 ist die *Weibullverteilung* für unterschiedliche Formparameter b dargestellt [Moc95], [Abe00], [BL04].

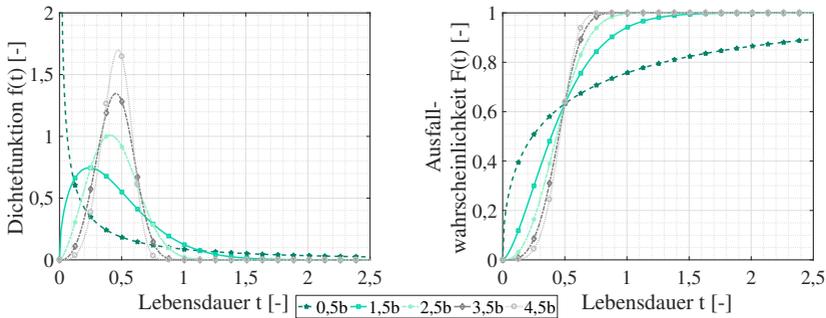


Bild 2.4: Normierte Darstellungen der Weibullverteilung

Binomialverteilung

Die *Binomialverteilung* ist eine der bedeutendsten diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Sie beschreibt das Wahrscheinlichkeitsmodell einer Stichprobenentnahme mit Zurücklegen aus der Grundgesamtheit. Sie kann dabei zwei Ergebnisse annehmen, wie beispielsweise die Beschreibung der Anzahl der Schäden innerhalb eines Ereignisses (Beobachtungszeitraumes). Ist die Erfolgswahrscheinlichkeit Pr bei einem Versuch und n die Versuchsanzahl, wird die Wahrscheinlichkeit für genau t Ergebnisse wie folgt beschrieben [BS58]:

$$\text{Dichtefunktion} \quad B(t|Pr, n) = \binom{n}{t} Pr^t (1-Pr)^{n-t}, \quad (2.17)$$

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit} \quad F(t|Pr, n) = \sum_{i=0}^t \binom{n}{i} Pr^i (1-Pr)^{n-i}, \quad (2.18)$$

$$\text{Erwartungswert} \quad E(X) = n \cdot Pr, \quad (2.19)$$

$$\text{Varianz} \quad Var(X) = n \cdot Pr \cdot (1-Pr), \quad (2.20)$$

$$(2.21)$$

mit $n \in \mathbb{N}$. In Bild 2.5 sind für unterschiedliche Erfolgswahrscheinlichkeiten Pr die Dichtefunktion und die Ausfallwahrscheinlichkeit dargestellt. Für beispielsweise $Pr = 0,5$ erfolgt mit der Symmetrie der Binomialkoeffizienten die Symmetrie der Binomialverteilung.

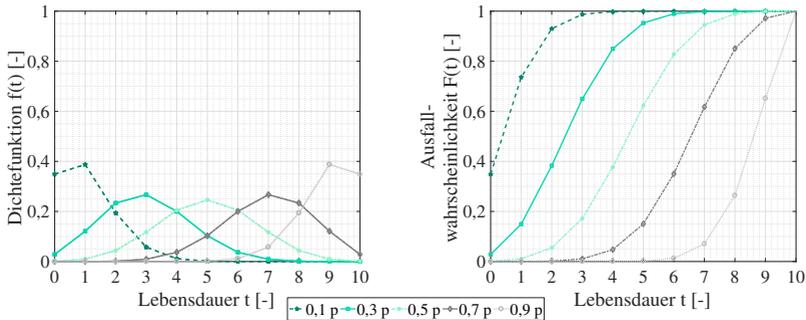


Bild 2.5: Normierte Darstellungen der *Binomialverteilung* (*B*)

Schätzung der deskriptiven Momente und Verteilung mittels Stochastik

Die *Stochastik* ist ein Wissenschaftsbereich, der sich mit der mathematischen Behandlung von Zufallserscheinungen befasst und durch die Wahrscheinlichkeitstheorie, die Statistik und deren Anwendungsgebiete gekennzeichnet ist [Sac97]. Die im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeitstechnik stehenden zentralen, stochastischen Betrachtungen sind die Schätzung der zuvor beschriebenen deskriptiven Momente und infolgedessen die Verteilungen der Grundgesamtheit durch Stichproben und die Grenzwertsätze der Wahrscheinlichkeitsrechnung, auch das Gesetz der großen Zahlen genannt. Diese Grenzwertsätze besagen in ihrer einfachsten Form, dass sich die relative Häufigkeit eines Zufallsergebnisses in der Regel um die theoretische Wahrscheinlichkeit eines Zufallsergebnisses stabilisiert und zwar unter gleichbleibenden Bedingungen des Zufallsexperiments [Mos06].

Im Allgemeinen lässt sich zwischen dem *Schwachen* und dem *Starken Gesetz der großen Zahlen* unterscheiden. Ersteres wurde von Jakob Bernoulli⁸ in [Ber99] definiert. Seine Definition umfasst ein Zufallsexperiment mit binärem Ziehen von Zufallszahlen. Das *Schwache Gesetz der großen Zahlen* besagt, dass eine Folge von Zufallsvariablen X_1, X_2, \dots, X_n mit ihrem Erwartungswert $E(|X_i|) < \infty$ dem arithmetischen Mittelwert der zentrierten Zufallsvariablen $X_i - E(X_i)$ in der Wahrscheinlichkeit gegen Null konvergiert [Mos06]:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \mu \right| \geq \varepsilon \right) = 0 \quad , \quad (2.22)$$

mit einem Fehleranteil $\varepsilon > 0$. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Abweichung größer oder gleich dem vorgegebenen Wert ε ist, geht für eine große Anzahl an Zufallsversuchen n gegen

⁸ Jakob I. Bernoulli (*06. Januar 1655 - †16. August 1705); Schweizer Mathematiker. Bekannteste Beiträge auf den Gebieten der *Wahrscheinlichkeitstheorie*, der *Varianzrechnung* oder der *Infinitesimalrechnung* [WM99].

Null. Das *Starke Gesetz der großen Zahlen* besagt, dass das arithmetische Mittel "fast sicher" gegen den Erwartungswert konvergiert [Mos06].

Ein weiterer, sehr wichtiger Grenzwertsatz ist der zentrale Grenzwertsatz und der Hauptsatz der theoretischen Statistik (mit dem Sonderfall: *Satz von Moivre-Laplace*). Er besagt im Allgemeinen, dass die Summe von stochastisch unabhängigen Zufallsvariablen annähernd normalverteilt ist. Der zentrale Grenzwertsatz lässt sich nutzen, um die Stichprobenverteilung bestimmter Maßzahlen anzugeben. Es seien X_1, X_2, \dots, X_n stochastisch unabhängige Zufallsvariablen, die alle der gleichen Population mit dem Mittelwert μ und der Varianz σ^2 genügen. Entsprechend konvergiert die Verteilungsfunktion $F_n(t)$ der standardisierten Zufallsvariablen [HG79], [Pap16]:

$$U_n = \frac{(X_1 + X_2 + \dots + X_n) - n\mu}{\sqrt{n}\sigma} \quad , \quad (2.23)$$

im Grenzfall $n \rightarrow \infty$ gegen die *Normalverteilung* (ϕ):

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(t) = \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{1}{2}\tau^2} d\tau \quad . \quad (2.24)$$

2.1.3 Möglichkeitstheorie

Eine weitere Methode zur Unsicherheitsbetrachtung ist die *Möglichkeitstheorie*⁹. Sie ist im Gegensatz zur *Wahrscheinlichkeitstheorie* von semantischer Art. Sie ist eine mathematische Theorie zur Beschreibung von subjektiven Expertenwissen und betrachtet die Möglichkeit des Eintretens eines Ereignisses. Entsprechend dieser Sichtweise ist sie keine Negierung der Wahrscheinlichkeitstheorie, sondern eine andere Sichtweise auf das Zufallsexperiment. Die junge Theorie wurde 1978 von Lotfali Aksar-Zadeh¹⁰ mit der Theorie der unscharfen Mengen (*Fuzzy Set Theory*) eingeführt [Zad65], [Zim86], vergleiche dazu Kapitel 2.2.1. Der Grundgedanke dieser Theorie basiert darauf, dass die Grenzen einer Menge nicht zwingend fest sind. Entsprechend weist eine Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{F}}$ ihren Elementen einen Grad an Zugehörigkeit zu. Folglich wird einem Element entgegen der *Wahrscheinlichkeitstheorie*, eine *Boole'sche Logik* unterstellt, sondern graduell einen rationalen Wert zwischen 0 und 1 zugewiesen, vergleiche Bild 2.6. \tilde{F} beschreibt eine unscharfe Menge (unscharfe Restriktion $\tilde{R}(X)$ der Zufallsvariable X) im Raum U mit der Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{F}}(u)$, wobei \tilde{F} als Einschränkung für die zugewiesenen Werte für X fungiert [Zad65]:

$$X = u : \mu_{\tilde{F}}(u) \quad u \in U \quad . \quad (2.25)$$

Die Zuweisung von u zu X wird mit dem Grad der Erfüllung $\mu_{\tilde{F}}(u)$ unter der Einschränkung von \tilde{F} zugewiesen.

Auf Basis dieser Betrachtungsweise wird eine verbesserte Betrachtung von Unsicherheiten mittels linguistischen Variablen ermöglicht. Diese Variablen können aus dem allgemeinen Sprachgebrauch zur Beschreibung von auftretenden Ereignissen, die nicht eindeutig sind,

⁹ aus dem Angelsächsischen für *Probability Theory*

¹⁰ Lotfali A. Zadeh (*04. Februar 1921): Amerikanischer Mathematiker, Informatiker und Elektroingenieur. Bekannteste Beiträge auf den Gebieten der *unscharfen Mengen* oder der *Fuzzylogik* [Zim86].

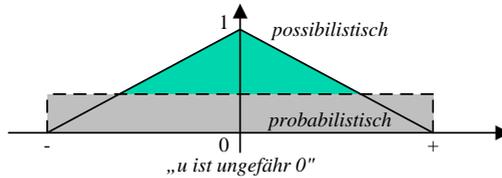


Bild 2.6: Qualitativer Vergleich zwischen Möglichkeits- und Wahrscheinlichkeitstheorie nach [Zad65]

angewandt werden. Im Gegensatz zur *Wahrscheinlichkeitstheorie* können unterschiedliche Standpunkte, wie beispielsweise die Experteneinschätzung eines Ereignisses, entgegen der *Boole'schen Theorie* der klassischen Mengenlehre, mittels fließender Grenzen und somit nicht uneingeschränkt auf tatsächliche Problemstellungen übertragen und realisiert werden. Zwar müssen Grenzen für die Zugehörigkeit zwischen 0 und 1 zugewiesen werden, allerdings sind die Übergänge dazwischen fließend je nach Problemstellung. Mögliche Formen der fließenden Übergänge können von linear bis polynomial sein, vergleiche Bild 2.7 [Bot13].

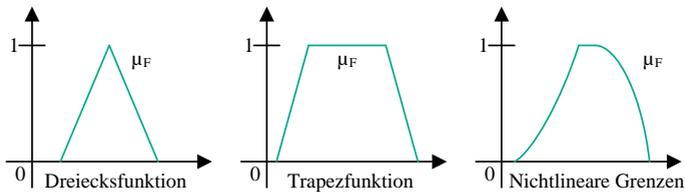


Bild 2.7: Beispiele für Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_{\tilde{F}}$ unscharfer Mengen

Grundlage der *Möglichkeitstheorie* ist die Betrachtungsweise der unscharfen Mengen. Demzufolge wird die Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\tilde{F}}(u)$ als Möglichkeitsverteilungsfunktion $\pi_x(u)$ betrachtet, wenn \tilde{F} als unscharfe Restriktion $\tilde{R}(X)$ agiert. Folglich kann $\tilde{R}(X) = \tilde{F}$ geschrieben werden [Zad65]:

$$\pi_x \hat{=} \mu_{\tilde{F}} \quad . \quad (2.26)$$

Dies bietet eine weitere Option gegenüber der Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Bewertung von Unsicherheiten, indem Ergebnisse bewertet werden können, zu denen keine empirischen Daten vorliegen und diese nicht als gleichverteilt angesehen werden. Eine eindeutige Beziehung zwischen der Wahrscheinlichkeit und der Möglichkeit liegt darin, dass ein unwahrscheinliches Ereignis nicht unmöglich, ein unmögliches Ereignis dagegen immer unwahrscheinlich ist. Auf Basis dieser Betrachtungsweise wird die Möglichkeit im Sinne der *Evidenztheorie*, siehe folgendes Kapitel 2.1.4, als obere Wahrscheinlichkeit betrachtet [Zad65]. Zudem kann die Summe aller Ergebnisse von Möglichkeit größer eins sein, infolgedessen ist eine Additivität analog der *Wahrscheinlichkeitstheorie* nicht gegeben.

2.1.4 Evidenztheorie

Diese Erweiterung der *Wahrscheinlichkeitstheorie* wurde erstmals 1976 von Glenn Shafer¹¹ mit dem Buch [Sha76] veröffentlicht. Die *Evidenztheorie* basiert auf den Arbeiten zu den oberen und unteren Wahrscheinlichkeiten von Arthur P. Dempster¹². Infolgedessen wird die *Evidenztheorie* auch *Dempster-Shafer-Theorie* genannt. Grundgedanke dieser Theorie ist, dass ein Sachverhalt, der nicht für eine These spricht, nicht automatisch gegen sie spricht. In der *Wahrscheinlichkeitstheorie* wird dagegen alles, was die These nicht unterstützt ihrem Komplement zugerechnet, sogenanntes binäres Denken. Evidenzen werden nach [Sha76] als Indizien oder Hinweise verstanden, die eine These unterstützen oder sogar negieren. Als These ist, analog zur *Möglichkeitstheorie*, die Zugehörigkeit eines Elements zu einer Menge oder auch das Eintreten eines bestimmten Ereignisses bei einem Zufallsexperiment zu verstehen. Evidenzen, die eine These unterstützen, werden einer sogenannten *Belief-Funktion* Bel zugeordnet. Sie kann als ein Mindestmaß für die Wahrscheinlichkeit verstanden werden. Nach [Sha76] sind folgende Annahmen vorausgesetzt: Θ ist eine endliche Menge und 2^Θ beschreibt die Menge aller Teilmengen von Θ . Zudem sei die Funktion $Bel : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, die folgende Bedingungen erfüllt:

$$Bel(\emptyset) = 0 \quad , \quad (2.27)$$

$$Bel(\Theta) = 1 \quad , \quad (2.28)$$

wobei beide Gleichungen das sichere Eintreten eines Ereignisses aus der Menge Θ beschreiben mit der Grenze 1 als sicheren Eintritt dieses Ereignisses. Für jede positive ganze Zahl n und jede Sammlung A_1, \dots, A_n von Teilmengen von Θ gilt [Bar81]:

$$Bel(A_1 \cup \dots \cup A_n) \geq \sum_{\substack{I \in \{1, \dots, n\} \\ I \neq \emptyset}} (-1)^{|I|+1} Bel\left(\bigcap_{i \in I} A_i\right) \quad . \quad (2.29)$$

Soweit ähnelt die *Evidenz-* der *Wahrscheinlichkeitstheorie*. Shafer postuliert jedoch, dass Evidenzen, die eine These nicht unterstützen, sie nicht zwingend negieren. Mit dieser Annahme führt er eine weitere Funktion (*Doubt-Funktion*) ein. Diese Funktion berechnet diejenigen Evidenzen, die die These tatsächlich negieren. Entsprechend kann sie als *Belief-Funktion* des Nichteintretens eines Ereignisses betrachtet werden [Sha76]:

$$Dou(A) = Bel(\bar{A}) \quad \text{mit} \quad (2.30)$$

$$Dou(A) \leq 1 - Bel(A) \quad . \quad (2.31)$$

Die Differenz zwischen der *Believe-* und *Doubt-Funktion* wird durch die weitere Funktion der *Plausibilität* oder der *oberen Wahrscheinlichkeit* Pr^* beschrieben [Sha76]:

$$Pr^*(A) = 1 - Dou(A) \quad . \quad (2.32)$$

¹¹ Glenn Shafer (*21. November 1946): US-amerikanischer Mathematiker. Bekannteste Beiträge auf den Gebieten der *Evidenztheorie* mit der *Generalisierung der Bayes'schen Statistik* [Sha76].

¹² Arthur P. Dempster (*1. Januar 1929): Kanadisch-US-amerikanischer Physiker. Bekannteste Beiträge mit der Entwicklung des *Massenspektrometers* [Sha76].

Die *obere Wahrscheinlichkeit* $Pr^*(A)$ gibt an, wie plausibel ein Ereignis eintritt und beschreibt zudem den unsicheren Bereich zwischen den beiden Funktionen $Bel(A)$ und $Dou(A)$. Somit kann die Unwissenheit über die genaue Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses als solche bewertet werden. Den schematischen Zusammenhängen aller drei Funktionen gibt Bild 2.8 wieder. Die *Evidenztheorie* bietet als Einzige die Möglichkeit die bestehende Unwissenheit¹³

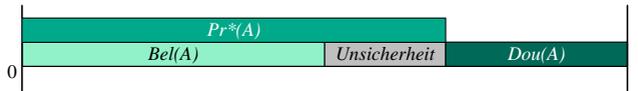


Bild 2.8: Aufteilung der Wahrscheinlichkeit nach Dempster-Shafer

zu quantifizieren. Darüber hinaus können Informationen aus verschiedenen Quellen miteinander kombiniert werden. Dabei kann die Glaubwürdigkeit der Quelle berücksichtigt werden, um die Aussagekraft zu erhöhen. Das gilt erweitert auch für konkurrierende Hypothesen.

Die *Evidenztheorie* bietet somit einen Brückenschlag und folglich eine Erweiterung zur *Wahrscheinlichkeits-* und *Möglichkeitstheorie* zur Handhabung von Unsicherheiten, indem sie es erlaubt Wahrscheinlichkeiten als untere und Möglichkeiten als obere Wahrscheinlichkeiten zu interpretieren. Durch ihre Fähigkeit, Unwissenheit zu quantifizieren stellt sie für technische Prozesse eine potente Ergänzung zur *Wahrscheinlichkeitstheorie* dar. Durch die Kombinationsregeln lassen sich verschiedene Erfahrungen und Expertenmeinungen realistisch bewerten und belastbarer zusammenfassen.

2.1.5 Zusammenfassung der bestehenden Methoden

Wie die vorgestellten Theorien zeigen, bedarf es für die Berechnung von verschiedenen Unsicherheiten entsprechend unterschiedliche, mathematische oder physikalische Theorien. Je nach Aufwand und Nutzen beziehungsweise Anwendungserlaubnis ist die Berechnung der Unsicherheit zwischen den Theorien der *Wahrscheinlichkeit*, *Möglichkeit* und *Evidenz* zu entscheiden. Gemeinsam ist allen drei Theorien, dass sie sich mit Zufallsexperimenten befassen. Sie stellen Hypothesen über deren Ausgang auf und quantifizieren diese. Als Beispiel kann in der Produktion jedes hergestellte Teil als Ergebnis eines solchen Zufallsexperiments betrachtet werden. Den Ausgang des Experiments stellen die Abmessungen des Teils und deren Abweichung vom Sollwert dar. Der Hauptunterschied zwischen den Theorien ist die Interpretation der Ergebnisse und die mengentheoretische Einordnung. Gerade dieser semantische Unterschied macht die Thematik für die Bewertung technischer Prozesse interessant. Besonders die *Wahrscheinlichkeitstheorie* wird in vielen technischen Aufgabenstellungen angewendet, ohne dass diese Anwendbarkeit hinterfragt wird. Eine Herausforderung ergibt sich, indem die Randbedingungen für die Berechnung mit Wahrscheinlichkeiten gegeben sein müssen. Dies kann nur der Fall sein, wenn eine ausreichende mathematische Genauigkeit gegeben ist.

¹³ Ungewissheit, vergleiche hierzu das Unsicherheitsmodell des *SFB 805*, beispielsweise in [EKB⁺12], mit dem die Ungewissheit als teilweise quantifizierte Wahrscheinlichkeit bei bekannter Wirkung definiert wird.

2.2 Modellierung von Abhängigkeiten und Unsicherheiten

Ergänzend zu den in den vorherigen Kapiteln 2.1.3 und 2.1.4 vorgestellten Theorien, werden in den nachfolgenden Teilkapiteln Werkzeuge zu deren Umsetzung vorgestellt. Im Allgemeinen wird zwischen der *Mathematischen* und der *Physikalischen Surrogate-Modellierung* unterschieden. Zur virtuellen Beschreibung und Bewertung von technischen Produkten oder Prozessen nach ihren Anforderungen, werden entsprechende Simulationsmodelle generiert. Diese Modelle sind sogenannte *Approximationsmodelle* und somit Ersatzmodelle, die den Aufwand von Simulationen verringern. Die Aussagegüte der zu erwartenden Ergebnisse aus den Modellen ist abhängig vom jeweiligen Ressourcenaufwand. Infolgedessen muss ein Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit geschlossen werden. Um ein bestimmtes Approximationslevel zu erreichen, werden eine bestimmte Anzahl an Stichproben (Simulationen) benötigt. Zur Unterstützung der Quantifizierung der Aussagegüte der vorliegenden Stichprobengröße zur Beschreibung der Population, dienen die im vorherigen Kapitel beschriebenen Werkzeuge.

2.2.1 Mathematische Surrogate-Modellierung

Zur leichteren Quantifizierung von *aleatorischen* und *epistemischen* Unsicherheiten, vergleiche Kapitel 2.1.1, stehen dem Anwender mehrere mathematische Methoden zur Verfügung, wie beispielsweise die Momenten-Methode [Sch03], die Fuzzy-Methode [Zim86] zur Bestimmung des Modells oder die Monte-Carlo Methode [Bin79] zur Quantifizierung des Modellverhaltens. Anhand von diesen Methoden können Unsicherheiten bei der Auslegungsrechnung hinreichend berücksichtigt werden und verringern somit die gebräuchliche Beaufschlagung von empirischen Sicherheitsfaktoren. Um diese Herangehensweise zur unzureichenden und gefährdenden Auslegung technischer Systeme sowie eine infolgedessen mögliche Überdimensionierung zu vermeiden, werden mit der *Mathematischen Surrogat-Modellierung* Modell- und Datenunsicherheiten mit in die Berechnung einbezogen. Über die letzten Jahrzehnte hinweg, wurde eine Vielzahl an mathematisch effektiven Methoden entwickelt. Allerdings werden für diese Arbeit ausschließlich die notwendigen Methoden im Folgenden vorgestellt.

Momenten-Methode

Bei der Momenten-Methode¹⁴ werden mit Maßzahlen, sogenannte Momente, aus einer approximierten Verteilung aus einer Stichprobe mit einer theoretischen Verteilung verglichen. Hierbei reicht die Betrachtung eines Moment für eine Verteilung nicht aus. Demzufolge müssen immer mehrere Momente bestimmt werden. Im Allgemeinen werden die statistischen Momente der *deskriptiven* Statistik: Mittelwert, Standardabweichung (Varianz), Schiefe und Kurtosis (Wölbung) betrachtet, vergleiche Kapitel 2.1.2. Die Momenten-Methode vermeidet numerische Diffusion (Abbruchfehler) bei hoher rechnerischer Effizienz. Sie kann auch angewendet werden, wenn die Beobachtungswerte t_i abhängig sind. Mit der Momenten-Methode können nur vollständige Stichproben ausgewertet werden. Darüber hinaus beschränkt sie sich auf eine überschaubare Anzahl an Momenten.

¹⁴Älteste Schätzmethode nach Karl Pearson (*27. März 1857 - †27. April 1936): Britischer Mathematiker, Statistiker und Psychologe. Bekanntester Beitrag zur Statistik ist die *Bravais-Pearson-Korrelation* [Eis74].

Monte-Carlo Methode

Für eine effektive Parameterstudie hinsichtlich Ressourcenaufteilung sollten Simulationen mehrerer Varianten (Parameterkombinationen) zusammen mit dem Vorteil der Statistik genutzt werden. Eine der bekanntesten Methoden ist die *Monte-Carlo Methode (MC)*. Sie findet seit ihrer Entwicklung aus dem Jahr 1934 [And86] im Bereich der Neutronenphysik in allen Gebieten der Wissenschaft Einsatz. *MC* ist ein numerisches Verfahren zur Lösung mathematischer Problemstellungen mit Hilfe von Zufallszahlen. Im Vergleich zu sehr komplexen Aufgabenstellungen, wie beispielsweise mehrdimensionaler Parameterstudien oder die mathematische Faltung mehrerer Verteilungen, kann diese Methode zur Lösung herangezogen werden.

Wird von einer m -dimensionalen Zufallsvariable (statistischer Mittelwert) $X \in R^m$ ausgegangen und eine eindimensionale Zufallsvariable X mit eindeutiger Funktion von t definiert, lautet der Erwartungswert $E(X)$ [Bin79], [Bin84]:

$$E(X) = \int P(t)E(t)d^m t \quad , \quad (2.33)$$

wobei das Integral dem statistischen Mittelwert der Zufallsvariablen X und $P(t)$ einem normierten, statistischen Gewicht entspricht, wie beispielsweise normalverteilte Beobachtungswerte, vergleiche Bild 2.9. Ausgehend von der Definition des Erwartungswerts aus Gleichung 2.4 kann der Erwartungswert E' für eine beliebige Funktion $f'(t)$ wie folgt beschrieben werden:

$$E'(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} f'(t)f(t)dt \quad . \quad (2.34)$$

Nach dem zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung¹⁵ kann folgende Diskretisierungsform angewandt werden:

$$E'(X) = \frac{1}{n} \sum_i^n f'(t_i) \quad , \quad (2.35)$$

entsprechend dem arithmetischen Mittelwert mit dessen Fehler, gegeben durch die Standardabweichung s :

$$\frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{E'(X)^2 - E(X)^2}}{\sqrt{n}} \quad . \quad (2.36)$$

Somit ergibt sich das Theorem für den zentralen Satz der *MC*-Rechnung:

$$E'(X) = \int f'(t)f(t)dt \approx \frac{1}{n} \sum_i^n f'(t_i) \pm \sqrt{\frac{E'(X)^2 - E(X)^2}{n}} \quad . \quad (2.37)$$

Unter Berücksichtigung der einfachen Implementierung, der hohen Auswertbarkeit und der vielseitigen Anwendung der *MC* zur Beschreibung von multidimensionaler Risiken, benötigt die Methode dennoch eine hohe Rechenkapazität bei nachteiligem Aussagedefizit zum Mo-

¹⁵Der Erwartungswert einer Funktion $f(t)$ kann für eine hinreichend große Anzahl von Beobachtungswerten diskret beschreiben werden [BS58].

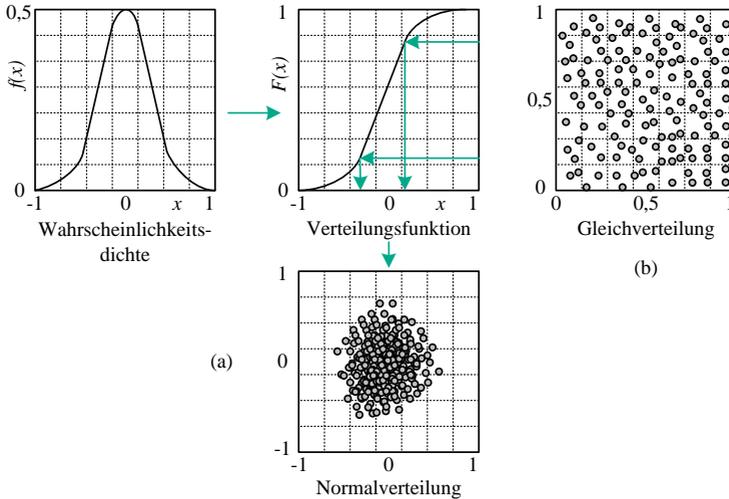


Bild 2.9: Generierung von normalverteilten (a) aus gleichverteilten (b) Beobachtungswerten mittels Monte-Carlo Methode

dell sowie deren Modellbildung. Allerdings kann die *MC* als effizientere und umfangreichere Unsicherheitsbetrachtung zur Abbildung der Population angewandt werden.

Derivate der *Monte-Carlo Methode*

Zu den genannten Nachteilen der hohen Rechenkapazität beziehungsweise der hohen Anzahl an Experimenten sind für ressourcenintensive Aufgaben, *Sampling-Methoden* mit möglichst geringem Versuchsumfang, bei gleichbleibender Güte, notwendig. Zwei Möglichkeiten zur Steigerung der Effektivität der *MC* ist einerseits die *Latin Hypercube Sampling (LHS)* Methode [MBC79] und andererseits die *Space-Filling* Methode [SBT10].

Latin Hypercube Sampling

Die *Latin Hypercube Sampling (LHS)* Methode nach [MBC79] oder [HD03] verteilt zufällige Designpunkte möglichst gleichmäßig und mit wenigen Designpunkten im Parameterraum [Mon12]. Das *LHS* kann aus dem *Latin Hypercube Design (LHD)* abgeleitet werden, indem die $n \times n_f$ Matrix, bestehend aus einer zufälligen Permutation der Stufen $\{1, 2, 3, \dots, n\}$, von jedem dieser Werte eine Zufallszahl $X \in [0, 1)$ subtrahiert und jeder Wert durch die Anzahl n dividiert wird. Folglich entsteht ein Testfeld im Einheitsraum E^{n_f} [MBC79], [SWMW89]:

$$t_{ij} = \frac{t_{ij}^{LHD} - \text{rand}[0, 1)}{n} \quad t_{ij}^{LHD} \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (2.38)$$

Als Bewertung für eine verbesserte Aufteilung der Designpunkte wird die Varianz des globalen Mittelwerts herangezogen. Nach [MBC79] und [Dyn13] wird die Domäne der

Zufallsvariable in Intervalle mit gleicher Wahrscheinlichkeit zerlegt. Dabei entsprechen die Anzahl der Intervalle der Anzahl an Bewertungszahlen. Jede Intervallprobe wird bezüglich der Wahrscheinlichkeitsdichte zufällig in einem Intervall gewählt und dadurch die Kombination N dieser Intervalle (*Hypercube*) gebildet, vergleiche Bild 2.9 und Bild 2.10.

In Bild 2.10 (b) und (c) wird der Unterschied zwischen der *MC* und der *LHS* Methode deutlich. Ausgehend von 10 Bewertungsmaßen (Stichproben) und von zwei unabhängigen Gleichverteilungen (X_1 und X_2) kann mit *LHS* im Vergleich zu *MC*, ein ausgewogeneres Testfeld erzeugt werden. Anschließend kann mit der in Bild 2.9 dargestellten, gewichteten Vorgehensweise eine Wahrscheinlichkeitsfunktion gebildet werden.

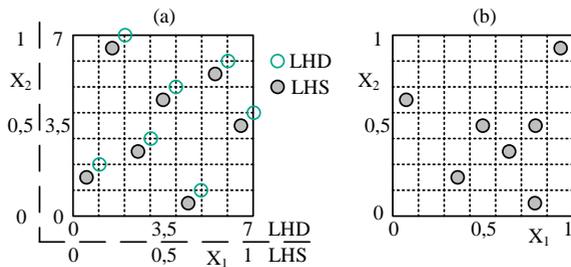


Bild 2.10: Latin Hypercube Design und Latin Hypercube Sampling (a) Methode im Vergleich zur Monte-Carlo Methode (b) nach [SBT10]

Space-Filling Methode

Die *Space-Filling* Methode ist eine weitere Methode zur Reduktion der erforderlichen Versuchszahl. Zwar bietet die *MC* Methode eine weitgehende *Orthogonalität*¹⁶ und vermeidet ein „over-fit“¹⁷, zeigt allerdings eine hohe Zahl an erforderlichen Versuchsläufen auf, welche auf die zufällige Festlegung der Faktorstufen zurückzuführen ist, da bei einem mehrdimensionalen Faktorraum für eine ausgeglichene Abdeckung merklich mehr Versuche definiert werden müssen. Entsprechende *LHS* Methoden reduzieren den Aufwand deutlich um circa 50 % ohne Verlust der Vorteile. Wohingegen diese mehrstufige Faktorstufenverteilung in der *realen* Erprobung nahezu nicht umzusetzen ist, werden diese Methoden bevorzugt in *CAE* eingesetzt. Es wird weiterhin empfohlen, für geringe Kapazitätsrechnungen die *MC* Methode anzuwenden [SBT10]. Weitere *Space-Filling* Methoden oder Designs wie *Sphere Packing*, *Uniform*, *Maximum-Entropie-Methode* oder *Gaussian Process IMSE Optimal* sind beispielsweise in [Jay57], [Slo84], [Wu97], [JJ09] beschrieben.

¹⁶ *Orthogonalität* beschreibt die Ausgewogenheit oder die Balanciertheit eines Testfelds d.h. jede Faktorstufenkombination kommt in der Spalte gleich häufig vor und korreliert nicht mit einer anderen Spalte [WH09], [Gun04].

¹⁷ Entspricht das gebildete Modell der zu Grunde liegenden Datenbasis exakt und bleiben scheinbare Effekte im Beschreibungsmodell, gehen Informationen über das tatsächliche, experimentell untersuchte System verloren. Die Varianzanalyse täuscht eine hohe Modellgüte vor, weil die Restvarianz klein ist [SBT10].

Statistische Versuchsplanung

Der Ursprung der *Statistischen Versuchsplanung*¹⁸ (*DOE*) liegt im Jahr 1926 bei Sir Ronald Aylmer Fisher¹⁹. Die *DOE* ist eine strukturierte Methode zur Beschreibung eines Systemverhaltens sowie eine deterministische Beschreibung der Unsicherheit. Diese Art der Beschreibung von *epistemischen Unsicherheiten* umfasst einen Raum an Parametern, der durch eine untere und obere Grenze beschränkt wird. Für eine Quantifizierung der Reaktion dieser Parameter auf eine Zielgröße, werden *Matrixexperimente* durchgeführt, vergleiche Bild 2.11. Als Ergebnis können zudem Informationen über das spätere Betriebsverhalten gewonnen und prognostiziert werden. In der Praxis ist im Allgemeinen die Durchführung von Experimenten langwierig und mit hohen Kosten verbunden. Entsprechend werden mit Hilfe dieser *Matrixexperimente* mittels strukturierter Vorgehensweise eine vertretbare Wirtschaftlichkeit angestrebt. Die klassische Vorgehensweise erfolgt in vier Schritten:

- ▶ *Screening*:
Ermittlung relevanter Faktoren,
- ▶ *Modellierung*:
Einfluss-Quantifizierung,
- ▶ *Antwortfläche*:
Response-Surface Modellierung,
- ▶ *Modellanwendung*:
Diskussion und Optimierung

Eine Übersicht über gebräuchliche Testpläne für die *Matrixexperimente* ist in Tabelle 2.2 gegeben. Dabei ist die Auswahl auf die gängigsten Versuchspläne reduziert. Weitere Versuchspläne sowie deren Grundlagen und Anwendungsschwerpunkte können aus der Literatur beispielsweise nach [Mon91], [WH09], [Mon12], [Kle11] oder [Kle13] entnommen werden.

Wichtige Begriffe und Prinzipien der *DOE* basieren auf den Normen [DIN82] und [ISO13]. Folgende sind für diese Arbeit hervorzuheben: *Versuch*, *Versuchsplan*, *Randomisierung*, *Antwortmatrix*, *Faktor*, (*Versuchs-*)*Versuchsparameter*, *Störgröße*, *Faktorstufe*, *Zielgröße*, *Effekt* und *Wechselwirkung*, deren Zusammenhang in Bild 2.11 und dessen erweiterte Erklärung im *Glossar* gegeben ist. Auf die wichtigsten drei Begriffe: *Effekt*, *Wechselwirkung* und *Nicht-Linearität* wird im Folgenden näher eingegangen.

¹⁸ engl.: *Statistische Versuchsplanung (DOE)*

¹⁹ Sir Ronald Aylmer Fisher (*17. Februar 1890 - †29. Juli 1962): Britischer Genetiker, Evolutionstheoretiker und Statistiker. Bedeutendster Mitbegründer der gesamten modernen Statistik mit seinen Werken über den Umgang von Feldexperimenten in [Fis26] und [Fis35].

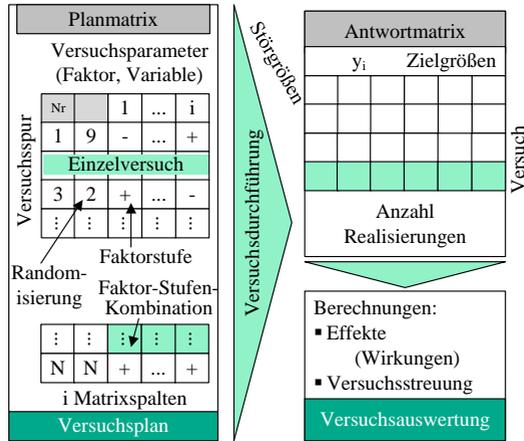


Bild 2.11: Begriffsübersicht der Versuchsplanung nach [Hol95], [Gun04]

Tabelle 2.2: Übersicht gängiger Versuchsplanungstypen für die *Matrixexperimente*

#	Modelltyp	Modell	Eigenschaft	Sinnbild
<i>Screening Versuchspläne</i>				
1	Fraktionell faktoriell	$HE^a + (WW)^b$	Nur ein Teil der Eckpunkte werden berücksichtigt.	
2	Plackett-Burmann	HE	Konstruktion über Generatorzeilen und zyklisches Durchschieben	
<i>Zentral zusammengesetzte Versuchspläne - Central-Composite-Design (CCD)</i>				
3	Circumscribed (CCC)	$HE + WW$	Voll-/Teilfaktorieller Versuchsplan mit Auflösung 5 ergänzt mit Stern- und Mittenpunkten	
4	Inscribed (CCI)			
5	Faced (CCF)			
<i>Optimale Versuchspläne</i>				
6	D-optimal	Alle Modell-situationen	Flexibel auf individuelle Aufgabenstellungen anpassbar	
7	A-/E-/G-/I-optimal			
<i>Sonderpläne</i>				
8	Box-Behnken	$HE + WW + QE^c$	Mittenpunkte werden durch Kantenpunkte ersetzt	
9	Taguchi	$HE + WW + QE$	WW zwischen Stör- und Einstellgrößen	
10	Mischungspläne	$HE + WW$	Anwendung bei Mischungssituationen	

^a Haupteffekt ^b Wechselwirkung ^c Quadratischer Effekt

Effekt und Wechselwirkung

Eine der grundlegendsten Aufgaben der *DOE* ist die Identifikation von *Effekten* sowie deren Bestätigung mittels Haupt- und Wechselwirkungseffektanalysen mit statistischen Methoden. Ein *Haupteffekt (HE)* existiert, wenn die Veränderung der Zielgröße ausschließlich von einem Faktor abhängt. Um den Aufwand von Versuchen gering zu halten, werden unterschiedliche Versuchspläne definiert. Je nach Einsparungspotential des Versuchstyps werden sogenannte *Vermengungen* (Überlagerungen) von neuen Faktoren und *Wechselwirkungen (WW)* höherer Ordnung angesetzt. *WWs* der Ordnung drei und höher sind physikalisch schwer zu deuten, beziehungsweise technisch ohne Relevanz [Pet91]. Eine Übersicht des jeweiligen Lösungstyps und der Vermengung, beziehungsweise Trennung von Effekten, ist am Beispiel von fraktionell faktoriellen Versuchsplänen in Tabelle 2.3 gezeigt. Es wird dabei in drei Gruppen von Effekten unterschieden: getrennte, vermengte und vernachlässigte *Effekte*. Mit zunehmender Auflösung erhöht sich der Grad der vermengten *WWs*. Dies führt zu einer deutlicheren Trennung sowie zu einem höheren Grad von vernachlässigten *WWs* der Effekte. Zwar sinkt die Anzahl der zu untersuchenden Faktoren, allerdings steigt dafür die Aussagesicherheit von Effektaussagen niedrigerer *Vermengungen*.

Tabelle 2.3: Auflösung von Effekten am Beispiel von fraktionell faktoriellen Versuchsplänen nach [Sch97]

Auflösung	Effekte			Anzahl der Versuche					Kommentar
	getrennt	vermengt	vernachlässigt	4	8	16	32	64	
				Anzahl der Faktoren					
III	HE von HE	HE mit 2WW	2WW und höhere	3	5-7	9-15	17-31	33-63	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hochvermengung ▪ Hohe Gefahr der Fehlinterpretation ▪ Anwendung: Ausieben
IV	HE von 2WW	HE mit 3WW, 2WW mit 2WW	3WW und höhere		4	6-8	7-16	9-32	
V	2WW von 2WW	HE mit 4WW, 2WW mit 3WW	3WW und höhere			5		8	
VI	2WW von 3WW	HE mit 5WW, 2WW mit 4WW, 3WW mit 3WW	4WW und höhere				6		
VII	3WW von 3WW	HE mit 6WW, 2WW mit 5WW, 3WW mit 4WW	4WW und höhere					7	
				HE: Haupteffekt xWW: xfache Wechselwirkung					

Im Gegensatz zu den *HEs* quantifiziert eine Wechselwirkungseffektanalyse den Einfluss eines Faktors auf die Zielgröße von einem zweiten Faktor. Eine vereinfachte Darstellung möglicher Wechselwirkungseffekte ist in Bild 2.12 gegeben.

Berücksichtigung der Nicht-Linearität mittels CCD

Im Fall einer *Nicht-Linearität* der zu untersuchenden Zielgröße(n), werden *zentral zusammengesetzte Versuchspläne (CCD)* angewandt, vergleiche Tabelle 2.2. Diese Versuchspläne, die lediglich lineare Abhängigkeiten aufzeigen, bauen auf einem zweistufigen Versuchsplan auf. Dies ermöglicht zuerst das System auf eine *Nicht-Linearität* hin zu untersuchen und infolgedessen den Versuchsplan mit fehlenden Versuchen zu ergänzen. Zur Überprüfung

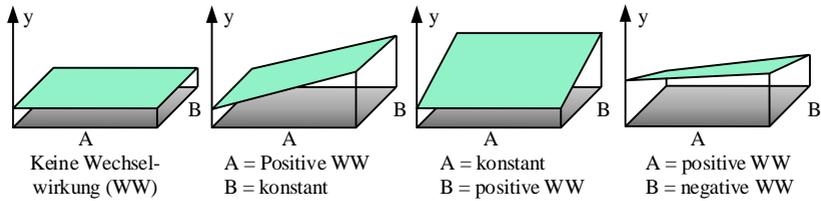


Bild 2.12: Darstellung der Wechselwirkung bei zwei Faktoren nach [Pet91]

der Linearität lässt sich mit Hilfe eines *Zentralpunkts* (ZP) die Verbindung zwischen Versuchsplänen erster und zweiter Ordnung²⁰ schaffen, vergleiche Bild 2.13 (a). Die *CCD* Pläne untersuchen Wirkzusammenhänge bis zu 5 Faktorstufen. Ausgehend von einem vollständigen 2^k - oder einem fraktionell faktoriellen 2^{k-p} -Versuchsplan, werden zusätzlich zu mehreren ZPs noch $2k$ -Sternpunkte, die für jede Achse symmetrisch zum ZP mit einem Abstand von $\pm\alpha$ liegen, benötigt²¹, vergleiche Bild 2.13 (b). Zuerst kann der faktorielle Plan sowie der ZP ausgeführt werden, um anschließend, wenn sich das berechnete lineare Regressionsmodell als nicht-adäquat erweist, die Sternpunkte anzufügen. Für den Erhalt der *Orthogonalität* der quadratischen Glieder, werden diese mit $\sum(x_i^2 - 0,667^{-1}) = 0$ transformiert. Zur Erreichung der *Orthogonalität* ist zu beachten, dass der Sternpunktabstand abhängig von der Faktoranzahl und von der Gesamtversuchszahl ist. Mit Hilfe der Anpassung der α -Werte kann die Drehbarkeit²² wieder hergestellt werden. Ausführungen der *CCD*,

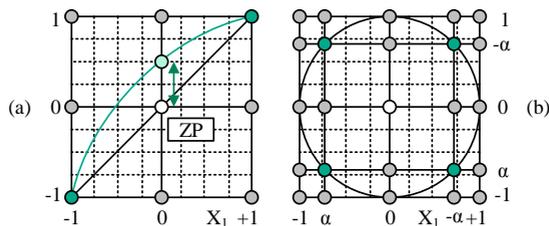


Bild 2.13: Überprüfung auf Nicht-Linearität mittels Zentralpunkt (ZP) (a) und Aufbau eines *CCD* (b)

vergleiche Bild 2.13 und Tabelle 2.2, sind die *CCCs*, bei denen die Sternpunkte außerhalb der Außenebenen liegen. Hierbei stehen pro Richtung fünf Stufen und somit eine stabilere Regressionsfunktion zur Verfügung. Bei den *CCFs* liegen die Sternpunkte in den Außenebenen, was bedingt durch die drei Einstellstufen pro Richtung zur Versuchseinsparung führt. Die *CCIs* räumen den Sternpunkten den maximalen Raum ein. Die Grenze und die Eckpunkte liegen im Inneren des Versuchsraums, vergleiche Bild 2.13 (b).

²⁰ Erste Ordnung für lineare Modelle (zweistufig); zweite Ordnung für quadratische Modelle (dreistufig)

²¹ k : Faktoranzahl, p : Anzahl der hinzugefügte Parameter

²² Ein Versuchsplan ist drehbar, wenn die Varianz der Vorhersage (Breite des Vertrauensbereichs) nur vom Abstand des betrachteten Punktes vom Zentrum des Würfels abhängt und nicht von der Richtung [Kle13].

Orthogonale Felder

Orthogonale Felder (OF) sind standardisierte, orthogonale Versuchsanordnungen, die zur Anwendung der Taguchi Versuchspläne entwickelt wurden. Diese OF basieren darauf, dass jede vorgenommene Einstellung mit all den anderen, definierten Einstellungen hinreichend kombiniert und daraus Aussagen mit einer statistischen Genauigkeit, mit möglichst reduziertem Versuchsaufwand, definiert werden können. Allerdings handelt es sich bei diesen Feldern um hochvermengte Versuchspläne, mit welchen eine maximale Anzahl von HES auf orthogonaler (unverfälschter) Weise, mit einer minimalen Anzahl von Versuchen, getestet werden kann. Dabei werden bei k zu untersuchende Parameter auf $m = 2$ Faktorstufen lediglich $k + 1$ Versuche nötig, um alle HES auszuwerten [Mor91]. Ausgehend von einem 2^k vollfaktoriellen Versuchsplan, wird in Tabelle 2.4 die Ableitung zu einem OF:

$$L_n(m^k)$$

dargestellt. Hier werden Spalten vertauscht und die Zweifachwechselwirkungsspalten negiert, multipliziert und die Faktorstufen mit „1“ und „2“ gekennzeichnet. Auf die Entwicklung von OF wird nicht detaillierter eingegangen, sondern auf die Literatur [WW00] und [TCW05] verwiesen. Für die Auswahl eines geeigneten Versuchsplans, gibt Tabelle 2.4 eine Übersicht aller verfügbaren OF. Die Anzahl der Zeilen bestimmt die Anzahl der durchzuführenden Versuche, während die Spaltenanzahl die mögliche Anzahl der Faktorstufen vorgibt.

Tabelle 2.4: Aufbau und Übersicht orthogonaler Versuchsfelder

Vollfaktorieller 2^3 -Versuchsplan								Feld	Anzahl Zeilen	Max. Anzahl Faktoren	Max. Anzahl der Spalten					
#	A	B	AB	C	AC	BC	ABC				2	3	4	5		
1	-	-	+	-	+	+	-	2-stufig	L ₄	4	3	3	-	-	-	
2	+	-	-	-	-	+	+		L ₈	8	7	7	-	-	-	
3	-	+	-	-	+	-	+		L ₁₂	12	11	11	-	-	-	
4	+	+	+	-	-	-	-		L ₁₆	16	15	15	-	-	-	
5	-	-	+	+	-	-	+		L ₃₂	32	31	31	-	-	-	
6	+	-	-	+	+	-	-		L ₆₄	64	63	63	-	-	-	
7	-	+	-	+	-	+	-		3-stufig	L ₉	9	4	-	4	-	-
8	+	+	+	+	+	+	+			L ₂₇	27	13	-	13	-	-
								L ₈₁		81	40	-	40	-	-	
#	1	2	3	4	5	6	7	mehr-stufig	L ₁₆	16	5	-	-	5	-	
	2	1	1	2	2	2	2		L ₂₅	25	6	-	-	-	6	
	3	1	2	2	1	1	2		2	L ₆₄	64	21	-	-	21	-
	4	1	2	2	2	2	1		1	Gemischt 2- und 3-stufig	L ₁₈	18	8	1	7	-
5	2	1	2	1	2	1	2	L ₃₂	32		10	1	-	9	-	
6	2	1	2	2	1	2	1	L ₃₆	36		23	11	12	-	-	
7	2	2	1	1	2	2	1	L ₃₆	36		16	3	13	-	-	
8	2	2	1	2	1	1	2	L ₅₀	50		12	1	-	-	11	
Orthogonales Feld L ₈ (2 ³)								L ₅₄	54	26	1	25	-	-		

Nachteilig zu erwähnen ist, dass *WWs* bei *Taguchi* Versuchsplänen eine eher untergeordnete Rolle einnehmen, da es bei hochvermengten Plänen problematisch und mittels Wechselwirkungstabellen sehr aufwendig ist, diese auszuwerten. Es wird empfohlen, sich bereits vorher mit den *WWs* des Systems auseinander zu setzen, sodass diese während der Auswertung der Ergebnisse keine Komplikationen verursachen. Aus einschlägiger Literatur wird ersichtlich, dass die *Taguchi* Pläne teilweise mit *Plackett-Burman*- oder *Box-Behnken*-Versuchsplänen identisch sind [Ros88], [Bar90].

Zur Qualitätsbewertung von Testfeldern, werden neben der *Orthogonalität* oder *Symmetrie* beispielsweise die *MiniMax* und *MaxiMin* Methode nach [JMY90], das *Entropie-Kriterium* nach [Sha48] oder die Bewertung der *Gleichverteilung (Uniformity)* nach [FLS05] angesetzt.

Innere und äußere Felder

Taguchi Versuchspläne verwenden zwei Arten von Versuchsplänen. Die sogenannten inneren (*inner array*) und äußeren (*outer array*) Felder. Dabei werden die *OF* übereinander angeordnet, vergleiche Bild 2.14. Das innere Feld wird lediglich für die *Stellgrößen (SFs)* und deren Freiheitsgrade ausgewählt, während das äußere Feld für die *Störgrößen (NFs)* zur Verfügung steht. Somit erhöht sich die maximale Anzahl an Versuchen auf die Anzahl der Versuche des inneren Feldes, multipliziert mit der Anzahl der Versuche des äußeren Feldes. Diese Erhöhung der Versuche stellt meist keine große Hürde dar, da die Anzahl der Versuche innerhalb eines *OF* sehr gering ist. Im dargestellten Beispiel werden 11 Faktoren auf drei Stufen mit lediglich 32 Versuchen getestet [LM90], [Gun04].

Die Intention hinter dieser Verfahrensweise mit zwei Feldern liegt in der Durchführung von *Quasi-Wiederholungen*. Jede Faktorstufenkombination der Steuergröße wird mit verschiedenen Kombinationen von *NFs* getestet. Somit kann das Verhalten jeder Faktorstufenkombination der *SF* unter Einwirkung der *NFs* getestet werden. Im Beispiel von Bild 2.14 werden für jede der acht Faktorstufenkombinationen vier *Quasi-Wiederholungen*, mit jeweils vier Ergebnissen für das Antwortfeld je Zeile, durchgeführt. Aus diesen Ergebnissen kann der Mittelwert μ , die Standardabweichung σ sowie die bei *Taguchi* Versuchen primäre Optimierungsgröße, das *S/N*-Ratio, errechnet und in das Analysefeld eingetragen werden. Durch das *S/N*-Ratio wird der Effekt der *NFs* auf die Zielgröße abgeschätzt und die Streuung wiedergegeben [Kle11]. Zur Optimierung beziehungsweise zur Bewertung der Aufgabenstellung, wird diese entsprechend den vier Problemtypen, vergleiche Absatz *Bewertungsmaß des Mittelwerts und der Streuung* in Kapitel 3.1.2, zugeordnet. Die Auswertung der durchgeführten Experimente erfolgt chronologisch mittels Mittelwerts- (*Analyse of mean (ANOM)*) und Varianzanalyse (*Analyse of variance (ANOVA)*). Die *ANOM* bestimmt die Optimierungsrichtung des Faktors und die *ANOVA* sichert die errechneten Effekte statistisch durch den *Fisher-Test*²³ ab. Diese Informationen können im Zuge der weiteren Optimierung, vor allem im Hinblick auf das *Toleranz Design* in Kapitel 6 und 7, hilfreich sein. Die detaillierte statistische Auswertung der Analysen wird nicht beschrieben, sondern auf die Literatur [Ros88], [TCW05], [PLLH06] und [Kle11] verwiesen.

Um die inneren Störeinflüsse, wie beispielsweise die Schwankung der nominellen *SF*, in die Untersuchung einzubeziehen, wird aufgrund der Doppelbelegung der *SF* im inneren und

²³ Signifikanztest zur Beurteilung von Effekten [Fis35]

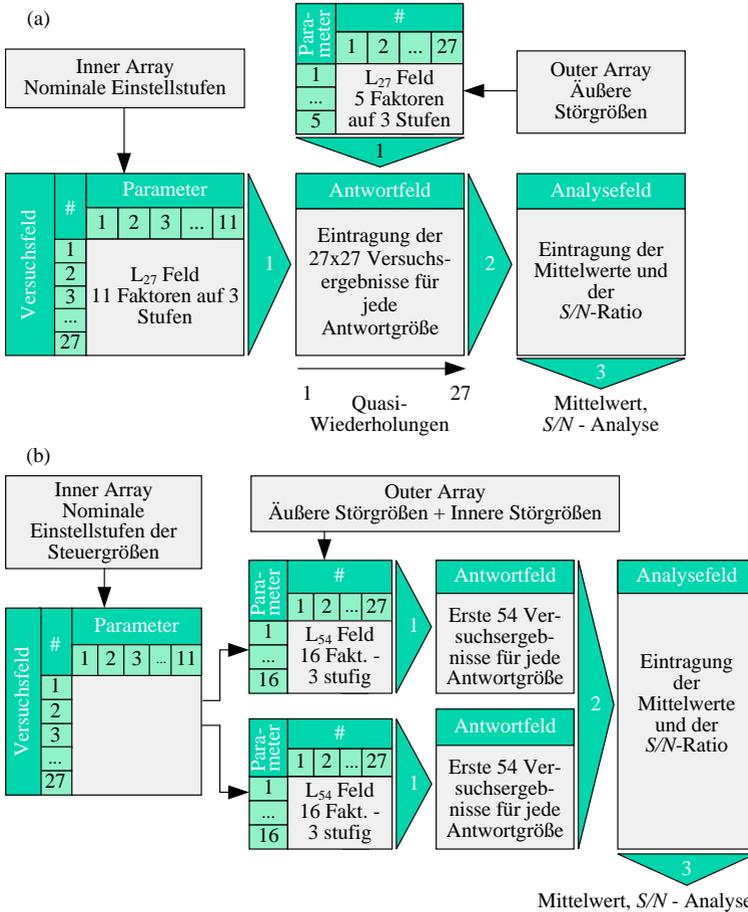


Bild 2.14: Übersicht eines *Taguchis* Versuchsplans mit äußeren (a) und inneren (b) Störgrößen

äußeren Feld eine angepasste Strategie verwendet, die in Bild 2.14 (b) dargestellt ist. Um eine Doppelbelegung zu vermeiden, wird für jede Faktorstufenkombination des inneren Versuchsplans ein kompletter, äußerer Versuchsplan aufgestellt und ausgewertet. Diese äußere *DOE* enthält neben den äußeren *NFs* ebenfalls die Schwankungen der nominellen Einstellstufen der *SF* (inneren *NFs*). Die innere *DOE* gibt lediglich die nominellen Werte vor, wird allerdings in der eigentlichen Auswertung nicht berücksichtigt. Die innere *DOE* verändert sich bei den unterschiedlichen Herangehensweisen nicht. Die äußere *DOE* hingegen enthält anstatt den 5 *NFs*, alle 16 Parameter. Folglich wird hierbei ein *L₅₄* Feld verwendet.

Fuzzy-Logik

Die *Fuzzy-Logik* ist eine gängige Methode in der *Möglichkeitstheorie* zur Beschreibung von *unscharfen*, subjektiven Einschätzungen²⁴. Ihr Grundgedanke basiert auf der Beschreibung von Mengen, deren Grenzen nicht fest sind. Solche Mengen werden als *unscharfe* Mengen bezeichnet, die eine Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\bar{F}}$ besitzen, mit der ihren Elementen einen Grad der Zugehörigkeit zugewiesen wird, vergleiche Kapitel 2.1.3. Diese Vorgehensweise für technische Anwendungen wird *Fuzzyifizierung* genannt [Dem93]. Zur Beschreibung von Expertenwissen liegt der Sachverhalt größtenteils in sprachlich formulierten Regeln vor, er ist jedoch meistens Unschärfen unterlegen, die auf die folgenden drei Formen der Unschärfe zurückzuführen sind [Ti93]:

- ▶ *Stochastische Unschärfe*: Ein Ereignis, was nicht sicher vorhergesagt werden kann.
- ▶ *Lexikalische Unschärfe*: Unsicherheit in der Interpretation einer Aussage
- ▶ *Informale Unschärfe*: Begriffe auf subjektiven Festlegungen, die zum Teil keine objektiven Bewertungsgrößen aufweisen.

Die mathematische Modellierung dieses Unsicherheitsmaßes wird beispielsweise in [Zim86] gezeigt.

Basierend auf der Fähigkeit mit unpräzisen oder vagen Begriffen umzugehen oder auf der Modellierung von komplexen, nicht linearen Problemen mit geringem Entwicklungs- und Rechenaufwand, wird überwiegend die *Fuzzy-Logik* in der Elektronikbranche angewandt und findet beispielsweise in Haushalts- und Hobbygeräten sowie Regelsystemen Einsatz. Nachteilig hingegen ist die inkonsistente Genauigkeit sowie deren Überprüfung. Infolgedessen wird die *Fuzzy-Logik* auf Systemen mit geringer Verantwortung eingesetzt.

2.2.2 Physikalische Surrogate-Modellierung

Eine weitere Form der Modellierung von Abhängigkeiten und Unsicherheiten ist die Methode der *Physikalischen Surrogates* und dient zur physikalischen Erkenntnisgewinnung. Nach [KH06] und [Mey07] sind physikalische Modelle als Abbildung der Natur zu sehen und können verschiedenartig repräsentiert werden, wie beispielsweise idealisierte Annahmen (Massepunkt), komplex theoretische Modelle (Gravitationstheorie), symbolische Modelle (Schaltbild eines elektrischen Stromkreises) oder formalisierte Modelle ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$). Letzteres Beispiel weist Ähnlichkeit zur mathematischen Modellierung auf. Allerdings betrifft dies nicht zwingend alle Elemente des physikalischen Modells. Nach Heinrich Hertz²⁵ sind die Ergebnisse des mathematischen Modells der Grundbaustein des physikalischen Modells sowie die Abbilder der naturnotwendigen Folgen [HH94]. Physikalische Modelle sind unabhängig von der Repräsentationsform. Der Modellierungs-Motivation zufolge gehören reale Elemente oder Zusammenhänge entweder nicht zur physikalischen Modellbildung oder die realen Elemente werden entsprechend stark betont. Infolgedessen ergibt sich die Definition der *Physikalischen Surrogates* als "...das Identifizieren von relevanten Elementen und deren Zusammenhänge." [KH06]. Äquivalent zu dieser Definition ist die mathematische

²⁴ Theorie der unscharfen Mengen - *Fuzzy Set Theory* nach [Zad65]

²⁵ Heinrich Rudolf Hertz (*22. Februar 1857 - †01. Januar 1894): Deutscher Physiker. Bekanntester Beitrag zur Erzeugung und Nachweis von *elektromagnetischen Wellen* im Experiment [Kra07].

Modellbildung im Rahmen, aber nicht notwendigerweise, der physikalischen Modellbildung. Je nach Aufgabenstellung zur Analyse von Strukturen der mechanischen oder elektrischen Domäne, werden verschiedene Modellierungsmethoden zugrunde gelegt. Die am häufigsten, herangezogenen Methoden, auch für die vorliegende Arbeit, sind die *Kontinuierliche Systeme (KOS)*, *Mehrkörpersysteme (MKS)*, *Finite-Elemente-Methode (FEM)* und *Hybride Mehrkörpersysteme (HMKS)*. Wobei die *HMKS* Methode die Kombination der *MKS* und der *FEM* ist. Als tabellarischer Vergleich dient Tabelle 2.5.

Kontinuierliche Systeme

Die *KOS* Methode benötigt zu ihrer mathematischen Beschreibung von Modellen *Partielle Differentialgleichungen (pDGL)*, die als Grundlage der modernen Berechnungsverfahren, wie *MKS* oder *FEM*, dient. Sie ist die einfachste Methode zur Beschreibung von physikalischen Modellen, wie beispielsweise einfache Geometriestrukturen (Stäbe, Balken, Platten). Sie ist jedoch beschränkt in der Anwendbarkeit auf komplexere Strukturen [GKL12], [Mes15].

Mehrkörpersysteme

Der Ursprung der *MKS* Methode liegt in den 70er Jahren. Deren Grundlage basiert auf den mathematischen Forschungsarbeiten von Newton²⁶, d'Alembert²⁷, Lagrange²⁸ und Hamilton²⁹ [Kre79]. Mit der *MKS* Methode werden die zu betrachteten Objekte in einzelne, starre Körper aufgeteilt, die beispielsweise über Gelenke, Federn, Dämpfer oder Kontaktbedingungen, entsprechend der konstruktiven Gegebenheiten, verbunden werden [Sch06], [AS09]. Häufig erfolgt die Modellbildung durch massebehaftete Körper sowie deren masselose Verbindungselemente. Es besteht die Option, elastische Körper zu berücksichtigen, dies ist allerdings mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden. Entsprechend werden elastische Elemente mit starren Elementen modelliert (*lumped mass* Methode). Eine Kontaktsimulation, wie in der *FEM*, benötigt zwischen Körper oder einem Körper und seiner Umgebung eine Kollisionserkennung sowie eine mathematische Beschreibung des Stoßgangs [RS14].

Finite-Elemente-Methode

Der Ursprung der *FEM* liegt bei [TCMT56] in den 50er Jahren begründet. Damals wurde die *FEM* zur Berechnung von Flugzeugstrukturen angewandt [ZT67], [MM89]. Nach ihrer rasanten Entwicklung dient sie heutzutage überwiegend als Grundlage für die Simulation und Vorhersage des physikalischen Verhaltens von komplex technischen Systemen. Dabei werden auf Basis von partiellen Differenzialgleichungen, numerische Lösungsverfahren angewandt, weshalb sich die Methode zur Berechnung von Verformungen einzelner Körper

²⁶ Isaac Newton (*04. Januar 1643 - †31. März 1727): Britischer Mathematiker, Statistiker und Philosoph. Bekanntester Beitrag zur ist die *Gravitations- und Bewegungsgesetz* [Kra07].

²⁷ Jean-Baptiste le Rond d'Alembert (*16. November 1717 - †29. Oktober 1738): Französischer Mathematiker und Physiker. Bekanntester Beitrag zur klassischen Mechanik ist das *D'Alembertsche Prinzip* zur Definition von Bewegungsgleichungen [FW07].

²⁸ Joseph-Louis de Lagrange (*25. Januar 1736 - †10. April 1813): Italienischer Mathematiker und Astronom. Bekanntester Beitrag zur analytischen Mechanik mit seinen *Lagrange-Funktionen* und der *Varianzrechnung* [FW07].

²⁹ William Rowan Hamilton (*04. August 1805 - †02. September 1865): Irischer Mathematiker und Physiker. Bekanntester Beitrag zur Mechanik und der Einführung der *Quaternionen* [FW07].

eignet [Kle12]. Hierbei ist die Grundidee, die Berechnungsgebiete in eine begrenzte Anzahl von Elementen zu zersetzen, deren Lösungen systematisch und näherungsweise anhand der Variationsmethode nach [MM89] oder der Methode der gewichteten Residuen nach [ZT67] sowie deren Derivate, zu ermitteln.

Tabelle 2.5: Modelltypenvergleich der physikalischen Modellierung

Modelltyp	<i>MKS</i>	<i>FEM</i>	<i>KOS</i>
Teilkörper	starr, ggf. elastisch	elastisch	elastisch
Systemgeometrie	komplex	komplex	einfach
Anzahl <i>DOF</i>	beschränkt	hoch	unendlich
Kräfte / Momente	diskret	verteilt / diskret	verteilt / diskret
Kontaktsimulation	eingeschränkt	ja	ja
Eigenfrequenzen	zu niedrig	zu hoch	exakt

Auf Basis der vorgestellten Möglichkeiten zur Modellierung von realen Wirkzusammenhängen (*Mathematische* und *Physikalische Surrogates*) werden relevante Elemente und deren Zusammenhänge identifiziert und je nach Fragestellung in einen abstrakten Modellraum überführt. Trotz dieser gemeinsamen Herangehensweise folgen beide Methoden unterschiedlichen Zielstellungen. Die mathematische Modellierung dient der quantifizierten und die physikalische Modellierung zudem der konzeptuellen Beschreibung [SL11].

2.2.3 Approximationsverfahren - *META*-Modellierung

Approximationsverfahren sind Methoden, die auf Basis von Testdaten einen mathematischen Zusammenhang beschreiben. Hierbei ist zu unterscheiden, wo der Ursprung der Testdaten liegt. Sind die Testdaten physikalische Experimente, kann dem *Approximationsverfahren* ein vordefinierter Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen vorausgesetzt werden. Entsprechend kann eine hohe Modellgüte und folglich eine hohe Prognosefähigkeit erreicht werden, wenn das zu analysierende System den Annahmen folgt. Basieren die Testdaten allerdings auf *CAE*-Versuchen, deren Beschreibungen auf komplexen Wirkzusammenhängen beruhen, die vor den Versuchen nicht oder nur teilweise bekannt sind, wird die Methode der *META-Modellierung*³⁰ angewandt. Sie wird als eine Ersatz-Modellierung für die Ermittlung mathematischer Beziehungen zwischen Parametern und Produkteigenschaften angewandt. Für sehr aufwendige Simulationsaufgaben kann die direkte Abbildung von Eingangs- und Ausgangsparametern eine große Menge an Ressourcen in Anspruch nehmen. Diese Modellierungsmethode ist sehr flexibel und selbständig, da sie ohne Vorgabe von funktionalen Abhängigkeiten zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen an komplexe Sachverhalte angepasst werden kann.

³⁰ Komposition aus *Modell* (Beschreibung eines Systems) und *Meta* (griechisch für über, neben). Sie beschreibt die Modellierungssprache mit der Abhängigkeiten modelliert werden können und findet hauptsächlich Anwendung in der Informatik oder beispielsweise in der multidisziplinären Analyse und Optimierung von Modellierungsaufgaben in der Simulation.

Inter- und Extrapolation

Unter *Approximation* wird im Allgemeinen die Annäherung eines vorhandenen Datenbestands durch eine mathematische Funktion mittels Methoden, wie *Moving Least Squares* oder *Kriging Verfahren*, verstanden [BZ00]. Im Gegensatz dazu wird die *Interpolation* als die Ermittlung eines unbekanntes Funktionswerts zu einem Argument definiert [Bil99]. Bei dieser Methode werden zwischen den Argumenten der bekannten Stützstellen, die Werte des jeweiligen Attributs berechnet. Im Gegensatz dazu, beschreibt die *Extrapolation* die Bestimmung von Attributen außerhalb des Mess- beziehungsweise Simulationsraumes [BZ91]. Es ist bei der Anwendung der *Extrapolation* darauf zu achten, dass Berechnungen außerhalb der Datenbasis zu großen Abweichungen führen können und der Sachverhalt nicht richtig wiedergegeben wird.

Polynomische Regression

Die *Polynomische Regression* ist eine häufig angewandte *Approximationsmethode*, bei welcher die Abhängigkeit zwischen den unabhängigen Variablen t_i und den abhängigen Variablen y_i als ein Polynom des Grads n modelliert wird. Hierdurch ist es möglich, die gesampelten Designpunkte zu bewerten. Die Antwort des Modells wird normalerweise von einer polynomischen Basisfunktion $\mathbf{p}(\mathbf{t})$ erster oder zweiter Ordnung (linear oder quadratisch) approximiert. Die Antwort y_i für eine definierte Parameterkombination x_i der Eingangssparameter, kann als Summe des approximierten Werts \bar{y}_i und einem Fehlerterm ε_i definiert werden. Die polynomische Basis $\mathbf{p}(\mathbf{t})$ ergibt sich nach [MW11] zu:

$$\mathbf{p}^T(\mathbf{t}) = [1 \ t_1 \ t_2 \ t_3 \ \dots \ t_1^2 \ t_2^2 \ t_3^2 \ \dots \ t_1 t_2 \ \dots \ t_1 t_3 \ \dots \ t_2 t_3 \ \dots] \quad , \quad (2.39)$$

wobei beispielsweise der Term $t_1 t_2$ ein koppelnder Term ist und auf die *WW* zwischen den beiden Parametern t_1 und t_2 hinweist. Die Systemantwort y_i für die definierten Eingangssparameter t_i kann als Summe des approximierten Wertes \bar{y}_i und einem Fehlerterm ε_i , definiert werden zu:

$$y(\mathbf{t}_i) = \bar{y}_i(\mathbf{t}_i) + \varepsilon_i = \mathbf{p}^T(\mathbf{t}_i)\beta + \varepsilon_i \quad , \quad (2.40)$$

mit β als Vektor der unbekanntes Regressionkoeffizienten. Die Regressionkoeffizienten können mittels der *Methode der kleinsten Fehlerquadrate* durch einfache Substitution der nichtlinearen Terme bestimmt werden. Zudem soll die Quadratsumme der Fehlerterme ε_i bei allen Designpunkten \mathbf{t}_i kleinst möglich sein. Es sei angemerkt, dass mit zunehmender Anzahl von Faktoren oder des Grads, die Anzahl der Terme ansteigt, was zu einem erheblichen Rechenaufwand führt. Entsprechend wird bei dieser Methode die Anwendung auf maximal quadratische Terme beschränkt. Zudem ist zu beachten, dass bei komplexeren Polynomen die Terme meist nicht orthogonal sind. Dies hat eine erschwerte, unsichere Zuordnung von Effekten zu den jeweiligen Termen zur Folge [AO01], [SBT10].

Moving-Least-Squares Approximation

Eine Weiterentwicklung zur zuvor beschriebenen *Polynomischen Regression* ist die *Moving Least Squares (MLS) Approximation* nach [LO80]. Diese Methode betrachtet das lokale Verhalten der Regressionsfunktion über eine positionsabhängige Gewichtungsfunktion. Wie bei der *Polynomischen Regression* wird hier die Basisfunktion auf lineare oder quadratische

Basisfunktionen beschränkt, allerdings können auch Funktionen höherer Ordnung, je nach Aufgabenstellung, angewandt werden [Lev98].

Um einen lokalen Charakter der Regressionsfunktion zu erhalten, wird die Gewichtungsfunktion $a(t)$ eingeführt. Die Basisfunktion kann jede Ordnung annehmen, wobei in der Regel lineare oder quadratische Terme verwendet werden. Die Approximationsfunktion kann wie folgt definiert werden [MW11]:

$$\bar{y}(\mathbf{t}) = \mathbf{p}^T(\mathbf{t})a(\mathbf{t}) \quad , \quad (2.41)$$

wobei $a(t)$ die bewegende Gewichtungsfunktion ist. Die *MLS* Methode hat den Vorteil, dass an jedem Punkt lediglich der Gewichtungsfaktor und die lokalen Polynom-Koeffizienten berechnet werden müssen, was den Ansatz zeitlich effizienter im Vergleich zu anderen Regressionsmethoden macht. Weitere Derivate der *MLS*, wie die *Advanced Moving Least Squares* Approximation nach [MW11], die *Galerkin-Methode* nach [Gal15] oder die erweiterte *Petrov-Galerkin-Methoden* nach [Mey07], verstärken die Anwendung der Gewichtungsfunktion für eine präzisere Regression mit geringerer Fehlerabweichung. Ein weiterentwickeltes Derivat auf Basis von [MW11] ist für die Aufgabenstellung dieser Dissertation in [18] beschrieben.

Kriging-Verfahren

Das *Kriging-Verfahren* stammt aus der Geowissenschaft (Geostatik) und ist nach dem südafrikanischen Bergbauingenieur D.G. Krige³¹ benannt. Nach [Arm98] kann man mittels *Kriging* nicht nur die Werte von Punkten, sondern auch von Flächen, schätzen, indem der Funktionswert für eine unbekannte Faktorkombination auf Basis von Messdaten in der lokalen Umgebung approximiert wird. Dabei werden diejenige Stützpunkte, die näher am Attribut liegen, höher gewichtet [SBT10]. Analog zu anderen Approximationsverfahren gilt die implizite Annahme über die Stetigkeit von Werten in der Nähe eines Attributs mit einem höheren Gewicht, als weiter entfernte Werte. Im Gegensatz dazu berücksichtigt das *Kriging-Verfahren* jedoch zusätzlich die Korrelation zwischen den Werten (Steifigkeit zwischen zwei Werten). Anhand der Korrelation kann die Gewichtung der Werte verbessert werden. Bildlich beschreibt dies beispielsweise die Gewichtsreduzierung von Werten bei einer Anhäufung an einem Attribut im Faktorraum.

Beim *Simple Kriging* wird von einem konstanten globalen Mittelwert, mit der Bedingung $\mu_{glob} = 0$, ausgegangen. Entsprechend erfolgt die Berechnung der Differenz des Wertes jedes bekannten Punktes y_i zum Erwartungswert $E(X) = \mu$. Anschließend wird die Abweichung des gesuchten Punktes t_0 vom gesuchten Funktionswert y_0 vom Mittelpunkt μ_{global} ermittelt [SBT10]:

$$\bar{y}_0 = \mu + \sum_{i=0}^n g_i (y_i - \mu) \quad . \quad (2.42)$$

³¹ Danie G. Krige (*26. August 1919 - †03. März 2013): Südafrikanischer Geostatiker. Bekanntester Beitrag mit seiner Arbeit zu den Grundlagen der Geostatik auf der Basis empirischer Daten aus dem Goldbergbau [Arm98].

Zur Bestimmung der Gewichte g_i wird im nächsten Schritt auf Basis einer Kovarianzfunktion $C(h)$, die Kovarianz zwischen allen Werten ermittelt. Eine häufige Form dieser Kovarianzfunktion ist:

$$C(h) = e^{-\sum_{k=1}^{n_f} \varpi_k |t_{ik} - t_{jk}|^p}, \quad (2.43)$$

mit $0 < p \leq 2$ und n_f als Faktoranzahl. Die Positionen zu den Werten und des gesuchten Punktes t_0 wird in der $n \times n$ Matrix $R = [C(h)]$ berechnet. Als Ergebnis wird mit dem berechneten Vektor $D = [C(h_0)]$ der Länge n , die Gewichte ermittelt zu [SBT10]:

$$g = R^{-1} D \quad . \quad (2.44)$$

Angemerkt sei, dass der zusätzliche, meist konstant angenommene, Gewichtungsfaktor ϖ den Werteeinfluss bei der weiteren Entfernung vom gesuchten Punkt x_0 verändert. Je geringer der Gewichtungsfaktor ϖ , desto glatter (*smoother*) die Approximation.

Derivate des *Kriging-Verfahrens* sind beispielsweise das genannte *Simple Kriging*, das *Ordinary Kriging* und das *Universal Kriging* [BG95]. Diese unterscheiden sich jedoch bei der Betrachtung des Erwartungswertes (Mittelwert). Beim einfachen *Simple Kriging* wird von einem konstanten, globalen Erwartungswert ausgegangen, der durch den Mittelwert aller Werte geschätzt wird. Das *Ordinary Kriging* hingegen betrachtet einen beliebigen, konstanten und unbekanntem Mittelwert. Anders als bei den beiden zuvor genannten Verfahren wird beim *Universal Kriging* im ersten Schritt ein globales Approximationsmodell angepasst und im zweiten Schritt die lokalen Abweichungen mittels Approximationsmodell geglättet [BG95], [Arm98]. Weitere Derivate des *Kriging-Verfahrens* werden unter anderem in [LS05] oder in [Ste99] vorgestellt.

META-model of Optimal Prognosis (MOP)

Eine zusätzliche in dieser Arbeit angewandte *META-Modellierungsmethode* ist das *META-Modell (MOP)* nach [MW08]. Auf Basis der vorgestellten *Approximationsmethoden* wird ein *META-Modell* erzeugt, das den höchsten *Prognosekoeffizient*, vergleiche nachfolgendes Kapitel 2.2.4, und ausschließlich signifikante Parameter aufweist. Zur Bestimmung der optimalen Parameterkonstellation werden die vorgestellten *Approximationsmethoden* angewandt. Eine Steigerung der Vorhersagegenauigkeit kann im Fall der Eliminierung der Parameter und des Vorhandenseins mehrerer Stützpunkte erlangt. Aufgrund der Modellunabhängigkeit sowie Objektivität des *COP* können verschiedene Modelle untereinander weiter in verschiedenen Teilräumen verglichen werden. Um die Signifikanz der Parameter zu bewerten, wird der Sensitivitätsindex des Modells S_T^{MOP} eingeführt und wie folgt definiert [MW08], [MW11]:

$$COP_i(X_i) = COP \cdot S_T^{MOP}(X_i) \quad . \quad (2.45)$$

Weiterhin können mit Hilfe des *MOP* die *WVs* zwischen den Parametern dargestellt werden. Um ein robustes Design bewerten zu können, sollte der *COP* des *MOP* aus eigenen Untersuchungen ≥ 90 % sein.

Weitere *Approximationsverfahren* sind beispielsweise die *Radial Basis Funktion* nach [Pow87], die nicht-parametrische *Kernel Polynom-Regression* nach [FG96] oder die *Künstli-*

chen Neuronale Netzwerke nach [MP43]. Weiterführende Literatur zu *Approximationsverfahren* oder *-algorithmen* sind unter anderem in [Wan06], [FH07], [JM08] gegeben.

2.2.4 Statistische Bewertungs- und Gütemaße zur Approximation

Um die Gefahr einer zwar hohen Approximationsqualität *COP* auf Basis der Datenpunkte mit sehr geringen Vorhersagegenauigkeit für neue Parameterkombinationen von *META-Modellen* zu umgehen, werden entsprechende statistische Bewertungs- und Gütemaße eingeführt. Mögliche Fehlerquellen können falsch gewählte Parameter, falsche Interpretation der Datenbasis sowie ein „*over-fit*“ sein. Analog der *Approximationsverfahren* wird in diesem Teilkapitel nur eine Auswahl an Bewertungsmaßen vorgestellt, welche für diese Arbeit relevant sind.

Bestimmtheitsmaß COD und COD_{adj}

Das Bestimmtheitsmaß COD^{32} , bewertet die Varianz der Differenz zwischen der Datenbasis und den geschätzten Regressionswerten [NKNW96]:

$$COD = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}(t_i) - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{y})^2}, \quad (2.46)$$

mit $COD \in [0, 1]$ und \bar{y} als Mittelwert der Datenbasis. Der *COD* gibt die Höhe der Gesamtvariation des Reaktionswerts y an, der durch die lineare Beziehung zwischen den Parametern im Regressionsmodell beschrieben werden kann. Je höher der *COD*, desto genauer die Anpassung des Regressionsmodells. Allerdings bedeutet ein hoher *COD* nicht zwingend eine hohe Regressionsqualität, da der *COD* mit zunehmender Anzahl von Regressionskoeffizienten deutlich erhöht wird. Entsprechend wird dieser Einfluss durch den COD_{adj} berücksichtigt:

$$COD_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} \cdot (1 - COD^2), \quad (2.47)$$

wobei n die Anzahl der Stützpunkte und p die Zahl der Regressionskoeffizienten ist [NKNW96]. Angemerkt sei, dass die Eigenschaft eines „*over-fits*“ daran erkennbar ist, dass eine zu große Differenz zwischen den beiden Koeffizienten vorliegt.

Quadratische Approximationsfehler

Mit der Fehleranalyse der Approximation, beispielsweise anhand der Varianzanalyse, können wertvolle Informationen über die Annäherungsgenauigkeit erörtert werden. Die häufigst verwendete Bewertungsmaße sind *Fehlerquadratsumme* (SS_E), *Mittlere Fehlerquadratsumme* (MS_E) und *Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme* (RMS_E). Als SS_E wird die Summe der Quadrate der Residuen beschrieben. Es gilt nach [NKNW96]:

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}(t_i))^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2. \quad (2.48)$$

Zwar kann die Abweichung durch SS_E gemessen werden, dennoch ist die durchschnittliche Abweichung an allen Punkten zusätzlich erforderlich. Für diese Aufgabenstellung werden

³² auch Determinationskoeffizient (*Coefficient of Determination*) genannt

MS_E und RMS_E eingesetzt. Der MS_E ist der typische Bewertungsmaßstab zur Quantifizierung der Qualität von *META-Modellen* und kann als mittlere, quadratische Abweichung oder mittlerer, quadratischer Fehler betrachtet werden [NKNW96]:

$$MS_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}(t_i)) \quad . \quad (2.49)$$

Um die absolute Fehlerabweichung zu bestimmen, wird der RMS_E eingesetzt. Er gibt den mittleren, quadratischen Fehler der Differenzen zwischen dem vorhergesagten zum tatsächlichen Wert an [NKNW96]:

$$RMS_E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}(t_i))} \quad . \quad (2.50)$$

Coefficient of Prognosis (COP)

Eine erweiterte Form zur Bewertung der Qualität von *META-Modellen* ist der *Prognosekoeffizient (COP)* nach [MW08]. Es handelt sich hierbei um ein unabhängiges Maß und wird wie folgt definiert:

$$COP = 1 - \frac{SS_{E_E}^{pre}}{SS_T} \quad , \quad (2.51)$$

wobei $SS_{E_E}^{pre}$ als die Summe aller Fehlerquadrate mittels der Validierungsversuche von den erstellten *META-Modellen* bestimmt wird (*Kreuzvalidierung*³³) und SS_T die Totalvariation des Zielfunktionswerts ist. Im Vergleich zu konventionellen Koeffizienten, wie beispielsweise dem Bestimmtheitsmaß, welches nur für die polynomische Regression anwendbar ist, ist der *COP* universell für alle Approximationsmethoden einsetzbar. Zudem wird eine Überschätzung der Approximationsqualität, vergleiche „*over-fit*“, vermieden. Mit ansteigender Anzahl von Testdaten zeigt der *COP* ein besseres Konvergenzverhalten. Eine weitere, positive Eigenschaft des *COP* zeigt sich in einer größeren Genauigkeit sowie der Approximationsqualität, wenn lediglich die signifikanten Parameter berücksichtigt werden. Ein Indiz für eine bestehende *WW* im System zeigt sich, wenn die Summe der einzelnen $COP_i(t_i)$ -Werte der Parameter erheblich größer ist als der gesamte COP_{META} vom *META-Modell*:

$$\sum COP_i(t_i) \gg COP_{META} \quad . \quad (2.52)$$

2.2.5 Zusammenfassung und Fazit

Für die Modellierung und Quantifizierung von Unsicherheiten existiert eine Vielzahl an mathematischen Theorien, deren vier Hauptvertreter die *Wahrscheinlichkeitstheorie*, die *Theorie der unscharfen Mengen*, die *Möglichkeitstheorie* und die *Evidenztheorie* sind. Eine direkte Abgrenzung zur expliziten Einsetzbarkeit sowie eine allgemeine Einsatzvorschrift existiert nicht und muss je nach Aufgabenstellung eruiert werden. Zwar besteht nach *Boole*³⁴ die Kritik einer unzureichenden Erfassung von Unsicherheiten in der Anwendung der

³³ Bei einer Regression beziehungsweise Approximation werden zur Erzeugung des Modells Versuchspunkte vernachlässigt, die zur späteren Modellüberprüfung hinzugezogen werden.

³⁴ George Boole (*02. November 1815 - †08. Dezember 1864): Britischer Mathematiker und Philosoph. Bekanntester Beitrag ist die Begründung der modernen mathematischen Logik [FW07].

Wahrscheinlichkeitstheorie, allerdings kann weder diese noch die anderen Theorien monoton eingesetzt werden. Aus eigener Untersuchung ist die *Evidenztheorie* eine sehr gute Alternative zur *Wahrscheinlichkeitstheorie*, da sich durch die Kombinationsregeln verschiedene Erfahrungen und Expertenmeinungen realistisch bewerten und belastbarer zusammenfassen lassen. Zudem vereint sie die sonst unvereinbaren Theorien der *Wahrscheinlichkeit* und der *Möglichkeit*, indem die *Wahrscheinlichkeit* als untere und die *Möglichkeit* als obere *Wahrscheinlichkeit* interpretiert werden kann. Allerdings muss der Mehraufwand je nach Aufgabenstellung gerechtfertigt sein.

Mit der steigenden Produktkomplexität, steigt der Anspruch an Simulationsmethoden für eine effiziente Produktentwicklung. Um den Simulationsaufwand zu reduzieren, werden immer häufiger *Approximationsmethoden* als Hilfsmittel eingesetzt, die den Zusammenhang zwischen den Parametern und der den zu untersuchenden Zielgröße(n) beschreibt. Dabei ist zu unterscheiden, für welche Aufgabenstellung und mit welchem Qualitätsziel die Methode eingesetzt werden soll. Können zum Zeitpunkt der Untersuchung aus der bereits vorhandenen Datenbasis physikalische Wirkprinzipien abgeleitet werden, kann eine Auswahl geeigneter Methoden erfolgen. Sind keine Daten vorhanden beziehungsweise werden noch Daten mittels realen oder virtuellen Test erzeugt, wird eine systematische Definition von Testfeldern empfohlen. Hierfür eignen sich sowohl die *DOE* Methode für reale Tests als auch die *MC* Methode und ihre Derivate, wie das *LHS*, für virtuelle Versuche.

Für die Modellierung von *META-Modellen* werden in der Regel keine Vorinformationen zum Wirkzusammenhang benötigt. Allerdings muss definiert werden, ob ein lokales (wie das *Kriging-Verfahren*) oder globales (wie die *Neuronalen Netzwerke*) Modell erzeugt werden soll. Für die Definition eines lokalen Modells ist zwischen der exakten Schätzung der Datenbasis (wie das *Kriging-Verfahren*) und der gemittelten Approximation (wie die *MLS* Methode) zu entscheiden. In der Regel gilt, dass bei einer vorhanden Streuung in der Datenbasis oder bei Simulationen, bei welchen keine direkte, zufällige Streuung auftritt, die gemittelte Approximation vorgezogen werden sollte. Es werden in der Literatur einige Empfehlungen für ein geeignetes *META-Modell* je Aufgabenstellung gegeben, wie beispielsweise in [SLC01]. Für einfache Aufgabenstellungen mit geringer Anzahl von Faktoren und einfachen Wirkzusammenhängen soll die *Polynomische Regression* angewandt werden. Für eine größere Faktorenanzahl mit $n_f > 50$ und einem starken nicht-linearen Zusammenhang soll hingegen das *Kriging-Verfahren*, für eine noch größere Faktorenanzahl wiederum die Methode der *Neuronalen Netzwerke* eingesetzt werden. Das vorgestellte *MOP* erleichtert die Auswahl einer geeigneten Approximation.

Für die Bewertung der Approximationsqualität können die zuvor beschriebenen Güte- beziehungsweise Bewertungsmaße eingesetzt werden. Es empfiehlt sich dennoch eine Überprüfung des *META-Modells* mittels zusätzlicher Experimente oder mit Hilfe der *Kreuzvalidierung*. Zudem sollten Extrapolationen außerhalb der Datenbasis vermieden und auf einen möglichen „*over-fit*“ geachtet werden.

2.3 Komplexität

Zur Vervollständigung der zu betrachtenden Schwerpunkte dieser Arbeit, wird abschließend im Grundlagenkapitel 2 die Definition der *Komplexität* und deren Festlegung zur Berück-

sichtigung bei der Betrachtung von Designlösungen behandelt. Produkte werden heutzutage zunehmend komplexer, um den wachsenden, funktionalen Anforderungen gerecht zu werden. *Design Parameter DPs* müssen nicht mehr lediglich einer *Funktionsanforderung (FR)* gerecht werden, sondern meist gleichzeitig mehrere *FRs* erfüllen. Dies führt zu einer hohen Funktionsdichte und folglich zu einer Steigerung des Komplexitätsgrades. Die *Komplexität* eines Systems ist gekennzeichnet durch die steigende Anzahl an Elementen sowie der steigenden Anzahl von Verknüpfungen zwischen diesen Elementen und deren Funktionalität [Mil81]. Die, durch die *FRs* bedingte, Eigenschaft, führt zu einer Mehrbelastung der jeweiligen *DPs* und somit zu einer potentiell höheren Ausfallwahrscheinlichkeit. Diese Mehrbeanspruchung muss in der Gestaltung der *DPs* in der frühen Phase des *PEP* berücksichtigt werden. Eine Übersicht weiterer, bestehender Definitionen der *Komplexität* zeigt zusammenfassend Tabelle 2.6.

Tabelle 2.6: Definitionen der *Komplexität*

Autor	Definition(en)
Dörner [Dö15]	„Die Existenz von vielen, voneinander abhängigen Merkmalen in einem Ausschnitt der Realität wollen wir als Komplexität bezeichnen.“
Ehrlenspiel [EM13]	„Die Komplexität eines technischen Systems ist ein objektiv feststellbares Maß für die Anzahl und Unterschiedlichkeit der Elemente und deren Relationen.“
Lindemann [LM09]	„Complexity represents an attribute of systems and can be divided into several aspects: numerical, relational, variational, disciplinary and organizational complexity.“
Pahl [PB77]	„Unter Komplexität wird in diesem Zusammenhang der Grad der Übersichtlichkeit des Zusammenhanges zwischen Eingang und Ausgang, die Vielschichtigkeit der notwendigen physikalischen Vorgänge, sowie die sich ergebende Anzahl der zu erwartenden Baugruppen und Einzelteile verstanden.“ „Es bestehen viele Komponenten mit unterschiedlich starker Verknüpfung, die sich gegenseitig beeinflussen.“
Weigt [Wei08]	„Im engeren Sinn Eigenschaft eines Systems, deren Ausprägung aus der Art und Anzahl der Elemente und der Art und Anzahl der Relationen des Systems resultiert. Im weiteren Sinn Eigenschaft einer Handlungssituation, deren Ausprägung zum einen aus der Komplexität im engeren Sinn des Systems, mit dem der Handelnde konfrontiert ist, und zum anderen aus weiteren situativen Merkmalen wie insbesondere Dynamik, Intransparenz sowie Unkenntnis und falschen Hypothesen resultiert.“

Alle Definitionen beschreiben ein wichtiges Kriterium, welches die Funktion(en) eines Produktes in Abhängigkeit der Anzahl von Eigenschaften beziehungsweise Elementen und deren *WW* beeinflusst. Dieses nicht vermeidbare Ereignis muss entsprechend bei der Konstruktion von Produkten oder Prozessen berücksichtigt werden.

3 Robustheit und Zuverlässigkeit

Als Grundlage für die Theorie der *Robusten Zuverlässigkeit* (vergleiche Kapitel 5) werden in diesem Kapitel die Grundtheorien der *Zuverlässigkeitstechnik* sowie der *Robust Design Methodik* und deren Methoden vorgestellt und bewertet.

3.1 Robust Design Methodik

Um die Produktqualität sowie deren Funktionsfähigkeit mit geringem finanziellen Einsatz und in kurzer Zeit zu bewerten, wurde die Theorie beziehungsweise der Qualitätsgedanke nach und von *Taguchi*¹ Mitte der 1950er Jahre definiert und entwickelt. Ein wesentliches Ziel dieses Gedankens ist bei der Produktentwicklung verankert: die Funktionalität eines Produktes soll gegenüber Schwankungen der Umgebungsbedingungen möglichst unempfindlich sein [TK09]. Um dieses Teilziel innerhalb eines Entwicklungsprozesses zu erreichen, hat sich der Begriff des *On-Target Engineering* als oberstes Ziel des *Robust Design* etabliert [FC95]. Das *On-Target Engineering* teilt den Gedanken, rasant steigende Kosten durch die gesetzten, reaktiven Qualitätssicherungs-Methoden, wie mit dem präventiven Ansatz von *Taguchi*, einzudämmen. Dieser Ansatz teilt nicht die althergebrachte Auffassung, dass alle Produkte, die ihre Toleranzspezifikationen erfüllen, gleich gut sind, egal wie weit ihre Leistungsmerkmale vom Zielwert abweichen. Dessen Philosophie ist es, die Sicht des Kunden, der es sehr wohl als Qualitätsunterschied betrachtet, wenn Produkte sich in ihren Leistungsmerkmalen unterscheiden, als Kriterium zu etablieren, dabei wird jede Abweichung vom Zielwert als Verlust gesehen. Die *RDM* kann nach [PLLH06] in drei Methoden eingeteilt werden: die *Taguchi Methode (TM)*, das *Axiomatic Design (AD)* und die *Robust Design Optimization (RDO)*. Bevor auf die einzelnen Methoden näher eingegangen wird, wird zuvor die Definition der *Robustheit* und des *Robust Design* diskutiert.

3.1.1 Definition der Robustheit und des Robust Design

Die enzyklopädische Definition von *Robustheit* lautet: „*Robustheit (lateinisch robustus, von robur Hart-, Eichenholz) ist die Fähigkeit eines Systems, seine Funktion auch bei Schwankung der Umgebungsbedingungen aufrecht zu erhalten.*“ [RH15]. *Taguchi* definiert *Robustheit* als die Fähigkeit eines Produktes seine Funktionsfähigkeit aufrecht zu erhalten, trotz Anwesenheit und Einfluss von inneren und äußeren Störfaktoren. Damit soll ein robustes Produkt nicht nur unempfindlich gegenüber Störfaktoren sein, sondern auch zusätzlich geringe Herstellungskosten ermöglichen [TCW05]. Als Störfaktoren werden die Einflüsse bezeichnet, die sich negativ auf die Funktionsfähigkeit des Produktes auswirken und nicht

¹ Gen'ichi Taguchi (*01. Januar 1924 - †02. Juni 2012): Japanischer Ingenieur und Statistiker. Bekanntester Beitrag zur Qualitätssicherung mit seiner *Taguchi-Methode* zur statistischen Versuchsplanung [TCW05].

beziehungsweise nicht ohne Weiteres zu beherrschen sind. Diese Definition findet im Bereich des sogenannten „*Quality Engineering*“ eine breite Verwendung, um die anfängliche *Robustheit* in der frühen Nutzungsphase zu beschreiben [Pha89a]. Da das Produkt möglichst über die gesamte Lebensdauer robuste Eigenschaften aufweisen soll, muss ebenso die Wirkung der Zeit mit einbezogen werden, um so die gewünschte Kundenzufriedenheit sicherzustellen [EEH13], [Yan07].

Allgemein wird *RDM* als Methodik zur Entwicklung eines robusten Produktes, Prozesses oder Systems verstanden. Hierfür werden die Ziele des Designprozesses in Funktionen abgeleitet, die es gilt zu optimieren (*Robust Design Optimization*). Dadurch können Problemursachen identifiziert und bewusst durch Veränderungen gesteuert werden. Es handelt sich um einen Optimierungsprozess, bei dem die *Robustheit* gesteigert werden soll. Obwohl die *RDM* als Methodik beschrieben wird, wird sie dennoch eher als eine Ideologie gesehen, entsprechend gibt es bis heute keine Norm oder Richtlinie, die ein konkretes Vorgehen beziehungsweise eine zeitliche Abfolge vorschreibt. Es handelt sich deshalb bei allen genannten Definitionen aus Tabelle A.12 im Anhang um Zitate aus der frei zugänglichen Literatur. Aus den aufgelisteten Definitionen lässt sich *RDM* zusammenfassend durch die drei Bestandteile: *Unempfindlichkeit*, *Anwendbarkeit* und *Erhaltung der Funktionsfähigkeit* ausdrücken. Somit bildet die *RDM* bildlich gesprochen eine Art Stütze im *PEP* um Kosten und Qualität im Einklang zu halten.

Tabelle A.11 zeigt eine chronologische Übersicht aller bisher genannten Definitionen samt deren erstgenannten Autor beziehungsweise Herausgeber und dem dazugehörigen Titel. Zusammenfassend zeigt Bild 3.1 die chronologische Reihenfolge der *RDM*-Definitionen und Bild 3.2 die zeitliche Einteilung im Histogramm. Es ist ersichtlich, dass die *RDM* eine junge Methodik ist (Jahr 1986), obwohl *Taguchi* diese bereits dreißig Jahre zuvor angewandt hat.

3.1.2 Taguchi Methode

Wie in der Einleitung zu diesem Teilkapitel erwähnt, basiert der Grundgedanke der *RDM* auf der Qualitätsideologie nach *Taguchi*. Bei der Entwicklung seiner Methode stützte sich *Taguchi* auf die Grundlagen der *DOE* und erreichte durch die Verwendung von *Orthogonalen Feldern* einen deutlich effizienteren Ansatz zur Lösung technischer Problemstellungen im Vergleich zu, bis dahin etablierten, *DOE*-Methoden [Mon91]. Dadurch lenkte er die Betrachtungsweise auf zwei Fragestellungen:

- ▶ *Wie können Leistungsschwankungen des Produkts mit möglichst geringem Kostenaufwand reduziert werden?*
- ▶ *Wie kann überprüft werden, dass die Ergebnisse, die im Labor oder beim Versuch gefunden werden, später auch bei der Verwendung im realen Umfeld zutreffend sind?*

Taguchi verfolgt somit das Ziel, die Qualität eines Produkts zu verbessern, indem die Auswirkungen durch Schwankungen minimiert werden. Dabei sollen nicht die Ursachen der Schwankungen beseitigt, sondern das Produkt so gestaltet werden, dass es sich möglichst unempfindlich gegenüber diesen Ursachen verhält. Dies soll erreicht werden, indem die Leistung eines Produkts oder Prozesses minimal empfindlich gegenüber den Faktoren, die Schwankungen verursachen, bestimmt werden und das mit möglichst niedrigen Herstellungskosten [TEH89], [Pha89a], [Pha89b], [FC95].

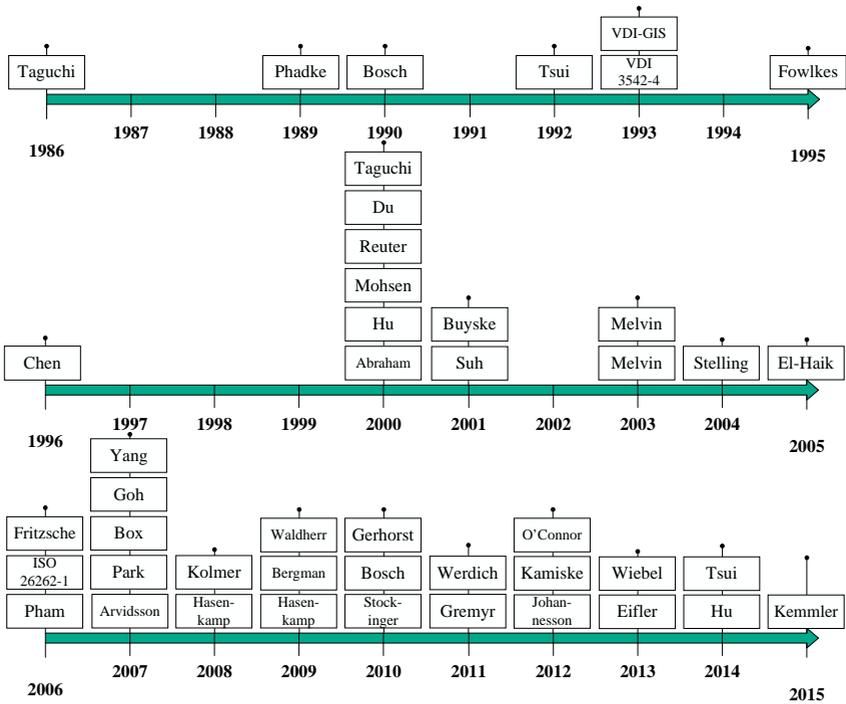


Bild 3.1: Zeitliche Einteilung von RDM-Definitionen

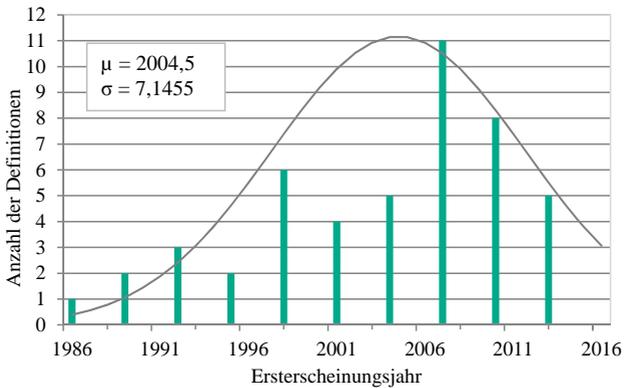


Bild 3.2: Häufigkeitsverteilung von RDM-Definitionen^a

^aDie bildliche Darstellung der zeitlichen Einteilung von RDM-Definitionen, in Form eines Histogramms mit ermittelter Normalverteilung, soll ausschließlich den zeitlichen Hotspot an Definitionen zum Thema wiedergeben.

Taguchi's Ideologie - Off-Line Qualitätslenkung

Unter die *On-Line Qualitätslenkung* fallen alle Maßnahmen, die während der Herstellung des Produkts unternommen werden, um die geforderte Qualität zu gewährleisten. Dabei werden im Wesentlichen *Unit-to-unit*-Schwankungen gemindert. Um festzustellen, wann innerhalb der Produktion Schwankungen, unabhängig von zufälligen Schwankungen, auftreten, wird die *Statistische Prozesskontrolle (SPC)* eingesetzt [FC95]. Im Gegensatz dazu befasst sich die *Off-Line Qualitätslenkung* mit allen Maßnahmen, die während der Entwicklung und Gestaltung des Produktes unternommen werden. Hierfür definiert *Taguchi* drei Phasen: *System Design (SD)*, *Parameter Design (PD)* und *Toleranz Design (TD)*. Diese werden im Folgenden nach [Tag78], [Kac85], [Tag86], [TCW05] und [BdLS09] zusammenfassend vorgestellt.

System Design

Das Ziel dieser Phase ist es, aus allen möglichen Design-Alternativen die bestmögliche Lösung auszuwählen. Hierfür wird beispielsweise *Quality Function Deployment (QFD)* angewandt, um die Wünsche der Kunden in technische Anforderungen und Ziele zu überführen. Um einen ersten Eindruck für die *Robustheit* der verwendeten Technologie zu bekommen, wird hier bereits eine Optimierung durch dynamische Signal/Rausch-Verhältnisse (S/N – Ratio) verwendet, siehe nachfolgendes Teilkapitel: *Bewertungsmaß des Mittelwertes und der Streuung*. Beim Finden von innovativen Lösungen stellt die *Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ)* ein beliebtes Hilfsmittel dar. Für eine erste Untersuchung der Auswirkungen der einzelnen Faktoren auf die Leistung des Produkts wird die *DOE* angewandt. Mithilfe von „*Competitive Technology Assessment*“ werden intern und extern entwickelte Technologien hinsichtlich ihrer bereits vorhandenen *Robustheit* analysiert. Für die letztliche Konzeptauswahl dient die *Pugh Matrix* als Hilfsmittel. Sie sammelt in einer übersichtlichen Matrix die Eigenschaften jeder Konzeptalternative und unterstützt somit das Expertenteam bei der Design Entscheidung. Eine weitere Methode zur Beschreibung, Bewertung und möglichen Lösung von *Komplexität* von Konzepten beziehungsweise Entwürfen ist die Methode des *Axiomatic Design (AD)*. Aufgrund der umfangreichen Beschreibung und deren Anwendung in *SMAR²T* wird sie losgelöst in Kapitel 3.1.3 behandelt.

Parameter Design

Auf dieser Phase liegt das Hauptaugenmerk von *Taguchi*, da im *Parameter Design (PD)* am meisten Veränderungen hinsichtlich der Verbesserung der *Robustheit* bewirkt werden können. Um dies zu erreichen, werden alle Kontrollfaktoren, die einen Einfluss auf das System haben, identifiziert und deren optimale Einstellungen ermittelt. Im Allgemeinen sollen dabei Erfahrung, Übung und Durchführen von Experimenten bei dem Identifizieren der wesentlichen Ursachen der Schwankungen verwendet werden. Zur Unterstützung wird dabei das *P-Diagramm*, was in Kapitel 6 ausführlicher vorgestellt wird und in Bild 3.3 schematisch dargestellt ist, für das System und für alle Faktoren hinsichtlich ihres Einflusses auf das System erarbeitet und veranschaulicht. Die Faktoren werden in folgende Kategorien eingeteilt: *Stellgröße (SF)*, *Störgröße (NF)*, *Steuergröße (CF)* und Qualitätskriterium (Systemantwort). Darüber hinaus kommen im *PD* dynamische und statische S/N – Ratio zum Einsatz. Damit werden die Designparameter bezüglich einer Minimierung der auftretenden Schwankungen

optimiert. Zudem kommen hier zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den *CFs* und den *NFs*, die für *Taguchi* charakteristischen, gekreuzten Versuchspläne² zum Einsatz.

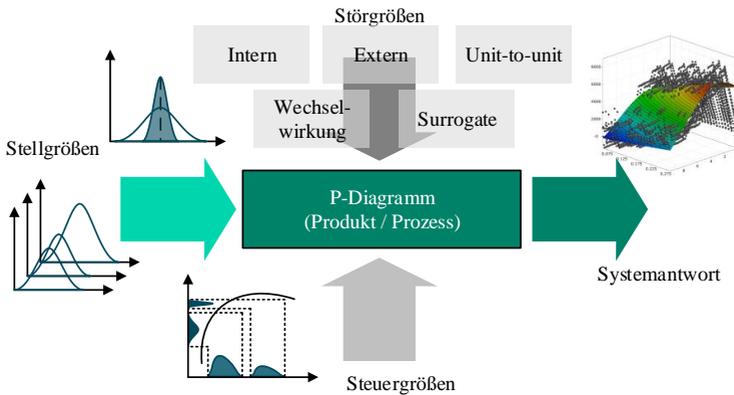


Bild 3.3: P-Diagramm

Toleranz Design

Wurden in der vorangegangenen Phase die optimalen Einstellungen für die Steuergrößen gefunden, werden im Anschluss daran im *Toleranz Design (TD)* die Toleranzbereiche für die einzelnen Parameter festgelegt. Für Parameter, die kaum Einfluss auf die *Robustheit* des Produkts haben, kann dabei der Toleranzbereich für eine Verringerung der Kosten vergrößert werden. Falls für die geforderte Qualität nötig, werden die jeweiligen Toleranzbereiche entsprechend verkleinert. Mithilfe der Qualitätsverlustfunktion (*Quality-Loss Function*), siehe entsprechend im folgenden Teilkapitel, können dabei die durch die auftretenden Schwankungen verbundenen Kosten berechnet werden. Die *Analyse of variance (ANOVA)* hilft dabei zu ermitteln, welchen Anteil die Schwankung jedes Stör- beziehungsweise Steuergrößen auf die Schwankung des gesamten Systems hat. Um die Auswirkungen der einzelnen Faktoren zu untersuchen kann darüber hinaus erneut die *DOE* eingesetzt werden.

Bewertungsmaß des Mittelwerts und der Streuung

Für verschiedene Zielstellungen beziehungsweise Zielfunktionen gibt *Taguchi* unterschiedliche Ansätze für die Berechnung des *S/N – Ratio* vor, was meist als letzter Schritt der *DOE*-Auswertung erfolgt. Aus der jeweils vorliegenden Zielstellung kann ein Problemtyp abgeleitet und das *S/N – Ratio* nach Tabelle 3.1 berechnet werden [FC95].

Der Wert eines einzelnen Ergebnisses der Antwort wird hier durch y_i beschrieben. Beim Zielwertproblem muss zudem in zwei Fälle unterschieden werden. Bei Typ I laufen die Werte der Standardabweichung und des Durchschnitts synchron zueinander und bei Typ II ist der Verlauf voneinander unabhängig. Das *S/N – Ratio* ist ein Maß für die Schwankungen

² Sonderform der *Orthogonalen Felder*

Tabelle 3.1: Statische Signal-Rausch-Verhältnisse (S/N – Ratios)

Problemstellung	Zielfunktionswert	S/N -Ratio
Minimierungsproblem	0	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$
Maximierungsproblem	∞	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$
Zielwertproblem Typ I	$\neq \infty$, endlich	$10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} \right)$
Zielwertproblem Typ II	endlich	$10 \log (\sigma^2)$

des Qualitätsmerkmals aufgrund der Störgrößen. Dabei ist es unabhängig von der Anpassung des Durchschnitts und ist somit nützlich, um ein Gefühl für die Qualität eines Systems zu bekommen, auch wenn sich der Zielwert noch ändern sollte. Zudem misst das S/N – Ratio die relative Qualität eines Systems, da es nicht für Vergleichszwecke herangezogen wird. Darüber hinaus erzeugt es beispielsweise auch keine Wechselwirkungen zwischen den Kontrollfaktoren, wenn die Einflüsse von mehreren Faktoren auf die *Robustheit* des Systems gleichzeitig untersucht werden. Im Anschluss der Berechnung des S/N – Ratios kann eine

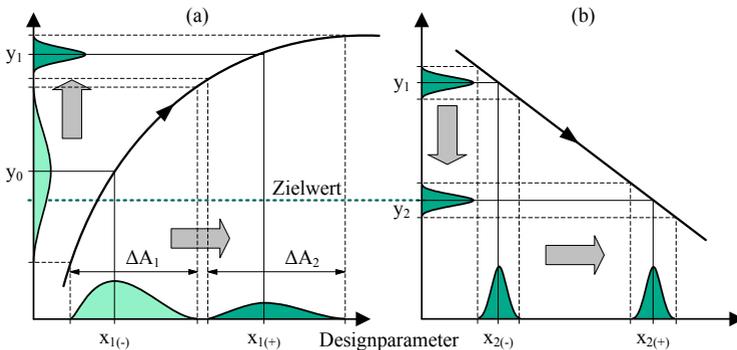


Bild 3.4: Zwei-Schritt Optimierung nach Taguchi: (a) Streuungsminimierung und (b) Mittelwertverschiebung

Optimierung des Zielwertproblems erfolgen, die sogenannte *Taguchi-Optimierung*. Sie erfolgt in zwei Schritten, vergleiche Bild 3.4. Zuerst wird die Streuung durch das Maximieren des S/N – Ratios minimiert, Bild 3.4 (a). Anschließend wird der Mittelwert auf den Sollwert ausgerichtet, Bild 3.4 (b). Für die Durchführung dieser Optimierungsstrategie müssen demnach die respektiven Einstellstufen der *DPs* gefunden werden. Um die Einstellstufen der Faktoren zu bestimmen, gibt es die zwei bewährten Verfahren aus der *DOE*: die *ANOM* und die *ANOVA*. Beide Verfahren können sowohl für den Mittelwert als auch für das S/N – Ratio durchgeführt werden. Dadurch ist es möglich, nach der Analyse des Versuchsplans die Steuergrößen prinzipiell in vier verschiedenen Ausprägungen zu unterteilen [YEH03].

Quality-Loss Function

Die Philosophie der *On-Target Qualitätslenkung* ist ein fester Bestandteil des Optimierungsprozesses innerhalb der *TM*. Somit spielen die Kosten, die durch Abweichung der Leistung vom Zielwert entstehen, eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung der Qualität eines Produkts. Mithilfe der quadratischen Verlustfunktion von *Taguchi* lässt sich dabei der finanzielle Verlust, der durch Schwankungen der Leistung um den gewünschten Wert entsteht, berechnen. Maßgeblich für die Qualität eines Systems ist die Optimierung der charakteristischen Funktion bezüglich eines Zielwerts. Hiernach kann die Verlustfunktion nach Bild 3.9 (b) definiert werden. Wie genau der Qualitätsverlust jedoch berechnet wird, hängt von der Art der Problemstellung ab und wird entsprechend definiert. Dabei bezeichnet $L(Y)$ den finanziellen Verlust in Abhängigkeit von der gemessenen Leistung Y , L_1 wiederum steht für die gemessene Leistung bei einer wirtschaftlich messbaren Konsequenz. Die funktionale Grenzen, bei welchen alle Kunden eine nicht zufriedenstellende Funktion ereilt, wird mit der Leistung L_2 dargestellt [FC95].

3.1.3 Axiomatic Design

Axiomatic Design (AD) ist eine von *N. P. Suh*³ entwickelte *RD*-Methode. Nach [Suh90] ist ein robustes Design, ein Design, das trotz großer Toleranzen der *Design Parameter (DPs)* und Prozessvariablen während die Herstellung und Montage seine funktionalen Anforderungen erfüllt. Die Methode hat ihren Ursprung in der Systemtheorie und soll eine wissenschaftliche Entwurfsbasis für Entwickler bieten. Hierbei soll die Kreativität des Entwicklers durch Verringerung von zufälligen Suchprozessen gesteigert werden [Fie09]. Das *AD* wird meistens nicht als alleinstehende Methode umgesetzt, sondern im Zusammenhang mit Entwicklungsmethodiken, wie beispielsweise *Design for Six Sigma (DFSS)*, die gleichbedeutend mit der steigenden Einsatzbereitschaft zur Anwendung der *TM* ist [YEH03]. Bei *Ford* wird sie bereits als Teilmethodik eingeordnet und erfolgreich für eine Zuverlässigkeitssteigerung um 28 % in einem neuen Automatikgetriebe umgesetzt [Wut12].

Grundgedanke

Grundgedanke von *AD* ist die Reduzierung der *Komplexität* in einem System. Diese kann infolge einer Strukturierung beliebiger Entwürfe, basierend auf dem Ergebnis des Zuordnungsprozesses von Lösungsmöglichkeiten aus den Kundenbedürfnissen im Lastenheft (*Kundenanforderungen (CAs)*), entstehen [Suh90], [Suh97], [Suh01]. Die Aufteilung der kreativen Modellierungsprozesse erfolgt in Domänen: Sicht des Kunden (*Kundenanforderung (CA)*), des Designers (*Funktionsanforderung (FR)*), des zu gestaltenden Systems (*Design Parameter (DP)*) und des Herstellungsprozesses (*Process Variables (PVs)*), vergleiche Bild 3.5. Der Modellierungsprozess ist nach *Suh* ein ständiges Zusammenspiel der Domänen mit der folgenden Fragestellung:

► **Was** wollen wir erreichen? \Leftrightarrow **Wie** wollen wir es erreichen?

Ausgehend von der Ermittlung der *CAs* wird *AD* in mehreren Schritten mit iterativen Prozessen vollzogen [LF08]. Darauf folgend werden die ermittelten Kundenbedürfnisse in sehr

³ Nam-Pyo Suh (*22. April 1936): US-amerikanischer Ingenieur und Mathematiker. Bekanntester Beitrag zur Qualitätssicherung mit seiner Methode *Axiomatic Design* [Suh90].

allgemeine, lösungsneutrale und funktionale Anforderungen (*FRs*) formuliert und übertragen. Sie bestimmen die oberste Entwurfsebene und infolgedessen die Kernanforderungen an das Produkt. Die Reihenfolge wird nach ihrer Wichtigkeit festgelegt und mit Restriktionen (Zielwert(e) und Grenzwert(e)) besetzt. Den *FRs* werden im letzten Schritt *DPs* zugeordnet, die nach [LF08] Ideen repräsentieren, die die definierten Restriktionen erfüllen [Suh01], [Mel03].

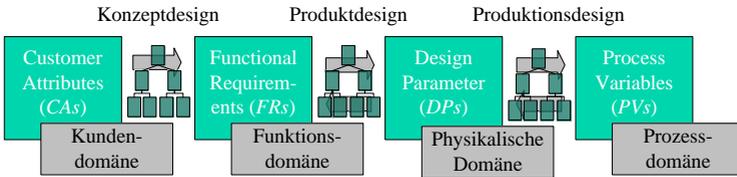


Bild 3.5: Design Domänen des Axiomatic Designs⁴

Dekomposition

Beim Dekompositionsprozess werden die funktionalen Domänen auf eine Ebene geeigneter *DPs* herunter gebrochen. Der Zusammenhang zwischen den *FRs* und den *DPs* wird mit der Transfermatrix $[A]$ dargestellt:

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad , \quad (3.1)$$

wobei die Transfermatrix den Zusammenhang zwischen dem Vektor $\{FR\}$ (funktionale Anforderungen) und dem Vektor $\{DP\}$ (Designparameter) dokumentiert. Sei m die Anzahl an *FRs* und n die Anzahl der zugehörigen *DPs*, kann die Gleichung unter 3.1 formuliert werden zu:

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_n \end{Bmatrix} \quad . \quad (3.2)$$

Wird die Gleichung 3.1 in differentialer Form geschrieben gilt:

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad . \quad (3.3)$$

Nach [Suh01] sind A_{ij} für lineare Designs Konstanten und für nicht lineare Designs Funktionen der *DPs*.

⁴Vergleiche hierzu auch das Prozessmodell nach [Hei01] mit den vier Phasen: Anforderung, Funktion, Effekt (Wirkprinzip, Entwurf) und Herstellung.

Unabhängigkeitsaxiom

Das erste Axiom⁵ der AD-Methode ist das *Unabhängigkeitsaxiom*. Es besagt, dass die Unabhängigkeit der *FRs* zu bewahren ist. Nach [Suh01] sind vorerst alle *FRs* eines Entwurfs bei ihrer Formulierung voneinander unabhängig. Erst bei der Zuordnung zu den *DPs* können Kopplungen entstehen, die zu sogenannten Nichtdiagonal- oder Kopplungselementen im Entwurf führen. Nach [Lee06] sind diese Koppelemente Energie-, Material- oder Informationsflüsse, die zu Iterationen während des Entwurfsprozesses führen [Mel03]. Zur Bewertung solcher Abhängigkeiten wird zwischen drei Designarten unterschieden: *Uncoupled*, *Decoupled* und *Coupled Design*, vergleiche Tabelle 3.2. Hierbei sei angemerkt, dass ergänzend zu

Tabelle 3.2: Designmatrizen zur Beschreibung der Dekomposition

Design	Beispielmatrix
Ungekoppelter Entwurf <i>Uncoupled Design</i>	$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix}$
Entkoppelter Entwurf <i>Decoupled Design</i>	$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix}$
Gekoppelter Entwurf <i>Coupled Design</i>	$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix}$

den gezeigten quadratischen Matrizen ($n = m$) auch rechteckige Formen von Entwurfsmatrizen existieren, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird, vergleiche hierzu weiterführende Literatur, wie beispielsweise [BR11]. Ungekoppelte Entwürfe (*Uncoupled Designs*) weisen nur eine Besetzung in der Hauptdiagonalen auf. Sie sind somit unabhängig, da keine Abhängigkeit zwischen mehreren *FRs* oder *DPs* existiert. Infolgedessen kann jede *FR* vollständig durch ihren zugehörigen *DP* realisiert werden. Entkoppelte Entwürfe (*Decoupled Designs*) weisen entweder ober- oder unterhalb der Hauptdiagonalen Koppelemente auf. Es wird daher von einer sogenannten Dreiecksform der Matrix gesprochen. Die *FRs* sind nicht mehr unabhängig voneinander, da sie von mehreren *DPs* erfüllt werden. Entsprechend müssen die *DPs* in einer bestimmten chronologischen Reihenfolge, beginnend mit den höchsten Abhängigkeit, realisiert werden. Wird diese Reihenfolge nicht eingehalten, werden die bereits erfüllten *FRs* durch die Realisierung nachfolgender *DPs*, aufgrund der Koppelemente, die zu Iterationen bei der Entwurfsumsetzung führen, verändert. Der Kompromiss hierbei ist die Einhaltung der Reihenfolge, die zu einem brauchbaren Entwurf führt [Suh01], [LF08]. Gekoppelte Entwürfe (*Coupled Designs*) sind Entwürfe, die sowohl oberhalb als

⁵ Ein Axiom ist eine „einfachste Aussage, die als wahr betrachtet wird, ...selbst nicht auf noch einfachere Aussagen zurückgeführt werden kann ... und keines Beweises bedarf“ [Bru14].

auch unterhalb der Hauptdiagonalen Koppellemente aufweisen. Diese Entwürfe sind nach dem *Unabhängigkeitsaxiom* unzulässig, da keine chronologische Reihenfolge der *DPs* existiert, die ohne Iteration einen Entwurf zulassen. Allerdings sind diese gekoppelten Entwürfe in der Produktentwicklung meistens der Regelfall. Entsprechend müssen hier Kompromisse hinsichtlich der Auslegung und der Bewertung erfolgen.

Methoden zur Entkopplung

Die Identifikation von Kopplungen in einer Transfermatrix mit einer Dimension kleiner als vier, kann mittels Sichtprüfung erfolgen. Bei komplexeren Matrizen werden wiederum geeignete Methoden benötigt. Es werden im Folgenden zwei Methoden zur Entkopplung von Entwürfen vorgestellt: *Graphentheoretische Interpretation (GI)* und *Reorganisation*. Beide Methoden sind sehr etabliert und unterscheiden sich im Anwendungsaufwand. Bei der *GI* werden mittels Digraphen, vergleiche Bild 3.6, die Elementknoten der Hauptdiagonalen bestimmt und mit der zugehörigen Nummer des *FR/DP*-Paares bezeichnet. Zudem beschreiben gerichtete Übertragungspfeile zwischen den Knoten die Abhängigkeiten. Abgehende Pfeile beschreiben von *FR* abhängige *FRs* innerhalb einer Spalte. Eingehende Pfeile hingegen beschreiben eine Abhängigkeit eines *DP* zu einer *FR*. Der dabei entstehende *Digraph*

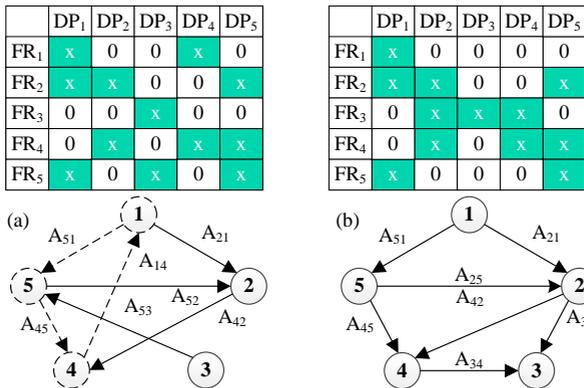


Bild 3.6: Graphentheoretische Interpretation von Transfermatrizen nach [Lee06]

muss auf Existenz eines Zyklus (geschlossene, gerichtete Folge der Übertragungspfeile) hin überprüft werden. In Bild 3.6 (a) ist ein solcher Zyklus abgebildet. Dieser Zyklus führt zu einer Iteration im Entwurfsprozess und weist folglich auf einen gekoppelten Entwurf hin. Im Gegensatz dazu ist in Bild 3.6 (b) kein Zyklus im *Digraph* erkennbar. Folglich ist eine entkoppelte Struktur vorhanden. Ergänzende und weiterführende Möglichkeiten zur Beseitigung von Zyklen wird in [LF08] beschrieben. Zudem werden diese Möglichkeiten in Kapitel 6 anschaulich angewandt. Eine bereits erwähnte Methode der *Reorganisation* bestimmt die Güte eines Entwurfs, indem die Transfermatrix umorganisiert wird und alle Koppellemente dadurch bestimmt werden können. Im Gegensatz zur *GI* bietet die *Reorganisation* dem Gestalter die Möglichkeit, die kleinste Menge an Matrixelementen zu identifizieren, was durch

Veränderung zu einer entkoppelten Matrix führt [BR11]. Weitere, zur Verfügung stehenden, Algorithmen verschiedener Autoren sind beispielsweise [Suh90], [Lee06], [LJ06], [BR11] und [HMRW11]. Der in dieser Arbeit angewandter Algorithmus ist der nach [BR11], da er den besten Kompromiss zwischen Aufwand und Optimierungspotential aufzeigt. Dieser wird in Kapitel 6 vorgestellt.

Informationsaxiom

Das zweite Axiom ist das *Informationsaxiom*, welches besagt, dass der Informationsgehalt I des Designs zu minimieren ist. Es ist ein quantitatives Maß für die Bewertung und zum Vergleich unterschiedlicher Entwürfe. Neben den Entwurfsgleichungen für die Realisierung, können mit Hilfe der zusätzlichen Information Aussagen über die Erfolgswahrscheinlichkeit $Pr(FR_i)$ getroffen werden [Suh01]. Werden mehrere Entwürfe miteinander verglichen, wird der Entwurf ausgewählt, der den geringsten Informationsgehalt und somit die größte Erfolgswahrscheinlichkeit aufweist, da sein Informationsgehalt die kleinste Menge an Informationen benötigt, um die Entwurfsziele zu erreichen [Suh01], [LF08]. Die Berechnung des Informationsgehalts erfolgt bevorzugt durch die Logarithmusfunktion zur Basis 2^6 . Der Tatsache geschuldet, dass aufgrund der Produktkomplexität ein *Coupled Design* nahezu nicht zu vermeiden ist, wird die Verbundwahrscheinlichkeit $P_{\{m\}}$ eines *Decoupled Design* mit der bedingten Wahrscheinlichkeit $P(FR_i|FR_{\{j\}})$ berechnet zu:

$$P_{\{m\}} = \prod_{i=1}^m P(FR_i|FR_{\{j\}}) \quad . \quad (3.4)$$

Dies bedeutet, dass die bedingte Wahrscheinlichkeit, die FR_i unter der Voraussetzung erfüllt, alle anderen mit dieser in Beziehung stehenden $FR_{\{j\}}$ ebenso erfüllt sind. Für das Gesamtsystem gilt somit:

$$I_{\text{sys}} = - \sum_{i=1}^m \log_2 P(FR_i|FR_{\{j\}}) \quad . \quad (3.5)$$

Ergänzend ist zu erwähnen, dass unter Betrachtung und Anwendung des *Informationsaxioms* in der vorliegenden Arbeit, ein Entwurf als *komplex* bezeichnet wird, wenn dessen Erfolgswahrscheinlichkeit klein und folglich der Informationsgehalt groß ist. Dies wäre bei engen Toleranzgrenzen einer FR mit einer hohen Genauigkeit der Fall. Bild 3.7 zeigt die Berechnung der Erfolgswahrscheinlichkeit für eine stetige⁷ Ausprägung einer FR . Die festgelegte Zielspanne ZS_i begrenzt den Bereich der zulässigen Ausprägungen der FR . Das umgesetzte, reale System liefert für den korrespondierenden DP in der physischen Domäne konkrete Ausprägungen für den entsprechenden FR [Suh01], [LF08]. Diese funktionale Ausprägung kann geschätzt werden, wenn eine Verteilungsfunktion zwischen FR und DP besteht. Allerdings wird meistens mittels Simulationsmodellen oder Experimenten diese Ausprägung ermittelt [Lee03]. Aufgrund der Tatsache, dass sich für jede DP -Ausprägung die Erfüllung der zugehörigen FR in Form der FR -Ausprägung ermitteln lässt, wird aus dieser eine Dichtefunktion mit den Grenzen der Systemspanne SS_i aufgestellt. Die Überschneidung (Fläche A_{SB}) der

⁶ Alternativ mit der Funktion des Logarithmus Naturalis

⁷ Für diskrete Verteilungen, siehe Berechnungsvorschrift in [Lee03]

ZS_i und der SS_i entspricht der Erfolgswahrscheinlichkeit $P_{\{m\}}$ und repräsentiert damit alle Fälle für die Erfüllung der FR . Folglich lässt sich der Informationsgehalt berechnen zu:

$$I(FR_i) = -\log_2 A_{SB} \quad \text{wobei} \quad (3.6)$$

$$A_{SB} = P(zs_i^u \leq FR_i \leq zs_i^o) = \int_{zs_i^u}^{zs_i^o} f(FR_i) dFR_i \quad , \quad (3.7)$$

wobei $zs_i^u < zs_i^o$ als Grenzen der Zielspanne ZS_i entspricht. Auf Basis ausschließlich normalverteilten Ausprägungen ist der Zielwert der Mitte die Zielspanne, deren Abweichung *Bias* genannt wird. Wird dieser *Bias* verkleinert oder sogar eliminiert, ist das System in der

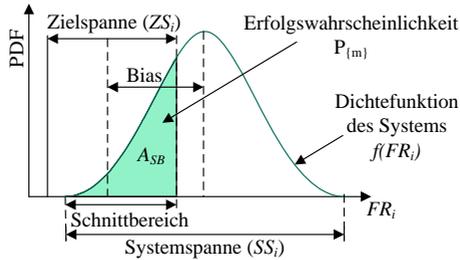


Bild 3.7: Schematische Darstellung des Informationsgehalts nach [Suh01], [Lee03]

Lage, Variationen von Design- und Herstellungsparametern ohne Beeinflussung aufzunehmen. Dies spiegelt den *Robust Design* Gedanken wider. Eine mögliche Vorgehensweise zur Verringerung des *Bias* ist die Beachtung des *Unabhängigkeitsaxioms*. Bei einem *Uncoupled Design* können die *DPs* unabhängig voneinander verändert werden. Wohingegen bei einem *Decoupled Design* die vorgegebene Reihenfolge der Dreiecksmatrix eingehalten werden muss.

3.1.4 Robust Design Optimization

Im Gegensatz zum Optimierungsgedanken der *TM*, ist die *Robust Design Optimization (RDO)* eine mehrparametrische Optimierung, bei der eine kombinierte und zeitgleiche Ermittlung eines Optimums mit dessen Robustheitseigenschaften erfolgt [Kö05]. Die kontinuierliche Vorgehensweise unter Verwendung von mathematischen Optimierungstechniken bietet innerhalb von *RDM* gewisse Vorteile. Beispielsweise sind bei der *TM* durch die Verwendung der *orthogonalen Felder* alle untersuchten Parameter diskret festgelegt, was eine Untersuchung eines großen Wertebereichs erschwert. Hinzu kommt, dass bei einem Design oft zahlreiche Randbedingungen vorhanden sind, die die *TM* im Gegensatz zu Optimierungstechniken, nicht gezielt berücksichtigen kann. *RDO* verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele: die *Robustheit* der Zielfunktion soll maximiert werden, welche durch die Toleranzen der *DPs* beeinflusst wird. Darüber hinaus soll gewährleistet werden, dass für den gesamten Toleranzbereich der *DPs* sämtliche Randbedingung stets erfüllt werden [Par07].

Prinzipien und Denkweisen

Bei der Integration des Robustheitsgedankens in den Prozess von Optimierungsmethoden existieren unterschiedliche Ansätze. Diese sollen im Folgenden nach [Wut12] zusammenfassend vorgestellt werden.

Varianzbasierte, robuste Optimierung (VRO)

Die *VRO* kann als die Umsetzung der *TM* gesehen werden. Sie hat das Ziel, die Varianz der Zielfunktion durch die auftretenden Ursachen von Schwankungen zu minimieren. Der Mittelwert und die Standardabweichung der Zielfunktion können dabei entweder differentiell durch die *Taylor-Reihenentwicklung*, deterministisch durch *DOE* oder stochastisch durch wahrscheinlichkeitsbasiertes *Sampling*, beispielsweise *MC*, ermittelt werden. Bei deren anschließenden Optimierung kommt entweder das Antwortflächenverfahren oder die stochastische Optimierung in Frage, vergleiche dazu Kapitel 2.2.

Zuverlässigkeitsbasierte robuste Optimierung (ZVO)

Die *ZVO* verfolgt das Ziel, die, aufgrund der auftretenden Schwankungen, bestehende Ausfallwahrscheinlichkeit hinsichtlich einer festgelegten maximalen Ausfallwahrscheinlichkeit zu verringern. Falls die Ausfallwahrscheinlichkeit analytisch nicht bestimmt werden kann, kommen zu deren Berechnung drei verschiedene numerische Verfahren zum Einsatz: bei der *Zuverlässigkeitsmethode erster Ordnung (FORM)* erfolgt die Berechnung mittels *Rosenblatt-Transformation*. Des Weiteren kann durch deterministische Verfahren, wie ein adaptives Antwortflächenverfahren eine Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit erfolgen. Die dritte Möglichkeit ist die *MC-Methode*, bei der man durch mehrfaches Durchführen der Simulation und der Anzahl der un-/zulässigen Ergebnisse direkt einen Wert für die Ausfallwahrscheinlichkeit erhält. Zu beachten ist bei diesen Verfahren, dass mit der Reihenfolge der Aufzählung die Genauigkeit des Ergebnisses zunimmt, jedoch auch der zeitliche Aufwand für die Simulationen. Zur anschließenden Optimierung der *ZUV* kann analog zu *VRO* das Antwortflächenverfahren oder die stochastische Optimierung zum Einsatz kommen.

Möglichkeitsbasierte, robuste Optimierung (MRO)

Die *MRO* optimiert Möglichkeiten, aufgrund derer das System bedingt durch Schwankungen ausfallen kann. Dabei wird innerhalb der *NFs* der ungünstigste Fall für eine Ausfallmöglichkeit ermittelt. Um herauszufinden, welche Ausfallmöglichkeiten existieren, wird unter anderem die *Maximale-Möglichkeits-Suche* verwendet. Die anschließende Optimierung erfolgt durch stochastische oder gradientenbasierte Verfahren.

Worst-Case-basierte, robuste Optimierung (WCO)

Hierbei soll das zu untersuchende System für den ungünstigsten Fall von *NFs* optimiert werden. Dabei ist es das Ziel, für die ungünstigsten Bedingungen die Kombination von *DPs* zu finden, die dafür die besten Ergebnisse erzielen. In der Regel sind die Resultate dieses Ansatzes eher konservativ, beispielsweise im Vergleich zu wahrscheinlichkeitsbasierten Verfahren.

Vorgehensweise

Für die Anwendung der *RDO* in der Praxis existiert keine vorgegebene, detaillierte Vorgehensweise. Als grobe Orientierung gilt es zunächst die Optimierung der *Robustheit* der Zielfunktion durchzuführen und im Anschluss daran die *Robustheit* der Randbedingungen des Systems zu gewährleisten.

Robustheit der Zielfunktion

Das Hauptziel der *RDO* ist das Erreichen der *Robustheit* der Zielfunktion unter Berücksichtigung der Ursachen von Schwankungen, da dies den Grundgedanken der *RDM* zum Ausdruck bringt. Dabei ist es nicht das Ziel, die optimalen Einstellungen für die *DPs* zu finden, sondern darauf zu achten, dass dieses Optimum geeignete Robustheitseigenschaften besitzt. Veranschaulicht wird dies in Bild 3.8 (a), indem ohne Berücksichtigung des Robustheitsaspektes der Punkt in A als Optimum der *DPs* für die Zielfunktion $f(FR)$ ausgewählt wird. Bei leichten Abweichungen eines oder mehrerer *DPs* würde sich der Wert der Zielfunktion merklich ändern. Aus diesem Grund soll ein Optimum gefunden werden, wie beispielsweise der Punkt C, bei dem sich die Zielfunktion im Idealfall trotz größerer Abweichung zunächst unmerklich ändert. Bei der Robustheitsbetrachtung der Zielfunktion lassen sich der Durchschnitt $\mu_{f(FR)}$ und die Varianz der Zielfunktion $\sigma_{f(FR)}^2$ nach [Par07] folgendermaßen näherungsweise beschreiben:

$$\mu_{f(FR)} \cong f(\mu_{DP_k}, \mu_{DP_l}), \quad (3.8)$$

$$\sigma_{f(FR)}^2 \cong \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(FR)}{\partial DP_{k,i}} \right)^2 \sigma_{DP_{k,i}}^2 + \sum_{i=1}^o \left(\frac{\partial f(FR)}{\partial DP_{l,i}} \right)^2 \sigma_{DP_{l,i}}^2, \quad (3.9)$$

wobei μ_{DP_k} für den Durchschnittsvektor des veränderbaren *DP*-Vektors DP_k und μ_{DP_l} für DP_l steht. $\sigma_{DP_{k,i}}^2$ ist die Varianz eines Wertes des *DP*-Vektors $DP_{k,i}$ und $\sigma_{DP_{l,i}}^2$ steht entsprechend für $DP_{l,i}$. Die Varianz der Zielfunktion aus Gleichung 3.9 ist dabei abhängig von deren Empfindlichkeit (aus der ersten Ableitung). Kommt die Empfindlichkeit bereits in der Zielfunktion vor, treten bei der Bestimmung der Varianz Ableitungen zweiter Ordnung auf, deren Berechnung meist sehr aufwendig sind. Um dieses Problem in der Praxis zu lösen, wurden mehrere Methoden entwickelt, die die Berechnung von zweiten Ableitungen nach Möglichkeit umgehen oder vereinfachen zu können, vergleiche hierzu Methoden in Kapitel 2.2 [Par07].

Robustheit der Randbedingungen

Hier gilt es sicherzustellen, dass sämtliche Randbedingungen innerhalb der Toleranz der *DPs* jederzeit erfüllt werden. Wie in Bild 3.8 (b) anschaulich dargestellt, kann dies als eine Verkleinerung des zulässigen robusten Bereichs (*robust feasible region*) aufgefasst werden. Dabei ergeben sich aus den ursprünglichen Randbedingungen g_1 und g_2 , durch die Einwirkung der Toleranzen der DP_i auf die Zielfunktion, neue Formulierungen für die

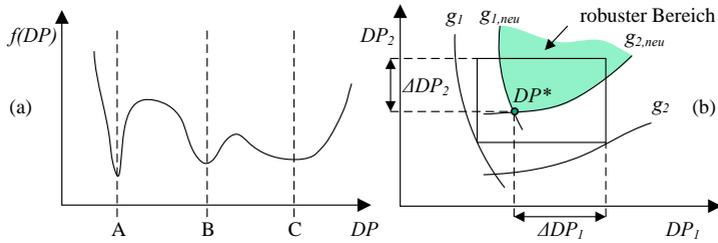


Bild 3.8: Robustheit der Zielfunktion (a) und der Randbedingungen (b) nach [Par07]

Randbedingungen $g_{1,new}$ und $g_{2,new}$. Die Varianz einer Randbedingung kann nach [Par07], auf Basis von Gleichung 3.9, wie folgt angenähert werden:

$$\sigma_{g_j}^2 \cong \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g_j}{\partial DP_{k,i}} \right)^2 \sigma_{DP_{k,i}}^2 + \sum_{i=1}^o \left(\frac{\partial g_j}{\partial DP_{l,i}} \right)^2 \sigma_{DP_{l,i}}^2 \quad (3.10)$$

3.1.5 Zusammenfassung und Fazit der Robust Design Methodik

RDM hat sich im Laufe der Zeit innerhalb einer Vielzahl von Forschungsfeldern weiterentwickelt, darunter beispielsweise auch *RD*-Methoden, wie *Robuste Parameteroptimierung* [EEH13], [JF07]. Dennoch stammen die grundlegenden Prinzipien vor allem aus der Arbeit von *Taguchi* [TCW05], die bis heute für die Beschreibung des Gedankens der *Robustheit* und dessen Gesamtziel des *RD* herangezogen werden. Grundsätzlich ist die *Robustheit* die Unempfindlichkeit von Produkten oder Prozessen gegenüber verschiedenen Variationsquellen, wie zum Beispiel Produktions- oder Montagetoleranzen, nicht (vollständig) angegebenen Belastungsszenarien oder Umgebungsbedingungen [JF07], [Tag78]. Eine schematische Beschreibung zur Unempfindlichkeit gegenüber Streuungseinflüssen beschreibt Bild 3.9 (a). Bei gleichbleibender Streubreite des *Design Parameters (DP)* $\Delta A_1 = \Delta A_2$ wird bei einem Mittelwert x_0 eine Zielgröße Y_1 mit der Übertragungsfunktion erreicht. Hingegen wird bei einem geänderten Mittelwert x_1 mit gleicher Streubreite ΔA_2 der Vorteil der Nicht-Linearität genutzt, um einen stabilen Bereich mittels geringer Streuung in der Zielgröße Y_1 zu erreichen.

Während traditionelle Maßnahmen zur Qualitätslenkung beispielsweise mittels Sicherheitsfaktoren gelöst werden und dadurch zusätzliche Kosten oder Produkt-Ineffizienzen entstehen können, zielt *RD* auf die Entwicklung von Produkten oder Prozessen ab, die dies möglichst verhindern. Die zugrunde liegende, wesentliche Annahme der *RD* Theorie wird durch die Qualitätsverlustfunktion dargestellt, vergleiche Bild 3.9 (b). Traditionelle Methoden der Qualitätskontrolle interpretieren alle Produkte innerhalb der Spezifikationsgrenzen (unterer und oberer Grenzwert) als gleich gut. Es handelt sich um eine sogenannte Gleichverteilungsbetrachtung. Im Gegensatz dazu basiert der *RD* Gedanke auf der Erkenntnis, dass selbst kleine Veränderungen der Produktleistung zu einem Verlust der Qualitätswahrnehmung (L_1 und L_2) seitens des Kunden führen können [Pha89a]. In diesem Fall kann beispielsweise eine quadratische (parabolische) Abweichung betrachtet werden.

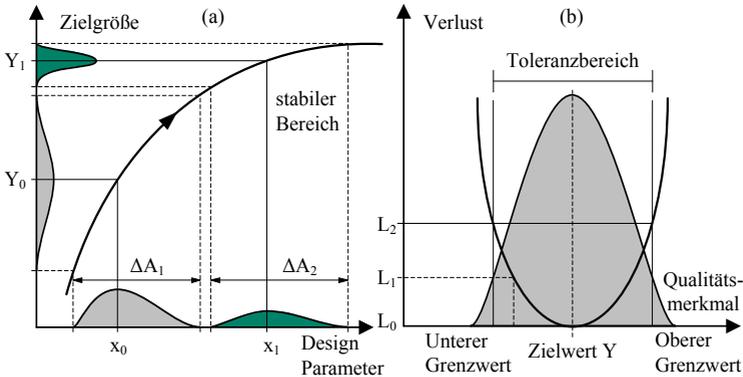


Bild 3.9: Robustheitsgedanke (a) und Quality Loss Function (b)

Die Vorgehensweise ist innerhalb von *RDM* ein sehr kontroverses Thema. Während die *TM* ganz klar die drei Design Phasen, ohne konkrete Ausführungsweise, definiert, ist sie für andere *RDMs* eher ein allgemeiner Ansatz und beschreibt keine spezielle Herangehensweise. Zudem herrscht Uneinigkeit darüber, wann genau in der Produktentwicklungsphase *RDM* Bemühungen eingesetzt werden sollten. Es werden Standpunkte vertreten, wonach es enorm wichtig ist, so früh wie möglich mit *RDM* zu beginnen, also bereits während der Konzeptauswahl. Anderen Meinungen zufolge sollte *RDM* hauptsächlich erst bei der Umsetzung eines gewählten Konzepts zum Einsatz kommen. Allgemein lässt sich jedoch sagen, dass *RDM* in jeder Phase der Produktentwicklung, von der Konzepterstellung bis hin zur Produktion, angewendet werden sollte, um das volle Potenzial von *RDM* auszuschöpfen und alle *NFs* zu entdecken [BdLS09]. Allerdings wirken die bisher genannten Methoden im Ansatz zu allgemein und im Einsatzzeitpunkt der Methode zu variabel.

An dieser Stelle sei bereits die *SMAR²T*-Methodik, vergleiche Kapitel 6, erwähnt, die einen allgemeinen Ansatz zur Umsetzung von *RDM* formuliert und eine konkrete, zeitliche Methodenabfolge vorgibt sowie deren Anwendung zu jedem Zeitpunkt des *PEP*, auch in der frühen Phase, berücksichtigt.

3.2 Zuverlässigkeit

In diesem Teilkapitel wird zunächst auf den Grundgedanken und auf die Definition zur genauen Interpretation der *Zuverlässigkeit (ZUV)* eingegangen. Zur Absicherung der *ZUV* werden Methoden und Nachweisverfahren sowie Möglichkeiten zur Integration des Vorwissens vorgestellt und abschließend bewertet.

3.2.1 Grundgedanke und Definition der Zuverlässigkeit

ZUV wird allgemein als Bestandteil der Qualität eingeordnet. Nach [Hoc02] ist Qualität definiert als „die Gesamtheit der Leistungsmerkmale und Eigenschaften eines Produktes

oder einer Dienstleistung, die einen Einfluss auf die Eignung dieses Produktes oder diese Leistung nehmen, bestimmte Anforderungen zu erfüllen.“ Qualität weist dementsprechend verschiedene Merkmale auf, deren Anforderungen an das Produkt gerecht werden muss. Die Qualitätsanforderungen können sowohl vom Kunden, der Gesellschaft, als auch vom Hersteller selbst kommen. Um eine hohe Qualität erzielen zu können, muss zwangsläufig eine hohe ZUV gewährleistet werden. Die Qualität samt ihren Anforderungen machen ein Produkt am Markt attraktiv und entscheidet über die Verkaufszahlen und die Zufriedenheit der Kunden. Nach [BL04] und [VDI98] ist die ZUV definiert als „die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt“. [VDI06] und [DIN00] beschreiben die ZUV als ein „Zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren, Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft.“. [Els12] hält mit seiner Definition fest, dass die ZUV, die Erprobung, die Instandhaltung und die Verfügbarkeit eines Produktes oder Prozesses weitgehend von seiner Qualität und folglich von seinem Design abhängt [Yan07]. Der Fokus der Definition nach [Yan07] liegt auf der Wahrscheinlichkeit. Sie beschreibt die vielseitigen Ausfallmöglichkeiten von stochastisch und zufällig verteilten Ursachen, die sich nur mit Wahrscheinlichkeiten quantitativ wiedergeben lassen. Eine weitere Definition für die ZUV findet man in der [VDI10]: „Zuverlässigkeit ist die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsforderung zu erfüllen.“.

Der Begriff der ZUV selbst wird in der Literatur seit mehr als 40 Jahren unterschiedlich definiert und bis heute kommen neue Definitionen hinzu. Sowohl bestehende Normen und Richtlinien, als auch die freie Literatur äußern sich auf unterschiedliche Weise zur Definition. In der deutschen Sprache ist der Begriff der ZUV eindeutig zu verstehen. Bei der Übersetzung aus dem Angelsächsischen ist die Begriffsdefinition jedoch nicht ganz eindeutig. Nach [Det11] umfasst die ZUV (*dependability*) die Attribute: Funktionsfähigkeit (*reliability*), Instandhaltbarkeit (*maintainability*) sowie Verfügbarkeit (*availability*). Diese sind in der Hierarchie der Qualitätsanforderungen somit wiederum notwendige Anforderungen. Oftmals wird in der angelsächsischen Literatur von *reliability* gesprochen, obwohl tatsächlich die ZUV gemeint ist. Aufgrund der nicht ganz eindeutigen Übersetzung wird bei allen genannten Definitionen der Begriff *dependability* heran gezogen. Zur Vollständigkeit listet Tabelle A.3 die Definition der genannten Begriffe und verdeutlicht die eng beieinanderliegende Bedeutung der Übersetzungen, insbesondere der Begriffe *dependability* und *reliability*. Speziell die genannte Quelle [IEC02] differenziert die beiden Begriffe lediglich über die Zeitspanne und die Umstände der Anwendung. Weitere Definition der ZUV sind nach dem *Deutsches Institut für Normung (DIN)* in Tabelle A.4, nach der freien Literatur in Tabelle A.5, nach der *International Electrotechnical Vocabulary (IEC)* in Tabelle A.6, nach dem *Verein der Automobilindustrie e.V. (VDA)* in Tabelle A.7 sowie nach dem *Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI)* in Tabelle A.8 gegeben. Allerdings weisen diese Definitionen nur geringfügige Abweichungen voneinander auf. Werden die Zuverlässigkeitsdefinition ab dem Jahr 1971 (vergleiche Literaturrecherche) bis zu dem Erscheinungszeitpunkt dieser Dissertation grafisch zusammengefasst, ergibt sich die zeitliche Anordnung in Bild 3.10, deren tabellarische Auflistung in Tabelle A.2 und deren Häufigkeit in Bild 3.11 gegeben ist.

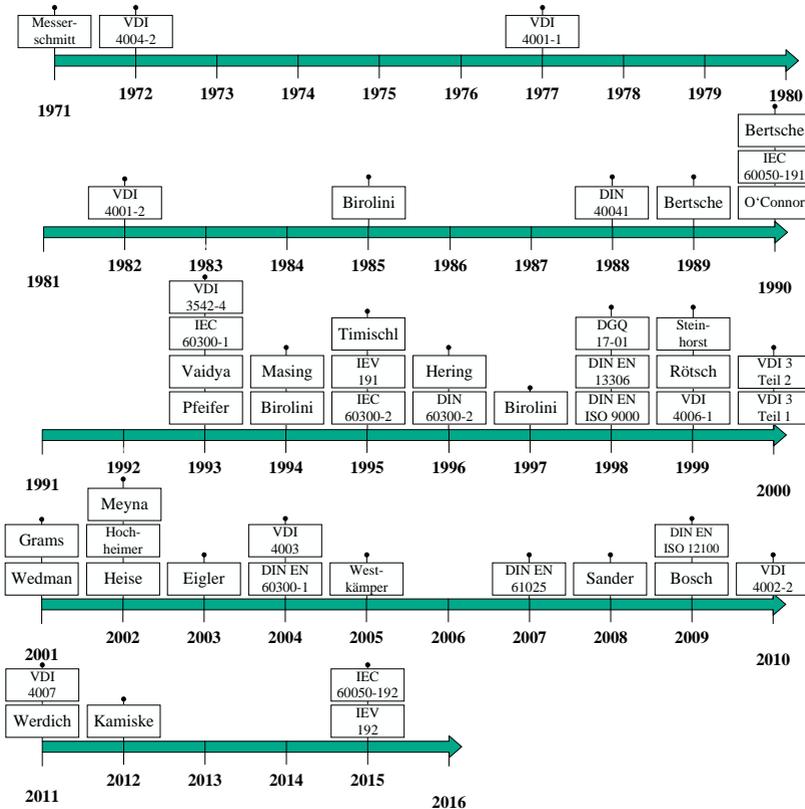


Bild 3.10: Zeitliche Einteilung von ZUV-Definitionen

3.2.2 Methoden der Zuverlässigkeit

Zur Bestimmung der Systemzuverlässigkeit werden verschiedene Methoden angewandt. Grundlegend werden diese in quantitative und qualitative Methoden nach [BL04] differenziert. Der Einteilung liegt zugrunde, dass jedes Produkt beziehungsweise System aus verschiedenen Beschaffenheitsmerkmalen, wie beispielsweise Gewicht, Abmessungen, Material oder Farbe besteht. Um verlässliche Aussagen über das Verhalten der einzelnen Systemelemente und somit über das Gesamtsystem treffen zu können, muss wegen der hohen *Komplexität* teilweise auf vorgestellte, probabilistische beziehungsweise statistische Berechnungsverfahren in Kapitel 2.1.2 zurückgegriffen werden. Allgemein beschreiben qualitative Vorgehensweisen die Eigenschaften des betrachteten Systems. Hingegen zeichnen sich die quantitative Vorgehensweisen im Wesentlichen dadurch aus, dass alle Arbeitsschritte auf statistischen oder mathematischen Zusammenhängen messbarer Eigenschaften basieren. Eine

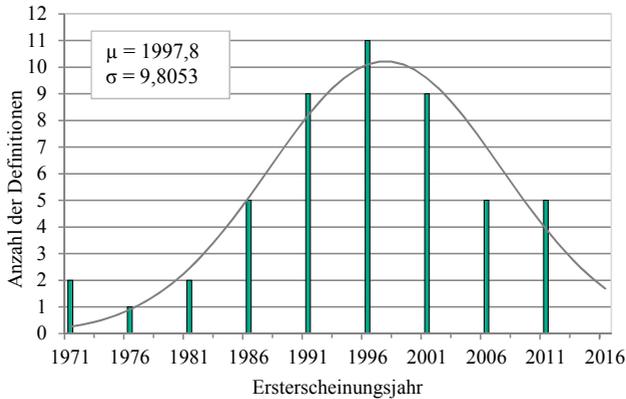


Bild 3.11: Häufigkeitsverteilung von ZUV-Definitionen^a

^aDie bildliche Darstellung der zeitlichen Einteilung von ZUV-Definitionen, in Form eines Histogramms mit ermittelter Normalverteilung, soll ausschließlich den zeitlichen Hotspot von Definitionen zum Thema wiedergeben.

zeitliche Einteilung der Methoden wäre theoretisch denkbar. Dabei müsste auf den Fortschritt des Produktentstehungsprozesses eingegangen werden, in welchem Stadium die jeweilige Methode eingesetzt wird. Ein möglichst früher Einsatz der Zuverlässigkeitsanalysen ist allerdings generell am sinnvollsten, da früh erkannte Qualitätsmängel einfacher zu beheben sind. Je nach Voraussetzungen, Anwendungsbereich und Aufwand können dabei eine Fülle von Methoden angewandt werden. Als Ergebnis eines Vergleichs aus verschiedenen Quellen ergeben sich die gängigsten Methoden in Tabelle A.9. Eine Wertung der verschiedenen Methoden wurde von [RSB02] auf Basis einer Umfrage vorgenommen und ist in Bild 4.2 dargestellt.

3.2.3 Nachweisverfahren zur Zuverlässigkeit

Einen wesentlichen Einfluss auf die Aussagewahrscheinlichkeit Pr_A eines ZUV-Nachweises hat die Wahl der Teststrategie, vergleiche Bild 3.12. Hierbei wird allgemein zwischen einer ausfallorientierten oder ausfallfreien (*Success Run*) Teststrategie unterschieden. Die ausfallorientierten Strategien können in zwei Testkategorien unterteilt werden: *Unvollständige / Zensierte* und *Vollständige* Teststrategie. Bei den *Unvollständigen Tests* sinkt die Aussagekraft, je mehr der Prüfaufwand hinsichtlich Lebensdauer beziehungsweise der Anzahl der ausgefallenen Bauteile beschränkt wird. Bei den *Vollständigen Tests* werden alle Bauteile einer Messreihe bis zum Ausfall aller Einheiten geprüft und weisen folglich die höchste Aussagekraft, allerdings auch den höchsten Ressourcenaufwand auf. Die Auswertung kann hierbei mit der für den Maschinenbau relevanten *Weibullverteilung*, *Normalverteilung* oder *Binomialverteilung* durchgeführt werden, vergleiche Kapitel 2.1.2. Bei den *Unvollständigen Tests* wird zwischen zwei Arten unterschieden. Die *Typ I-Zensierung* ist eine zeitlich begrenzte Prüfung, bei der der Testabbruch nach einer vorher festgelegten Zeit erfolgt. Bricht man den Test nach einer vorher festgelegten Anzahl von Bauteilausfällen ab, spricht man



Bild 3.12: Nachweisverfahren zur Bestimmung der Zuverlässigkeit

von einer *Typ II-Zensierung*. Der bekannteste Vertreter der Prüfung mit Stückzahl limit stellt der *Sudden-Death-Test* dar, vergleiche hierzu [BL04]. Erlaubt der zeitliche Rahmen keine *Vollständigen* oder *Unvollständigen Tests*, kann der Prüfaufwand durch *Strategien zur Testzeitverkürzung*, wie beispielsweise mit der *Step-Stress-Methode*⁸ oder dem *Degradation Test*⁹ wesentlich minimiert werden.

Ein weiterer Bestandteil der Erprobung mittels statistischen Methoden ist die Bestimmung des Stichprobenumfangs. Um eine Aussage über dessen Umfang, bei beispielsweise einer geforderten *Mindest-Zuverlässigkeit* $R_{min}(t)$, zu treffen, wird häufig die *Binomialverteilung* angewendet, vergleiche hierzu [BS58] und Kapitel 2.1.2. Allgemein gilt im Beispiel des *Success Run* für die Aussagewahrscheinlichkeit Pr_A für eine *Mindest-ZUV* nach [BL04]:

$$Pr_A = 1 - \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} \cdot (1 - R_{min}(t))^i \cdot R_{min}(t)^{n-i} \quad , \quad (3.11)$$

mit x als Anzahl der Ausfälle im Zeitraum t und dem Stichprobenumfang n . Tritt während des Versuchs ein Fehler auf beziehungsweise fällt ein Bauteil aus, ergibt sich:

$$Pr_A = 1 - R_{min}(t)^n - n \cdot (1 - R_{min}(t)) \cdot R_{min}(t)^{n-1} \quad . \quad (3.12)$$

Zur Berücksichtigung der Prüfkosten, des Stichprobenumfangs sowie der vorgestellten Teststrategien sei auf [13] hingewiesen.

3.2.4 Möglichkeiten zur Integration von Vorwissen

Eine Durchführung von Zuverlässigkeitsversuchen stellt stets einen monetären und zeitlichen Aufwand dar. Dieser Aufwand ist ebenfalls bedingt durch den Einsatz von Versuchsproben,

⁸ Stufenweise Erhöhung der Belastung nach jedem Ausfall auf Basis der Kennung der Belastung und Lebensdauer der elektronischen oder elektrischen Bauteile [BL04]

⁹ Test zur Anwendung bei Bauteilen, deren Maß für die Lebensdauer eine sich zeitlich ändernde Produkteigenschaft ist. Als Versagensart wird eine Verschleißgrenze, sogenannte *EOL*, definiert [MEL98].

welche nötig sind, um eine geforderte Aussagesicherheit zu erzielen. Dabei übersteigt der theoretisch ermittelte Stichprobenumfang oftmals die reelle Anzahl an vorhandenen Prüflingen. Diese auftretende Diskrepanz kann durch den Einsatz von Vorinformationen reduziert werden. Als Vorinformationen gelten dabei Informationen beispielsweise aus Vorversuchen, Vorgängerprodukten oder getätigten Berechnungen [Kro04]. Vorkenntnisse können zur Erhöhung der Zuverlässigkeitsaussage einer Komponente oder zur Reduzierung des notwendigen Stichprobenumfangs genutzt werden [Mai07]. Fast alle Methoden haben den Ansatz nach *Bayes*¹⁰ gemein, vergleiche hierzu [Sta77] und nachfolgenden Absatz. Letztlich entsteht aus Vorwissen (in Form einer *a-priori*-Dichte) in Kombination mit aktuellen Tests eine *a-posteriori*-Dichte unter Einsatz des *Satzes von Bayes*. Wobei zu überprüfen ist, ob sich auf Komponentenebene oder Systemebene, mit den jeweiligen Versuchen ein entsprechendes Vorwissen mittels einer *a-posteriori* Verteilung ableiten lässt. Neben den oben genannten Formen des Vorwissens kann auch eine Gleichverteilung angenommen werden, wenn zu Beginn des Zuverlässigkeitstests keine Vorinformationen vorliegen. Da die Integration von Vorwissen bei vielen Methoden möglich ist, wird diese im Folgenden detailliert behandelt. Im Laufe der Zeit haben sich einige Verfahren zur Integration des Vorwissens von Produkten etabliert, vergleiche Zusammenfassung in Bild B.1.

Satz von Bayes

Das *Bayes-Theorem* liefert ein mathematisches Hilfsmittel zur Nutzung von Vorkenntnissen, welche bereits zu Beginn einer statistischen Testplanung als gegeben angenommen werden können [Mai07]. Ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(x)$ einer Zufallsvariablen X bereits aus theoretischen Überlegungen, Beobachtungen oder Schätzungen bekannt, kann diese Ausgangssituation bei Auswertung eines aktuellen Experimentes mit berücksichtigt werden [Sta77]. Diese Art der Vorinformationen wird als *a-priori* Wissen bezeichnet. Im Fall einer kontinuierlichen Zufallsvariablen handelt es sich um eine *a-priori* Dichtefunktion $f(x)$ und bei diskreten Zufallsvariablen um eine *a-priori* Wahrscheinlichkeit $Pr(X)$ [Mai07]. Der Satz von *Bayes* kombiniert die Vorinformationen, in Form einer *a-priori* Verteilung mit der bedingten Verteilung der aktuellen Testergebnisse zu einer *a-posteriori* Wahrscheinlichkeit $P(x|y)$ oder einer Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(x|y)$. In der *a-posteriori* Verteilung werden die aus dem Experiment gewonnenen Informationen, unter Berücksichtigung des Vorwissens, zusammengefasst. In 3.13 ist die Wahrscheinlichkeitsdichte nach dem *Bayes-Theorem*, im Fall eines Überganges von diskreten auf stetige Zufallsgrößen, aufgezeigt:

$$f(x|y) = \frac{f(x|y) \cdot f(x)}{\int f(x|y) \cdot f(x) \delta x} \quad (3.13)$$

3.2.5 Zusammenfassung und Fazit der Zuverlässigkeit

Die endliche Lebensdauer von Produkten ist keine deterministische, sondern eine stochastische Größe, die mit statistischen Methoden beschrieben werden kann. Das Modell der *Stress-Strength-Interference*¹¹ macht das deutlich [BL04], vergleiche Bild 3.13. Sobald sich

¹⁰ Thomas Bayes (*1701 - †7. April 1761) - Britischer Mathematiker und presbyterianischer Pfarrer. Nach ihm ist der Satz von Bayes benannt, der in der Wahrscheinlichkeitsrechnung große Bedeutung hat. [FW07].

¹¹ Belastung-Belastbarkeitsmodell: Modell zur Beschreibung der Belastung und Belastbarkeit eines Produktes, dessen Überschneidung zum Ausfall führt.

die Belastung zeitlich der Belastbarkeit nähert und sich eine Überschneidung ergibt, tritt ein Ausfall auf. Wann und mit welcher Wahrscheinlichkeit dies auftritt, wird durch die *ZUV* beschrieben. Eine wichtige Aufgabe im Bereich der *ZUV* ist die Bestimmung der Wahr-

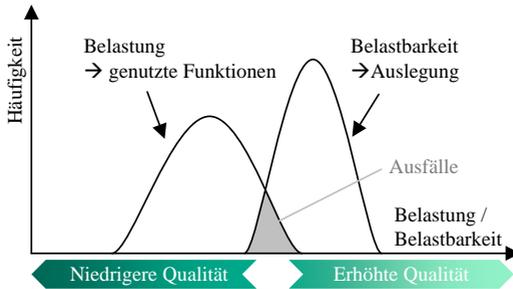


Bild 3.13: Zusammenhang Belastung und Belastbarkeit (Stress-Strength-Interference)

scheinlichkeit, mit der in einer bestimmten Zeitdauer kein Fehler auftritt beziehungsweise ein Produkt ohne Ausfall überlebt und verfügbar ist. Hierfür werden qualitative und quantitative Methoden während des Produktentwicklungsprozesses angewandt [BL04]. Ein weiterer wichtiger Punkt der *ZUV*-Bestimmung von Produkten ist die Lebensdauer von Systemen und deren Komponenten. Die Lebensdauer beschreibt die zeitbezogene Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Schädigungen, wie Verschleiß und Korrosion [OK12]. Zur Bestimmung der Lebensdauer werden verschiedene Methoden zur Datenerfassung benötigt. [Nel04] und [ME98] beschreiben eine Vielzahl an umfassenden Methoden, die zur Datenanalyse eingesetzt werden können. Um diese Daten zuverlässig zu messen, zu klassieren und zu quantifizieren, werden mathematische und statistische Methoden angewandt, die zusätzlich die Unsicherheiten in deren Vorgehensweise beachten. Die bei der Anwendung von quantitativen Methoden ermittelten Kennzahlen der *ZUV* sind dabei stets mit Unsicherheiten behaftet. Sie resultieren aus der Tatsache, dass anhand von Stichproben ermittelten Kennzahlen auf die Grundgesamtheit übertragen werden. Mit Hilfe statistischer Methoden kann eine Aussagesicherheit ermittelt werden, mit der die quantitative Beschreibung dieser Unsicherheit möglich wird [OK12]. Durch die Angabe von Vertrauensbereichen kann diese Aussagesicherheit visualisiert werden.

4 Zielsetzung und Forschungsbedarf

Im allgemeinen Sprachgebrauch werden viele technische Anwendungen als *zuverlässig* und *robust* bezeichnet, sofern sie die an sie gestellten Anforderungen erfüllen. Allerdings wird dabei auf eine scharfe Abgrenzung beider Eigenschaften verzichtet, sodass bei der Verwendung der Begrifflichkeiten *Zuverlässigkeit* und *Robustheit* Missverständnisse entstehen. Ebenso können begriffliche Redundanzen die Folge sein. In den meisten Fällen liegt der Grund für den intuitiven Gebrauch der genannten Theorien in der Unkenntnis der genauen Definitionen [RH15] und auf einer eher unsystematischen Auswahl von entsprechenden Methoden [EEH13]. Damit sämtliche Kundenanforderungen durch ein Produkt abgedeckt sind und die Zielkosten (im Sinne von Herstellungskosten) eingehalten werden, ist es zwingend erforderlich die Methodiken von *Zuverlässigkeit* und *Robustheit* sowie deren Methoden zielführend einzusetzen, um Chancen für erhöhte Einflussmöglichkeiten und Optimierungspotentiale zu nutzen. Allerdings besteht die Schwierigkeit darin, aufgrund der hohen Methodenanzahl und deren Anwendungsspezifikationen für die individuelle Entwicklung, die entsprechend geeignete Methode zu finden. Erschwert wird dies zudem durch die isolierte Abarbeitung der unterschiedlichen Methoden, was zur Folge ein nicht-integriertes Vorgehen hat. Entsprechend sollen im Folgenden beide Theorien untereinander sowie deren mit bisherigen Ansätzen verglichen werden, um die Zielsetzung und der Forschungsbedarf für diese Dissertation abzuleiten. Bevor abschließend auf die Zusammenfassung und das Fazit eingegangen wird, sollen die *Zuverlässigkeit* und die *Robustheit* im Zusammenhang mit der *Qualität* und den *Kosten* dargestellt werden.

Der in den folgenden Kapiteln 4 und 5 gegebene Inhalt ist auszugsweise aus den bereits in [8] und [17] dargestellten Publikationen entnommen, siehe Veröffentlichungsliste auf Seite 193. Dabei beschränkt und ergänzt sich der Inhalt ausschließlich auf den, für die vorliegende Dissertation, notwendigen Kontext. Zudem werden aus den bereits veröffentlichten Inhalten die Zielsetzung und der Forschungsbedarf abgeleitet und ein ganzheitlicher Zusammenschluss der Theorie: *Robuste Zuverlässigkeit* (R^2) wiedergegeben.

4.1 Zuverlässigkeit und Robustheit

Die Begriffe *robust* und *zuverlässig* sind Produkt- und/oder Prozesseigenschaften, die in Übereinstimmung mit der Kundenanforderung nach einer hohen Qualität streben. In der Wissenschaft und in der Praxis wird tolerant mit der zweideutigen Verwendung der grundlegenden Definition beider Theorien umgegangen. [JBS⁺12] beschreiben beispielsweise Ausfälle und schlechte Qualität als einen Mangel an *Robustheit* eines Produkts. Im Gegensatz dazu beschreibt [GJSS09] die *Robustheit* eines Produkts während des normalen Betriebs und seine *ZUV* bezüglich des Produktleistungsabbaus in dieser Zeit. Untersuchungen von

[EEH13] und [4] weisen darauf hin, dass die *Robustheit* und *ZUV* nicht notwendigerweise gleichzeitig erreicht wird. Robuste Produkte können beispielsweise während der geforderten Einsatzzeit ausfallen. Wiederum können zuverlässige Produkte empfindlich und mit Ausfall auf einen zu großen Störgrößeneinfluss reagieren. Gängige Ansätze zur Reduzierung des gegensätzlichen Verhaltens ist die Entwicklung großer Sicherheitsfaktoren, die dazu beitragen, dass Qualitätsprobleme und Produktausfälle verhindert werden, mit der Folge eines geringeren Wirkungsgrads, bei erhöhtem Ressourcenverbrauch.

4.2 Bewertung bisheriger Ansätze

Im ersten Teilkapitel werden bisherige Ansätze zur *Robusten Zuverlässigkeit* betrachtet. Zu beachten ist, dass bei der durchgeführten Literaturrecherche die Thematik der *Robusten Zuverlässigkeit* überwiegend in angelsächsischer Literatur mit der Bezeichnung *Robust Reliability* zu finden ist. Folglich wird der Begriff *Robust Reliability* gleich dem Begriff *Robuste Zuverlässigkeit* gesetzt und mit R^2 abgekürzt. Im zweiten Teilkapitel wird auf den aktuellen Stand der Methodenanwendung aller drei Theorien eingegangen. Es existiert jeweils eine Vielzahl an Werkzeugen, die unabhängig voneinander zum entsprechenden Ziel der einzelnen Theorie führen. Allerdings finden auch gemeinsam angewandte Werkzeuge ihren Einsatz zur Aufgabenlösung. Im dritten Teilkapitel werden Ansätze zur Methodik für die Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten vorgestellt und abschließend die Notwendigkeit einer systematischen und chronologischen Vorgehensweise aufgezeigt.

4.2.1 Bisherige Ansätze zur *Robusten Zuverlässigkeit* R^2

Obwohl es nur wenige wissenschaftliche Quellen zu einer integrierten Betrachtung beider Theorien gibt, ist die Notwendigkeit zu einer einheitlichen Anschauung ersichtlich. Grundlegende Literaturquellen zu *Taguchi's Quality Engineering* zeigen beispielsweise die Vorteile einer variationsbasierten Robustheitsoptimierung für gewöhnlich kostenintensiven, resistenten Materialien, Redundanzen, hoher Sicherheit und Wartung [Pha89a], [FC95], [TCW05]. Im Gegensatz dazu beziehen sich *ZUV*-Quellen wie [Yan07] oder [OK12] auf die *Robustheit* als Teil der Produktzuverlässigkeit und die Robustheitsoptimierung nach *Taguchi* als eine der Möglichkeiten zur Zuverlässigkeitsabsicherung. Allerdings scheinen sich beide Disziplinen weitgehend auf ihr eigenes Forschungsgebiet zu konzentrieren, abgesehen davon, dass *RDM* heutzutage eine Vielzahl an Ansätzen zur Verfügung stellt, die weit über die traditionellen *Taguchi*-Experimente hinaus reichen oder dass sie wesentliche *ZUV*-Aspekte vernachlässigen, die für ein komplexes Material- und Verschleißverhalten hinsichtlich *Robustheit* notwendig sind.

Um die beschriebenen Einschränkungen herkömmlicher *RDM*- und *ZUV*-Betrachtungen zu überwinden, schlagen einige neuere Veröffentlichungen eine *Robustheits*-basierte *Design for Reliability (DFR)* Anwendung vor. [JBS⁺12] und [Hu14] beispielsweise betonen bei der Produktion auftretende Variationen zu betrachten. Zudem sollen entsprechende Unsicherheiten über unvorhersehbare Ereignisse komplexer Interdependenzen¹ zwischen den Produkten und Prozessen berücksichtigt werden. Während die Zielsetzung auf einem proaktiven Fokus liegt,

¹Wechselseitige Abhängigkeiten

anstatt auf einer „indirekten Verwendung von Felddaten-basierten Ausfallraten“ [Hu14], beruhen diese vorgeschlagenen Ansätze auf einer entweder weitgehend qualitativen oder auf einer rein experimentellen Unsicherheitsbestimmung.

Detaillierte Ansätze für eine verbesserte Anpassung der Theorien sind nach [BH96] Modellierungsmöglichkeiten für mechanische Konstruktionsaufgaben sowie nach [GL16] das Gebiet der robusten Systemtheorie. Zudem wird die Unsicherheit über die Variation der Produkteigenschaft, der Einflüsse während der Lebensdauer sowie Unsicherheit der angewandten Modellierungsmethode betrachtet. Die von [BH96] und [GL16] vorgeschlagenen *Robust Reliability* Methoden erfordern jedoch eine quantitative Beschreibung der potentiellen Unsicherheiten. [GL16] setzt sich mit seiner *Robust Reliability* Methode das Ziel einer verbesserten, kohärenten Steuerungsstrategie für verschiedene Anwendungen. Sie basiert auf der Intervall-Betrachtung und der darin angewandten Reglereigenschaften, vergleiche [GM07] oder [Guo14]. Ähnlich basiert der *Robust Reliability* Ansatz von [BH96] auf kosten- und ressourcenintensiven Modellierungsmethoden, um die Sensitivität des Systems und dessen Reaktion auf ein zuvor definiertes Maß an Unsicherheit zu messen. Die Betrachtung der *Robust Reliability* anhand realer Testdaten ist ein weiterer Forschungsansatz von [PK01]. Allerdings erfordert eine Anwendung in der Produktentwicklung, mit entsprechenden Ansätzen an die zunehmenden Anforderungen, ein hohes Maß an Aufwand.

In [8] wird auf die bereits veröffentlichte Methodik *SMAR²T* eingegangen, die auf verschiedene Methoden aus der *RDM* und der *ZUV* basiert. Zudem wird das Erklärungsmodell *R²* vorgestellt. Damit wird der *R²*-Theorie eine neue Methodik zugeordnet, die aus den grundlegenden Vorgehensweisen der *ZUV* und der *Robustheit* entsteht. Die *R²*-Theorie ist bereits seit 1996 von [BH96] aufgestellt. Die nachfolgenden Veröffentlichungen [PK01], [Yan07], [Hu14] und [8] greifen den Zusammenhang der beiden Domänen nochmal auf und erklären die Problemstellung. Das Prinzip der Theorie samt Zielsetzung ist demnach im Maschinenbau bekannt, aber nicht eindeutig definiert.

4.2.2 Methodenbetrachtung des Robust Design und der Zuverlässigkeit

RDM beziehungsweise *Robustheit* wenden in ihrer reinen Form Methoden zur Streuungsreduzierung in der funktionellen Leistungsfähigkeit des Designs an. In ihrer Anwendung werden sie dennoch häufig mit anderen Methoden kombiniert, die sich allerdings in ihrer Zielsetzung unterscheiden. Eine häufige Verknüpfung besteht nach [EEH13] zwischen Methoden der *RDM* und der *ZUV*. Eine anschauliche Darstellung zur Methodenabgrenzung zeigt das Abgrenzungsmodell in Bild 4.1. Daraus ergibt sich, dass *ZUV*-Methoden auf der Vermeidung von Fehlern während der Produktion und auf der Reduzierung von Ausfällen in der Produkteinsatzzeit basieren. Mit Hilfe von qualitativen und quantitativen Werkzeugen, wie der *Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse (FMEA)* und der *Fehlerbaumanalyse (FTA)*, werden diese potentiell auftretenden Fehlerarten beschrieben und erfasst.

In [8] wird der Methodeneinsatz von *ZUV* und *RD* anhand den Veröffentlichungen von [RSB02] und [GAJ03] gegenübergestellt, vergleiche Bild 4.2. Aus der Umfrage zur industriellen Anwendung von Methoden zur Produktentwicklung ergibt sich, dass eine Schnittmenge zwischen dem Methodeneinsatz von *ZUV* und von *RD* besteht. Im Vergleich zum Abgrenzungsmodell beziehen Anwender beider Entwicklungsmethodiken die Methoden: *FMEA* (91 % / 62 %, 49 %), *FTA* (13 % / 53 %) und *DOE* (4 % / 52 %). Der Betrachtung des

	Zuverlässigkeit	Robust Design
Produkt-entwicklung	Fehlervermeidung im Design Prozess <ul style="list-style-type: none"> ▪ Qualitativ: <i>FMEA, FTA, ETA</i> ▪ Quantitativ: Zuverlässigkeitsanalyse, Lebensdauervorhersage, Lebensdauerberechnung, Validierungstests 	Reduzierung der Streuung <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Taguchi</i> – Methode ▪ <i>DOE</i> ▪ Kinematic Design ▪ Axiomatic Design
Produktion	Fehlervermeidung im Produktionsprozess <ul style="list-style-type: none"> ▪ Prozess <i>FMEA</i> ▪ Qualitätskontrollen (Checklisten, Pareto Diagramm, Histogramme) ▪ Schlanke Produktion (Poka Yoke, Kaizen) 	Kontrolle der Streuung im Produktionsprozess <ul style="list-style-type: none"> ▪ Six Sigma Methode ▪ Statistische Prozess Kontrolle ▪ Prozessfähigkeitswerte

Bild 4.1: Abgrenzungsmodell in Anlehnung an [EEH13]

Abgrenzungsmodells zufolge, ist gemäß der Methodeneinordnung und deren Abgrenzung zu den einzelnen Methodiken eine klare Trennung gegeben. Es werden dennoch einerseits in der Praxisanwendung entsprechende Methoden separat und andererseits auch Werkzeuge beider Methodiken gemeinsam je nach Entwicklungsziel angewendet.

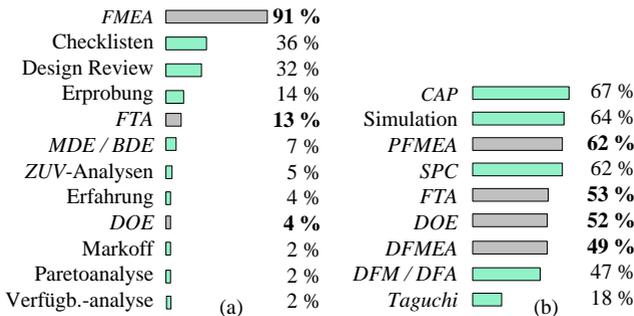


Bild 4.2: Methodeneinsatz: *ZUV*-Methoden (a) nach [RSB02] und *RD*-Methoden (b) nach [GAJ03] in Anlehnung an [8]

4.2.3 Ansätze zur robusten, zuverlässigen Methodik

In der industriellen Anwendung wird *RDM* hauptsächlich spät innerhalb des *PEP*, zur punktuellen Lösungsfindung, angewandt. In den frühen Entwicklungsphasen findet *RDM* und deren Werkzeuge kaum Anwendung. Gründe hierfür ist die komplexe Anwendung der großteils qualitativen Werkzeuge, obwohl sie eine schnelle und adäquate Entscheidungsfindung er-

möglichen. Eine Umfrage unter schwedischen Produktionsbetrieben auf Basis von [GAJ03] besagt, dass 28 % der befragten Unternehmen die Philosophie von *RDM* verstanden haben. Weitere Studien von [BdLS09] und [EEH13] zeigen, dass keine Vorschläge oder Anleitungen zur Methodenintegration und deren chronologischen Umsetzung bestehen. Zwar arbeiten circa 80 % der Befragten an einer Reduzierung der Schwankungseinflüsse, dennoch wenden nur 18 % davon Werkzeuge des *RDM* an. Bei einer Studie in Großbritannien nach [And96] wurden 31 Methoden zur Produktentwicklung hinsichtlich ihrer Häufigkeit der Anwendung in der Industrie untersucht. Dabei landeten drei der vier untersuchten *RDM* Methoden (*TM*, *FTA*, *DOE*) auf den letzten vier Plätzen. Bei der in den Vereinigten Staaten durchgeführte Studie nach [Tho03], zeigte sich, dass 39 % der Unternehmen *RDM* durchgehend durch den gesamten Entwicklungsprozess verwenden und 38 % *RDM* gezielt für bestimmte Aufgabenstellungen während der Anlaufphase der Produktion einsetzen. Der Grund für die geringe Anwendung basiert auf der stetigen Weiterentwicklung von statistischen Methoden, weniger auf dem Ziel, ein geeignetes Rahmenwerk zu definieren. Zudem mangelt es an genauen Vorgaben oder Vorschriften bezüglich der Ausführung innerhalb von *RDM*. Des Weiteren ist zu beachten, dass der *RDM*-Ursprung in Japan zu finden ist und somit kulturelle Unterschiede hinsichtlich Denkweisen existieren. Eine wirkende Gegenmaßnahme würde die Vermittlung der Existenz von Unsicherheiten und deren Quantifizierung beziehungsweise Handhabung mittels Streuungen (Schwankungen) sein. Dies ist ein Teilziel der in Kapitel 6 vorgestellten Entwicklungsmethodik *Systematic Methodology for Axiomatic Robust Reliability-Testing (SMAR²T)*.

Bei bisherigen Qualitätskontrollen oder bei Entwicklungsmethodiken, wie beispielsweise *DFSS*, liegt der Schwerpunkt auf der Produktqualität und -funktionalität am Ende der Entstehungsphase, weniger auf der anschließenden Einsatzzeit [Hac07]. *ZUV*-Methoden wie *DFR* oder *BIR* verfolgen das Ziel der Produktgestaltung mit einem möglichst geringen Ausfall oder Fehler, der die Funktion oder die Sicherheit des Produkts in dessen Einsatzzeit gefährdet [She82], [RG12]. Ansätze für eine frühe *ZUV*-Integration im *PEP* sind beispielsweise in [Der08], [KT08] und [HJ09] beschrieben. Allerdings müssen dafür *ZUV*-Daten oder Wirkweisen vorhanden beziehungsweise bekannt sein. Dies ist meist ohne reale Erprobung nicht möglich. Um dennoch dieses Defizit zu decken, gibt es mit der *Virtuellen Lebensdauerermittlung VLE* nach [12] einen Ansatz, *ZUV* bereits in der virtuellen Produktumgebung in das Produkt zu entwickeln. *SMAR²T* integriert diesen Aspekt der *ZUV* in den Entwicklungsprozess von robusten Produkten. Hierzu dienen beispielsweise Prognosen, bezogen auf die Dauerhaltbarkeit in der Einsatzzeit, zur Absicherung der entwickelten Design-Varianten.

4.3 Qualität, Kosten und *Robuste Zuverlässigkeit R²*

Für eine klare Abgrenzung der Begrifflichkeiten *Qualität*, *Kosten*, *Robustheit* und *Zuverlässigkeit* sollen in diesem Teilkapitel folgende Fragestellungen geklärt werden:

- ▶ *Sind die Begrifflichkeiten hierarchisch und inhaltlich auf gleicher Stufe zu sehen?*
- ▶ *Wie können die Kosten in diesem Zusammenhang eingeordnet werden?*
- ▶ *Sind die Kosten ein Qualitätsmerkmal?*
- ▶ *Wie stehen die Kosten den anderen Begrifflichkeiten gegenüber?*

Bild 4.3 klärt die Frage bezüglich der hierarchischen Anordnung der Begrifflichkeiten. Als Oberbegriff ist die *Qualität* zu sehen. Dieser Begriff umfasst die *Kosten* und die *Robuste Zuverlässigkeit*, welche die *Robustheit* sowie die *Zuverlässigkeit* umschließt. *Qualität* und

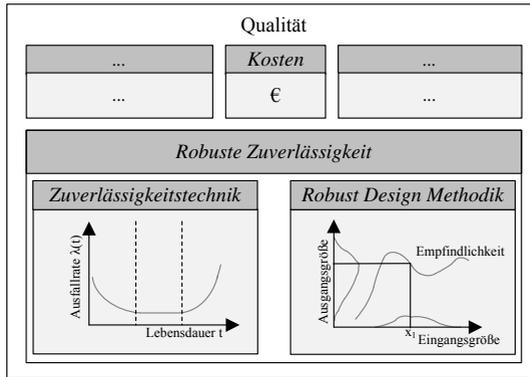


Bild 4.3: Hierarchische Einteilung der Begrifflichkeiten

Kosten unterstehen einem Zielkonflikt, je nachdem welches qualitative Maß an *Qualität* gefordert wird. Die Lebensdauer eines Produkts kann beispielsweise als hohe *Qualität* eingeordnet werden, wenn die Einsatzzeit des Produkts länger ist als gefordert. Für die Schaffung einer solchen langen Lebensdauer müssen Produkteigenschaften berücksichtigt werden, die meist mit hohen Entstehungskosten verbunden sind.

Die *Kosten* sollen in dieser Arbeit als *Kosten* auf Seite des Herstellers gesehen werden. Darunter sind unter anderem Herstellungskosten oder *Total Cost of Ownership* zu verstehen. Entsprechend werden *Kosten* nicht dem kundenseitigen Qualitätsmerkmal *Preis* zugeordnet. Zudem sind *Kosten* gemäß der Eigenschaftstheorie nach [LM09] oder nach [EM13] nicht als Qualitätsmerkmal zu sehen, da sich beispielsweise die Herstellungskosten aufgrund von unterschiedlichem Materialeinsatz, bei gleicher Qualitätsanforderung, merklich unterscheiden können.

Kosten werden in der *RDM* als implizite Kostenverantwortung gesehen. Hingegen haben sie a priori keine Berührungspunkte mit der *ZUV*. In der vorliegenden Dissertation sollen die *Kosten* explizit als *Total Cost of Ownership* in der R^2 -Methodik berücksichtigt werden.

4.4 Zusammenfassung und Fazit

Werden die betrachteten wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu R^2 in Kapitel 4.2 und die im vorherigen Kapitel 4.3 beschriebene Kostenbetrachtung zusammengefasst, ergeben sich drei Motivationspunkte für die vorliegende Dissertation:

- die Beschreibung der R^2 -Theorie mit der *Robustheit* und *Zuverlässigkeit* als Funktion über der Zeit,

- ▶ die Vorhersage und Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie
- ▶ die explizite Kostenbetrachtung.

Eine ganzheitliche Betrachtung einer Produktzuverlässigkeit benötigt zwingend eine Berücksichtigung sowohl von beispielsweise Störfaktoren, unerwarteten Anwendungsgebrauch und Verschleißerscheinungen als auch von deren Wechselwirkung(en) bezüglich des Indikators Zeit. Zwar bieten existierende *RD*-Methoden eine Unterstützung zur Erfassung und Verringerung von Unsicherheiten über die Produkteinsatzzeit hinaus, allerdings gibt die Literatur keine Hinweise zu Überschneidungen, Unterschieden und potentiellen Synergieeffekten der Theorien *RDM* und *ZUV*. Auch nicht zu Gestaltungsprinzipien, zu Methoden und Werkzeugen oder zu deren chronologischen Anwendung, vergleiche Kapitel 4.2.3. Entsprechend sollen weiter die folgenden Fragestellungen in dieser Dissertation geklärt werden:

- ▶ *Wie zuverlässig sind robuste Produkte?*
- ▶ *Inwieweit trägt die Robustheit zur ganzheitlichen Produktzuverlässigkeit bei?*
- ▶ *Inwieweit unterstützen RD-Methoden die Zuverlässigkeitsabsicherung?*
- ▶ *Wie und mit welchen Methoden können robuste, zuverlässige Produkte systematisch und in zeitlicher Abfolge entwickelt werden?*
- ▶ *Inwieweit ist eine explizite Kostenbetrachtung in den bekannten Methoden immanent?*

Die Definition der R^2 -Theorie in dieser Dissertation, siehe Kapitel 5, umfasst die vier, in den Grundlagenkapiteln vorgestellten Eigenschaften: *Komplexität* (Struktureigenschaft), *Unsicherheit* (Produkteigenschaft), *Robustheit* und *Zuverlässigkeit* (je Produkt- und/oder Prozesseigenschaft), die einen erheblichen Einfluss auf die *Qualität* haben und als Qualitätsmerkmal betrachtet werden. *Kosten* werden zudem berücksichtigt, allerdings nicht als Qualitätsmerkmal, stattdessen als Teilbestand der *Qualität*. Aufgrund dieser Definition werden die *Kosten* in Tabelle 4.1 nicht gegenübergestellt, sondern ausschließlich die in R^2 betrachteten Qualitätsmerkmale. Eine genaue hierarchische Einteilung der genannten Domänen erfolgt in Kapitel 6.

R^2 betrachtet jede Domäne im Einzelnen und berücksichtigt zusätzlich alle Verknüpfungen untereinander. Während bei der Betrachtung und Optimierung einer einzelnen Eigenschaft beziehungsweise Anforderung die anderen Domänen bislang außer Acht bleiben, kann mit R^2 die daraus resultierende Veränderung der anderen Eigenschaften mitberücksichtigt und deren Wirkung auf die *Kosten* betrachtet werden. Anders ausgedrückt verfolgen die vier Domänen, vergleiche Tabelle 4.1, jeweils ein einziges Ziel, während R^2 alle Ziele zu einem Gesamtziel respektive der *Kosten* vereint und dieses versucht zu erfüllen.

Die Motivationspunkte für eine *Robuste Zuverlässigkeit* (R^2) sowie dessen Modell werden eingehend in Kapitel 5 erläutert und für eine integrale Methodik zur Entwicklung robuster, zuverlässiger Produkte, samt der zeitlichen Abfolge der Methodik *Systematic Methodology for Axiomatic Robust Reliability-Testing (SMAR²T)* in Kapitel 6 beschrieben.

Angemerkt sei, dass die *Qualität* als ganzheitliche Theorie-Betrachtung, vergleiche Bild 4.3, nicht Bestandteil dieser Dissertation ist. Im Gegenteil soll diese Betrachtung als Anstoß für weiterführende Arbeiten dienen.

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung *Zuverlässigkeit, Robustheit, Komplexität, Unsicherheit*

	<i>Zuverlässigkeit</i>	<i>Robust Design</i>	<i>Komplexität</i>	<i>Unsicherheit</i>
Definition	„Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“ [BL04]	„Ein Produkt wird als robust bezeichnet, wenn es sich unempfindlich gegenüber den auftretenden Unsicherheiten seiner Lebenslaufprozesse verhält.“ [WEM ⁺ 13]	„Die Komplexität eines technischen Systems ist ein objektiv feststellbares Maß für die Anzahl und Unterschiedlichkeit der Elemente und deren Relationen.“ [EM13]	„Der Begriff Unsicherheit beschreibt eine Abweichung wirkender Einflussfaktoren von einem deterministischen Wert.“ [WEM ⁺ 13]
Jahr	1971 [MBBBG ⁺ 71]	1986 [Tag86]	1977 [PB77]	1987 [Bog87]
Ziel	Ausfall von Produkten oder Systemen durch frühzeitiges Erkennen entgegenwirkender; Nachweis der ZUV-Anforderung	Produkte oder Systeme unempfindlich gegenüber Störeinflüssen entwickeln und so mit die Schwankungen möglichst gering halten.	Interaktion einzelner Bauteile und Prozesse erfassen und deren Bauteil- und Funktionsstruktur sichtbar machen. Anzahl der Elemente eines Produktes möglichst gering halten.	Potentielle Schwachstellen und Risiken eines Produktes oder Systems aufdecken, betrachten, prognostizieren. Risikobereiche möglichst klein halten.
Bestandteile	Funktionsfähigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Instandhaltungsbereitschaft, Sicherheit, Mindestwerteinhaltung, Ausfallfreiheit, Anforderungs- und Erwartungserfüllung	Unempfindlichkeit, Anwendbarkeit, Erhaltung der Funktionsfähigkeit	Vielgestaltigkeit, Vernetzung, Dynamik, Zustand	Defizit, Abweichung, nicht Erreichen des Ziels

5 Die Theorie der *Robusten Zuverlässigkeit* R^2

Ausgehend von den Fragestellungen, wie *Robuste Zuverlässigkeit* (R^2) mit der *Robustheit* und *Zuverlässigkeit* (*ZUV*) als Funktion über der Zeit beschrieben wird beziehungsweise wie Unsicherheiten berücksichtigt und prognostiziert werden können, wird in diesem Kapitel eine Definition zur R^2 -Theorie gegeben und anhand des R^2 -Modells erklärt.

5.1 Motivation

Entsprechend der Argumentation in Kapitel 4.2.1 und Kapitel 4.2.3 haben *Robustheit* und *ZUV* nicht zwingend die gleiche Zielsetzung. Nach [Yan07] kann die *ZUV* als *Robustheit* über einen bestimmten Zeitraum oder umgekehrt die *Robustheit* als *ZUV* unter verschiedenen Umgebungsbedingungen beschrieben werden. Schematisch ist dieser Zusammenhang in Bild 5.1 dargestellt.

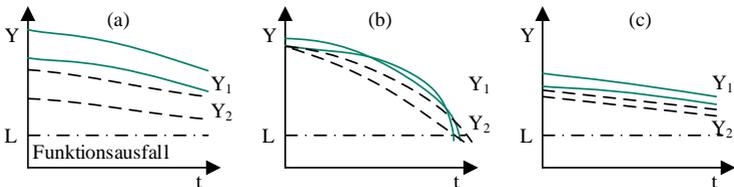


Bild 5.1: Schematischer Vergleich der Theorien *ZUV* (a), *RDM* (b) und R^2 (c) in Anlehnung an [Yan07]

Gegeben sei die geforderte Produktqualität Y und der entsprechende Grenzwert L als Maß für den Funktionsausfall des Gesamtsystems. Zudem sind mit Y_1 und Y_2 zwei Produktverhalten mit unterschiedlich resultierender Qualität in Form von Grenzen beschrieben, die durch die unterschiedliche Einwirkung der Umgebungsbedingungen auf das jeweilige Produkt bedingt sind. Soll das Produkt robust sein, muss es seine *ZUV* auch für andere Umgebungsbedingungen beibehalten. Folglich kann ein Produkt zuverlässig jedoch nicht robust sein, vergleiche Bild 5.1 (a). Das Design mit Y_1 und Y_2 besitzt unter Einwirkung der inneren und äußeren Einflüsse zwar ein zuverlässiges, zeigt allerdings kein robustes Produktverhalten. Im Gegensatz dazu wird in Bild 5.1 (b) für die frühe Phase der Produktnutzung eine hohe *ZUV* bei bestehenden Umgebungsbedingungen aufgezeigt. Selbst wenn diese *ZUV* mit zunehmender Produktnutzung in einem bestimmten Zeitraum nicht mehr aufrecht erhalten werden kann, wird dennoch die *Robustheit* beibehalten. Über die gesamte Einsatzzeit besteht eine hohe *Robustheit*, da sich die Produktqualität unter Einwirkung von Y_1 oder Y_2 nicht merklich

ändert. Auch nicht mit zunehmender Verringerung der Qualität über der Zeit, bedingt durch die sich merklich ändernde *ZUV*, beispielsweise durch *Altern*.

Aus der aufgezeigten Gegenüberstellung lässt sich folgern, dass ein robustes Produkt nicht unmittelbar diverse Zuverlässigkeitskriterien erfüllt. Ein robustes Produkt weist lediglich geringe Schwankungen seiner funktionalen Leistungsfähigkeit auf, was zunächst bedeutet, dass ein Produkt von hoher Qualität (Funktionserfüllung) vorliegt. Dennoch muss dieses Produkt nicht über der Zeit uneingeschränkt zuverlässig sein. Daraus lässt sich folgende Hypothese aufstellen:

- ▶ *Durch die Kombination beider Theorien (ZUV und RD) kann innerhalb eines Ansatzes eine höhere Produktqualität erreicht werden, als durch die getrennte Anwendung.*

Bild 5.1 (c) zeigt schematisch den Sachverhalt eines robusten und zuverlässigen Produktes gegenüber Schwankungseinflüssen und über seine gesamte Einsatzzeit. Mittels der Berücksichtigung der Variablen *Zeit t* und der Beschreibung des Produktverhaltens über dieser Zeit, kann innerhalb des *RDM* Gedankens mit der dargestellten Kombination eine *Robuste Zuverlässigkeit* (R^2) erreicht werden. Wird die *Robustheit* als *ZUV* entsprechend unter verschiedenen Umgebungsbedingungen betrachtet, weist das zuverlässige Produkt folglich eine hohe *Robustheit* unter den festgelegten beziehungsweise geforderten Bedingungen auf.

R^2 basiert auf der zuvor genannten Literatur zur Zeitintegration von [Yan07]. Dies ist jedoch aufgrund der meist komplexen Abhängigkeiten von Produkteigenschaften, unerwarteten Störfaktoren und Nutzungsbedingungen sowie relevanten Verschleißmechanismen keine triviale Aufgabe. Die Fragestellung, wie ein hohes Maß sowohl an *Robustheit* als auch an *ZUV* von Produkten erreicht wird, kann nicht durch eine einfache Erweiterung bestehender Werkzeuge, wie beispielsweise die Berücksichtigung von Verschleiß in einer experimentellen Optimierung der Parameterkombinationen, beantwortet werden, wie es von [Yan07] vorgeschlagen wird. Stattdessen muss R^2 zwei Aspekte verfolgen. Zum einen muss die Theorie einen praktischen Zugang ermöglichen, damit zeitabhängige Verschleißmechanismen und deren Korrelationen identifiziert, beschrieben und analysiert werden können. Zum anderen müssen die jeweiligen Ansätze auch eine Unterstützung für eine sinnvolle Berücksichtigung der zahlreich auftretenden Störgrößen bieten, die entweder direkt die Produktqualität oder indirekt die Funktionsfähigkeit in Form von einem unerwarteten und unvorhersagbaren Anstieg an Verschleiß beeinflussen.

5.2 Definition der *Robusten Zuverlässigkeit* R^2

Um den Zusammenschluss und die Nutzung der Synergie der beiden Theorien *Robust Design Methodik* und *Zuverlässigkeit* zu verdeutlichen, sollen für zukünftige Betrachtungen die Theorie der *Robusten Zuverlässigkeit* nach folgenden, grundlegenden Definition gelten. Die *Robustheit* wird als *ZUV* unter unterschiedlichen Umgebungs- und System-internen Bedingungen definiert. Dabei soll die Varianz der Abweichung von Mittelwert und von Funktionsgrenze reduziert werden, wodurch ein geringerer Sicherheitsabstand definiert werden kann. Getrennt betrachtet, wirkt sich die *Robustheit* dabei auf die Reduzierung von Früh- und Zufallsausfällen aus, die *ZUV* hingegen auf die Funktionserhaltung innerhalb der geforderten Einsatzzeit hinsichtlich einer Ermüdung.

“Robuste Zuverlässigkeit (R^2) ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt oder Prozess während seiner gesamten Einsatzzeit, trotz aller auftretenden inneren und äußeren Störeinflüssen, seine geforderte Funktionsfähigkeit mit geringer Varianz aufrecht hält.”

Die gegebene Definition ist für ein gemeinsames Verständnis beider Theorien von wesentlicher Bedeutung. Die Fragen nach ihre Neuheit und dem Mehrwert einer integrierten Betrachtung der ZUV und *Robustheit* sowie ihrer Allgemeingültigkeit wird in [17] nach [PEB⁺00] diskutiert und soll in dieser Arbeit zusammen mit dem Erklärungsmodell R^2 -Modell sowie mit der Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten *Systematic Methodology for Axiomatic Robust Reliability-Testing (SMAR²T)*, vergleiche Kapitel 6, nach dem *Validation Square* von [PEB⁺00], siehe nachfolgendes Kaptiel 5.3, validiert werden.

5.3 Validierung von Theorie, Modell und Methodik

Um eine Theorie, Methodik oder Methode auf deren Neuheitsgrad hin zu überprüfen, gibt es zum Zeitpunkt dieser Arbeit keine geeigneten Richtlinien, die eine klar definierte Vorgehensweise aufzeigen. Normen, wie [DIN05], oder Literaturhinweise, wie [WG05], beschreiben eine Vorgehensweise, wonach Methoden auf Basis von beispielsweise Datensätzen aus Messungen validiert werden. Eine Empfehlung für eine rein wissenschaftliche und industrielle Methodik- oder Methodenvalidierung bleibt offen. Unterschiedliche Ansätze zur Validierungsmöglichkeiten sind in [BC09] oder in [PEB⁺00] beschrieben. Der Schwerpunkt der Methode nach [BC09] liegt auf einer zweistufigen Validierung von Design-Methoden. Hingegen erfolgt bei [PEB⁺00] die Validierung von Methoden in vier Stufen mit dem Schwerpunkt auf Produkte. Zwar zeigt [BC09], wie eigene Prozesse und Methoden reflektiert werden können, dennoch soll für die genannte Aufgabenstellung die Validierung nach [PEB⁺00] erfolgen. Zumal deren Vorgehensweise die Überprüfung des Neuheitsgrades der Theorie und Modell R^2 sowie der ganzheitlichen Methodik *SMAR²T* weitestgehend abdeckt. Die Validierung erfolgt mittels dem sogenannten Validierungsquadrat (*Validation Square*), vergleiche Bild 5.2, mit den vier Validierungsoptionen: *Theoretisch, Empirisch, Strukturiell und Leistungsbezogen* und wird in den sechs nachfolgend beschriebenen Schritten umgesetzt:

- (a1) *Annahme der Konstrukt-Gültigkeit:*
Vergleich des Methodenaufbaus infolge Literaturarbeit und gegebenenfalls nachfolgendem Benchmark zur Überprüfung des Neuheitsgrads
- (a2) *Annahme der Folgerichtigkeit der Methode:*
Modellierung zur chronologischen oder schrittweisen Abfolge der Methode sowie zur Überprüfung derer Relevanz
- (b) *Annahme der Beispielprobleme:*
Methodenanwendung auf ähnliche Problemstellungen der eigentlichen Anwendung sowie einer anschließenden Lösungsbewertung

- (c1) *Aufzeigen der Methodennutzung anhand von Beispielproblemen:*
Übertragung der Methodenanwendung auf industrielles Beispiel mit anschließender Lösungsbewertung aus industrieller Sicht, wie Qualitätserhöhung
- (c2) *Überprüfung des Methodenmehrwerts:*
Vergleich mit adäquaten Ergebnisse aus anderen Methoden sowie mit deren Qualität
- (d) *Nachweise der verallgemeinernden Methodenanwendung:*
Abschließende Bewertung der Methodenanwendung zur Problemlösung sowie hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Aufgabenstellungen anhand der Punkte (a1) bis (c2)

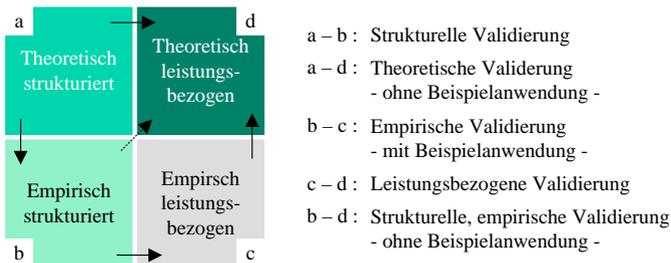


Bild 5.2: Validierungsquadrat (*Validation Square*) nach [PEB⁺00]

Nach dem vorgestellten Validierungsquadrat können für die Validierung der R^2 -Theorie, deren Modell sowie der *SMAR²T*-Methodik die folgenden vier Optionen zur allgemeinen Anwendung als Nachweis in dieser Dissertation geführt werden:

- ▶ *Theoretische Validierung (a1) & (a2) & (d):*
Der Neuheitsgrad des vorgeschlagenen Theorieansatzes wird mittels des Modellansatzes *R²-Modell* (Kapitel 5), einer strukturierten Methodikdarstellung und -abfolge (Kapitel 6) sowie einer Literaturarbeit (Kapitel 4) unter Beweis gestellt.
- ▶ *Strukturelle Validierung (a1) & (a2) & (b):*
Zur Klärung der potenziellen Vorteile sowie für eine erste Validierung des vorgeschlagenen Konzepts wird das abgeleitete *R²-Modell* an repräsentativen Anwendungsbeispielen angewendet (Kapitel 6).
- ▶ *Empirische Validierung (b) & (c1) & (c2):*
Die vorgeschlagene Definition sowie das entwickelte Modell müssen an verschiedenen, industriellen Aufgabenstellungen angewendet werden, damit ihre Gültigkeit für eine Reihe von archetypischen Szenarien bewiesen wird (Kapitel 7).
- ▶ *Leistungsbezogene Validierung (c1) & (c2) & (d):*
Überprüfung des beschriebenen komplexen Industriebeispiels (Kapitel 7) im Hinblick auf eine allgemeine Übertragbar- und Anwendbarkeit auf andere Aufgabenstellungen. Dies geschieht, indem die relevanten Einflüsse auf die Produktlebensdauer, -qualität und -kosten sowie alle ihre Abhängigkeiten gezeigt werden und dadurch eine systematische Bewertung der *R²-Theorie*, Methodik und des Modells erfolgt.

5.4 Das R^2 -Modell

Im Gegensatz zu den am häufigsten, angewandten ZUV-Werkzeugen, die im Wesentlichen qualitativ sind oder sich zu einem großen Teil auf eine Komponenten-orientierte Analyse auf Basis von bekannten Ausfalldaten stützen [BL04], erfolgt die Analyse von R^2 vorzugsweise nach quantitativer Funktionsbeschreibung des Produktes oder Prozesses mit Hilfe der *Taguchi Methode (TM)* (Kapitel 3.1.2), des *Axiomatic Design (AD)* (Kapitel 3.1.3) und der *Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse (FMEA)* sowie mit den genannten Methoden zur Beschreibung von Unsicherheiten (Kapitel 2.1 und Kapitel 2.2).

Als Basis des Modells dient das *RDM*-Konzept der Übertragungsfunktion (Kapitel 4.2.1). Hiernach sollen zunächst die Qualitätsmerkmale *Robustheit* und ZUV (R^2) betrachtet werden. Im weiteren Schritt (Kapitel 5.6) werden mit dem R^2_{Prozess} -Modell die Kosten und mit dem R^2_{Feld} -Modell das Funktionsverhalten im Feld integriert und quantifiziert.

Im R^2 -Modell werden alle relevanten *Kundenanforderungen (CAs)* aus dem Lastenheft in entsprechende *Funktionsanforderungen (FRs)* nach dem Prinzip des *Axiomatic Design (AD)* abgeleitet und in die dafür notwendigen *DPs* überführt. Für eine eindeutige, gegliederte Funktionsintegration werden die *FRs* und ihre *DPs* mit Hilfe des *Funktionsblockdiagramms (FBD)* sowie mit dem *Wirkzusammenhangsdiagramm (WZD)* (Kapitel 6.2.4) in eine *Design Matrix (DM)* (Kapitel 6.2.6) überführt. Dies wird iterativ mit der Fragestellung:

- Welche FR_k soll erreicht werden? \Leftrightarrow Mit welchem $DP_{k+1,i}$ soll sie realisiert werden?

mit $k \in \mathbb{N}$ und $i \in \mathbb{N}^*$ umgesetzt. Diese Fragestellung wird in dieser Weise wiederholt, bis eine eindeutige Beziehung zwischen *FR* und *DP* gegeben ist und sich ein hierarchisch gegliederter Satz von Funktionen daraus ergibt. Hierbei bildet die Gesamtfunktion FR_0 die oberste Ebene und wird im R^2 -Modell an der Ordinate mit den entsprechenden Funktionsgrenzen $L_{\min/\max}$ aufgetragen, die sich aus den geforderten *CA*-Grenzen ergeben, vergleiche Bild 5.4 (a). Der entsprechende *DP* und dessen Grenzen werden über die Übertragungsfunktion mittels Störgrößenquantifizierung¹ überführt und definiert:

$$FR_k = f(DP_{k+1,i}) \quad , \quad (5.1)$$

wobei $k \in \mathbb{N}$ und $i \in \mathbb{N}^*$ ist. Hierfür beschreibt k die Ebenentiefe in vertikaler und i die Anzahl der *FRs* beziehungsweise *DPs* in horizontaler Richtung, vergleiche Bild 5.3.

Im R^2 -Ansatz wird in der obersten Ebene ($k = 0$) der Einfluss aller *DPs*, gebündelt in einer Verteilung, auf die Zielgröße *FR* betrachtet. Dies liegt darin begründet, dass mehrere *DPs* und deren mögliche Korrelationen und Sensitivitäten, als Maß für den Einfluss, die *DPs* beeinflussen und sich auf die Übertragungsfunktion auswirken. Dabei steht diese Verteilungsfunktion nicht für ein einziges Qualitätsmerkmal, sondern für eine Vielzahl an Qualitätsmerkmalen und somit für zuverlässigkeits- und robustheitsrelevante Merkmale aller *DPs*. Daraus ergibt sich die Frage:

- Wie werden sämtliche zuverlässigkeits- und robustheitsrelevanten Merkmale zu einem Parameter zusammengefasst?

¹ Mathematische Modellierung der Übertragungsfunktion mit Hilfe von geeigneten Methoden zur Quantifizierung von Störgrößen und deren Abhängigkeiten

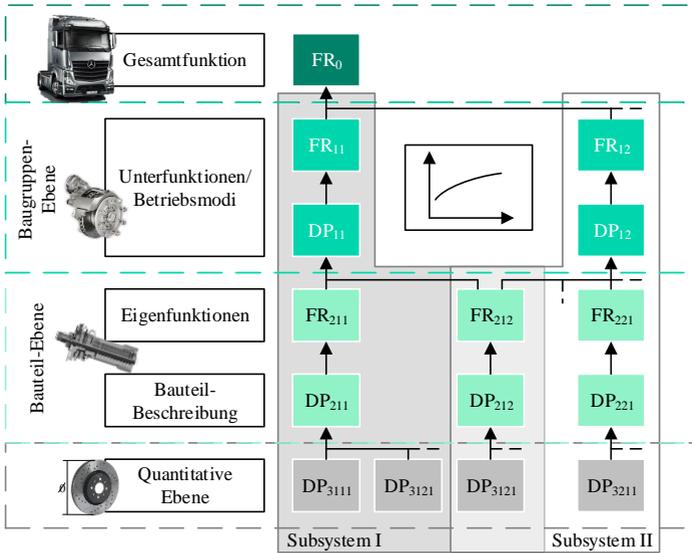


Bild 5.3: Schematischer Aufbau zur Ermittlung der Gesamtfunktion

Nach der in Bild 5.3 gezeigten hierarchischen Aufbauweise, wird die Gesamtfunktion (FR_0) oder die für die Produktzuverlässigkeit zentral verantwortlichen Funktionen in der obersten Ebene, mit dem entsprechenden DP äquivalent mit seiner obersten Ebene (DP_0), dargestellt. Die Betrachtungstiefe k und die Anzahl i der Designparameter ($DP_{k,i}$) entsprechen in den Sub-Ebenen den Funktionsanforderungen ($FR_{k,i}$) und werden über stochastische Analysen aus deren Initialverteilung, die der Grundgesamtheit entspricht, bestimmt. In der Ebene $k=0$ wird das Gesamtsystem (Gesamtfunktion), bei $k=1$ die Betriebsmodi (Unterfunktionen), bei $k=2$ die Bauteilebene (Komponentenebene) und bei $k=3$ die quantitative Ebene (Merkmalsebene) betrachtet. Ausgehend von der Bauteilebene werden in der Merkmalsebene sämtliche DPs , wie Materialeigenschaften oder Geometriegrößen, beschrieben, die Einfluss auf die Wirkstruktur haben. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich folgende Gleichungen:

$$DP_{k,i} = \sum_{l=1}^j \sum_{l=1}^m DP_{k+1,i,l} ; k \in \{1\} , DP_{k,i,l} = \sum_{i=1}^j \sum_{l=1}^m \sum_{o=1}^n DP_{k+1,i,l,o} ; k \in \{2\} \quad , \quad (5.2)$$

mit $l, o \in \mathbb{N}^*$, vergleiche dazu Bild 5.3. Für die Funktionsstruktur wird die Gesamtfunktion in der Bauteilebene in einzelne Unterfunktionen aufgeteilt. Jede Subfunktion umfasst Eigenfunktionen, je nach Aufgabenstellung des Betriebsmodus. Diese Eigenfunktionen können für

mehrere Betriebsmodi agieren. Zusammengefasst werden diese Strukturen in Subsystemen, deren Unter- und Eigenfunktionen allgemein definiert sind zu:

$$FR_k = \sum_{i=1}^j FR_{k+1,i}; k \in \{0\}, FR_{k,i} = \sum_{i=1}^j \sum_{l=1}^m FR_{k+1,i,l}; k \in \{1\} \quad . \quad (5.3)$$

Es sollten möglichst alle signifikanten *DPs* und Effekte zwischen den Bauteilen berücksichtigt werden. Unterstützende Werkzeuge dafür sind beispielsweise die *FTA*, *FMEA*, Sensitivitätsstudien, Expertenwissen oder Wirkstrukturmodelle, wie das *Wirkzusammenhangsdiagramm (WZD)* in Kapitel 6 oder Kapitel 7.

Auf Basis der *Normalverteilung* mit dem Mittelwert μ als Erwartungswert $E(X)$ gilt:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \partial x = \sqrt{2\pi}\sigma \quad , \quad (5.4)$$

mit der Ableitung:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{2(\mu-x)}{2\sigma^2} \partial x = 0 \quad . \quad (5.5)$$

Mit der Erweiterung von $\cdot \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}}$ ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right] e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot (\mu-x) \partial x = 0 \quad (5.6)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right] e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot x \partial x = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right] e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot \mu \partial x \quad (5.7)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) \partial x = \mu \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \partial x = \mu \cdot 1 \quad , \quad (5.8)$$

mit $\mu = E(X)$ kann folgender Zusammenhang betrachtet werden:

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) \partial x = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot H_i) = E \cdot H^T \quad , \quad (5.9)$$

mit $E = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ als Vektor für alle Messwerte $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, $H^T = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$ als Vektor für die Häufigkeiten $h_i (i = 1, 2, \dots, n)$ der Messwerte t_i . Dies bedeutet beispielsweise bei einer Prozessfähigkeit $C_{pk} = 1,33$ eine kumulierte Häufigkeit innerhalb der Toleranzgrenzen von $\sum_{i=1}^n h_i = 0,9997$. Zudem gilt für die Standardabweichung:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad , \quad (5.10)$$

mit der Varianz:

$$Var(X) = \sigma^2 = \int (x - \mu)^2 f(x) \partial x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad . \quad (5.11)$$

Übertragen auf die quantitative Merkmalsebene ($k = 2$) mit der Indizierung $DP_{k+2,i,l,o}$, die die Produktabweichung durch entsprechende Toleranzvorgaben beschränkt, gilt für die Mittelwerte (Erwartungswerte) von beispielsweise zwei verschiedenen Parametermerkmalen $o = 1, 2$ mit einer Anzahl an gemessenen Merkmalen $a_{i,l,o}$ einer Baugruppe $i = 1$ mit einem Bauteil $l = 1$ folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned}\mu_{1,1,1} &= E_{1,1,1} \cdot H_{1,1,1}^T = (x_{1,1,1,1}, \dots, x_{1,1,1,a_{1,1,1}}) \cdot (H_{1,1,1,1}, \dots, H_{1,1,1,a_{1,1,1}})^T, \\ \mu_{1,1,2} &= E_{1,1,2} \cdot H_{1,1,2}^T = (x_{1,1,2,1}, \dots, x_{1,1,2,a_{1,1,2}}) \cdot (H_{1,1,2,1}, \dots, H_{1,1,2,a_{1,1,2}})^T,\end{aligned}$$

mit einer Standardabweichung von:

$$\sigma_{1,1,1} = \sqrt{\frac{\sum_{a=1}^{a_{1,1,1}} (x_i - \mu_{1,1,1})^2}{a_{1,1,1}}} = \frac{T_{k+2,1,1,1}}{3}, \quad \sigma_{1,1,2} = \sqrt{\frac{\sum_{a=1}^{a_{1,1,2}} (x_i - \mu_{1,1,2})^2}{a_{1,1,2}}} = \frac{T_{k+2,1,1,2}}{3},$$

mit $T_{k+2,i,l,o}$ als Toleranz des Merkmals. Verallgemeinernd für DPs der Baugruppe i mit Anzahl l an Bauteilen mit Merkmalen o sowie an deren gemessenen Merkmalen (Stichproben) $a_{i,l,o}$ lässt sich zusammenfassen:

$$\mu_{i,l,o} = E_{i,l,o} \cdot H_{i,l,o}^T = (x_{i,l,o,1}, \dots, x_{i,l,o,a_{i,l,o}}) \cdot (H_{i,l,o,1}, \dots, H_{i,l,o,a_{i,l,o}})^T, \quad (5.12)$$

$$\sigma_{i,l,o} = \sqrt{\frac{\sum_{a=1}^{a_{i,l,o}} (x_i - \mu_{i,l,o})^2}{a_{i,l,o}}} = \frac{T_{k+2,i,l,o}}{3}. \quad (5.13)$$

$$(5.14)$$

Übertragen auf die DP -Nomenklatur der Quantitativen-Ebene ($k = 3$) wird allgemein definiert:

$$DP_{k=3,i,l,o} = \mu_{i,l,o} + \sigma_{i,l,o}, \quad (5.15)$$

transponiert auf Bauteil-Ebene ($k = 2$) ergibt sich:

$$DP_{k=2,i,l} = \begin{bmatrix} DP_{k+1,i,l,1} \\ DP_{k+1,i,l,2} \\ \vdots \\ DP_{k+1,i,l,o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{i,l,1} \\ \mu_{i,l,2} \\ \vdots \\ \mu_{i,l,o} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{i,l,1} \\ \sigma_{i,l,2} \\ \vdots \\ \sigma_{i,l,o} \end{bmatrix}, \quad (5.16)$$

entsprechend für die Baugruppen-Ebene ($k = 1$):

$$DP_{k=1,i} = [DP_{k+1,i,1}, DP_{k+1,i,2}, \dots, DP_{k+1,i,1}]_{1-l}. \quad (5.17)$$

Die direkte Zuordnung der DPs zu den FRs erfolgt in der untersten Funktionsebene (Bauteil-Ebene) und die der Betriebsmodi in der Baugruppen-Ebene nach dem Dekompositionsprinzip

des *Axiomatic Design* mit der *Design Matrix* (DM) und der Transfermatrix $[A]$, vergleiche Kapitel 3.1.3. Vertretend dargestellt für die Baugruppen-Ebene ($k = 1$):

$$\begin{bmatrix} FR_{1,1} \\ FR_{k,2} \\ \vdots \\ FR_{k,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,m} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n,1} & A_{n,2} & \dots & A_{n,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{1,1} \\ DP_{1,2} \\ \vdots \\ DP_{k,m} \end{bmatrix} . \quad (5.18)$$

Die Transfermatrix beschreibt die Abhängigkeit der DPs zu den FRs , quantifiziert mit den Werten $A_{n,m} \in (0, 1)$. Infolgedessen kann die Zuordnung mittels einer Funktion g_i mit $(1, 2, \dots, i)$ erfolgen:

$$[FR_{1,1}, FR_{1,2}, \dots, FR_{k,n}]^T = g_i (DP_{1,1}, DP_{1,2}, \dots, DP_{k,m})^T . \quad (5.19)$$

Nach der Definition der dritten, quantitativen Merkmalebene, müssen die in dieser Ebene befindlichen DPs miteinander in Beziehung gebracht werden, um daraus die nächst höhere Betrachtungsebene zu beschreiben. Es existieren hierbei mehrere zu unterscheidende DP -Konstellationen, wie die einfache lineare Maßkette mit nicht- und sensitiven DPs . Diese DPs weisen bereits zu Beginn der Einsatzzeit schwankungsbasierte Einflüsse, wie beispielsweise aus Material und Produktion, auf, die in Form von Häufigkeitsverteilungen beschrieben werden. Eine Möglichkeit diese Verteilungen in Zusammenhang zu bringen ist die Toleranzrechnung. Hierbei ist zu beachten, dass diese Korrelationen nicht addiert werden dürfen, da die Überlagerung der Funktion berücksichtigt werden muss. Um eine korrekte Verbindung zu schaffen, wird die mathematische *Faltung*² angewendet, wobei sich beispielsweise die Häufigkeitsverteilung des Gesamtmaßes einer Maßkette ergibt. Für R^2 gilt somit für zwei DPs der Baugruppen-Ebene ($k = 1$):

$$\begin{aligned} f(DP_{k=1,i}) &= (DP_{k+1,i,l} * DP_{k+1,i+1,l})(x) \\ &:= \int_{\mathbb{R}^n} (DP_{k+1,i,l}(\tau)) DP_{k+1,i+1,l}(x - \tau) \partial \tau \quad , \end{aligned} \quad (5.20)$$

mit $DP_{k+1,i,l}, DP_{k+1,i+1,l} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$. Für die zeitliche Betrachtung folgt:

$$\begin{aligned} f(DP_{k=1,i}(t)) &= (DP_{k+1,i,l}(t) * DP_{k+1,i+1,l}(t))(x, t) \\ &:= \int_{\mathbb{R}^n} (DP_{k+1,i,l}(\tau, t)) DP_{k+1,i+1,l}(x - \tau, t) \partial \tau \partial t \quad . \end{aligned} \quad (5.21)$$

Für die entsprechende Lage gilt analog Gleichung 5.2:

$$\mu_{DP_{k=1,i}} = \sum_{i=1}^j \mu_{DP_{k+1,i,l}} \quad . \quad (5.22)$$

² Im Fall unterschiedlicher Verteilungen kann durch die mathematische Operation der *Faltung* resultierende Verteilungsfunktionen verknüpft werden, wobei der Mittelwert eines Falproduktes sich linear aus den Mittelwerten der Ausgleichsverteilungen ergibt. Folglich beruht die Toleranzmodellierung häufig auf normalverteilten Daten [DS09].

Aufgrund der Tatsache, dass sowohl Materialeigenschaften und Geometriegrößen gefaltet werden und diese dadurch Einfluss auf die Zielgröße haben, soll eine Normierung der DP -Achse erfolgen und mit der ermittelten Sensitivität gegenüber FR entsprechend die Mittelwertsverschiebung beschrieben werden. Zudem soll mit dieser Sensitivitätsuntersuchung der Einfluss auf die Schwankungsbreite der DPs betrachtet und mit statistischen Methoden erfasst werden. Ausnahme für die Anwendung der beschriebenen *Faltung* ist eine Korrelation von DPs über deren Lebensdauer hinaus. Dies ist vor allem bei den sich zeitlich ändernden DPs , beispielsweise beim abrasiven Verschleiß eines Bauteils mit dessen Partnern, merklich. Diese Abhängigkeit muss in einer neuen Funktion beschrieben und mit dessen Verteilungen in mathematischen Zusammenhang gebracht werden. Eine einfache statistische Methode ist die *Monte-Carlo Methode (MC)*, vergleiche Kapitel 2.2.1. Die Beschreibung von den DPs zu den entsprechenden FRs erfolgt mit der Übertragungsfunktion. Somit ist die MC stets von den DPs abhängig, die einen signifikanten Einfluss auf sie und folglich auf die FRs haben. Allerdings haben DPs bei einer merklich veränderten Konstellation keinen Einfluss auf die FR , wenn sich ihre Auswirkungen kompensieren. Dabei kommt eine in Bild 5.4 (c) dargestellte Eigenschaft zum Tragen, wonach ein DP bei Überschreitung seiner Spezifikationsgrenze nicht zum Funktionsausfall führt.

Für die Beschreibung der Funktionserfüllung wird die bekannte *ZUV-Methode* des *Stress-Strength-Interference*, vergleiche Kapitel 3.2.5, angewandt. Hierbei tritt ein Ausfall des Systems auf, wenn die entsprechende Spezifikationsgrenze der FR überschritten wird. Im Gegensatz zu klassischen Lebensdauerbetrachtungen, bei denen die Überschneidung von der Belastung und der Belastbarkeit als Ausfall deklariert wird, wird beim R^2 -Ansatz ein Ausfall des Systems als Überschreitung der Funktionsgrenzen gesehen, vergleiche Bild 5.4. Als Ausfallkriterium gilt hier die Überschreitung der fest definierten Grenzen der CA . Dies steht im Einklang mit der Definition der *ZUV*, bei der stets die (Gesamt-)Funktion des Systems als Ausfallkriterium betrachtet wird. Der Grundgedanke dieser erweiterten Sichtweise kann am Beispiel eines Systems verdeutlicht werden, dessen einzelne Qualitätsanforderungen, wie *Robustheit* oder *ZUV* (vergleiche Bild 4.3), erfüllt sind, das System selbst aber nicht der geforderten Funktion entspricht. Im Umkehrschluss gilt Gleiches, wenn einzelne Qualitätskriterien nicht erfüllt werden, dann kann die Systemantwort dennoch innerhalb der Vorgaben liegen, vergleiche Bild 5.4 (c). Beide Fälle können eintreten, wenn die für die Qualitätsmerkmale definierten Grenzwerte nicht optimal gesetzt sind oder sich die Funktionsgrenzen während der Betriebszeit verändern. Durch mögliche Kombinationen unterschiedlicher Ordnung zwischen mehreren Qualitätsmerkmalen können die Grenzwerte zum Funktionserhalt ebenfalls einander beeinflussen und zeitlich variieren. Die Systemantwort FR hingegen spiegelt die Funktionsfähigkeit des Produkts direkt, weshalb deren Grenzwerte $L_{min/max}$ nach Lastenheft unverändert bleiben. Die Anforderungen an das System sollen als Kriterium der *ZUV*-Betrachtung herangezogen werden [8].

Während der Nutzungsdauer wird FR zusätzlich und zunehmend von Alterungseinflüssen, wie Verschleiß, Ermüdung und Kriechvorgängen, beeinflusst. Diese werden in der zeitlichen Entwicklung der Dichtfunktion der DPs abgebildet. Meistens bestehen nichtlineare Korrelationen zwischen den wertabhängigen DPs , welche sich unterschiedlich stark auf FR auswirken. Diese Umstände haben zur Folge, dass die Übertragungsfunktion zeitlich

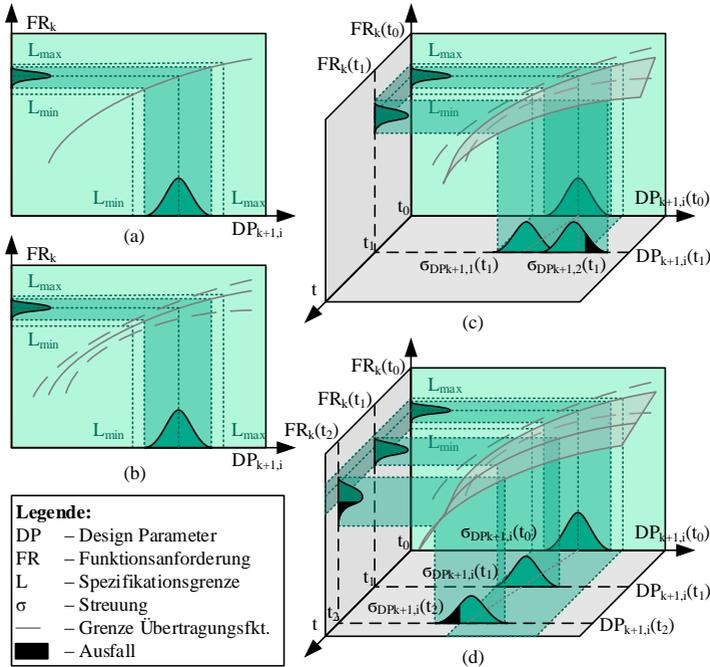


Bild 5.4: Das R^2 -Modell

veränderlich ist. Dieser Zusammenhang ist in Bild 5.4 (b) mit den Variationsgrenzen der Übertragungsfunktion in einer Ebene ($t = 0$) dargestellt.

Durch die erweiterte, zeitliche Betrachtung der FR kann die Gleichung 5.1 für die Baugruppen-Ebene ($k = 1$) ergänzt werden zu:

$$FR_{k=1,i}(t) = f(DP_{k=1,i}(t)) \quad . \quad (5.23)$$

Auf Basis der erwähnten RDM -Theorie betrachtet das R^2 -Modell sämtliche, auf das System wirkende, Störeinflüsse von innerhalb und außerhalb des Systems. Um diesen Einfluss zudem im Modell abzudecken, müssen diese Effekte mit berücksichtigt werden. Durch diese erweiterte Betrachtung ergibt sich die Gleichung 5.23 mit $j \in \mathbb{N}^*$ zu:

$$FR_{k=1,i}(t) = f(DP_{k=1,i}(t, NF_j)) \quad . \quad (5.24)$$

Die Designgrenzen ($L_{min/max}$) können zum Zeitpunkt $t = 1$ teilweise oder zum Zeitpunkt $t = 2$ komplett durch den DP überschritten werden, was nach dem Zuverlässigkeitsverständnis zum Ausfall führen würde. Allerdings werden durch das Robustheitsverständnis, anhand der nichtlinearen Übertragungsfunktion, die Funktionsgrenzen nicht überschritten, vergleiche

Bild 5.4 (c) mit der Verteilungsfunktion der Parameter zur Zeit $t = 1$. Infolgedessen wird die Funktion trotz abweichender DPs erfüllt. Insbesondere bei komplexer werdenden Systemen hat diese Betrachtungsweise potentielle Vorteile. Oft haben mehrere DPs Einfluss auf die Gesamtfunktionsanforderung FR_0 . Eine Abweichung eines Parameters muss nicht zwingend zum Ausfall beziehungsweise zur Abweichung der Gesamtfunktion führen. Die dadurch entstehende Abweichung kann von anderen DPs durch die nichtlineare Übertragungsfunktion (Wirkung) auf die FR kompensiert werden. Allgemein bedeutet dies, dass eine Abweichung eines Systemparameters nicht zwingend zu signifikanten Veränderungen der Gesamtfunktion führt und damit die System-ZUV gleich bleibt.

Ein anderes Beispiel ist die Erfüllung der Funktion bei einer Abweichung des DP , beispielsweise zur schwankenden unteren Designgrenze (L_{min}), vergleiche Zeitpunkt $t = 2$ in Bild 5.4 (d). Hier würde sowohl nach dem *Robustheits*- als auch nach dem *ZUV*-Gedanken die Funktion nicht mehr erfüllt werden und dies zum Ausfall führen. Somit kann zusammenfassend folgende Gleichung definiert werden:

$$F(t) = \int_0^{t(F(t)=1)} (FR_k(t) \geq L_{max} \cup FR_k(t) \leq L_{min}) dt \quad . \quad (5.25)$$

Während das R^2 -Modell die Berechnung der allgemein anerkannten Zuverlässigkeitskenngrößen erlaubt, beispielsweise die B_x -Lebensdauer³, sei angemerkt, dass hierbei ausschließlich die Funktionserfüllung (*ZUV*) des Produkts betrachtet wird. Um den Einfluss aller potentiell auftretenden Fehlermechanismen zu benennen und diese zu minimieren, soll dies in Form der auftretenden Streuungseffekte beschrieben werden. Eine Optimierung kann durch die Verringerung der Varianz der Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ der Parameter sowie deren Kombination auf unterster Designebene erfolgen. Falls diese Optimierung nicht ausreicht, muss eine erneute Design-Schleife gezogen werden.

5.5 Betrachtung von Unsicherheiten mit R^2

Das R^2 -Modell umfasst möglichst alle auftretenden Unsicherheiten, auch Modellunsicherheiten, in Form von Streuungen. Diese Streuungen können nicht nur in den einzelnen Betrachtungsebenen der DPs auftreten, sondern auch in der Übertragungsfunktion zwischen den DPs und den FRs . Zudem ergeben sich durch unterschiedliche Ausfallarten und die sich zeitlich ändernden Produktmerkmale weitere Unsicherheiten bezüglich der (Funktions-)Lebensdauer und der damit verbundenen Ausfallzeit.

Die Unsicherheitsbetrachtung sollte entlang der klassischen Elemente des *Produktentwicklungsprozesses (PEP)*⁴ erfolgen. In den folgenden drei Unterkapiteln wird eine Auswahl dieser klassischen Elemente: Bauteilfertigung sowie -montage; Funktionserhalt über der Zeit sowie Effekte beziehungsweise Wirkprinzipien aufgegriffen, die für die weiterführende Betrachtung in Kapitel 6 sowie in Kapitel 7 von Relevanz sind.

³Zuverlässigkeitskenngröße / Zeitpunkt, bei dem nicht mehr als x % der Grundgesamtheit ausgefallen sind [BL04]

⁴Hier die zeitliche Abfolge: Anforderung - Funktion - Effekte/Wirkprinzipien - Bauteile/Baugruppen/Produkt - Bauteilfertigung - Bauteilmontage - Prüfung

5.5.1 Unsicherheiten und Einflüsse auf die Übertragungsfunktion

Produkteigenschaften unterliegen prozessbedingt Toleranzen. Diese Toleranzen haben Einfluss auf die gewünschte Zielgröße. Die Zufälligkeit der Einflussgrößen kommt durch die natürliche Materialstreuung und durch die Herstellungstoleranzen zustande. Mit der vereinfachten Annahme, dass die zufälligen Einflussgrößen beschreibbar verteilt sind, kann innerhalb der Variationsgrenzen jeder beliebige Wert angenommen werden [Van83]. Entsprechend werden bei den Untersuchungen nach der R^2 -Theorie diese bestehenden Unsicherheiten in der Übertragungsfunktion in Form von Modellparameter-Schwankungen in die Betrachtung integriert.

5.5.2 Zeitliche Unsicherheiten der Produkteigenschaften

Endliche Produkteigenschaften, wie Werkstoffeigenschaften, unterliegen Alterungs- und Ermüdungseinflüssen (Degradation), weshalb eine anvisierte Funktion nicht exakt und dauerhaft gewährleistet werden kann. Entsprechend können Produkte nur für eine bestimmte Einsatzdauer ausgelegt werden. Um eine genauere Vorhersage über das Funktionsverhalten innerhalb der Einsatzzeitraums zu quantifizieren, werden auf Basis statistischer Tests sowohl reale als auch virtuelle Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt [12]. Bei der Modifizierung des R^2 -Modells wird diese klassische Zuverlässigkeitsbetrachtung beziehungsweise die Unsicherheit der Alterung oder Ermüdung berücksichtigt, indem diese Erscheinungen statistisch ermittelt und in den zeitlichen Verlauf integriert werden. Zudem werden Schwankungen im Lastkollektiv und in den Feld- zu Test-Korrelationen weiter mit einbezogen.

5.5.3 Unsicherheit unvorhersehbarer Ereignisse

Eine klassische Aufgabe in der ZUV ist die Betrachtung von unterschiedlichen Ausfallarten. Diese Ausfallarten können nach [OK12] in sogenannte Früh-, Zufalls- oder Ermüdungsausfälle unterteilt und in Form der bekannten Badewannenkurve beschrieben werden. Wobei die letztere Ausfallart, der im zuvor beschriebenen Kapitel, der zeitlichen Unsicherheit unterliegt. Bei der Betrachtung der einzelnen Ausfallarten ist darauf zu achten, dass sich je Ausfallart ein charakteristisch unterschiedlicher Verlauf der Funktion ergibt.

5.6 Das modifizierte R^2 -Modell

Als Ausgangspunkt für das modifizierte R^2 -Modell dient die zum Zeitpunkt t_0 geforderte Funktionsfähigkeit. Das modifizierte Modell besteht außerdem aus zwei zeitlichen R^2 -Betrachtungsmodellen sowie dem Prozess- und dem Feld-orientierten R^2 -Modell, deren schematische Unterteilung in Bild 5.5, in Anlehnung zu dem zeitlichen Produktlebenszyklus, dargestellt wird.

5.6.1 Prozess-orientiertes R^2 -Modell

Das in Bild 5.3 beschriebene Ebenenmodell wird um die Kostenbetrachtung für das prozess-orientierte R^2_{prozess} -Modell erweitert, vergleiche Bild 5.6. In der Quantitativen-Ebene ($k = 3$)

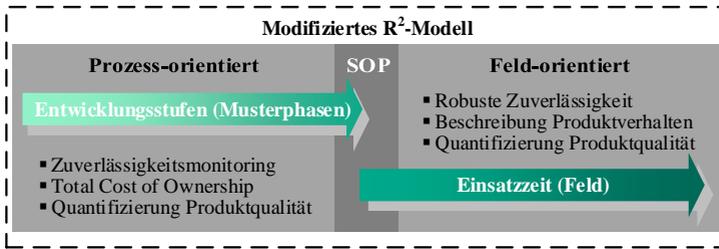


Bild 5.5: Zeitliche Einordnung des modifizierten R^2 -Betrachtungsmodells

beschreiben die $DP_{k=3,i,l,o}$ die Kosten $K_{k=3,i,l,o}$ durch die entsprechende Qualitätsbetrachtung nach den Toleranz-Definitionen sowie mit dem zugehörigem Fertigungsverfahren. In der Bauteil-Ebene ($k = 2$) werden die Gesamtkosten $K_{k=2,i,l}$ als Zusammenschluss aller Fertigungskosten, Materialkosten und Qualitätskosten einer Komponente berechnet. In der Baugruppen-Ebene ($k = 1$) ergeben sich die Kosten je Betriebsmodus $K_{k=1,i}$ als die Summe der am Betriebsmodus beteiligten Bauteile. Zusammenfassend gilt:

$$K_{k=1,i} = \sum K_{k+1,i,l} = MK + \sum K_{k+2,i,l,o} = MK + \sum (FK + SEK)_{k+2,i,l,o} \quad , \quad (5.26)$$

mit den *Materialkosten* (MK) als Fixkostenanteil, den *Sondereinzelkosten* (SEK) sowie den *Fertigungskosten* (FKs), die sich aus den *Fertigungslohnkosten* (FLK) und den *Fertigungsgemeinkosten* (FGK) zusammensetzen. Eine Gesamtkostenaufstellung $K_{k=0}$ ergibt sich entsprechend als Summe aller Bauteilkosten. Für die toleranzabhängigen Fertigungskosten auf quantitativer Ebene ($k = 3$) gilt:

$$FK_{k+1,i,l} = f_F(t_{k+2,i,l,o}) \quad . \quad (5.27)$$

Das R^2_{Prozess} -Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen der Funktionsfähigkeit, der dafür notwendigen Produktqualität und dem, für den Hersteller dafür notwendigen, Gesamtbetriebskosten⁵. Zur Beschreibung dieser drei Eigenschaften wird das R^2_{Prozess} -Modell in drei Quadranten eingeteilt, vergleiche Bild 5.7. Im ersten Quadranten wird der Zusammenhang zwischen der geforderten Funktionsfähigkeit FR und der dafür notwendigen DP mittels Übertragungsfunktion beschrieben. Im zweiten Quadranten wird für die Festlegung der Qualität, analog zur Bestimmung der DPs , eine Übertragungsfunktion ermittelt und definiert sowie in Qualitätsklassen $Y_{(1,2,\dots,i)}$ eingeteilt. Die Übertragungsfunktion kann entweder monotoner oder symmetrischer Art sein, je nach FR . Vergleichbar mit der Gleichung 5.24 untersteht diese Funktion Unsicherheiten. Der zweite Quadrant wird zudem in adäquate Qualitätsklassen eingeteilt. Diese diskrete Einteilung ist abhängig von der Betrachtungstiefe. Eine Betrachtungstiefe auf der Ebene $k = 3$ (Quantitative-Ebene), vergleiche Bild 5.3, beschreibt die Qualität anhand der IT-Klassierung. Eine Beschreibung der Qualität auf Bauteil-Ebene

⁵ Sogenannte *Total Cost of Ownership* (TCO)

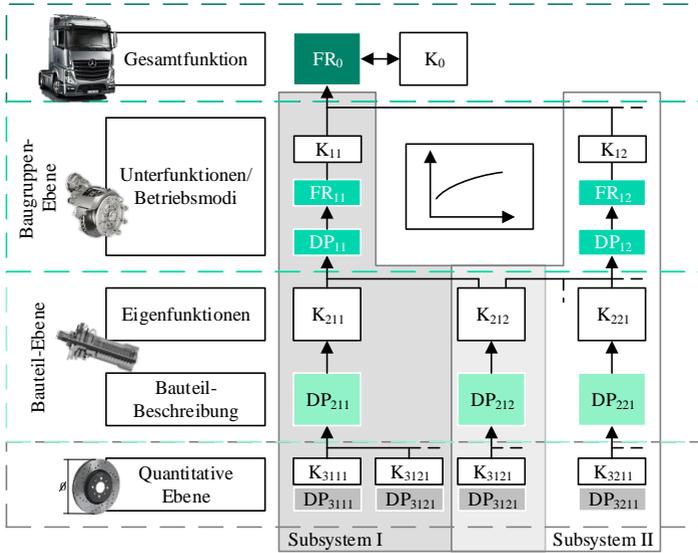


Bild 5.6: Schematischer Aufbau zur Ermittlung der Gesamtfunktion und -kosten

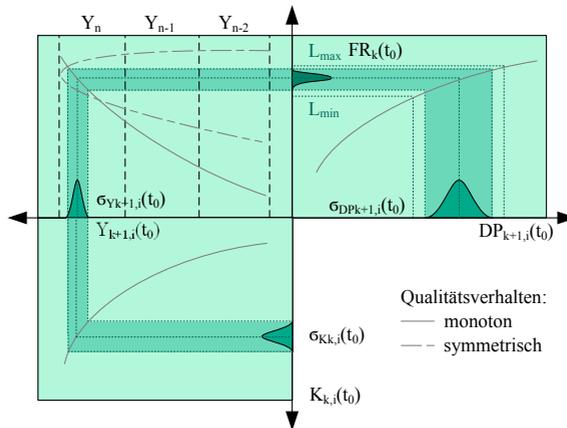


Bild 5.7: Das modifizierte, Prozess-orientierte R^2 -Modell

($k = 2$) erfolgt anhand der Differenzbetrachtung der idealen Funktionsanforderung FR_{ideal} zur Summe aller Funktionsabweichungen FR_{Δ} :

$$Y_{k=2,i,l} = 1 - \frac{\sum FR_{\Delta}}{FR_{ideal}} \quad (5.28)$$

Auf Baugruppen-Ebene ($k = 1$) und bei der Gesamtfunktion ($k = 0$) kann beispielsweise für ein symmetrisches Qualitätsverhalten, die Qualität durch die Abweichung des geforderten Werts im Mittel und der tatsächlichen Größe beschrieben werden:

$$Y_{k=0,1,i} = \begin{cases} \left(1 - \frac{|FR - FR(\mu)|}{L_{max} - FR(\mu)} \right), & FR > FR(\mu) \\ \left(1 - \frac{|FR - FR(\mu)|}{FR(\mu) - L_{min}} \right), & FR < FR(\mu) \end{cases} \quad (5.29)$$

Eine schematische Zusammenstellung des vorgestellten $R^2_{prozess}$ -Modells ist in Bild 5.7 dargestellt.

5.6.2 Feld-orientiertes R^2 -Modell

Mit dem Feld-orientierten R^2_{Feld} -Modell wird der Zusammenhang zwischen der Funktionsfähigkeit und der vom Kunden geforderte Qualität während der Produkteinsatzzeit ($t > t_0$) beschrieben. Ab dem Zeitpunkt des *SOP* werden und können für das R^2 -Modell die *TCO* nicht mehr erfasst werden. Entsprechend ergeben sich für das R^2_{Feld} -Modell im Gültigkeitsbereich $t > 0$ zwei Quadranten nach Bild 5.8. Es ist zu beachten, dass die Qualität $Y_{k,i}$

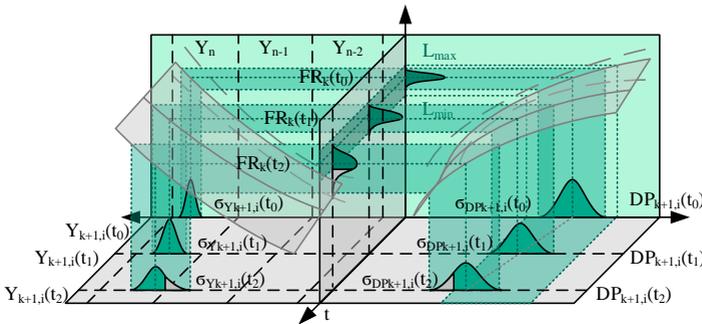


Bild 5.8: Das modifizierte, Feld-orientierte R^2 -Modell (mit monotonem Qualitätsverhalten)

zeitabhängig ist und bei Überschreitung der Qualitätsgrenzen ein merklicher Verlust für den Kunden resultiert. Am Beispiel des gezeigten Modells ist dies der Zeitpunkt $t = 2$. Auch bereits vor diesem Zeitpunkt sind schon Funktionsausfälle vorhanden. Anhand der Übertragungsfunktion beschreiben diese Ausfälle, markiert durch die eingefärbte Fläche rechts der Grenze zwischen Y_n und Y_{n-1} sowie unterhalb der Dichtefunktion, einen Qualitätsverlust, verursacht durch das Überschreiten der Qualitätsgrenzen.

5.7 Fazit zur *Robusten Zuverlässigkeit* R^2 und deren Modellierung

In diesem Kapitel 5 wird die Modellierung der *Robusten Zuverlässigkeit* beschrieben und diskutiert. Die getrennte Betrachtung und Diskussion beider Theorien aus Kapitel 4 zeigt, dass beide ein gemeinsames Ziel verfolgen. Für eine gemeinsame Betrachtung und deren Zusammenschluss wird eine, für diese Dissertation und weiterführende Arbeiten, grundlegende Definition für die *Robuste Zuverlässigkeit* (R^2) festgelegt. Der neue Zusammenschluss wird anhand des R^2 -Modells mit der Beschreibung des Zusammenhangs von *Design Parametern* (DPs) und der geforderten Funktionsfähigkeit FR umgesetzt. Die Verknüpfung von ZUV und *Robustheit* wird mit der Integration der Zeit als fortschreitende ZUV -Kenngröße bewerkstelligt. Zudem wird die Unsicherheit der sich zeitlich ändernden Übertragungsfunktion, die Produkteigenschaften wie Alterungs- oder Ermüdungserscheinung der DPs und das Auftreten von Ausfallarten berücksichtigt. Mit der räumlichen Darstellung wird die Verknüpfung von ZUV und *Robustheit* am Modell diskutiert. Es zeigt sich, dass das Überschreiten der vorgegebenen Grenzen nicht zwangsläufig zum Systemausfall führt. Dies stellt eine mögliche Unterschreitung der Robustheitseigenschaften dar, obwohl die ZUV -Eigenschaften weiterhin erhalten bleiben. Mit dem R^2 -Modell wird anschaulich der direkte Zusammenhang zwischen beiden Theorien aufgezeigt, indem nicht nur die *Robustheit* im Neuzustand, sondern auch deren zeitliche Änderung beschrieben und somit die Entwicklung der ZUV erfasst wird.

Mit dem modifizierten R^2 -Modell werden zudem die Auswirkungen auf die Entstehungskosten und die für den Kunden merkbare Qualität anschaulich beschrieben. Hierfür stehen zwei Beschreibungsmodelle zur Verfügung, das Prozess-orientierte $R^2_{Prozess}$ -Modell und das Feld-orientierte R^2_{Feld} -Modell. Das $R^2_{Prozess}$ -Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen der Funktionserfüllung seitens DPs , der daraus resultierenden Qualität sowie den dafür notwendigen Entstehungskosten. Das R^2_{Feld} -Modell hingegen beschreibt den Zusammenhang von Funktionserfüllung und Qualität während der Einsatzzeit. Allerdings werden hierbei keine herstellungsseitigen Kosten erfasst, da sich Kosten im Feldeinsatz größtenteils auf Garantie- und Kulanzkosten konzentrieren, die nicht Teil dieser Arbeit sind.

Auf die im folgenden Kapitel 6 vorgestellte Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten in der frühen Entwicklungsphase, wird nur das $R^2_{Prozess}$ -Modell angewandt, da das R^2_{Feld} -Modell erst nach dem entwickelten Produkt in der Einsatzzeit modelliert werden kann. Zwar besteht die Möglichkeit einer Prognose des Produktverhaltens, allerdings muss hierfür eine ausreichende Datenbasis zur Verfügung stehen, damit genügend Informationen, beispielsweise über die Umgebungs- oder Nutzungsbedingungen, vorliegen. Dies ist nicht die Aufgabenstellung dieser Arbeit und wird nicht weiter diskutiert, dennoch wurde Vollständigkeit halber das R^2_{Feld} -Modell vorgestellt.

6 Methodik zur Entwicklung robuster, zuverlässiger Produkte mit Anwendungsbeispielen

Systematic Methodology for Axiomatic Robust Reliability-Testing (SMAR²T) ist eine zeitlich geordnete Methodik, basierend auf den drei *Robust Design*-Phasen (*System (SD)*, *Parameter (PD)* und *Toleranz (TD)* Design) des *Off-Line Quality Engineering* nach [TEH89] und erweitert diese um die Erprobungsphase *Robuste Zuverlässigkeitserprobung (R²T)*. Sie vereint Methoden aus den Theorien der *RDM* und der *ZUV* und empfiehlt eine systematische, zeitliche Abfolge zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten.

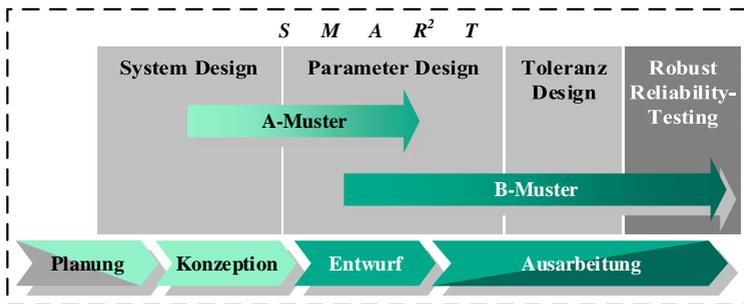


Bild 6.1: SMAR²T mit Design Phasen und Musterständen sowie Einordnung in den PEP

SMAR²T orientiert sich mit seinen vier Phasen (Planung, Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung) an der zeitlichen Einordnung des allgemeingültigen, branchenunabhängigen Produktentwicklungsprozess (PEP) nach der VDI Richtlinie 2221 [VDI93a], vergleiche Bild 6.1. Analog zum PEP wird die nächste Phase erst erreicht, wenn die vorhergehende abgeschlossen ist. Entsprechend können mehrere Iterationsschleifen innerhalb einer Phase bis zum Erreichen des Phasenziels ermöglicht werden. Die Methodik soll die bereits etablierten RD-Methoden *Axiomatic Design (AD)* und *Taguchi Methode (TM)* sowie Methoden aus *Design for Six Sigma (DFSS)* und *Design for Reliability (DFR)*, wie beispielsweise die *Statistische Versuchsplanung (DOE)*, kombinieren. Für eine verbesserte und umfassendere Einordnung unterschiedlicher Entwicklungsstände, berücksichtigt SMAR²T die heutzutage sehr gängigen Musterstände in der Automobilindustrie, vergleiche Tabelle 6.1, [HW13], [KZ11]. Die entsprechenden Entwicklungsstadien werden durch den jeweiligen Musterstand gekennzeichnet. Hierbei entspricht das A-Muster einem Funktionsmuster oder Prototypen, welcher weitestgehend die geforderten, technischen Funktionen erfüllt. Zu diesem Stadium weist das Produkt noch nicht die endgültigen Maße, Werkstoffe und Normen auf und wird

demnach zur Konzeptbewertung herangezogen. B-Muster hingegen eignen sich für die Erprobung im Zusammenhang mit der möglichen Endanwendung. Dabei entsprechen Maße und Werkstoffe weitestgehend den endgültigen Werten. Solange das A-Muster zu Beginn der Entwurfsphase noch verfeinert wird, wird mit der Erstellung des B-Musters simultan begonnen und ist erst am Ende der Ausarbeitungsphase endgültig für die anschließende (Dauer-)Erprobung fertiggestellt. In der darauf folgenden Fertigungsphase, die bereits während der Ausarbeitungsphase beginnen kann, wird zunächst die Produktion vorbereitet und das C-Muster hergestellt.

Tabelle 6.1: Musterstände der Automobilindustrie nach [HW13]

Kategorie	Verwendung	Phase
A-Muster	Funktionsaussage (Funktionsmuster, Versuche); Bestätigung Entwurf / Konzept	Konzept / Entwurf
B-Muster	Erprobung des gesamten Funktionsumfangs und der technischen Anforderungen, geeignet für Dauererprobung	Entwurf / Ausarbeitung (Applikationsentwicklung)
C-Muster	Prüfung zur Erreichung der „Technischen Freigabe“; vorgezogenes Erstmuster	Ausarbeitung / Fertigung (Produktionsvorbereitung)
D-Muster	Vorserie mit Nachweis der Fertigungssicherheit; Erstmuster	Fertigung / Serienlauf

Das eigentliche Grundgerüst von $SMAR^2T$, vergleiche Bild 6.4, bilden die drei zuvor genannten Phasen (SD , PD und TD) sowie die vierte Phase: *Robuste Zuverlässigkeitserprobung* (R^2T), die im Anschluss des TD folgt. Die Struktur ist modular aufgebaut und ermöglicht zu Beginn jeder Phase einen Einstieg in die Methode. Im SD wird ein Entwurf auf Basis der Kundenanforderung ausgelegt. Dieser Entwicklungsabschnitt kann zum Teil der Planungs- und der Konzeptphase zugeordnet werden. Der ausgearbeitete Entwurf (Konzept) wird im PD weiter konkretisiert und optimiert. Im anschließenden TD wird das Konzept hinsichtlich Parametergrenzen und Kosten optimiert, bevor die ersten Prototypen für die darauffolgende R^2T -Phase hinsichtlich Funktionserfüllung, *Robustheit* und Lebensdauer erprobt werden.

6.1 Einordnung von $SMAR^2T$ zu bisherigen Methodiken

Motivation für die Entwicklung von $SMAR^2T$ ist der bestehende Mangel an Vorgaben für die industrielle Umsetzung der RDM . Es gibt Ansätze aus jüngerer Zeit, wie ([BdLS09],[CZW15], [HACA07], [EMS⁺08]), die eine Umsetzung der RDM aufzeigen. Allerdings liegt der Fokus dieser Ansätze überwiegend auf der RDM und weniger auf der ZUV -Integration in den einzelnen Phasen sowie auf einer entsprechenden Empfehlung zur Erprobung des jeweiligen ZUV -Nachweises (Phase 4). Aufgrund der ähnlichen Zielstellung wird im Folgenden

$SMAR^2T$ mit $DCOV$ (eine in der Industrie bereits angewandte Methodik) und [CZW15] (rein wissenschaftliche Methodik) verglichen und bewertet. Im Weiteren wird ein Vergleich und eine entsprechende Abgrenzung von $SMAR^2T$ zu den etablierten QM -Methodiken: DFR und $DFSS$ erarbeitet und abschließend mit der TM und dessen drei Phasen direkt verglichen.

6.1.1 Abgrenzung zu adäquaten Methodiken

Vergleich zum *Define, Characterize, Optimize and Verify Model*

Eine detaillierte und bereits in der Industrie angewendete Vorgehensweise ist die Methodik: *Define, Characterize, Optimize and Verify Model (DCOV)* der Firma *Rolls-Royce*. Mit $DCOV$ kann die Entwicklung von robusten Produkten durch Methodenkombination von RDM und $DFSS$ erreicht werden. $DCOV$ ist ein ganzheitlicher Ansatz, der den Robustheitsaspekt für eine frühzeitige Berücksichtigung von Merkmals-Schwankungen in die Produktentwicklung integriert, vergleiche Bild B.2. Zur Zielerreichung werden Designwerkzeuge nach Tabelle 6.3 angewandt [EMS⁺08]. Beide Ansätze, $DCOV$ und $SMAR^2T$, liefern eine ganzheitliche und

Tabelle 6.2: Vergleich $SMAR^2T$ mit $DCOV$

	$SMAR^2T$	$DCOV$
Motivation & Ziele	Ganzheitliche Methodik zur Entwicklung robuster, zuverlässiger Produkte	Integration von <i>Robustheit</i> in frühe Phasen des <i>PEP</i>
Prinzipien & Denkweisen	Nutzen der Stärken von AD bei Konzeptentwicklung von TM / RDO bei der Parameteroptimierung; Integration in <i>PEP</i>	RDM & $DFSS$
Vorgehensweise	Die drei <i>Off-Line Quality Engineering</i> Phasen integriert in <i>PEP</i> mit systematischer Vorgehensweise und anschließender ZUV -Betrachtung / -Absicherung	Define, Characterize, Optimize and Verify Model

systematische Vorgehensweise zur Produktentwicklung basierend auf den bekannten RD Methoden. Dennoch unterscheiden sie sich in ihrer Motivation, Denk- und Vorgehensweise, vergleiche Tabelle 6.2. Aus der TM werden die Phasen PD und TD angewandt, wohin gegen $SMAR^2T$ die SD Phase anbietet, in der VOC und AD systematisch und chronologisch zusammengefasst sind. Hingegen orientiert sich $DCOV$ in der frühen Phase an der Vorgehensweise nach $DFSS$. Gemeinsam haben beide die abschließende ZUV -Betrachtung, die $SMAR^2T$ jedoch um die detaillierte R^2T Phase bedeutend erweitert.

Vergleich zur Methodik nach [CZW15]

In [XC08] wird ein wissenschaftlicher Ansatz zur Verbindung von AD mit Methoden von RD gezeigt, indem eine mathematische Beziehung zwischen den Axiomen zu *Quality Loss Function* und *Signal-Rausch-Verhältnis* hergestellt wird. In [CZW15] wird eine ähnliche Integration von AD in den Ablauf des SD nach Taguchi gezeigt. Der Unterschied zu $SMAR^2T$

Tabelle 6.3: Vergleich des Methodeneinsatzes von *SMAR²T* und *DCOV*

Methoden ^a	<i>SMAR²T</i>	<i>DCOV</i>	Methoden ^a	<i>SMAR²T</i>	<i>DCOV</i>
<i>VOC</i>	●	◐	<i>SD</i>	●	○
<i>QFD</i>	◐	◐	<i>PD</i>	●	●
Konzeptalternativen generieren	●	◐	<i>TD</i>	●	●
bewerten	●	◐	<i>R²T</i>	●	◐
Statistik	●	◐	<i>ZUV-Modelle</i>	●	◐
Hypothesentests	●	◐	Simulation	●	◐
Modellbildung	●	◐	<i>FMEA</i>	◐	◐
<i>DOE</i>	●	◐	<i>AD</i>	●	○
			<i>SPC</i>	◐	●

Legende: ● wird angewandt ◐ wird teilweise angewandt ○ wird nicht angewandt

^a Auswahl an gemeinsamen Methoden, nicht als gesamten Methodeninhalt der einzelnen Methodiken zu verstehen.

besteht in der Anwendung des *AD*. [CZW15] erweitert das *AD* um die *Fuzzy Logic*, indem *DP*-Abhängigkeiten durch subjektive Meinungen ergänzt wird. Hierbei werden die *FR* mittels *Fuzzy Logic* in drei Module eingeteilt und der Schwerpunkt auf die signifikanten Parameter gelegt, die diese Module beeinflussen. Im Anschluss wird mit dieser Kategorisierung die *TM* angewandt. Im Vergleich zur vorgestellten Methodik von [CZW15], verfolgen beide Methodiken ([CZW15] und *SMAR²T*) die Integration des *AD* im *SD* zur Beschreibung der *Komplexität* mittels *DP*-Abhängigkeiten. [CZW15] integriert zudem die für mechanische Systeme nicht weit verbreitete *Fuzzy Logic*. *SMAR²T* empfiehlt je nach Aufwand den Ansatz der *Evidenz Theorie* zur Beschreibung von Unsicherheiten und wendet darüber hinaus *AD* als Konzeptbewertungswerkzeug an.

6.1.2 Vergleich zu bisherigen Qualitätsmanagement-Methodiken

Tabelle 6.4 zeigt eine Übersicht zum Vergleich der Methodiken *SMAR²T*, *DFR* und *DFSS* anhand der drei zuvor definierten Kategorien beziehungsweise Kriterien: Motivation und Ziele, Prinzipien und Denkweisen sowie Vorgehensweise. Der Vergleich der angewandten Werkzeuge ist in Tabelle 6.5 gelistet. *DFSS* und *DFR* sind ganzheitliche *QM*-Methodiken, die auf eine Null-Fehler Philosophie nach der Produktion beziehungsweise über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg abzielen. Mit dem Ergebnis einer möglichst geringer Fehleranzahl nach der Herstellung des Produkts. *DFSS* verfolgt zudem mittels Promotoren und zahlreichen Werkzeugen das Ziel eines erhöhten Einsatzes von Ressourcen in frühen Entwicklungsphasen in den *PEP*. *DFR* grenzt sich dahingegen ab, dass die Methodik diverse Richtlinien, sogenannte Paradigmen, definiert, um die maximale *ZUV* des Produkts während dessen Lebenszyklus zu erhalten. Hierbei konzentriert sich *DFR* mit dessen Werkzeugen auf die ausführliche Suche der Fehlerursachen sowie die Betrachtung aller entstehenden Kosten während der gesamten Produktlebenszeit. Wie aus Tabelle 6.5¹ ersichtlich wird, bieten alle

Tabelle 6.4: Vergleich *SMAR²T* mit *DFSS* und *DFR*

	<i>SMAR²T</i>	<i>DFSS</i>	<i>DFR</i>
Motivation & Ziele	Ganzheitliche Methodik zur Entwicklung robuster, zuverlässiger Produkte	Null-Fehler Prinzip im Produkt nach der Herstellung	Null-Fehler Prinzip im Produkt über den gesamten Produktlebenszyklus
Prinzipien & Denkweisen	Nutzen der Stärken von <i>AD</i> bei Konzeptentwicklung von <i>TM</i> / <i>RDO</i> bei der Parameteroptimierung; Integration in <i>PEP</i>	Null-Fehler Philosophie, Promotorenkonzept, Prävention statt Reaktion, <i>PEP</i> -Integration	Paradigmas: z.B. Kostenerfassung über gesamte Produktlebenszeit, Fehlerursachenanalyse
Vorgehensweise	Die drei <i>Off-Line Quality Engineering</i> Phasen integriert in <i>PEP</i> mit systematischer Vorgehensweise und anschließender <i>ZUV</i> -Betrachtung	Methoden anhand einer Toolbox systematisch im <i>PEP</i> integriert	Anwendung der <i>ZUV</i> -Methoden über Produktlebenszyklus verteilt

drei Methodiken eine Vielzahl an Werkzeugen an. Welche Werkzeuge wann im *PEP* Anwendung finden, wird bei *DFSS* und vor allem bei *SMAR²T* mit klarer Struktur vorgegeben. Wobei *DFSS* eine individuelle Anpassung an den bereits im Unternehmen vorhandenen *PEP* berücksichtigt. Im Gegensatz zu *SMAR²T* und *DFSS* weist *DFR* keine systematische Vorgehensweise auf, wonach dessen Werkzeuge nach den festgelegten Paradigmen entlang des *PEP* für die einzelnen Entwicklungsaufgaben eingesetzt werden können. Entsprechende Paradigmen geben beispielsweise [Yan07], [Hac07] und [RG12] wieder.

Gemeinsam verwendete Methoden aller drei Methodiken sind die *VOC*, *QFD*, Techniken zum Generieren und Bewerten von Konzeptalternativen, Statistik, Hypothesentests, Modellbildung, *DOE*, *SIM*-Werkzeuge und *FMEA*. Angemerkt sei, dass die letzt genannte Methode bei *SMAR²T* nicht direkt betrieben wird, sondern vielmehr Kenntnisse sowohl von der *FMEA* als auch für das *SD* in *SMAR²T* transferiert werden können. Gemeinsame Werkzeuge für *SMAR²T* und *DFSS* sind die Robustheits- und Toleranzanalysen sowie die Prozessfähigkeitsuntersuchungen, welche bei *SMAR²T* überwiegend in der *TD*-Phase angewandt werden. Ein Unterschied findet sich jedoch in der Anwendung der Toleranzanalyse. *SMAR²T* wendet hierfür das *TD* nach Taguchi an. Die Schnittmenge mit *DFR*-Methoden basiert auf der *SMAR²T*-seitigen Kombination von *Robustheit* und *ZUV*. Hierbei können Methoden wie *ZUV*-Modelle, *POF*, *FMECA*, Testing, *ESS* / *HALT* / *HASS*, *RG* und Beanspruchungsanalysen Anwendung finden.

¹ Ergebnis aus der durchgeführten Recherche und aus der persönlichen Einschätzung heraus formuliert

Tabelle 6.5: Vergleich der Werkzeuge von $SMAR^2T$, $DFSS$ und DFR

Werkzeug	$SMAR^2T$	$DFSS$	DFR	Werkzeug	$SMAR^2T$	$DFSS$	DFR
<i>VOC</i>	●	●	●	<i>SD/PD/TD/R²T</i>	●	○	○
<i>QFD</i>	◐	●	◐	<i>FMECA</i>	◐	○	●
<i>KA bewerten</i>	●	●	●	<i>Testing</i>	●	○	●
<i>KA generieren</i>	●	●	●	<i>ESS/HASS/HALT</i>	●	○	◐
Statistik	●	●	●	<i>RG</i>	◐	◐	●
Robustheits-/ Sensitivitäts- analysen	●	●	○	Beanspruchungs- analysen	●	○	●
Modellbildung	●	●	●	<i>MSA</i>	○	●	◐
<i>DOE</i>	●	●	●	<i>SPC</i>	◐	●	●
<i>SIM</i>	●	●	●	<i>AD</i>	●	●	○
<i>FMEA</i>	◐	◐	●	<i>DFMA</i>	○	●	○
Hypothesentests	●	●	●	<i>DRBFM</i>	○	●	○
Toleranzanalyse	●	●	○	<i>FRACAS</i>	○	○	●
Prozessfähigkeit	●	●	○	<i>DRBFM</i>	○	○	●
<i>ZUV-Modelle</i>	●	○	●	<i>POF</i>	●	○	●
<i>ZUV-Allokation</i>	○	○	●	Garantie- vorhersage	○	○	●

Legende: ● wird angewandt ◐ wird teilweise angewandt ○ wird nicht angewandt

6.1.3 Betrachtung von $SMAR^2T$ und RDM

Die TM gliedert sich in die drei Hauptphasen: SD , PD und TD , vergleiche Kapitel 3.1.2. $SMAR^2T$ basiert auf diesen drei genannten Phasen und erweitert diese um die vierte Phase *Robuste Zuverlässigkeitserprobung* (R^2T). Für den direkten Vergleich ist in Bild 6.2 die Gegenüberstellung beider Vorgehensweisen dargestellt. $SMAR^2T$ zeigt einen Weg, wie ein strukturierter und funktionsbasierter Systementwurf mit einer verringerten *Komplexität* mittels AD in der SD -Phase realisiert werden kann. TM legt in dieser Phase die Art, Technologie und Komponenten des Systems fest, allerdings ohne konkrete Vorgehensweise. Im PD verfolgen beide das Ziel einer optimalen, nominalen Definition der Einstellstufen der DPs . $SMAR^2T$ erweitert zudem diese Phase um die ZUV -Abschätzung, indem sie früh im Entwicklungsprozess mittels virtueller Produktkenntnis die Lebensdauer des Konzepts in Form von Lage und Streuung prognostiziert. In der letzten Phase werden in beiden Ansätzen Kosten- und Leistungs-optimierte Toleranzen der DPs bestimmt. Dies geschieht bei TM mittels der QLF und bei $SMAR^2T$ anhand entsprechender Kostenmodelle nach dem Prinzip des modifiziertem $R^2_{Prozess}$ -Modells. Im Vergleich gibt $SMAR^2T$ dem Anwender eine, in

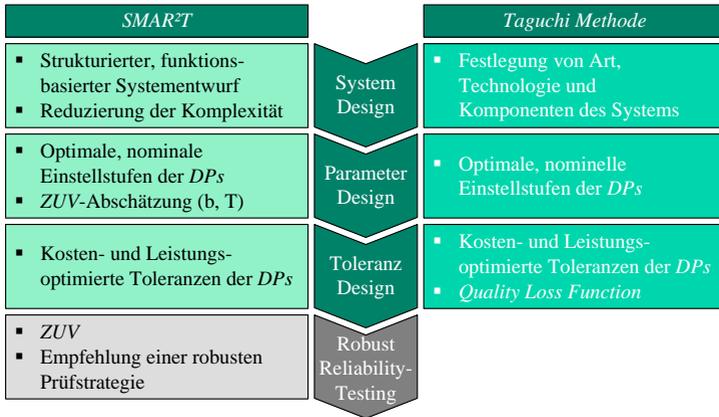


Bild 6.2: Direkter Phasenvergleich von $SMAR^2T$ mit der Taguchi Methode

ihrer chronologischen Abfolge, detaillierte Anleitung als Werkzeug für die Gestaltung robuster, zuverlässiger Produkte an die Hand. *TM* zeigt zwar beispielsweise nach [UD91] eine ausführliche Anleitung allerdings ausschließlich für die *PD*-Phase. Für die anderen zwei Phasen wird nur ansatzweise ein praktikabler und strukturierter Ansatz vorgegeben.

6.1.4 Schnittmenge von $SMAR^2T$ mit *RDM* und *ZUV*-Methoden

Die R^2 -Theorie vereint die *RDM* und die *ZUV*. Folglich ergibt sich aus der Verbindung der beiden Theorien eine Liste von Methoden und Werkzeugen, die prinzipiell flexibel in R^2 verwendet werden können, vergleiche gesamte Methodenauflistung in Bild 6.3 sowie in Tabelle 6.5. Bei der Betrachtung der jeweiligen Methodik im Vergleich mit $SMAR^2T$, können die erwähnten Methoden, wie *AD*, explizit und in vollem Umfang angewendet werden. Zusätzlich werden Methoden, wie die *Checkliste*, bei Bedarf und je nach Aufgabenstellung hinzugezogen. Bild 6.3 zeigt die getrennte, domänenspezifische Methodenauflistung beider Theorien sowie die Schnittmenge der gemeinsam angewandten Methoden. Hierbei wird zusätzlich zur diskutierten Definitionsabhängigkeit in Kapitel 4 auch die bildliche Methodenabhängigkeit der sich überschneidenden Methoden und Werkzeuge gezeigt. Diese Methoden können nicht gezielt auf eine Theorie beziehungsweise Methodik zurückverfolgt werden, da sie sowohl auf robuste als auch auf zuverlässige Systeme angewandt werden, vergleiche Tabelle 6.5. Welche Methoden letztendlich in welcher Phase von $SMAR^2T$ angewendet werden kann, hängt vom Einzelfall ab. Für eine allumfassende Empfehlung müssen noch Erfahrungen in der Anwendung gesammelt werden. Allerdings werden in dieser Arbeit mit den gezeigten Anwendungsbeispielen erste Einsatzempfehlungen zu jeder einzelnen Phase gegeben. Dabei werden sowohl Methoden aus der gemeinsamen Schnittmenge als auch vereinzelt Methoden aus den beiden anderen Theorien eingesetzt.

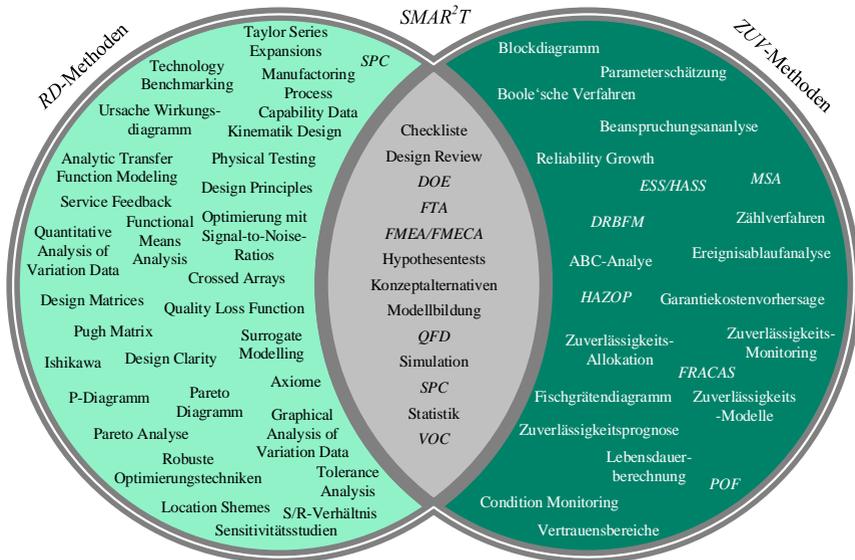


Bild 6.3: Methodenschnittmenge von $SMAR^2T$, RDM und ZUV

6.1.5 Zusammenfassung und Fazit zur Methodik-Abgrenzung

Aufgrund unzureichender Hinweise zur praktischen Umsetzung in der Industrie, findet *RDM* bislang als ganzheitlicher Ansatz zum *PEP* relativ geringe Anwendung. Dies könnte an dem Mangel an bestehenden Methodiken, die keine klare und zeitlich orientierte Vorgehensweise vorgeben, sowie an fehlenden *RDM*-Methoden im frühen *PEP* liegen. $SMAR^2T$ knüpft hier an und gibt einen Lösungsansatz zu diesen Defiziten an, indem die Stärken von *AD* gezielt früh im *PEP* eingesetzt werden. Zusätzlich wird eine systematische, chronologische Vorgehensweise, orientiert am *PEP* nach [VDI93a], mit den drei *RDM*-Entwicklungsphasen und der vierten Erprobungs-Phase aufgezeigt. Somit ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Produktentwicklung, bei dem im Mittelpunkt der *Robustheits*- und *ZUV*-Gedanke steht, gegeben. Dabei wird neben den zwei beschriebenen, umfangreichen *QM*-Methodiken ein vergleichbarer Ansatz geschaffen, der gezielt auf die Philosophien von *RDM* und *ZUV* setzt. $SMAR^2T$ weist, analog zu *DFSS*, eine hohe Methodenvielfalt und infolgedessen eine individuelle Anwendungsflexibilität an einen unternehmensspezifischen *PEP* auf. Gegenüber *DFR* gibt $SMAR^2T$ zudem einen klar strukturierten Ablauf vor. $SMAR^2T$ wurde gezielt als Stellvertreter von *RDM* und für eine ganzheitlichen, funktionsorientierte Entwicklungsmethodik, unter Berücksichtigung der *ZUV*, entwickelt.

In den nachfolgenden Kapiteln wird $SMAR^2T$ und ihre Vorgehensweise beziehungsweise ihre Phasen, vergleiche Gesamtübersicht in Bild 6.4, an Funktionsbaugruppen des in Kapitel 7 vorgestellten Anwendungsbeispiels, einer Nachstelleinheit von Bremssystemen für Nutzfahrzeuge der Firma *Knorr-Bremse Sfn GmbH*, vorgestellt und im Detail beschrieben.

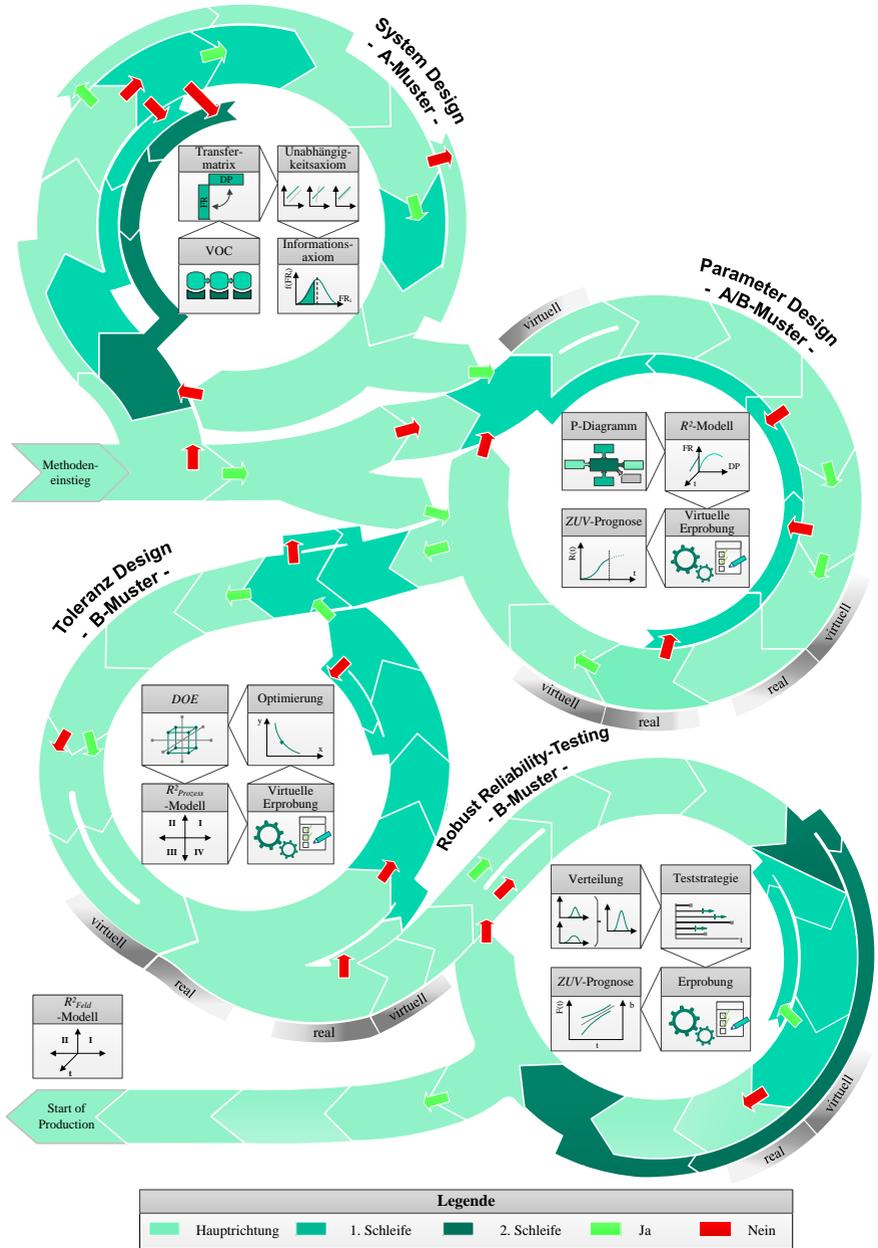


Bild 6.4: Schematische Gesamtansicht von *SMAR²T*

6.2 System Design nach *SMAR²T*

Das *SD* bietet eine Hilfestellung bei der Konzeptfindung mittels *Axiomatic Design (AD)* mit der Zielstellung geringer *Komplexität*². Besteht vor Anwendungsbeginn von *SMAR²T* bereits ein Konzept beziehungsweise ein Entwurf, muss geklärt werden, ob optimale Nominalwerte der *DPs* bekannt sind. Falls diese noch bestimmt werden müssen, beginnt der Einstieg in die Methodik mit der Anwendung des *AD* zum *PD*. Mit Hilfe des *AD* kann das Konzept hinsichtlich *Komplexität* bewertet und zudem eventuelle Entwurfsfehler aufgedeckt und verbessert werden. Bestehen bereits optimal nominale *DPs*, kann direkt in die *TD*-Phase eingestiegen werden. Weist das Muster bereits robuste Toleranzgrenzen auf und ist hinsichtlich der Aufwandskosten optimiert, kann direkt in die Phase des *R²T* übergegangen werden, vergleiche Bild 6.4 sowie die Detailbilder 6.5, 6.14, 6.26 und 6.31.

6.2.1 Anwendungsbeispiel für das System Design

Aufgrund der Übersichtlichkeit zur Erklärung des *SD*, wird als erste Funktionsbaugruppe der Nachstelleinheit der Freilauf bestimmt. Dieser hat die Funktion einen Kraftfluss eindirektional in Arbeitsrichtung zu übertragen und in entgegengesetzter Richtung den Kraftfluss zu trennen. Zur Umsetzung dieser Anforderung stehen drei verschiedene Funktionsgruppen von Freiläufen zur Verfügung: *Überholkupplung*, *Schaltwerk* und *Rücklaufsperre*. Nachdem nicht die Funktion eines Lagers vorliegt, müssen für die Konstruktion entsprechend Lage- und Funktionskonzepte integriert werden. Es werden zwei Konzepte von Freilaufvarianten vorgestellt, bewertet und ein Entwurf für die anschließende *PD*-Phase definiert. Die Konzeptvarianten sind die *Nachstelleinheit der dritten Generation (N3G)* mit dem Kegelkonus-Freilauf (*KKF*) und die *Modifizierte Nachstelleinheit der dritten Generation (N3G⁺)* mit dem Klemmrollen-Freilauf (*KRF*). Zur Begriffsdefinition nach [SH61] wird im Folgenden für die Klemmrollenfreiläufe charakteristisch die mit *Klemmflächen* ausgestattete Komponente als *Stern* und die Komponente mit der zylindrischen *Klemmbahn* als *Ring* bezeichnet. Je nach Richtung und Lage der Funktionswirkung werden die genannten Bezeichnung mit den Präfixen *Außen-* und *Innen-* erweitert.

Für die Funktion der Nachstelleinheit dient der Freilauf als *Rücklaufsperre*, indem in Sper- richtung anhand der Momentübertragung eine Nachstellung erfolgt, um bei dem verschleiß- bedingten Bremsvorgang eine zu geringe Bremswirkung zu kompensieren. Um diese Kom- pensation aufrecht zu erhalten, muss eine Rückstellung des Nachstellvorgangs verhindert werden, entsprechend unterbricht der Freilauf den Kraftfluss. Das Konzept des *KRF* im Ver- gleich zum *KKF*, vergleiche Bild 6.6 und die Funktionsblockdiagramme (*FBDs*) in Bild 6.7, unterscheidet sich im Wesentlichen durch die Klemmfunktion. Die Klemmwirkung besteht bei beiden Freiläufen in Umfangsrichtung, wohingegen beim *KKF* die Unterbrechung des Kraftflusses in axialer Richtung und beim *KRF* in Umfangsrichtung erfolgt. Eine detaillierte Funktionsbeschreibung beider Konzepte erfolgt im nächsten Kapitel mit der Definition der *Design Matrix (DM)*.

² In diesem Zusammenhang mit der Bedeutung der nicht redundanten Funktionsbeeinflussung je *DP*

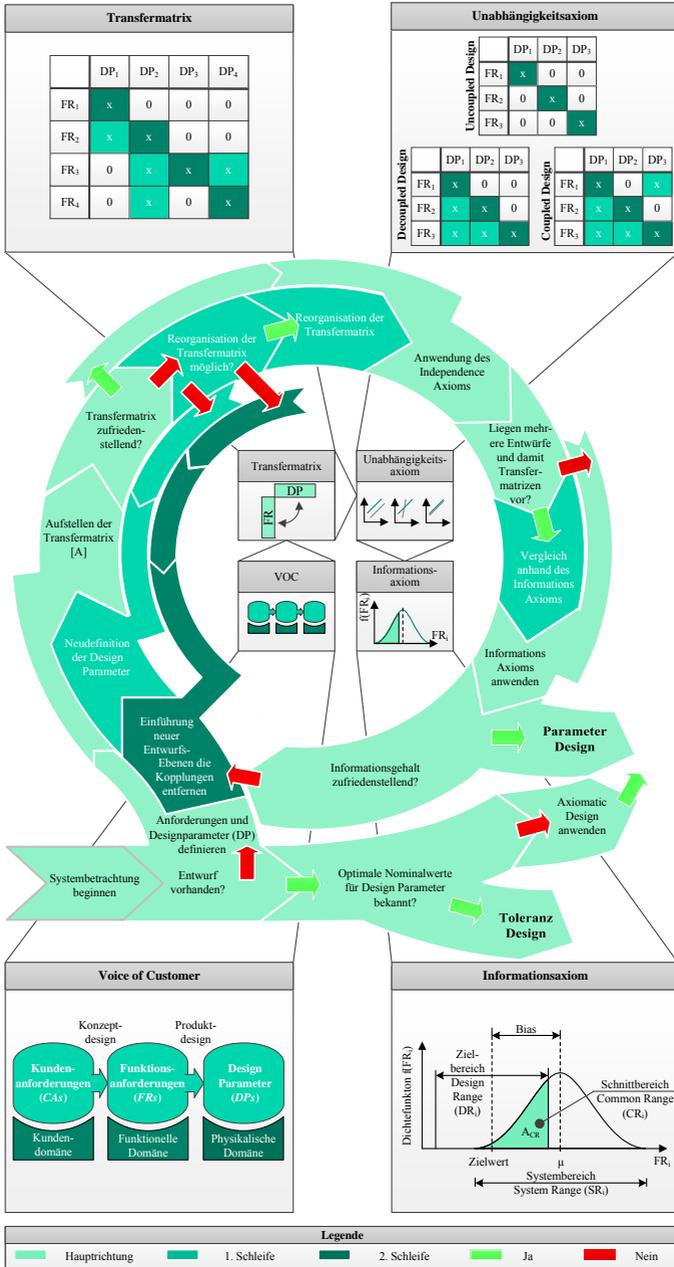


Bild 6.5: System Design in SMAR²T

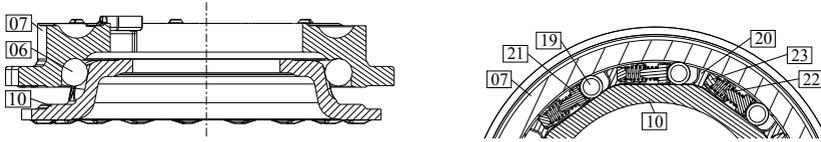


Bild 6.6: Freilaufvarianten der Nachstelleinheit N3G (links) und N3G⁺ (rechts)

6.2.2 Systemanalyse - Dömanenzuordnung

Im ersten Schritt des *SD* werden auf Basis der *Kundenanforderungen (CAs)*, vergleiche Tabelle 6.6, die *Funktionsanforderungen (FRs)* und die *Design Parameter (DPs)* bestimmt. Die *CAs* werden direkt aus dem Lastenheft definiert, aus denen die *FRs* und die zugehörigen *DPs* nach dem Prinzip der *VOC-Methode* sowie mit Hilfe der Domänenzuordnung nach dem *AD* eingeteilt werden, vergleiche Kapitel 3.1.3 sowie 5.4. Anschließend werden

Tabelle 6.6: Qualitative Kundenanforderungen an das Freilauf-Konzept

#	Vorgang	Anforderung
1	Nachstellung	Während des Nachstellvorgangs muss der Freilauf ein Moment übertragen.
2	Überlast	In diesem Betriebsmodus soll der Freilauf gesperrt bleiben und in Wirkrichtung an den Bauteilschnittstellen innerhalb sowie an der Systemgrenze keine Relativbewegung zulassen.
3	Rückstellung	Der Rückstellvorgang verläuft in entgegengesetzter Nachstellrichtung, dabei soll der Kraftfluss unterbunden und der angetriebene Stern in Ausgangslage gebracht werden, wohingegen der Ring in der nachgestellten Position bleibt.

die *FRs*, geordnet nach ihrer Wichtigkeit, in oberster Ebene in aufsteigender Reihenfolge durchnummeriert und mittels des Zuordnungs- und Dekompositionsprozesses die Umsetzung der *FRs* in zugehörige *DPs* ausgedrückt. Bestehen mehrere Konzeptvarianten der *DPs*, können diese über eine morphologische Vorgehensweise aufgelistet und nach dem Kriterium der geringsten *Komplexität* angewandt werden. Entsprechend kann diese Priorisierung in der *DM* gesetzt werden, vergleiche Bild 6.11. Bevor diese *DM* aufgestellt wird, ist es von Vorteil, für die Komponentenzuordnung eine Funktionsbetrachtung des Konzepts mittels *Funktionsblockdiagramm (FBD)* und für deren Wirkungszusammenhang mittels *Wirkungszusammenhangsdiagramm (WZD)* aufzustellen.

6.2.3 Konzeptfindungsmöglichkeiten

Im vorliegenden Anwendungsbeispiel sind bereits zwei Konzepte zur Aufgabenstellung definiert. In den meisten industriellen Anwendungsfällen wird auf *Vorwissen*, das heißt auf bewährten Konzepten beziehungsweise Produktlösungen aufgebaut. Schwerpunkt dieser Dissertation ist das Aufzeigen einer chronologischen und systematischen Vorgehensweise,

infolgedessen wird an dieser Stelle nicht weiter auf die Methoden der Konzeptfindung eingegangen, dennoch soll Tabelle 6.7 eine Auswahl geeigneter Methoden darstellen.

Tabelle 6.7: Methodenauswahl zur Konzeptfindung

Methode	Beschreibung	Quelle
Allgemein wiederkehrende Methoden	Analyse, Abstraktion, Synthese, Methode: gezieltes Fragens / Negation und Neukonzeption / Vorwärts- und Rückwärtsschreitens	[PBWC95]
Analogiebetrachtung	Analyse bekannter Systeme (Bionik, Messungen, etc.)	[PBWC95]
<i>AD</i>	Methode zum strukturierten Entwurf von Systemen	[Suh01]
Diskursiv-,	Ordnungsschemata; Konstruktionskataloge	[CH12]
Intuitiv-betonte Methoden	Brainstorming; Methode 635; Delphi Methode; Brainwriting; Galeriemethode; Synektik	[CH12]
<i>TRIZ</i>	Theorie des erfinderischen Problemlösens	[Kle14b]

6.2.4 Wirkzusammenhangsdiagramm

Grundlegende, funktionale Systembetrachtungen nach [PBWC95], [SW00] oder [OW03] sollten für ein verbessertes System-/ Konzeptverständnis in *Funktionsblockdiagrammen FBDs*³ modelliert werden. In *SMAR²T* wird in erster Linie das *FBD* angewandt, dessen funktionsbasierte Analyse und Modellierung ausführlich in [BL04] beschrieben ist. Die *FBDs* der beiden Konzepte sind in Bild 6.7 dargestellt. Hierbei werden die Komponenten mit ihren Schnittstellen und Übergängen zu benachbarten Komponenten mit deren Verbindungsart dargestellt. Prinzipiell existieren zwei Bewegungsarten: translatorische und rotatorische Bewegung sowie deren Kombination. Die Übergänge sind entweder form- und/oder kraftschlüssig. Bestehende Wellen-Naben-Verbindungen dienen zur Lagerung und sind in den Freiläufen zentriert.

Anhand der Systemstruktur ist ersichtlich, dass die Konzeptlösung *KKF* (Bild 6.7 (a)) die Lagerung des Freilaufs außerhalb der Systemgrenze und nicht wie beim *KRF* (Bild 6.7 (b)) innerhalb der Funktionsbaugruppe aufweist. Mit den *Kugeln 5,4 mm (61)* und der *Passscheibe (11)* werden zwar eine axiale Lagerung zum und aus dem System realisiert, allerdings haben beide eine weitere Funktionalität, beispielsweise muss die *Passscheibe (11)* ein *Haltemoment* realisieren. Bei der Betrachtung des zweiten Konzepts (*KRF*) erscheinen auf den ersten Blick mehr Bauteile, was eine erhöhte *Komplexität* vermuten lässt, allerdings besteht hierbei die Lagerung innerhalb des Systems und erfüllt nur diese *FR*. Für eine weitere Beurteilung der *Komplexität* sollte das, aus dem *FBD* abgeleitete, *WZD* (Bild 6.8) für eine erweiterte Betrachtungsweise aufgestellt werden. Diese Art der Systemmodellierung bietet

³ Anmerkung: In dieser Arbeit werden die *FBDs* nach der *ZUV*-Theorie angewandt, beispielsweise nach [BL04]. Diesbezüglich stehen diese Diagramme nicht im direkten Zusammenhang mit den Funktionsdiagrammen aus der Konstruktions-Theorie.

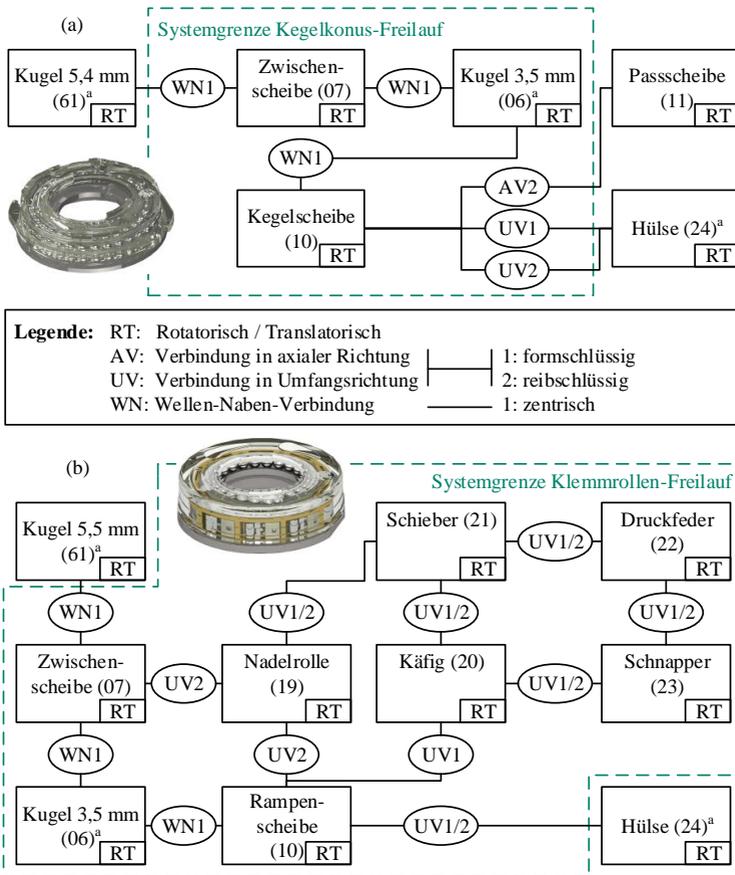


Bild 6.7: Funktionsblockdiagramm^a: Kegelkonus-Freilauf (a) und Klemmrollen-Freilauf (b)

^a ▶ Bauteilnummerierung ist aufgrund Geheimhaltung von der Nachstelleinheit $N3G$ beziehungsweise $N3G^+$ auf die Nachstelleinheit $N2G$ angepasst.

▶ Kugeln 3,5 mm (06) im KRF sind in Bild 6.6 nicht dargestellt. Die Kugeln dienen zur Axiallagerung zwischen den beiden Scheiben.

▶ Die Kräfteinleitung an der Systemgrenze wird über die Kugeln 5,4 mm beziehungsweise 5,5 mm (61) realisiert, beim $N2G$ über die Kugeln 3,5 mm (61).

▶ Die Schnittstellenanbindung an der Systemgrenze in Nachstellrichtung wird beim $N3G$ und beim $N3G^+$ über die Hülse (24) realisiert, beim $N2G$ hingegen über die Kugeln 5,4 mm (81).

gewisse Vorteile zum Funktionsverständnis. Mit dem WZD können neben dem Kraftfluss auch die bestehenden Betriebsmodi abgebildet werden. Daraus lassen sich weitere Abhängigkeiten ableiten, da nicht in jedem Betriebsmodi jede Komponente Einsatz findet, vergleiche Ebenenbetrachtung des R^2 -Modells.

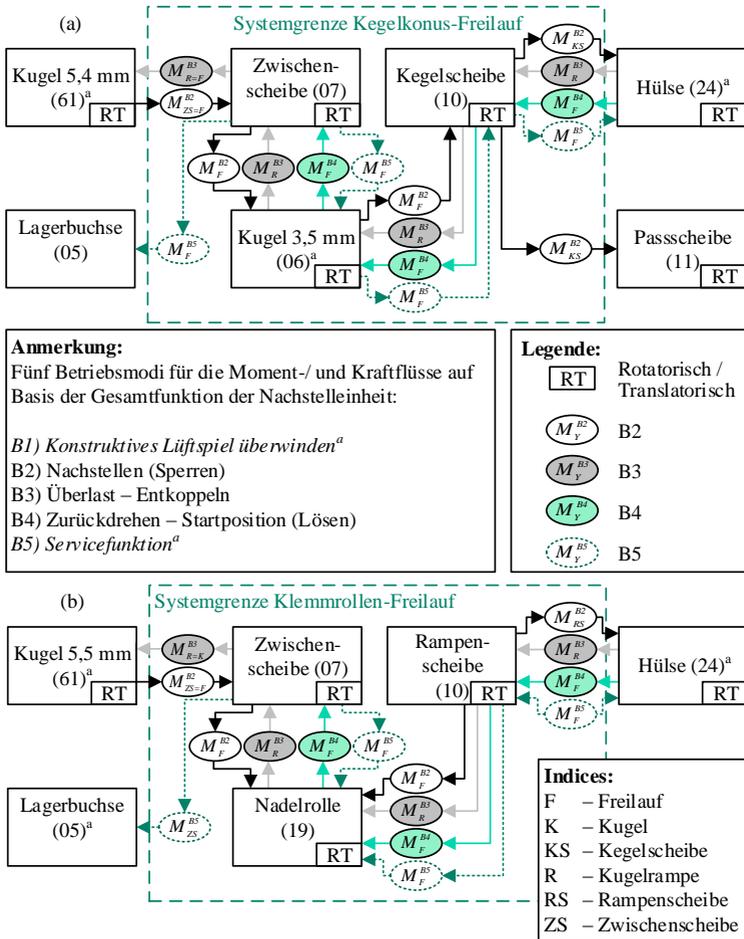


Bild 6.8: Wirkzusammenhangsdiagramm^a: *Kegelkonus-Freilauf* (a) und *Klemmrollen-Freilauf* (b)

^a ▶ Bauteilnummerierung ist aufgrund Geheimhaltung von der Nachstelleinheit *N3G* beziehungsweise *N3G⁺* auf die Nachstelleinheit *N2G* angepasst.

- ▶ Kugeln 3,5 mm (06) im *KRF* sind in Bild 6.6 nicht dargestellt. Die Kugeln dienen zur Axiallagerung zwischen den beiden Scheiben.
- ▶ Die Krafteinleitung an der Systemgrenz wird über die Kugeln 5,4 mm beziehungsweise 5,5 mm (61) realisiert, beim *N2G* über die Kugeln 3,5 mm (61).
- ▶ Die Schnittstellenanbindung an der Systemgrenz in Nachstellrichtung wird beim *N3G* und beim *N3G⁺* über die Hülse (24) realisiert, beim *N2G* hingegen über die Kugeln 5,4 mm (81).
- ▶ Betriebsmodus 1 (B1): Bei diesem Betriebsmodus wird keine Klemmfunktion benötigt.
- ▶ Servicefunktion: Betriebsmodus der im Fall von verschlissenen Bremsbelägen eintritt.

Im Vergleich der zwei Konzeptvarianten weisen beide ähnliche Wirkzusammenhänge auf. Dargestellt sind die Moment- und Kraftflüsse der entsprechenden fünf Betriebsmodi, siehe Kapitel 7, wobei der erste Betriebsmodus *Konstruktives Lüftspiel überwinden* kein Einwirken auf den Freilauf hat. Entsprechend wird dieser Modus nicht betrachtet. Bei allen anderen Betriebsmodi werden alle dargestellten Komponenten berücksichtigt, bis auf die Komponente *Passscheibe (11)*. Diese leitet im zweiten Betriebsmodus das benötigte Moment zum *Nachstellen* weiter, obwohl sie die priorisierte Funktion der axialen Lagerung hat. Für die Gesamtbeurteilung der *Komplexität* der Konzepte wird anschließend mit der gewonnenen Erkenntnis der Funktionsabhängigkeiten die *DM* aufgestellt. Zuvor sollten die Modelle anhand der aufgestellten *WZDs* in sogenannte *Surrogates Modelle* überführt werden, wenn die *Komplexität* die funktionale Modellierung der Konzepte ermöglicht. Dieser Zwischenschritt erwirkt eine strukturierte Funktionsbetrachtung und gibt Indizien zur Kriterienerfüllung.

6.2.5 Erste Modellierungsmöglichkeiten

Für die erste Überprüfung von Konzepten zur Funktionalität hinsichtlich *CAs* dienen erste Modellierungsmöglichkeiten, wie:

- ▶ *CAD- oder Kinematikmodell*,
- ▶ Starrkörpermodell / Mehrkörpersysteme und
- ▶ FEM-Modell von Strukturkomponenten,

vergleiche dazu die Modellierung von *Physikalischen Surrogates* in Kapitel 2.2.2. Durch einfache Kinematikmodelle auf Basis von *CAD*-Daten, werden erste Untersuchungen hinsichtlich des Arbeitsraums durchgeführt. Bei der Anwendung von kinetischen und kinematischen Verhaltensanalysen der beweglichen Mechanismen werden sogenannte Mehrkörpersysteme eingesetzt, die mithilfe von Starrkörpern simuliert werden. *FEM*-Berechnungen unterstützen dabei die Dimensionierung der Strukturkomponenten und deren Festigkeitsnachweise. Die Auslegung der Freiläufe ist nicht Schwerpunkt dieser Arbeit und erfolgt separat. Angewendet wird die Methode der *Kinematikmodelle* sowie die Auslegung nach [SH61]. Als Ergebnis erfüllen beide Freiläufe die *CAs*, da sie den drei genannten Anforderungen nach Tabelle 6.6 nachkommen.

6.2.6 Design-Matrix und Gewichtungsfaktoren

Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse aus der Funktionsbetrachtung und deren Wirkzusammenhänge kann die *DM*⁴ modelliert werden. Hierbei wird die Beziehung von *FR* zum *DP* mit der Frage:

- ▶ *Kann der DP_j konstruiert werden, ohne FR_i zu beeinflussen?*

mit $i, j \in \mathbb{N}^*$, erreicht. Wird die Frage positiv beantwortet besteht keine direkte Abhängigkeit und es erfolgt in der verknüpften Zelle der Eintrag $DM_{ij} = 0$, andernfalls wird die Abhängigkeit mit $DM_{ij} = x$ oder $DM_{ij} = 1$ gekennzeichnet. Die Abhängigkeitsprüfung und Modellierung der *DM* erfolgt bei beiden Freiläufen auf Basis der *FR-DP*-Zuordnung nach

⁴ vergleichbar mit der Theorie der *Schluß-Matrix* nach [Rot00]

den erstellten Tabellen 6.8 und 6.9.⁵ Angemerkt sei, dass eine eindeutige Trennung beziehungsweise Zuordnung einer Funktion von einem *DP* bei der qualitativen Formulierung nicht immer zu realisieren ist. Entsprechend kann ein klassischer Mix aus Funktionen auftreten, die funktionale Beziehungen zwischen den Bauteilen beschreiben. Die Auflistung ist dennoch essenziell für die weitere Konzept-Realisierung, bei der die vermeidliche, funktionale Beziehung in *DP* überführt wird. Nachdem die Beziehungen und Abhängigkeiten kategorisiert sind, folgt im Anschluss die Aufstellung der beiden *DMs*, vergleiche Bild 6.9 und Bild 6.10. Mittels Sichtprüfung können diese auf erkennbare *Ent-* oder *Ungekoppelten Systeme* hin überprüft werden. Beide Konzepte zeigen im DP_{1x} eine gekoppelte Struktur. Allerdings kann final keine Beurteilung getroffen werden, da mittels *Reorganisation* überprüft wird, ob ein entkoppeltes Design erfolgen kann oder tatsächlich eine gekoppelte Struktur bestehen bleiben soll.

(a)	DP ₁	DP ₂	DP ₃	(b)	DP ₁₁	DP ₁₂	DP ₁₃
FR ₁	x	0	0	FR ₁₁	x	x	x
FR ₂	0	x	0	FR ₁₂	x	x	x
FR ₃	0	0	x	FR ₁₃	x	x	x

(c)	DP ₂₁	DP ₂₂	DP ₂₃	(d)	DP ₃₁₁	DP ₃₁₂	DP ₃₁₃
FR ₂₁	x	0	0	FR ₃₁₁	x	x	0
FR ₂₂	0	x	0	FR ₃₁₂	0	x	0
FR ₂₃	x	0	x	FR ₃₁₃	0	x	x

Bild 6.9: Design Matrix des *Kegelkonus-Freilaufs*

(a)	DP ₁	DP ₂	DP ₃	DP ₄	(b)	DP ₁₁	DP ₁₂
FR ₁	x	0	0	0	FR ₁₁	x	x
FR ₂	0	x	0	0	FR ₁₂	x	x
FR ₃	0	0	x	0			
FR ₄	0	0	0	x			

(c)	DP ₂₁	DP ₂₂	(d)	DP ₃₁	DP ₃₂	(e)	DP ₃₁₁	DP ₃₁₂
FR ₂₁	x	0	FR ₃₁	x	0	FR ₃₁₁	x	0
FR ₂₂	0	x	FR ₃₂	x	x	FR ₃₁₂	x	x

Bild 6.10: Design Matrix des *Klemmrollen-Freilaufs*

Wird eine Abhängigkeit registriert, gilt es diese in eine konstruktive Lösung mit einer möglichst geringen Abhängigkeit zu anderen *DPs* umzusetzen. Bei manchen Konstruktionslösungen kann es der Fall sein, dass mehrere Möglichkeiten realisierbar sind. Zur Unterstützung der Auswahl einer geeigneten Lösung kann mit Hilfe einer morphologischen Gewichtung

⁵ Hierbei können die Funktionen und deren *FRs* nach dem *Kanonischen System* von Funktionen und Funktionsanforderungen formuliert werden, vergleiche [Rot00].

Tabelle 6.8: Zuordnung von *FRs* und *DPs* des Kegelkonus-Freilaufs

#	<i>Funktionsanforderung (FR)</i>	<i>Design Parameter (DP)</i>
1	Ermögliche Momentübertragung von <i>ZS (07)</i> auf <i>KS (10)</i>	<i>Wellen-Naben-Verbindung (WNV)</i> über <i>KKF</i>
2	Halte Nachsteller in nachgestellter Position	Baugruppe <i>KKF</i>
3	Realisiere Überlastfunktion	Verbindung zwischen <i>Hülse (24)</i> und <i>KS (10)</i> ratscht durch (Formschluss)
1.1	Übertrage Moment von <i>ZS (07)</i> auf <i>KS (10)</i>	<i>Wellen-Naben-Verbindung</i> mit <i>K35 (06)</i> , die sich in Formschrägen befinden
1.2	Gewährleiste Translation der <i>ZS (07)</i> zur Gewährleistung der Funktion des Freilaufs	Angrenzende Bauteile mit Form-/Reibschluss für <i>ZS (07)</i>
1.3	Gewährleiste Rotation der <i>ZS (07)</i> um die eigene Achse	Angrenzende Bauteile mit Form-/Reibschluss für <i>ZS (07)</i>
2.1	Unterbreche Kraftübertragung von <i>SG</i> über <i>K54 (61)</i> auf <i>ZS (07)</i> (<i>KKF</i> öffnen)	<i>K54 (61)</i> , die sich in Rastpunkten zwischen <i>SG</i> und <i>ZS (07)</i> befinden
2.2	Stütze <i>KS (10)</i> wieder auf <i>PS (11)</i> ab	Reibschlüssige Haltekraft der <i>DF</i>
2.3	Unterbreche Momentübertragung von <i>ZS (07)</i> auf <i>KS (10)</i>	<i>K35 (06)</i> , die in Formschrägen nicht mehr im Eingriff sind
3.1	Verhindere Rotation der <i>KS (10)</i>	<i>KKF</i> sperrt durch Kraftübertragung von <i>ZS (07)</i> auf <i>KS (10)</i>
3.2	Verhindere Rotation der <i>ZS (07)</i> in Rückstellrichtung	Anschlag auf <i>LB (05)</i> (Ausgangsposition, <i>ZS (07)</i>)
1.2.1	Lasse Spiel zwischen <i>ZS (6)</i> und <i>SG (7)</i> zu	Spiel durch <i>K54 (9)</i> in Rastpunkten zwischen <i>SG (7)</i> und <i>ZS (6)</i>
1.2.2	Lasse Spiel zwischen <i>ZS (07)</i> und <i>KS (10)</i> zu	Spiel durch <i>K35 (06)</i> , die sich axial verschieben können
1.3.1	Stütze <i>ZS (07)</i> auf <i>SG</i> ab	<i>K54 (61)</i>
1.3.2	Stütze <i>ZS (07)</i> auf <i>KS (10)</i> ab	<i>K35 (06)</i>
3.1.1	Gewährleiste kleine Relativbewegung zwischen <i>ZS (07)</i> und <i>SG</i>	Versetzter Anschlag in der <i>ZS (07)</i>
3.1.2	Übertrage Kraft von <i>SG</i> auf <i>ZS (07)</i>	<i>K54 (61)</i> , die in Rastpunkten von <i>SG</i> auf <i>ZS (07)</i> gedrückt werden
3.1.3	Übertrage Haltemoment von <i>ZS (07)</i> auf <i>KS (10)</i>	<i>WNV</i> mit <i>K35 (06)</i> , die sich in Formschrägen befinden

^a *Schaltgabel*, vorgeschaltetes Bauteil von *K54 (61)*, außerhalb der Systemgrenze; für den Gesamtkontext vergleiche Kapitel 7 sowie *FBD* in Bild B.3 und *WZD* in Bild B.4 der Nachstelleinheit im Anhang.

^b *Druckfeder*, nachgeschaltetes Bauteil von *Hülse (24)*

Tabelle 6.9: Zuordnung von *FRs* und *DPs* des Klemmrollen-Freilaufs

#	<i>Funktionsanforderung (FR)</i>	<i>Design Parameter (DP)</i>
1	Ermögliche Momentübertragung von <i>ZS (07)</i> auf <i>RS (10)</i>	<i>Wellen-Naben-Verbindung (WNV)</i> über <i>KRF</i>
2	Halte Nachsteller in nachgestellter Position	Baugruppe <i>KRF</i>
3	Realisiere Überlastfunktion	Verbindung zwischen <i>Hülse (24)</i> und <i>RS (10)</i> ratscht durch (Formschluss)
4	Lagere axial	<i>K55 (61)</i>
1.1	Übertrage Moment von <i>ZS (07)</i> auf <i>RS (10)</i>	<i>WNV</i> mit <i>NR (19)</i> , die einrastet
1.2	Gewährleiste Rotation der <i>ZS (07)</i> um die eigene Achse	Angrenzende Bauteile mit Form-/Kraftschluss für <i>ZS (07)</i>
2.1	Unterbreche Kraftübertragung von <i>SG</i> auf <i>ZS (07)</i> (<i>KRF</i> öffnen)	<i>K55 (61)</i> , die sich in Rastpunkten zwischen <i>SG</i> und <i>ZS (07)</i> befinden
2.2	Unterbreche Momentübertragung von <i>ZS (07)</i> auf <i>RS (10)</i>	<i>NR (19)</i> in entkoppelnder Richtung überträgt keine Momente
3.1	Verhindere Rotation der <i>RS (10)</i>	<i>NR (19)</i> dreht mit <i>ZS (07)</i> in entkoppelnder Richtung mit und <i>RS (10)</i> steht
3.2	Verhindere Rotation der <i>ZS (07)</i> in Rückstellrichtung	Anschlag in <i>LB (05)</i> (Ausgangsposition, <i>ZS (07)</i>)
3.1.1	Gewährleiste kleine Relativbewegung in Rückstellrichtung zwischen <i>ZS (07)</i> und <i>SG</i>	Versetzter Anschlag in der <i>ZS (07)</i>
3.1.2	Übertrage Kraft von <i>SG (9)</i> auf <i>ZS (10)</i>	<i>K55 (21)</i> , die in Rastpunkten von <i>SG (9)</i> auf <i>ZS (10)</i> gedrückt werden

^a *Schaltgabel*, vorgeschaltetes Bauteil von *K54 (61)*, außerhalb der Systemgrenze; für den Gesamtkontext vergleiche Kapitel 7 sowie *FBD* in Bild B.3 und *WZD* in Bild B.4 der Nachstelleinheit im Anhang.

eine Rangliste erstellt werden, wie beispielsweise die bildliche Gewichtungslandschaft in Bild 6.11. Diese Landschaft ergänzt die klassische Transfermatrix um die Gewichtungssache, die jede *FR-DP*-Realisierungsmöglichkeit bewertet. Dabei gilt folgender Leitsatz:

Je höher der Gewichtungsgrad, desto größer die Kopplung zwischen der geforderten FR und dem zugeordneten DP.

Im Beispiel der Konzeptvarianten der Freiläufe werden keine weiteren Lösungsvarianten betrachtet, sondern aus diesen beiden Varianten die weiterführenden Konzepte abgeleitet. Der direkte Vergleich und die Bewertung wird mittels *Unabhängigkeits-* und *Informationsaxiom* erfolgen. In den folgenden Tabellen 6.8 und 6.9 sind die Beziehungen der *FRs* und der *DPs* gegeben.

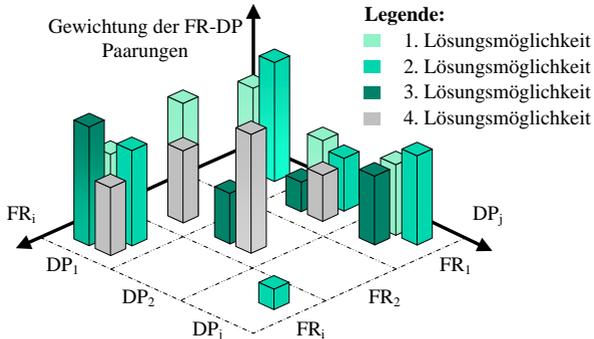


Bild 6.11: Gewichtungslandschaft der *DM*

6.2.7 Reorganisation

Nach [LF08], vergleiche Kapitel 3.1.3, stehen unterschiedliche Methoden und Algorithmen zur Entkopplung beziehungsweise Bewertung von Abhängigkeiten zur Verfügung. Diese sind die *Reorganisation*, die *Überarbeitung* und die *Erweiterung* des Entwurfs sowie die *Internalisierung* der Zyklen. Wobei die letzten drei Möglichkeiten erst in Betracht gezogen werden, wenn eine *Reorganisation* aufgrund interner Zyklen nicht durchgeführt werden kann. In den beiden *DMs* der Freiläufe bestehen keine internen Zyklen, entsprechend wird die Methode der *Reorganisation* angewandt. Hierfür stehen unterschiedliche Algorithmen zur Verfügung. Die bekanntesten davon sind [Suh01], [Mel03], [Lee06], [LJ06] und [BR11]. Die Spanne reicht von sehr einfacher Anwendung mit zufriedenstellendem Ergebnis, [Suh01], bis hin zur komplexeren Anwendung mit sehr genauem Ergebnis, [Lee06]. Es wird der Algorithmus nach [BR11] angewandt, da er sich für die in Kapitel 7 komplexe Reorganisation bewährt hat (bester Kompromiss zwischen Optimierungspotential und Aufwand), obwohl aufgrund der geringen Dimension der Transfermatrix (kleiner als 4) nach [Lee06] eine Sichtprüfung ausreichen würde.

6.2.8 Unabhängigkeitsaxiom

Nach den drei Ausprägungen der *DM*, vergleiche Kapitel 3.1.3, werden die beiden *DMs* der Freiläufe nach einer möglichen *Reorganisation* bewertet. Bei der Vollmatrix des *KKF* der ersten Unterfunktion FR_{1x} , Bild 6.9 (b), gibt es keine Struktur der *DPs*, in der die *FRs* unabhängig voneinander realisiert werden können. Werden im Gegensatz die einzelnen *DMs* des *KRF*-Entwurfs betrachtet, vergleiche Bild 6.10, wird durch die Einführung eines weiteren DP_4 die Lagerung separat realisiert und somit eine Koppelung des DP_1 entnommen. Bestehen bleibt eine gekoppelte Verbindung, die im Weiteren, zusammen mit dem ersten Entwurf, näher untersucht werden soll. Zwar existieren weitere Abhängigkeiten einer *FR* zu mehreren *DPs*, dennoch genügt die Auswahl derer, die ihre Platzierung unterhalb der Hauptdiagonalen haben und somit erlaubte Verbindungen darstellen. Für den *KKF* Entwurf sollen im Folgenden die genannten Möglichkeiten zur Eliminierung des Zyklus durchgeführt

Tabelle 6.10: Entkopplungsmöglichkeiten der *DM*

#	Maßnahme	Potential & Umsetzung		Bewertung
1	Reorganisation	Abschwächung des Zyklus	x	Erfolgreiche Umsetzung & Kopplungsidentifikation
2	Internalisation	Abschwächung des Zyklus	0	Keine Verbesserung durch Zusammenführung
3	Modifikation	Beseitigung des Zyklus	x	Entwurfsänderung zum <i>KRF</i>
4	Extension	Beseitigung des Zyklus	0	Redundante <i>DPs</i> nicht umsetzbar
5	Unifikation	Beseitigung des Zyklus	0	Keine Vereinigung möglich
6	Externalisierung	Beseitigung des Zyklus	0	Keine Aufdeckungsmöglichkeit

werden. Nach Tabelle 6.10 ist die zuvor durchgeführte *Reorganisation* eine Möglichkeit den Zyklus abzuschwächen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der *Internalisation*. Hierbei müssten mehrere *FR-DP*-Paarungen zusammengeschlossen werden, was in der gegebenen Aufgabenstellung zu einer Zusammenfassung auf oberster Dekompositionsebene führen würde und somit zu keiner direkten Vereinfachung beziehungsweise Entkopplung. Die Entkopplung nach dem Prinzip der Beseitigung des Zyklus mittels *Extension*, *Unifikation* und *Externalisierung* können nicht umgesetzt werden, da entweder eine Vereinigung oder eine Aufdeckungsmöglichkeit von weiteren Dekompositionsmöglichkeiten existiert.

Im Fall der *Externalisierung* sei beispielhaft in Bild 6.12 deren Maßnahmenauswirkung gezeigt. Die $FR_{1x}-DP_{1x}$ -Paarung des *KRF* wird durch Einfügen eines redundanten Systems aufgelöst. Der DP_{13} und die FR_{13} werden dupliziert und ergeben im ersten Schritt die Matrix (b), vergleiche Bild 6.12 (b). Im nächsten Schritt erfolgt ein zweites Duplizieren der $FR_{12}-DP_{12}$ -Paarung. Das Ergebnis ist eine entkoppelte Matrix (c) mit unidirektionaler Wirkrichtung. Allerdings entspricht die Duplizierung einer sekundären Einführung einer Rotation und Translation der *Zwischenscheibe* durch eine neue Schnittstelle. Dieser Aufwand würde gegen das Prinzip des *AD* verstoßen und zudem zu erhöhten Kosten führen. Folglich wird diese analog zu den anderen Maßnahmen verworfen. Die letzte Entkopplungsmaßnahme ist die *Modifikation*. Diese könnte zielführend sein, wenn die Anstellung beziehungsweise die Eliminierung des Spiels zur direkten Klemmung erfolgt. Dies würde zur Veränderung des Designs in Richtung *KRF* führen. Zwar ist der *KRF* nicht komplett nach dem *Unabhängigkeitsaxiom* lösbar, dennoch weist er eine geringere *Komplexität* auf. Entsprechend der Entkopplungsmaßnahme des *KKF* und der geringen *Komplexität* soll final mit dem *Informationsaxiom* das Design des *KRF* untersucht und bewertet werden.

6.2.9 Informationsaxiom

Nachdem die Einhaltung der funktionalen Anforderung des *KRF* mit dem *Unabhängigkeitsaxiom* überprüft wurde, wird der gültige Entwurf mittels quantitativem Maß des *Infor-*

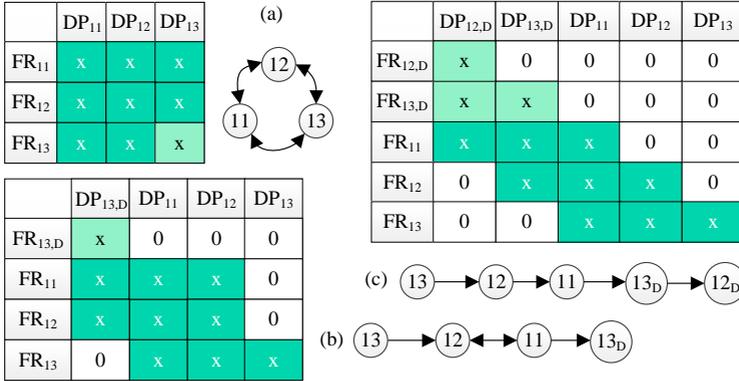


Bild 6.12: Entkopplungsmöglichkeit der Extension der *DM* des *Kegelkonus-Freilaufs*

mationsaxioms bewertet. Diese Bewertung erfolgt durch Aussagen über Erfolgswahrscheinlichkeiten der Entwurfsziele, indem zusätzliche Informationen, wie Entwurfsgleichungen für die Realisierung des Designs, in Betracht gezogen werden. Nach [Suh01] ist der Informationsgehalt *I* durch die Erfolgswahrscheinlichkeit $P(FR_i)$ eines Entwurfs, mit welcher Wahrscheinlichkeit dieser in der Lage ist, die *FR* zu erfüllen, definiert. Im Fall von mehreren Entwürfen, wird derjenige Entwurf mit dem der größten Erfolgswahrscheinlichkeit und damit mit dem höchsten Informationsgehalt zur Realisierung der *FR* verwendet. Analog zur Gewichtungsmatrix, vergleiche Bild 6.11, wird die *DM* nach dem Informationsgehalt gewichtet betrachtet. Diese modifizierte Betrachtungsweise sowie deren Berechnung des Informationsgehalts des Gesamtsystems basiert auf der Herleitung in Kapitel 3.1.3. Der Informationsgehalt berechnet sich ausschließlich auf der untersten Dekompositionsebene und wird als gewichtete Summenbetrachtung der Erfolgswahrscheinlichkeit der einzelnen *FR_i* im Verhältnis zur Gesamtfunktion *FR_j* addiert:

$$I_{sys} = \sum_{i=1}^m 1 + \log_{10} P(FR_i | FR_{\{j\}}) \quad , \quad (6.1)$$

mit der geforderten Ziel- und berechneten Systemspanne:

$$ZS_i = [zs_i^u, zs_i^o] \quad \text{und} \quad SS_i = [ss_i^u, ss_i^o] \quad . \quad (6.2)$$

Als Formulierung der zu vergleichenden Basis der Systeminformation I_{sys} ist die geforderte bidirektionale Momentübertragung bei einem sehr geringem Ansprechwinkel. Entsprechend werden für die sechs untersten Dekompositionspaarungen quantifizierbare Zielmerkmale definiert. Anschließend wird durch Wahl einer geeigneten Modellierungsmöglichkeit die Systemspanne ermittelt und final der Informationsgehalt des Gesamtsystems berechnet, vergleiche Bild 6.13. Zusammengefasst ergibt sich folgende Vorgehensweise:

- *Aufstellen der Zielspanne,*

- ▶ Berechnung der Systemspanne mit den Simulationsmodellen,
- ▶ Berechnung der Erfolgswahrscheinlichkeit und der Systeminformation und
- ▶ Konzeptbewertung.

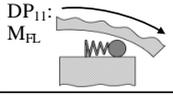
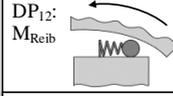
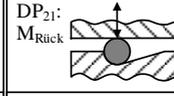
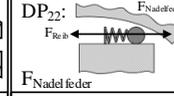
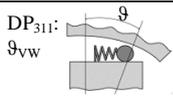
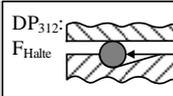
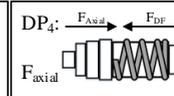
 <p>DP₁₁: M_{FL}</p>	 <p>DP₁₂: M_{Reib}</p>	 <p>DP₂₁: M_{Rück}</p>	 <p>DP₂₂: F_{Nadelfeder} F_{Reib}</p>
$zS_{11} = [9,5...10,5] \text{ Nm}$ $ss_{11} = [9,8...10,3] \text{ Nm}$	$zS_{12} = [0,01...0,02] \text{ Nm}$ $ss_{12} = [0...0,03] \text{ Nm}$	$zS_{21} = [0...0] \text{ Nm}$ $ss_{21} = [0...570] \text{ Nm}$	$zS_{22} = [4,2...6,3] \text{ N}$ $ss_{22} = [0...9,2] \text{ N}$
$I_{11} = 0,0145$	$I_{12} = 0$	$I_{21} = 0$	$I_{22} = 0$
 <p>DP₃₁₁: θ_{VW}</p>	 <p>DP₃₁₂: F_{Halte}</p>	 <p>DP₃₂: M_{LB}</p>	 <p>DP₄: F_{axial} F_{DF}</p>
$zS_{311} = [0,2125...4]^\circ$ $ss_{311} = [0...1,5]^\circ$	$zS_{312} = [0...10] \text{ N}$ $ss_{312} = [0...1265] \text{ N}$	$zS_{32} = [0...10] \text{ Nm}$ $ss_{32} = [0...10] \text{ Nm}$	$zS_4 = [0...10] \text{ N}$ $ss_4 = [0...1265] \text{ N}$
$I_{311} = 0$	$I_{312} = 0$	$I_{32} = 1$	$I_4 = 1$
<p>Bedingung:</p> <p>DP₁₁: M_{FL} > M_{flach} DP₂₁: M_{Rück} < M(F_{DF}) DP₃₁₂: F_{Halte} < F_{DF} DP₄: F_{axial} >> F_{DF} DP₁₂: M_{FL} < M(F_{DF}) DP₂₂: F_{Nadelfeder} < F_{reib} DP₃₂: M_{LB} >> M_{Rück}</p>			

Bild 6.13: Informationsgehalt des Klemmrollen-Freilauf

Als Grenze ist ein Informationsgehalt von 40 % mit einer Erfolgswahrscheinlichkeit von 60 % für die Freigabe zur Anwendung der anschließenden PD-Phase gegeben. Mit einem $I_{Sys} = 0,33$ bit des KRF kann die SD-Phase abgeschlossen werden, andernfalls müsste bei einer Nicht-Erfüllung eine zweite Schleife gestartet werden.

6.3 Parameter Design nach SMAR²T

In dieser Phase von SMAR²T wird der Entwurf hinsichtlich Robustheit und ZUV untersucht und unter Berücksichtigung der technischen Realisierbarkeit der nominellen Einstellstufen der DP optimiert. Hierfür wird zu Beginn der Phase das P-Diagramm definiert, das System auf Basis des AD und des WZD ganzheitlich erfasst sowie das R²-Modell systematisch modelliert. Daraus können mit der geeigneten Simulationstrategie und Modellierungsmethode mit anschließender Sensitivitätsbetrachtung und Optimierung die nominellen, robusten Einstellstufen bestimmt werden. Im Anschluss wird mittels der Virtuellen Lebensdauerermittlung (VLE) und dem R²-Modell die Lebensdauer sowie die ZUV hinsichtlich Funktionserfüllung abgeschätzt. Die ZUV-Analyse auf Basis von VLE und dem R²-Modell liefern Prognosen zum Ausfallverhalten des optimierten Designs infolge statistisch streuender DP's unter Präsenz von äußeren und inneren Störgrößen. Je nach technischer Realisierbarkeit und geforderter ZUV können in dieser Phase mehrere Iterationsschleifen vonnöten sein. Eine Detail-Übersicht der PD-Phase gibt Bild 6.14.

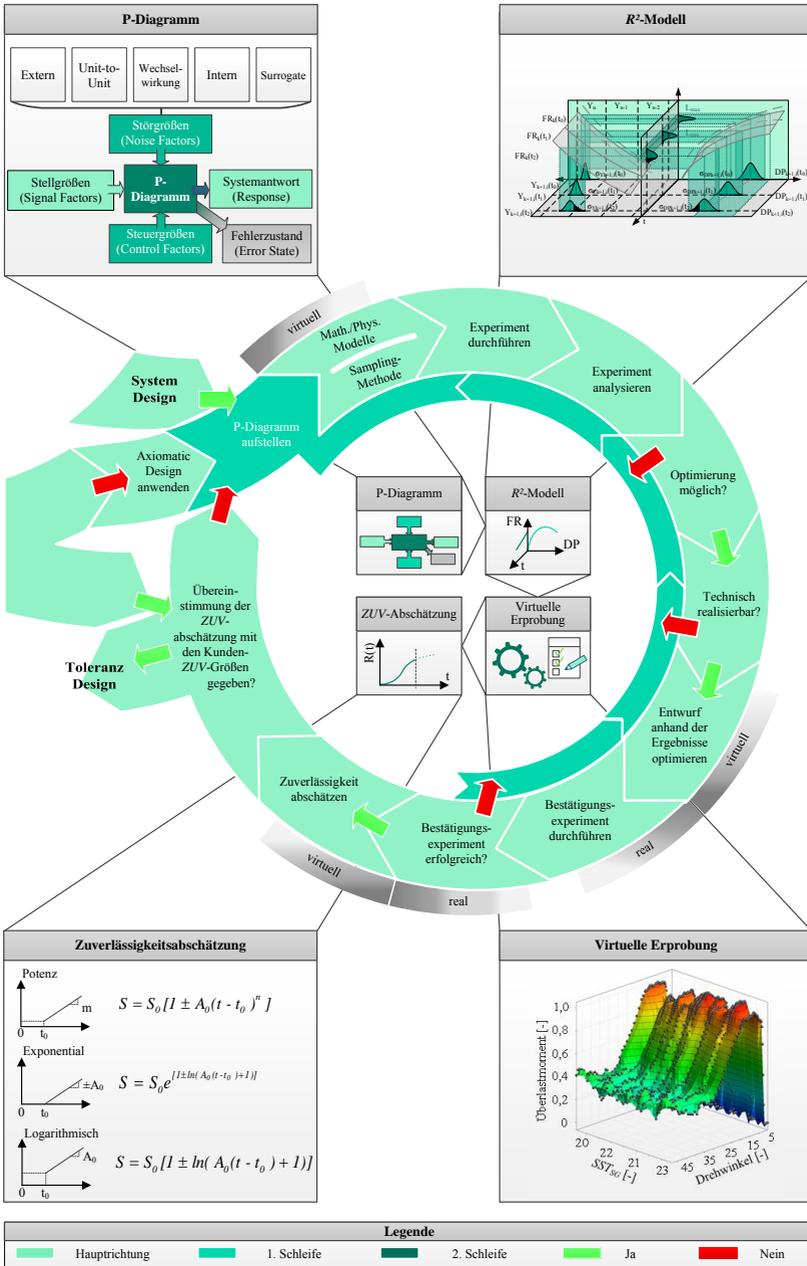


Bild 6.14: Parameter Design in SMAR²T

6.3.1 Anwendungsbeispiel des Parameter Design

Als Demonstrator für das PD soll die Funktionsbaugruppe *Kugelrampe / Überlastkupplung (KR)* der Nachstelleinheit dienen, vergleiche Bild 6.15. Diese Baugruppe erfüllt eine zentrale Funktion der Nachstelleinheit und ist maßgeblich an der korrekten Funktionsweise der Nachstelleinheit beteiligt. Sie muss diese unmittelbar bei Kontakt der Bremsbeläge mit der Bremsscheibe vor dem zu hohen Bremsmoment schützen, bei gleich bleibenden rotatorischen Krafteinfluss. Aufgrund des induzierten Gegenmoments, welches um ein vielfaches größer als das Antriebsmoment ist, können sich die Gewindespindeln und folglich die *Zwischenscheibe (ZS)* nicht mehr verdrehen. Die *Schaltgabel (SG)* hingegen leitet nach wie vor eine Antriebsbewegung weiter, beispielsweise aufgrund eines stärkeren Bremsvorgangs. Zum Schutz der filigranen Mechanik muss in diesem Betriebsmodus⁶ das System folglich entkoppelt werden, da es sonst zu Gewalt- oder Ermüdungsbrüchen kommen kann. Ist das Überlastmoment zu gering, kann das Nachstellverhalten negativ beeinflusst werden, indem sich die Kupplung bei einem geringeren Verdrehwinkel öffnet somit ein notwendiges Nachstellen unterbunden wird und infolgedessen sich ein zu großes Lüftspiel⁷ einstellt.

Bei diesem Betriebsmodus wird die Rotations- in eine Translationsbewegung umgeleitet. Im darauffolgenden Betriebsmodus, bei dem die Bremse gelöst und die Antriebsrichtung umgekehrt wird, erfolgt die Umleitung einer rückwirkenden Translations- in eine Rotationsbewegung. Realisiert wird diese Transformation hauptsächlich durch die Bahnkontur der Scheiben und den *Kugeln mit Käfig*, wobei der *Käfig* ausschließlich für die Positionierung der *Kugeln* zuständig ist und im Weiteren nicht betrachtet wird.

Die komplexe Rampengeometrie besteht aus flacher werdenden Nuten, an deren tiefsten Stellen *Rastpunkte (RP)* für die *Kugeln* liegen, die einen etwas größeren Durchmesser als die *Kugeln* selbst aufweisen. Die Nuten sind auf einem definierten *Bahnradius (BHR)* sowohl auf der *SG* als auch auf der *ZS* angeordnet. Im zweiten Betriebsmodus liegen die *Kugeln* im *RP* und werden durch die eingeleitete Drehbewegung in die *Steile Steigung (SST)* gedrückt. Die *Rastpunkttiefe (RPT)* definiert die Tiefe des *Rastpunktdurchmesser (RPD)* bezüglich der beginnenden *SST*.

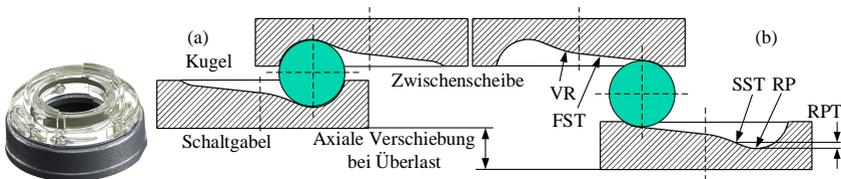


Bild 6.15: Anwendungsbeispiel der PD-Phase: Überlastkupplung

Bei einem Grenzdrehmoment bewegen sich die *Kugeln* aus den *RP*s heraus und rollen über den *Verbindungsradius (VR)* auf einer *Flachen Steigung (FST)* hinauf. Die *SG* dreht sich aufgrund der eingeleiteten Bewegung weiter, was eine axiale Verschiebung der *ZS*, in Folge

⁶ Es existieren beim Bremsvorgang insgesamt vier Betriebsmodi: *Konstruktives Lüftspiel überwinden, Nachstellvorgang, Überlastmodus und Zurückdrehen*, vergleiche hierzu Kapitel 7.

⁷ Konstanter Sicherheitsabstand zwischen Bremsscheibe und Bremsbelag

der abrollenden *Kugeln* verursacht, vergleiche Bild 6.15 (b). Durch die axiale Verschiebung wird die *Druckfeder* (DF)⁸ zusammengedrückt. Beim Zurückdrehen in die Ausgangslage gibt die DF diese Energie frei, um die Bauteile in ihre axiale Ausgangslage zurückzuschieben.

6.3.2 P-Diagramm

Beginnend mit dem Ausstieg aus der SD -Phase oder mit dem direkten Einstieg über die Bewertung eines bestehenden Designs mittels AD , wird das P-Diagramm hinsichtlich Zielgröße (Robustheitsmaß) und Stellgröße sowie zu untersuchenden Steuer(Signal)- und Störgrößen aufgestellt, vergleiche Bild 6.16. Für die KR ist die zu optimierende Zielfunktion das maximal übertragbare Moment M_{Rampe} , da sie nur indirekt das *Lüftspiel* beeinflusst und somit das *Lüftspiel* in dieser lokalen Betrachtung nicht die Zielgröße darstellt. Das KR überträgt das Nachstellmoment bis zu einem bestimmten Überlastmoment. Die Last wird mittels rotatorischer Bewegung eingeleitet und ergibt somit die erste Stellgröße. Zudem wird ein Zeitpunkt benötigt, der das Öffnen der KR definiert. Konkret wird das im Nachsteller über das eingeleitete Gegenmoment erreicht. Dieses kann als Zeitpunkt verstanden werden, bei dem die KR mit der Öffnung beginnt. Genau definiert wird dieser Zeitpunkt durch das alte Lüftspiel s_{alt} , das im vorherigen Takt im Nachsteller vorhanden ist. Daraus lässt sich nicht nur exakt bestimmen, wie viel nachgestellt werden muss sondern auch der Zeitpunkt zum Öffnen der KR . Das alte Lüftspiel bildet somit die zweite Stellgröße, um den Wirkzusammenhang der KR zwischen den einzelnen Größen zu komplettieren. Als Steuergrößen werden die Geometrieparameter der Abrollbahn sowie deren Toleranzen verwendet. Diese können innerhalb gewisser Bereiche nach Belieben variiert werden. Störgrößen bilden zum einen nicht beeinflussbare Parameter wie Alterung, Temperatur sowie Schwankungen der Materialeigenschaften. Zum anderen werden Parameter, die nicht innerhalb der Systemgrenze der KR liegen, aber dennoch Einfluss auf die Funktion nehmen, als Störgröße betrachtet. Konkret handelt es sich dabei um die DF , die aufgrund ihrer Vorspannung eine Kraft über die KS auf die KR ausübt. Zu große oder zu geringe Überlastmomente führen zu einer Fehlfunktion und müssen vermieden werden.

6.3.3 Simulationsstrategie

Die RDM beschreibt Methoden zu geeigneten Simulationsstrategien, vergleiche Kapitel 3.1.2 und 3.1.4 sowie die aufgabenspezifische, systematische Vorgehensweise in Kapitel 6.6. Es wird an dieser Stelle nur auf die entsprechenden Kapitel verwiesen und nicht weiter auf die einzelnen Methoden eingegangen. Angemerkt sei, dass eine Definition der Simulationsstrategie eine gute Systemkenntnis voraussetzt, bei der eine Zielgröße und möglichst alle Einflussgrößen identifiziert und in der Modellierung berücksichtigt werden können. In dem vorgelegten Beispiel ist die Zielgröße der Momentfluss in Abhängigkeit des Verdrehwinkels. Um ein $META$ -Modell zu entwickeln muss zunächst die Simulationsstrategie sowie die Systemgrenze angepasst werden, da einzelne SUB -Modelle⁹ nicht mehr im globalen Wirkungszusammenhang stehen.

⁸ In Bild 6.15 nicht dargestellt, vergleiche hierzu Kapitel 7 sowie FBD in Bild B.3 und WZD in Bild B.4 der Nachstelleinheit im Anhang.

⁹ Vergleiche hierzu die Simulationsstrategie und SUB -Modellierung in Kapitel 6.6.3.

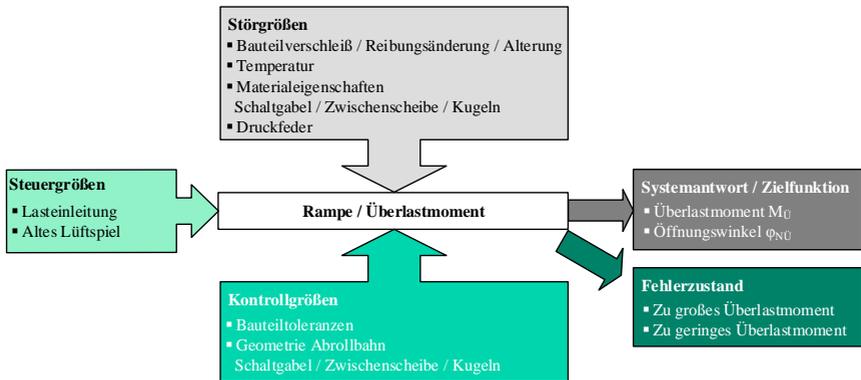


Bild 6.16: Lokales P-Diagramm des Betriebsmodus: Überlast - Kugelrampe

Bei der in diesem konkreten Beispiel angewandten Modellierung von *META*-Modellen auf *FE*-Basis, werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse mit Hilfe der *LHS*-Methode, vergleiche Kapitel 2.2.1, verschiedene Design-Kombinationen berechnet und ausgewertet. Dabei werden die Werte für die Parameter diskret vorgegeben, um sicher zu stellen, dass auch die Parametergrenzen in das *Sampling* mit einbezogen werden. Bei einem kontinuierlichen *Sampling* mit geringen Stichproben werden häufig die Parametergrenzen nicht erfasst, was folglich den Parameterraum nicht ganz abdeckt und eventuelle Wirkzusammenhänge unterschätzt werden. Aus eigenen Untersuchungen geht hervor, dass in den Randbereichen mehr Designs ausgewählt werden sollten, damit eine bessere Modellqualität des *META*-Modells erreicht wird. Eine genaue Vorgabe der Designpunkte der Parameter sowie deren Dezimaltaktung sind daher empfehlenswert. Ermittelt werden Effekte durch die vorliegenden Korrelationen im System, die sich aus der Auswertung der Sensitivitätsstudie ergeben. Sämtliche untersuchte Parameter werden nach der Erstellung des *META*-Modells in *SIM-SMAR²T* übernommen, vergleiche Kapitel 6.6.3, indem sie mit unterschiedlichen Kombinationen im Gesamtsystem ausgewertet werden. Vor diesem Hintergrund findet keine strikte Trennung der Parameter in Kontroll- oder Störgrößen statt. Allerdings werden die klassifizierten Parameter nach dem P-Diagramm für eine weiterführende Optimierung und Robustheitsanalyse benötigt.

6.3.4 Simulationsmodellierung

Die Sensitivitätsanalyse wird im Rahmen von *SMAR²T* durchgeführt, um ein tiefgreifendes Systemverständnis zu erhalten und um das *META*-Modell der Überlastfunktion für das Basis-Modell *SIM-SMAR²T* zu erstellen. Die rotatorische Lasteinleitung wird nicht als Signalfaktor in die Parametervariation einbezogen, da sie lediglich die gewünschte Wirkung im System hervorruft. Änderungen können funktionale Probleme bis hin zum Gesamtverlust der Funktion der *KR* verursachen. Die Abrollbahn ist sowohl in der *ZS* als auch in der *SG* vorhanden, weshalb die Parameter weiterhin dem entsprechenden Bauteil zugeordnet werden. Alle Parameter mit Ausnahme des *BHR* und des *RPD* weisen keine funktionale

Verbindung untereinander auf und können daher getrennt voneinander erfasst und variiert werden. Der *BHR* gibt die konzentrische Lage der Abrollbahn in der *ZS* und in der *SG* vor. Um die korrekte Funktion zu gewährleisten, darf der *BHR* nicht getrennt in *SG* und *ZS* variiert werden, sondern muss als globaler Parameter betrachtet werden. Der *RPD* ist funktional an den Durchmesser der Kugeln gebunden.

Die Integration der Störgrößen bietet die Chance, weitere Einflüsse zu erkennen. So ist es möglich Rückschlüsse auf Wechselwirkungen zwischen Steuer- und Störgrößen zu ermitteln, die ohne eine Integration der Störgrößen unentdeckt bleiben würden. Hierfür werden beispielsweise auf Basis des Lastenhefts und/oder aus bereits durchgeführten *RD*-Simulationen, wie in [5], Störgrößen wie Materialschwankungen, Alterung, Temperatureinflüsse sowie Änderungen der *DF* eingeführt. Die *SG* und die *ZS* werden aus identischem Material gefertigt, weshalb ihr E-Modul zusammengefasst wird. Lediglich aus diesem Grund wird der E-Modul im Rahmen von Materialschwankungen berücksichtigt. Da Belastungen im Material lediglich von der Last und der Konstruktionsgeometrie abhängig sind, wirken sich Materialeigenschaften, wie die Streckgrenze oder die Zugfestigkeit, nicht auf Belastungen in der Baugruppe aus, sondern werden lediglich für Festigkeitsnachweise herangezogen. Diese These kann in ersten Versuchsdurchläufen bestätigt werden. Alterung äußert sich in der Realität durch Bauteilverschleiß, Oberflächenschädigung und Fettalterung, was in der Simulation für die reine *RD*-Untersuchung durch Veränderung des Reibkoeffizienten abgebildet wird. Für die Betrachtung der *ZUV* mittels *VLE* und abschließender *R²*-Modellierung wird der zeitliche Alterungsprozess näher untersucht. Temperatureinflüsse werden im Rahmen der Betriebstemperatur der Nachstelleinheit abgebildet. In diesem Temperaturbereich muss der Nachsteller voll funktionsfähig sein, was demnach ebenfalls für die *KR* als untergeordnetes System gilt.

In Folge der These, dass Korrelationen besser bei breiten Streugrenzen erfasst werden können, sind die Variationsgrenzen der Steuergrößen allgemein groß zu wählen. Außerdem ist im weiteren Verlauf dadurch der zulässige Parameterraum breiter, was hinsichtlich der folgenden Optimierung und Robustheitsanalyse mehr Freiheiten zulässt. Bei Parametern die funktionale oder geometrische Grenzen aufweisen, werden diese entsprechend eingehalten. Bei Parametern ohne derartige Beschränkungen können die Grenzen im Rahmen von technischer Realisierbarkeit variiert werden. Die Störgrößen sind entgegen den Steuergrößen in der Realität nicht beherrschbar, weshalb sie nach entsprechenden Vorgaben oder Richtlinien variiert werden. Eine Auflistung aller 27 Parameter ist im Anhang in Tabelle A.16 zu finden.

6.3.5 Interpretation der Analyse

Mit Hilfe der *COP*-Methode wird die Modellqualität des Systems bewertet. Der *COP* des Gesamtmodells erreicht einen Wert von 94 %, vergleiche Bild 6.17. Die Summe der einzelnen *COP*-Werte der Parameter übersteigt den Gesamtwert des *COP* nicht, folglich sind im *META*-Modell keine sich beeinflussenden Wechselwirkungen vorhanden, siehe Kapitel 2.2.4. Das *META*-Modell berücksichtigt alle Parameter der Sensitivitätsstudie. Würden an dieser Stelle nur die signifikantesten Parameter für das *META*-Modell eingebunden, steigt der *COP* auf circa 99 %. Grund für den Kompromiss ist die spätere Anwendung im Basis-Modell. Unter anderem ist es das Ziel, dem Entwickler ein Simulationswerkzeug zur Verfügung zu stellen, mit dem er in der Lage ist, sämtliche Parameterwerte im Basis-Modell zu be-

rücksichtigen. Zudem resultieren aus den einzelnen Modellen Parameterkombinationen, die zwar auf die einzelnen *META*-Modelle nur einen geringen Einfluss haben, im Basis-Modell allerdings Wechselwirkungen hervorrufen können. Insofern kann unter Berücksichtigung aller Parameter eine ganzheitliche Betrachtung des Simulationsmodells gewährleistet werden, was im globalen Zusammenhang gesehen, vom großen Wert ist.

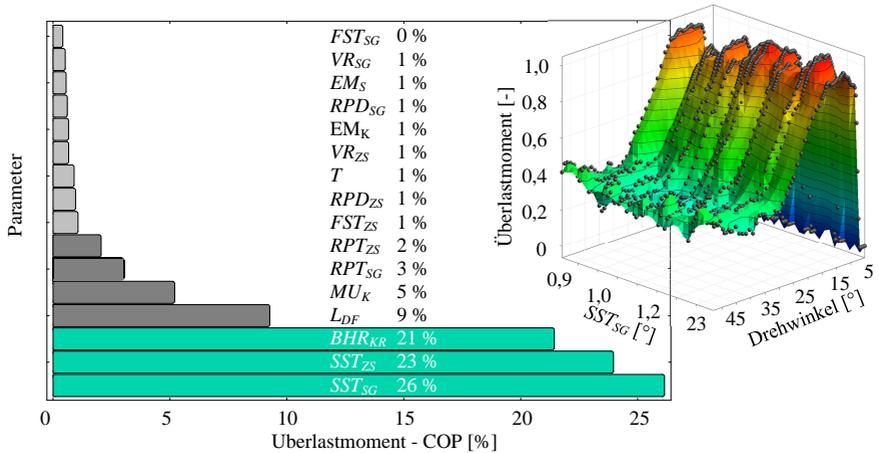


Bild 6.17: Sensitivität mit allen Parametern - Modellgüte $COP = 94 \%$

Die Tendenzen für die *DPs*, die potentielle Ausfälle verursachen, werden erfasst, indem gezielt diejenigen Designpunkte ausgewertet werden, bei denen die Zielgröße außerhalb der Intervallgrenze liegt. Aufgrund der großen Parametervielfalt sind in der erweiterten, linearen Korrelationsmatrix, in Bild 6.18, die Tendenzen symbolisch für zwei ausgewählte Steuergrößen abgebildet. Dabei ist zu erkennen, dass besonders Werte von $0,9^\circ$ bis $1,2^\circ$ von SST_{SG} eine starke Tendenz dazu aufweisen, Ausfälle aufgrund eines zu hohen Überlastmoments zu verursachen. Im Kontrast dazu zeigt sich, dass auch kleine Werte von $0,8^\circ$ bis $0,9^\circ$ die Tendenz haben Ausfällen verursachen. In diesem Fall allerdings aufgrund von zu kleinen Überlastmomenten. Im Gegensatz dazu kann bei der Steuergröße FST_{SG} keine Tendenz erkannt werden. Ausfälle entstehen hier zufällig und sind etwa gleich über die gesamte Range der Steuergröße verteilt.

Die erweiterte Korrelationsmatrix ist durch eine Diagonale gekennzeichnet. Anhand dieser ist die Datenvielfalt effektiver auszuwerten. Oberhalb dieser Diagonalen sind die linearen Korrelationskoeffizienten abgebildet, während unterhalb die dazugehörigen Häufigkeitsverteilungen zu sehen sind. Der lineare Korrelationskoeffizient bildet ein Maß, mit dem der lineare Zusammenhang zweier Größen bewertet wird, von 0 = keine lineare Korrelation, bis 1 = ideale lineare Korrelation.

Zunächst kann der Matrix keine im System vorliegenden Wechselwirkungen entnommen werden, da die Häufigkeitsverteilungen der inneren Matrix komplett zufällig in der Parameterfläche angeordnet sind. Dies spiegelt sich ebenfalls im quantitativen Wert der Koeffizienten,

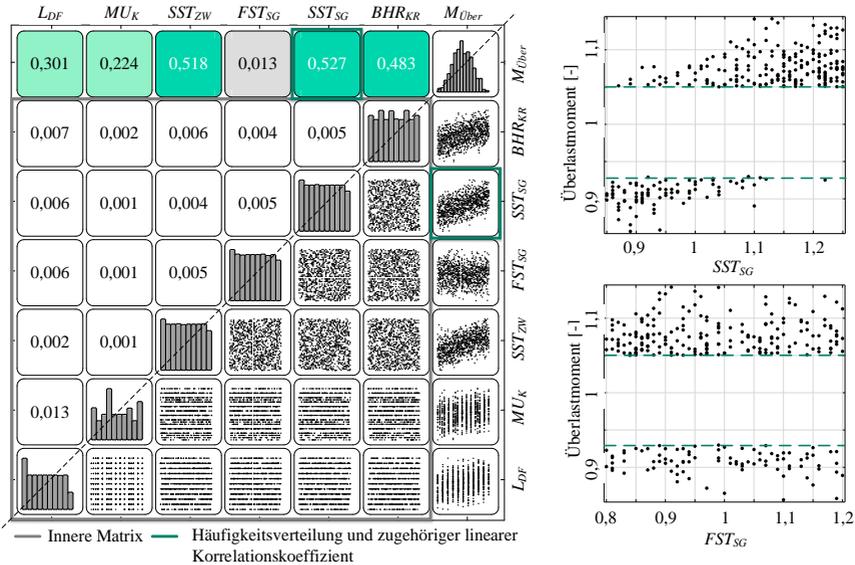


Bild 6.18: Korrelationsmatrix und Ausfalltendenzen

die alle sehr nahe Null liegen. Für die später folgende Optimierung ist diese Erkenntnis von essentiellstem Wert, da sie sich auf die Auswahl des *DOE*-Designs auswirkt. Der äußeren Matrix ist zu entnehmen, dass vor allem SST_{SG} und SST_{ZW} sowie BHR_{KR} eine sehr hohe lineare Korrelation auf das Überlastmoment besitzen. Zudem weisen die beiden Störgrößen MU_K und L_{DF} eine signifikante, lineare Korrelation auf. Daraus kann in erster Annäherung auf die Streuung der Zielgröße im System, die vor allem durch diese beiden Störgrößen verursacht wird, geschlossen werden.

Es sei erwähnt, dass mit der Analyse der linearen Korrelationen eine sehr tiefgreifende Systemanalyse durchgeführt werden kann, die sich zudem hervorragend zur Identifizierung von Wechselwirkungen im System eignet. Dennoch bildet sie lediglich die linearen Zusammenhänge ab, weil die Regression eine lineare Basisfunktion besitzt. Korrelationen können auch in höherer Ordnung auftreten, die mit einer linearen Regression jedoch nicht korrekt erfasst werden können.

6.3.6 Optimierungspotential hinsichtlich Streuungsminimierung

Für das zuvor beschriebene Modell wird im folgenden Schritt eine Optimierung nach *Ta-guchi* durchgeführt (beschrieben in Kapitel 3.1.2 mit der Anwendung von *Orthogonalen Feldern*, vergleiche Kapitel 2.2.1). Für jede *FK* des inneren *DOE* wird aus den Zielwerten der Mittelwert und stellvertretend für die Streuung das *S/N*-Ratio nach „The nominal the best Typ II“ ermittelt. Die Ergebnisse der Zielwerte sowie der *S/N*-Ratios werden nach *ANOM*

ausgewertet, wobei die Wirkungen der einzelnen Steuergrößen und ihrer FS bezüglich des Mittelwertes berechnet werden.

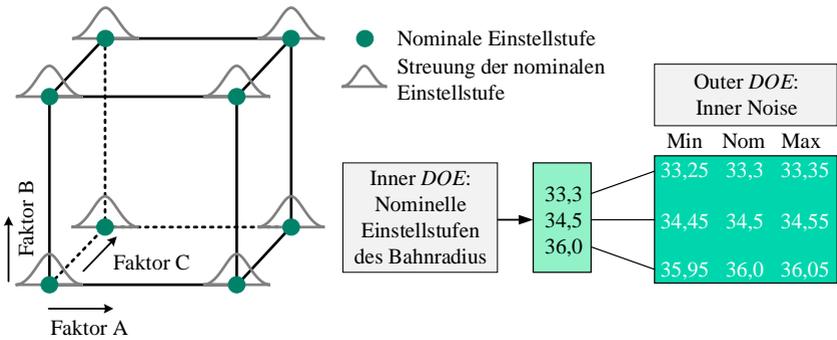


Bild 6.19: Berücksichtigung von inneren Störgrößen am Beispiel des Bahnradius

Nach dem beschriebenen Versuchsaufbau nach der TM , vergleiche Bild 6.19, ergeben sich für alle 27 FS des inneren DOE jeweils ein Zielwert und ein S/N -Ratio. Daraus lassen sich für den gesamten Versuch der Mittelwert der Zielwerte und das gemittelte S/N -Ratio bestimmen. Der Zielwert liegt zwischen Werten von 8,492 Nm bis 11,602 Nm und das S/N -Ratio schwankt zwischen $-48,62$ dB und $-50,39$ dB. Die ermittelten Daten sind in Tabelle A.14 dargestellt. Darin ist ein Auszug aus dem inneren DOE für die Faktorstufen (FS) des Parameters SST_{SG} ($19,5^\circ$, $21,5^\circ$, $23,5^\circ$) enthalten, anhand dessen die Ermittlung der Ergebnisse plakativ beschrieben werden. Für die $ANOM$ wird dabei das Mittel aus dem Ergebnis (Zielwert, S/N -Ratio) jeder FK gebildet, bei welcher der auszuwertende Parameter auf der zu untersuchenden FS steht (in Tabelle A.14 farblich markiert).

Demzufolge wird das durchschnittliche S/N -Ratio $\bar{\eta}$ für die jeweiligen signifikanten Faktorstufen FS_x des Parameters DP aufgrund der *Orthogonalität* wie folgt berechnet:

$$\bar{\eta}_{DP_{FS_x}} = \frac{1}{9} (\eta_{FK1} + \eta_{FK4} + \eta_{FK5} + \eta_{FK6} + \eta_{FK9} + \eta_{FK10} + \eta_{FK24} + \eta_{FK25} + \eta_{FK27}). \quad (6.3)$$

Für den durchschnittlichen Zielwert $\bar{Y}_{DP_{FS_x}}$ der FS s ergibt sich entsprechend:

$$\bar{Y}_{DP_{FS_x}} = \frac{1}{9} (Y_{FK1} + Y_{FK4} + Y_{FK5} + Y_{FK6} + Y_{FK9} + Y_{FK10} + Y_{FK24} + Y_{FK25} + Y_{FK27}). \quad (6.4)$$

Um die Wirkung einer FS zu ermitteln, wird die mittlere Abweichung mit dem Mittelwert des Zielwerts beziehungsweise mit der gemittelten S/N -Ratio verglichen. Diese Analyse der Wirkungen wird für alle Parameter des inneren DOE und somit für alle Steuergrößen durchgeführt. Daraus ergibt sich ein ganzheitliches Wirkungsdiagramm nach $ANOM$, das in Bild 6.20 visualisiert ist. Aus dem Diagramm ergeben sich neben den verursachten Wirkungen jeder Steuergröße beziehungsweise deren FS s auch die zugehörigen Optimierungsrichtungen. Die Wirkung einer FS kann gezielt anhand der Abweichung vom Mittelwert des Zielwerts

beziehungsweise der gemittelten S/N -Ratio bestimmt werden. Je größer dieser Abstand ist, desto größere Auswirkungen zeigt die FS bezüglich des Zielwerts oder der S/N -Ratio.

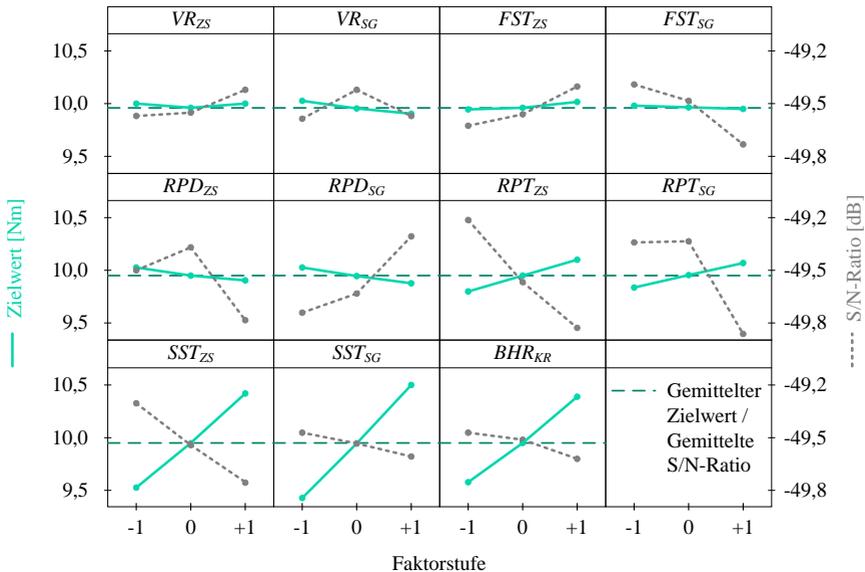


Bild 6.20: Wirkungsdiagramm nach ANOM

Parameter wie FST_{SG} , RPD_{ZS} , RPD_{SG} , RPT_{ZS} , RPT_{SG} und SST_{ZS} zeigen eine signifikante Wirkung auf die S/N -Ratio, während Faktoren wie R_{ZS} , VR_{SG} , SST_{SG} oder BHR_{KR} eine eher geringere Auswirkung aufweisen. Um die S/N -Ratio zu maximieren, werden alle Steuergrößen entsprechend ihrer ermittelten Optimierungsrichtung auf diejenige FS eingestellt, welche die maximale S/N -Ratio wiedergibt. Die optimalen Einstellstufen für die Mittelwerte für ein maximales S/N -Ratio können Tabelle A.15 entnommen werden.

6.3.7 Robustheitsbewertung

Um zu bestätigen, dass das Ziel der Streuungsminimierung erfüllt ist, wird ein Bestätigungsexperiment durchgeführt. Mit diesem wird sowohl das Ausgangs- als auch das Optimale-Design geprüft und bewertet. Konkret wird dazu ein weiterer *Taguchi*-Versuchsplan aufgestellt, der die nominellen, optimalen Werte und deren Streuungen im inneren *DOE* sowie die Störgrößen im äußeren *DOE* enthält. Dieser *DOE* wird entsprechend für beide Designs durchgeführt. Auf diese Weise kann ein qualitativer Vergleich zwischen Ausgangs- und Optimalem-Design durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind in Bild 6.21 und Tabelle 6.11 aufgeführt. Darin ist zu erkennen, dass die Streuung im Optimalen-Design mit einer Standardabweichung von 0,246 Nm signifikant niedriger ist, als im Ausgangs-Design mit 0,297 Nm. Im Kontrast dazu stellt sich mit der Einführung des Optimalen-Designs aber auch eine erhebliche Abweichung vom zu erreichenden Zielwert von 9,900 Nm ein. Dieses Verhalten

entsteht durch die Effekte der FS s, da jegliche Steuergrößen sowohl die Streuung als auch den Zielwert beeinflussen. Besonders die Steuergrößen SST_{ZS} , SST_{SG} und BHR_{KR} weisen eine umgekehrte Wirkung auf die S/N -Ratio und den Zielwert auf. Die niedrige FS dieser Parameter maximiert die S/N -Ratio aber minimiert gleichzeitig den Zielwert. Um diesen Konflikt zu lösen, muss ein weiteres Design eingeführt werden, das einem Zielwert von 9,900 Nm entspricht. Hierfür muss ein geeigneter Kompromiss gefunden werden, der einer möglichst geringen Streuung und Abweichung vom Zielwert entspricht. Dem Zielwert-Design wird sich durch die Parameter SST_{SG} und BHR_{KR} angenähert.

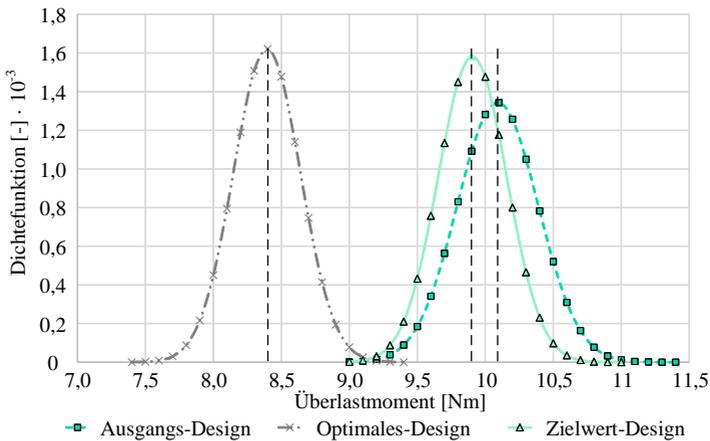


Bild 6.21: Optimierungsverlauf des Überlastmoments

Tabelle 6.11: Statistische Ergebniskennwerte der Optimierung

Kennwert	Einheit	Ausgangs-	Optimales-	Zielwert-Design
Mittelwert	[Nm]	10,091	8,394	9,906
Standardabweichung	[Nm]	0,297	0,246	251,9

Nach Gleichung 6.5 und Bild 6.20 ergeben sich die maximalen Effekte von SST_{SG} und BHR_{KR} beim Wechsel von der hohen zur niedrigen FS für den Zielwert zu:

$$\begin{aligned}
 Y(SST_{SG})_{max} &= \bar{Y}_{FS_{+1}} - \bar{Y}_{FS_{-1}} = 10,485 \text{ Nm} - 9,489 \text{ Nm} = 0,996 \text{ Nm} \\
 Y(BHR_{KR})_{max} &= \bar{Y}_{FS_{+1}} - \bar{Y}_{FS_{-1}} = 10,456 \text{ Nm} - 9,547 \text{ Nm} = 0,909 \text{ Nm} \quad (6.5)
 \end{aligned}$$

Der maximale Effekt auf das S/N -Ratio ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}\eta(SST_{SG})_{max} &= \bar{\eta}_{FS_{+1}} - \bar{\eta}_{FS_{-1}} = -49,68 \text{ dB} + 49,47 \text{ dB} = -0,21 \text{ dB} \\ \eta(SST_{SG})_{max} &= \bar{\eta}_{FS_{+1}} - \bar{\eta}_{FS_{-1}} = -49,67 \text{ dB} + 49,48 \text{ dB} = -0,19 \text{ dB}\end{aligned}\quad (6.6)$$

Diese Steuergrößen werden ausgewählt, da ihre Wirkung auf den Zielwert hoch und auf die S/N -Ratio niedrig ausfällt. Somit wird es möglich, das Design auf den korrekten Zielwert anzupassen, ohne die Streuung signifikant zu verschlechtern. In einem iterativen Prozess werden diese Parameter so lange erhöht, bis sich der Mittelwert des Designs dem Zielwert angleicht. Die Ergebnisse sind in Bild 6.21 und in Tabelle 6.11 dargestellt. Das Zielwert-Design entspricht mit einem Mittelwert von 9,906 Nm einer sehr guten Annäherung an den Zielwert. Die Streuung hat sich mit 0,252 Nm lediglich marginal vergrößert. Somit ist eine gute Lösung für ein neues Design gelungen.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die quantitativ korrekte Ermittlung und Festlegung der Streuung der Steuergrößen und der Zielfunktion in der TD -Phase erfolgt. Im PD ist es zulässig, die Toleranzen in erster Näherung abzuschätzen, da das primäre Ziel darin besteht, nominelle Einstellstufen zu identifizieren, die gegenüber dem Ausgangs-Design eine reduzierte Streuung aufweisen.

6.3.8 Virtuelle Lebensdauererprobung

Im Betrieb unterliegen Produkte beispielsweise Schwankungen von ertragbaren und tatsächlich wirkenden Lastamplitude. Diese Streuungen können infolge der internen Systemzusammenhänge der Bremsenheit zu Streuungen in den Produkteigenschaften führen, was eine merkliche Abweichung der Produktqualität bedeuten kann. Um alle diese auftretenden Schwankungen und die daraus resultierenden Wechselwirkungen zu berücksichtigen, werden durch den stochastischen Simulationsansatz mittels Parameterstudien nach [12] streuende Ausfallzeiten der Funktion nach dem R^2 -Modell prognostiziert. Anhand diesem Modell können mittels strukturmechanischer Betrachtung der klassischen Lebensdaueruntersuchung beschleunigte Tests definiert und zielführender umgesetzt werden. Zudem können mittels geeigneter Verschleißmodelle, Degradationstests effizienter durchgeführt werden. Im folgenden Unterkapitel *Virtuelle Lebensdauerermittlung* wird die allgemeine Vorgehensweise vorgestellt und im Unterkapitel *Degradationsermittlung* anhand geeigneter Degradationsmethoden am Demonstrator der Überlastkupplung angewandt.

Virtuelle Lebensdauerermittlung

Die zuverlässigkeitsorientierte *Virtuelle Lebensdauerermittlung* (VLE) dient der Bestimmung der Lebensdauer eines Bauteils auf virtueller Ebene während der Produktentwicklung. Ihre schematische Vorgehensweise ist in Bild 6.22 dargestellt.

Das Ziel der Methodik ist es, im Gegensatz zu herkömmlichen Herangehensweisen, eine Verteilung der Lastwechselzahlen bis zum Versagen des Bauteils beziehungsweise der Funktion zu bestimmen, aus der charakteristische Kennwerte der ZUV ermittelt werden können. Die Methodik besteht aus drei Phasen: *Modellbildung und Zieldefinition* mit möglicher *Virtuellen Versuchsplanung* sowie der *Lebensdauerberechnung* und *Bewertung der Ergebnisse*. Ausgangspunkt der Methodik ist ein bestehender Konzeptentwurf. Im Rahmen von $SMAR^2T$ kann

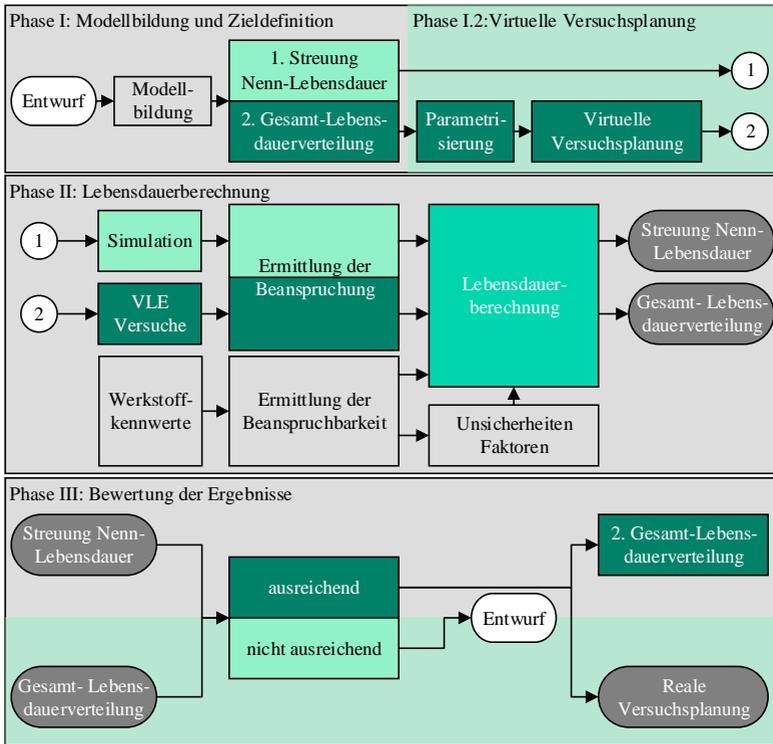


Bild 6.22: Ablaufdiagramm *Virtuelle Lebensdauerermittlung*

dies bereits das robuste Design aus der bis dahin durchgeführten Robustheitsuntersuchung sein. Je nach Untersuchungsziel kann diese Phase für eine Gesamt-Lebensdauerumverteilung um die *Virtuelle Versuchsplanung* erweitert werden. Mit dieser Ergänzung wird das Modell parametrisiert und mittels virtuellen Versuchsplan aufbereitet. Im Falle der Zielstellung der Steuerung der Nenn-Lebensdauer, kann direkt in die Phase zwei: *Lebensdauerberechnung* übergegangen werden. Dabei wird anhand des aufbereiteten Modells die Beanspruchung mittels Simulation ermittelt, deren Umfang wiederum Versuchsplan-abhängig ist. Aus den zugeordneten Werkstoffen zur jeweiligen Komponente wird die Belastbarkeit ermittelt. Hierfür werden Unsicherheiten in der Faktor-Definition, die zur Bestimmung der Belastbarkeit dienen, berücksichtigt. So beispielsweise auch bei der Anwendung der Lebensdauerberechnung nach der *FKM-Richtlinie*¹⁰ wird, je nach Zieldefinition in Phase eins, abschließend in Phase zwei mit der *Stress-Strength-Methode* die Lebensdauer der Komponenten beziehungsweise der Funktion berechnet. In der letzten Phase werden die gewonnen Ergebnisse einem Vergleich mit zuvor festgelegten Kriterien unterzogen. Ziel der Bewertung ist es, die Eig-

¹⁰ Forschungskuratorium Maschinenbau: „Rechnerischer Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen“

nung des Entwurfs hinsichtlich der zu erreichenden Lebensdauer unter dem Aufrechterhalten der geforderten Funktion, festzustellen. Weiterführende und detaillierte Informationen zur Vorgehensweise ist aus [12] und [14] zu entnehmen.

Degradationsermittlung

Eine Art der beschleunigten Zuverlässigkeitsbestimmung ist die Degradation. Bei dieser Methode wird die zeitliche Abnutzung und das Verschleißverhalten sowie das Funktionsverhalten über der Einsatzzeit betrachtet. Ist ein solcher zeitliche Verlauf modellierbar, können anhand geeigneter Regressionsmethoden (Funktions-) Ausfälle, die durch das Überschreiten einer bestimmten Grenze (*End of Life (EOL)*) definiert sind, prognostiziert werden. Zudem können anhand dessen Ausfallverteilungen zu beliebigen Zeitpunkten berechnet werden, vergleiche Bild 6.23. Um die Lebensdauer eines Bauteils mittels Degradationmodell zu

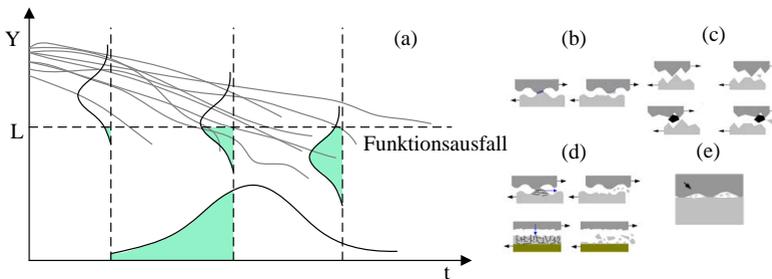


Bild 6.23: Allgemein funktionale Degradationsbetrachtung (a) und Darstellung verschiedener Verschleißmechanismen: *Adhäsion* (b), *Abrasion* (c), *Oberflächenzerüttung* (d) und *Tribooxidation* (e)

prognostizieren, werden folgende Arbeitsschritte verfolgt [BK08]:

- ▶ *EOL-Definition*,
- ▶ *Initialverteilung zum Zeitpunkt t_0* ,
- ▶ *Betriebsprofil-Erstellung*,
- ▶ *Degradationsverlauf /-geschwindigkeit unter Systemeinwirkung* und
- ▶ *Lebensdauerverteilung*.

Um für die vorliegende Aufgabenstellung das Verschleißverhalten angepasster zu modellieren, müssen die Verschleißmechanismen nach den in Bild 6.23 dargestellten physikalischen Wirkungsweisen: *Adhäsion* (b), *Abrasion* (c), *Oberflächenzerüttung* (d) und *Tribooxidation* (e) identifiziert werden, vergleiche hierzu [Pop10], [SH14] und [RM15]. In der Überlastkupplung tritt die Wirkungsweise der *Adhäsion* auf.

Die Umsetzung der Verschleißsimulation findet mittels *FEM* statt. Der Grundgedanke besteht darin, alle Knoten des *FE*-Netzes zu sammeln, die während der gesamten Bewegung Kontakt mit den Kugeln erfahren. Diese Knoten sollen in die Wirkrichtung der Pressung in das Bauteilinnere verschoben werden. Der Verschleiß in Form von Materialverlust wird

durch Netzknotten-Verschiebung realisiert. Mit den aus der FEM -Simulation gewonnenen Pressungswerten, kann aufgrund von adhäsiven Verschleiß eine einfache Simulation des Materialabtrags modelliert werden. Hierfür werden Derivate des *Archard'schen* Verschleißmodells nach [TT06] und [Pop10] angewandt [16].

6.3.9 Robuste Zuverlässigkeitsabschätzung mittels R^2 -Modell

Nachdem die Degradationsmodellierung definiert und deren Simulation durchgeführt ist, wird das R^2 -Modell zur Bewertung der zeitlichen Funktionsfähigkeit innerhalb der Einsatzzeit aufgestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Bild 6.24 und das R^2 -Modell der Überlastkupplung der nominellen Einstellstufen in Bild 6.25 abgebildet.

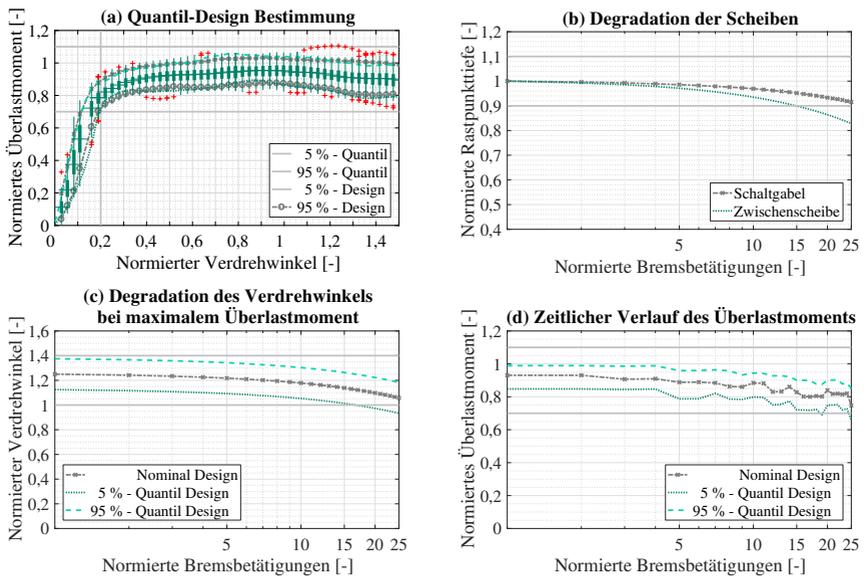


Bild 6.24: Funktionale Degradationsbetrachtung der Überlastkupplung

In Bild 6.24 (a) wird das Überlastmoment mit dem Nominal-Design, dem 5 %- und 95 %-Quantil-Design dargestellt. Das Diagramm zeigt das Überlastmoment über dem Verdrehwinkel. Diese Darstellungsweise ergänzt das Bild 6.21, es wird lediglich die Ergebnisdarstellung bei einem konstanten Verdrehwinkel im maximalen Überlastmoment nach überschreiten der untere Spezifikationsgrenze betrachtet. Ab diesem normierten Verdrehwinkel von $\psi = 0,2$ sind alle 95 %-Quantil-Designs innerhalb der Spezifikation. Die Degradation im Rastpunkt der SG und der ZS ist in Bild 6.24 (b) gezeigt. Es zeigt das sich über der Zeit ändernde Verschleißverhalten am Übergangsradius, infolge der sich zunehmend verändernden *Rastpunkttiefe* (RPT). Die gesetzten Toleranzgrenzen dieses Merkmals werden nach einer normierten Bremsbetätigungsanzahl von $Z \approx 15$ erreicht. Die Folge dieser Degradation wird

in Bild 6.24 (c) deutlich. Das Resultat der Degradation ist die zeitliche Änderung des Überlastmoments zu einem verkürzten Verdrehwinkel bei einer normierten Bremsbetätigungsanzahl von $Z \approx 15$. Entsprechend wird das Überlastmoment über der Zeit stetig abnehmen, vergleiche Bild 6.24 (d). Allerdings erreicht das 5 %-Quantil-Design eine normierte Bremsbetätigungsanzahl deutlich größer $Z > 15$. Das R^2 -Modell zeigt diese einzelnen Ergebnisse kompakt in Bild 6.25. Es wird deutlich, dass sich das Überlastmoment zwar zeitlich ändert, dennoch überschreitet es die Funktionsgrenzen beziehungsweise die geforderte Spezifikation nicht, auch wenn die Toleranzgrenze deutlich früher unterschritten wird. Folglich kann eine Prognose hinsichtlich strukturell robuster, zuverlässiger Funktionsweise für die geforderte Einsatzzeit positiv beantwortet werden. Der im geforderten Einsatzzeitpunkt vorhandene Sicherheitsabstand zur Funktionsgrenze (normierten Bremsbetätigungsanzahl von $Z = 15$), gibt der anschließenden *TD*-Phase die Möglichkeit, kostenintensiven Merkmalen anhand von weiteren Toleranzgrenzen entgegenzuwirken.

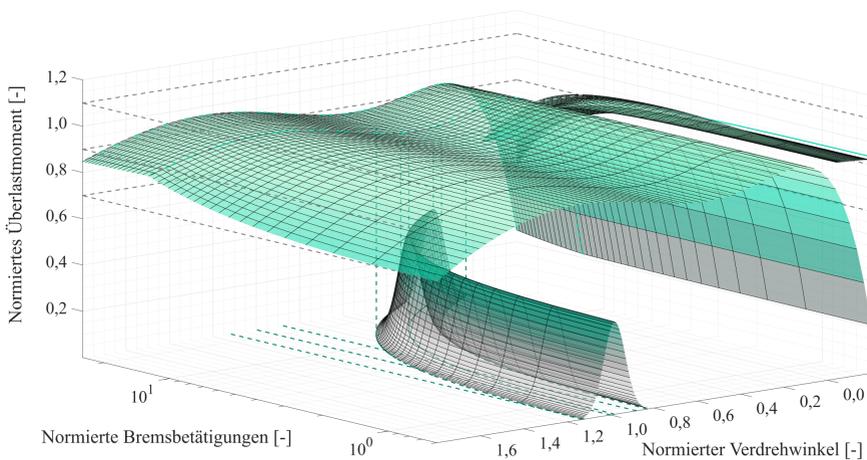


Bild 6.25: Das R^2 -Modell der Überlastkupplung

6.3.10 Festlegung der nominellen Parameterstufen

Abschließend können in der *PD*-Phase die nominellen Parameterstufen festgelegt werden, anhand dieser in der darauffolgenden *TD*-Phase die tatsächlichen Toleranzen unter Berücksichtigung der Fertigungskosten und technischer Realisierbarkeit definiert werden. Tabelle A.15 zeigt die chronologische Entwicklung der Einstellstufen. Aufgrund der vorgestellten Vorgehensweise des *PD* kann ein Design entwickelt werden, das deutlich weniger sensitiv auf den Einfluss von Störgrößen reagiert und zudem die geforderte Funktionalität innerhalb der Funktionsgrenzen über der geforderten Einsatzzeit aufweist.

6.4 Toleranz Design nach *SMAR²T*

In dem im Anschluss¹¹ des *PD* folgenden *TD* wird ein allgemeines Vorgehen skizziert, vergleiche Bild 6.26, das in Abhängigkeit der verfügbaren Kostendaten für die Herstellung und Fertigung des Produkts, eine optimale Toleranzsynthese gewährleistet. Enge Tolerierungen von Merkmalen führen zu geringen Streuungen und somit generell zu einer erhöhten Funktionserfüllung mit steigenden Kosten, bedingt durch den hohen Fertigungsaufwand. Für eine kostengünstigere Herstellung müssen meistens größere Bauteiltoleranzen definiert werden, was zu höheren Streuungen und folglich zu einer größer-streuenden Funktionsgenauigkeit führt. Dies endet meist in einem höheren Ausschuss und abnehmender Qualität. Entsprechend ist das Ziel der *TD*-Phase den Zielkonflikt aus dem divergierenden Ziel der hohen Qualität bei niedrigen Kosten und einfacher Herstellung, durch einen akzeptablen Kompromiss zu lösen. Das ganzheitliche Vorgehen des *TD* orientiert sich sowohl an statistischen als auch an arithmetischen Tolerierungsmethoden.

6.4.1 Anwendungsbeispiel des Toleranz Design

Für den ersten Betriebsmodus *Konstruktives Lüftspiel überwinden* wird konstruktiv ein Gesamtspiel erreicht, das abzüglich Schlupf und Spiele genau dem Abstand zwischen Belag und Bremsscheibe im Nachstellvorgang entspricht. Während des Überwindens dieses Spiels findet keine Nachstellung statt. Die wichtigsten Spiele im Nachsteller sind hierbei in chronologischer Wirkrichtung: *Zahnflankenspiel*, *Kulissenspiel*, *Antriebsspiel* und *Kegelspiel*. Als Anwendungsbeispiel dient das *Kulissenspiel* (*KLS*). Es handelt sich hierbei um einen freien Drehwinkel zwischen dem Anschlag der *ZR* und der *SG*, siehe Bild 6.27. Wird das *ZR* und die *SG* als ein System betrachtet, ist die Größe des *KLS* die Systemantwort. Nach Systemuntersuchungen werden mittels P-Diagramm alle Steuer- und Störgrößen des Systems festgelegt, vergleiche Tabelle 6.13. Die Störgrößen sind die schwankende Betriebstemperatur, Materialeigenschaft, Last und der Reibwert im Kontaktbereich sowie die axiale Verschiebung. Die Steuergrößen sind die Geometrieparameter der Bauteile. Die Robustheits- und Kostenkriterien sind in Tabelle 6.12 gelistet.

Tabelle 6.12: Robustheits- und Kostenkriterien für das *Kulissenspiel*

Robustheitskriterien		Kostenkriterium	
Lüftspiel	$1,0 \pm 0,2 \text{ mm}$	Zahnrad	0,20 €
Kulissenspiel	$11,4 \pm 0,2^\circ$	Schaltgabel	0,75 €

6.4.2 Toleranzanalyse- und synthese

Zu Beginn des *TD* müssen zuerst Toleranzen zu den zuvor definierten nominalen Einstellstufen definiert werden. Hierfür eignet sich die *Toleranzsynthese*, vergleiche [Kle14a]. Bei der

¹¹ Ein adaptiver Einstieg in das *TD* ist bei vorhandenen robusten und zuverlässigen, nominellen Einstellstufen ebenso möglich.

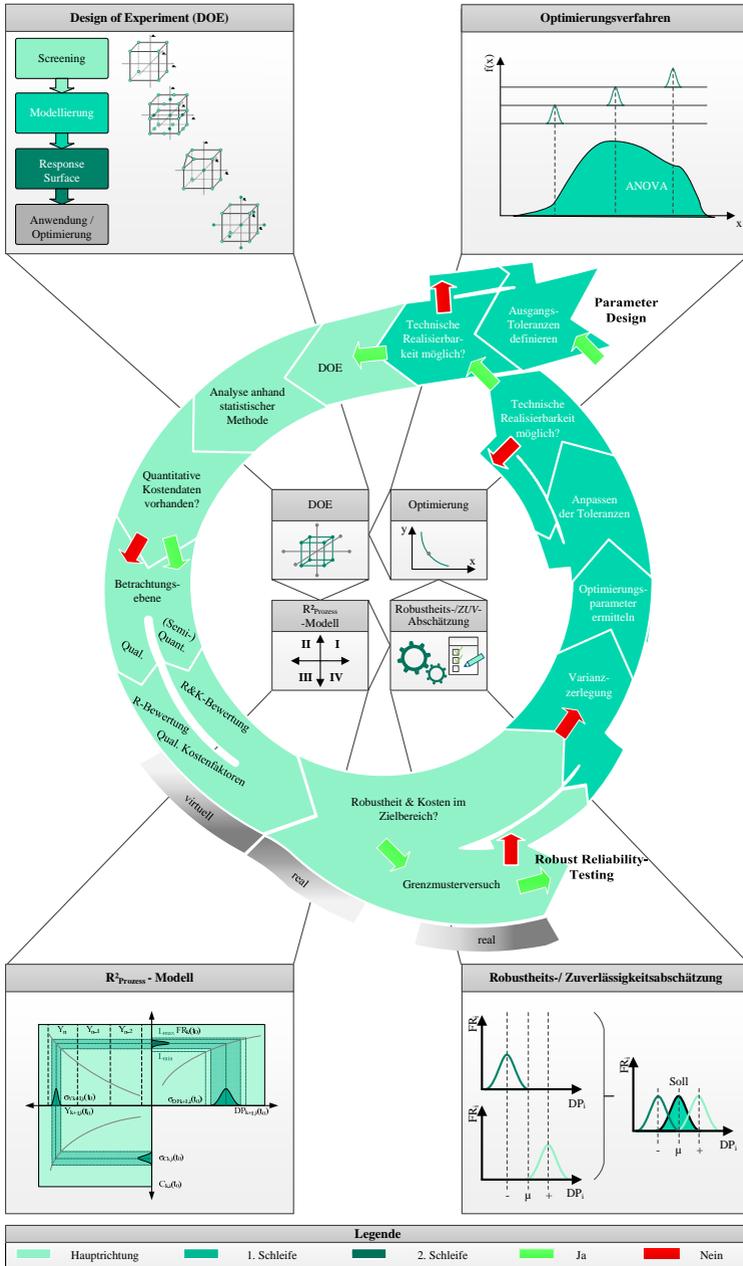


Bild 6.26: Toleranz Design in SMAR²T

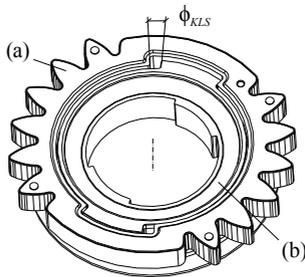


Bild 6.27: Anwendungsbeispiel des *TD*: Kulissenspiel zwischen *ZR* (a) und *SG* (b)

Tolerierung der funktionsabhängigen Parametern sollte, besonders bei bewegten Systemen oder Konstruktionsbaugruppen, auf die Aufrechterhaltung der Funktion geachtet werden, da diese invarianten Parametertoleranzen aufgrund der Qualitätsanforderung nicht variiert werden können. Diese Funktionstoleranzen¹² werden bei der iterativen *Toleranzsynthese* nicht berücksichtigt. Möglichkeiten hierfür wären beispielsweise die Maßketten-Tolerierung nach der *Statistischen Tolerierung* oder die Vergabe der Grenzen nach *Prozessfähigkeitskennwerten* C_{pK} nach der *Six Sigma* Philosophie, vergleiche hierzu [LMJ⁺ 12]. Für funktionsunkritische Parameter können Toleranzen in erster Näherung nach den Normen [DIN91a] und [DIN91b] angesetzt werden. Für alle Parameter gilt, das Wissen aus dem Vorgängermodell sowie Annahmen von Experten nicht außer Acht zu lassen. Zur Überprüfung, ob sämtliche Kundenanforderungen bei der Toleranzanalyse berücksichtigt werden, können Methoden wie *QFD* oder *Checklisten* in Form von Anforderungslisten angewandt werden. Grundlegende Voraussetzung für die *Toleranzsynthese* ist die Betrachtung auf Basis der technischen Realisierbarkeit.

Die Festlegung der Betrachtungstiefe der *Toleranzsynthese* erfolgt in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Kostendaten zu Herstellungsprozessen und zu Fertigungsverfahren. Dies kann rein qualitativ, *semi-quantitativ* oder quantitativ erfolgen. Eine qualitative Betrachtung erfolgt auf Basis von unzureichender Information oder zu hohem Aufwand in der Beschaffung bezüglich Toleranzänderungskosten. In der Praxis liegt dieser Fall bei gefertigten Zulieferbauteilen ohne ausreichende Herstellungstransparenz vor. Die *semi-quantitative* Betrachtungsebene findet Anwendung, wenn Toleranzänderungen der einzelnen Bauteile nicht vorliegen, wie es im Anwendungsbeispiel der Fall ist. Hierfür wird ein Modell entwickelt, um Kostenbeeinflussung durch Toleranzänderungen, *semi-quantitativ* mit den verfügbaren Einkaufskosten und einer Annahme zur Kostenentwicklung, zu beurteilen. Werden hingegen Bauteile in der eigenen Produktion gefertigt, können detaillierte Kostendaten zu Toleranzänderungen auf quantitativer Ebene betrachtet werden.

Die Kostenarten im Zusammenhang mit den Toleranzen, der Prozessfähigkeit und den resultierenden Kosten sind Maschinen- und Materialkosten, die durch die Prozessfähigkeit nicht beeinflusst werden. Kostenarten im Zusammenhang mit Kosten und vorhandenen *Prozess-*

¹² Toleranz innerhalb den maximalen Grenzen, in denen die geforderte Gesamtfunktion noch gegeben ist.

Tabelle 6.13: Parameter des Zahnrad und der Schaltgabel

Parameter	Einheit	Beschreibung	Faktor
ϑ	[°C]	Betriebstemperatur	NF
EM_{ZR}	[MPa]	E-Modul des Zahnrad	NF
M	[Nm]	Drehmoment	NF
μ_R	[-]	Reibwert	NF
D_{SG}	[mm]	Durchmesser der Schaltgabel	CF
W_{SG}	[°]	Stufenwinkel der Schaltgabel	CF
W_{SGR}	[°]	Stufenwinkel der Schaltgabel bis zur Flanke	CF
Rd_{SGin}	[mm]	Rundung der Stufe innen	CF
Rd_{SGaus}	[mm]	Rundung der Stufe außen	CF
Z_{iZR}	[mm]	Verschiebung des Zahnrad in z-Richtung	CF

CF: Control Factor NF: Noise Factor

fähigkeitsindizes sind Nachbearbeitungskosten, Prüfkosten, Ausschusskosten, Fertigungsbeziehungweise Herstellkosten sowie Gesamtkosten, vergleiche dazu [Kam13].

6.4.3 Statistische Versuchsplanung und Durchführung

Analog zum *PD* erfolgt an dieser Stelle der Untersuchung die *DOE*. In Abhängigkeit des Versuchsaufwands können unterschiedliche Versuchspläne Anwendung finden. Priorisiert werden Versuchspläne nach Taguchi. Die Faktoren des inneren Felds werden in eine dreistufigen Versuchsanordnung variiert, damit eine aussagekräftigere Varianzuntersuchung vorliegt. Um einer Überschätzung der Parameterstreuung entgegen zu wirken, wird statt der Gleichverteilung eine Normalverteilung nach [DZ88] durchgeführt, da in der Realität die Toleranzen um ihren Mittelwert normalverteilt streuen. Anwendung findet hierbei die *Modifizierte Taguchi Methode* nach [DZ88] mit dem Mittelwert μ_i und der unteren beziehungsweise oberen Einstellstufe:

$$\mu_i \pm \sigma_i \cdot \sqrt{3} \quad . \quad (6.7)$$

Diese 1/6- beziehungsweise 1/4-Gewichtung bildet die stochastischen Momente deutlich optimaler ab. Zur Auswahl geeigneter Versuchspläne kann auf Kapitel 2.2.1 sowie auf die Fachliteratur [SBT10], [Kle11] und [Kle13] zurückgegriffen werden.

Für das Anwendungsbeispiel *KLS* ergibt sich eine Gesamttoleranz nach Tabelle 6.14. Aufgrund der Übersichtlichkeit werden für die einzelnen Parameter des *ZR* und der *SG*, zusammenfassend das *KLS*, gezeigt.

Tabelle 6.14: DOE-Einstellstufen KLS

Parameter	Untere Einstellstufe	Mittelwert	Obere Einstellstufe
$\Phi_{KLS} [^\circ]$	11,207	11,4	11,593

6.4.4 Robustheitsanalyse

Die n Ergebnisse der durchgeführten DOE bilden eine *Normalverteilung*. Folglich stehen zwei statistische Momente: *Mittelwert* und *Standardabweichung* für die n Ergebnisse zur Auswertung zur Verfügung. Für nicht-symmetrische Toleranzgrenzen können weitere statistische Auswertemethoden als Bewertungsmaß angewandt werden, wie beispielsweise *Schiefe* oder *Wölbung*, vergleiche Kapitel 2.1.2. Die Bewertung erfolgt mittels σ -Qualitätsniveau¹³. Wird die geforderte *Robustheit* nicht erfüllt (signifikante Abweichung der Soll- von der Ist-Streuung), können entweder die Robustheitskriterien gelockert oder die Streuung mittels der modifizierten ANOVA-Methode (auf Basis von Quadratsummen) analysiert und verringert werden. Die erste Möglichkeit sollte in Betracht gezogen werden, wenn sich die Robustheitskriterien nicht mit einer Verengung der Toleranzgrenzen erreichen lassen. Die Quadratsummen-Modifizierung hat durch das additive Verhalten den Vorteil der Zerlegung und der Zusammenführung nach ermittelten Verhältnissen. Hierfür muss die gesamte Systemvariation SS_T ¹⁴, in Anlehnung an [Bar90], und der Beweis für eine Metrik bezüglich der Standardabweichung:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \quad , \quad (6.8)$$

mit n als Gesamtanzahl der Versuche und Y als Zielgröße, betrachtet werden. Die Parameterquadratsumme SS_P ergibt sich mit den mittleren Quadratsummen der *Faktorstufen* (FS) nach [Kle11] zu:

$$SS_P = \frac{(\sum Y_{FS,1})^2}{\# FS_1} + \frac{(\sum Y_{FS,2})^2}{\# FS_2} + \dots + \frac{(\sum Y_{FS,n})^2}{\# FS_n} - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} \quad . \quad (6.9)$$

Daraus lässt sich die prozentuale Bedeutung P_q aus dem Quadratsummenverhältnis ableiten:

$$P_q = \frac{SS_P}{SS_T} \quad . \quad (6.10)$$

Bei der Auswertung von Matrixexperimenten können Zuordnungs- und Streuungsfehler auftreten. Falsche Einträge von FS führen zu Zuordnungsfehlern, nicht beeinflussbare, zufällig

¹³ Nach der *Six-Sigma*-Methode wird das Niveau auf $\pm 3\sigma$ (6σ) definiert, was einem $C_{pK} = 2$ und folglich einem zu 99,99966% fehlerfreien beziehungsweise innerhalb der ϕ -Grenzen definierter Anteil entspricht.

¹⁴ engl. Total Sum of Squares

auftretende Schwankungen hingegen zu Streuungsfehlern. Die Quadratsumme der Fehler SS_E errechnet sich nach [Kle11] zu:

$$SS_E = SS_T - \sum_{i=1}^n SS_{P_i} \quad . \quad (6.11)$$

Der Freiheitsgrad dieses Fehlers DOF_{Fehler} ist ein Maß für die Anzahl von unabhängigen Vergleichen in einem System und berechnet sich zu:

$$DOF_{\text{Fehler}} = DOF_{ges} - \sum_{i=1}^m DOF(P)_i - 1 \quad . \quad (6.12)$$

Die Ergebnisse dieser vorgestellten modifizierten ANOVA-Methode stellen für die Nichteinhaltung der *Robustheit* beziehungsweise der Kosten ein fundamentales Vorwissen für eine Systemoptimierung dar.

6.4.5 Kostenmodelle und Kostenanalyse

Auf Basis von [10] und in Bezug auf das modifizierte R_{Prozess}^2 -Modell, werden in diesem Teilkapitel zusammenfassend die Kostenmodelle sowie die Kostenanalyse diskutiert. Bevor auf diesen Teilschritt des *TD* eingegangen wird, muss zunächst die Betrachtungsebene in Abhängigkeit der vorliegenden Kostendaten bestimmt werden. Hierfür sind die drei folgenden Kostenanalysearten definiert.

Qualitative Kostenanalyse

Wird die Herstellung der Bauteile durch Fremdfirmen bewerkstelligt, sind möglicherweise zuverlässige, quantitative Kostendaten schwer zu quantifizieren. In diesem Fall sollte die Bewertung der *Systemrobustheit* sowie die Kostenanalyse *qualitativ* oder *semi-quantitativ* erfolgen. Die *qualitative* Beurteilung gibt dem Entwickler Handlungsempfehlungen bezüglich Herstellungskosten und *Robustheit*. Die Teilschritte dieser Kostenanalyseart gliedern sich in: *Bauteileingrenzung*, *Ermittlung der Herstellverfahren und Prozessgrenzen*, *Qualitative Kostenfunktionsmodellierung* und *Toleranzfeldüberführung in qualitative Kostenfaktoren*.

Die Bauteileingrenzung der zu betrachtenden Bauteile kann anhand der Einkaufskosten EK_i erfolgen. In der Kostenanalyse werden mittels definiertem Grenzwert der Einkaufskosten EK_{lim} die Bauteile des zu untersuchenden Systems mit der folgenden Bedingung verknüpft:

$$EK_i \geq EK_{lim} \quad . \quad (6.13)$$

Liegen keine Einkaufskosten der Komponenten vor, sollte auf Experten- sowie Vorwissen zurückgegriffen werden. Die Bauteileingrenzung ist individuell anhand des vorliegenden Systems zu wählen. Mit der durchgeführten Auswahl und dem vorhandenen Wissen werden darauffolgend die Herstellungsverfahren ermittelt. Ebenso bietet sich die Möglichkeit, Rücksprache mit dem jeweiligen Bauteillieferanten zu führen. Zudem sollte die momentane Toleranzklasse nach Vorgänger-, Expertenwissen oder mittels Konstruktionszeichnung identifiziert werden.

Auf Basis der Kostenentwicklungsannahme nach Bild 6.28 können qualitative Kosten bei Toleranzänderungen abgeleitet und die zu untersuchenden Toleranzfelder einer prozentualen Kostenbeeinflussung zugeordnet werden.

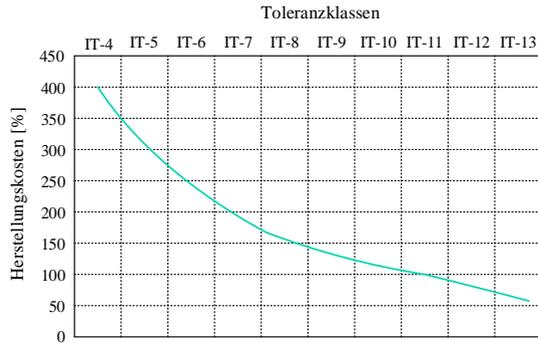


Bild 6.28: Qualitative Kostenentwicklungsannahme je Toleranzklasse nach [KR07]^a

^a Vereinfachte Darstellung; bei einer Kostenentwicklung bezüglich Herstellungskosten auf Basis von Toleranzklassen sind Sprünge erkennbar, beispielsweise durch Änderung der Fertigungsverfahren und/oder durch Einfluss von Losgrößen, vergleiche Kostenfunktionen der Nachstelleinheit im Anhang B.7.

Quantitative Kostenanalyse

Zur Wahl dieser Art der Kostenanalyse führt das Vorhandensein von Kostendaten mit welchen die realen Kosten für die Herstellung mit den eingestellten Toleranzfeldern geschätzt und frühzeitig Optimierungspotential zur Kosteneinsparung aufgezeigt werden können. Hiermit werden monetäre Kostendaten zu Toleranzänderungen ermittelt und eine Kostenoptimierung früh im Entwicklungsprozess durchgeführt. Für die Fertigungskostenbeeinflussung durch unterschiedliche Parametertolerierungen kann auf die unternehmensspezifischen Faktoren¹⁵ nach [WMJV13] zurückgegriffen werden. Diese Faktoren müssen für die nachvollziehbare Kostenentwicklung in der Kostenberechnung berücksichtigt werden. Für zuverlässige Kostenevaluierungen sollte das Berechnungsmodell an das jeweilige Unternehmensumfeld angepasst werden. Somit erfolgt die Kostenanalyse in den Teilschritten: *Bauteilklassifizierung*, *Herstellungsverfahrenszuweisung*, *Toleranz-Kosten Funktionsaufstellung*, *Bewertungskennzahlbestimmung* und abschließende *Bewertung*.

Für die Bauteilklassifizierung müssen zunächst die notwendigen Toleranzklassen auf Basis von Konstruktionszeichnungen oder aus funktionalen Gesichtspunkten nach [DIN10] ermittelt werden. Eine entsprechende Tabelle mit herstellbaren Toleranzklassen bezüglich Nennmaß und verschiedenen Ur- und Umformverfahren sind in Tabelle A.20 gelistet. Hierfür kann auch eine Bauteileingrenzung zur Einschränkung des Untersuchungsaufwands vorgenommen werden. Mögliche Ansätze hierzu vergleiche nachfolgendes Unterkapitel zur *semi-quantitative Kostenanalyse*. Die Zuordnung der Herstellungsverfahren mit erreichbarer

¹⁵ Verfolgte Fertigungsstrategie, vorhandener Maschinenpark, Maschinenkosten und benötigte Bearbeitungszeit

Genauigkeit in Abhängigkeit verschiedener Genauigkeiten kann nach genannter Tabelle A.20 erfolgen. Zuzüglich müssen die Maschinenkosten MaK und die notwendige Bearbeitungszeit je Verfahren für die Fertigung ermittelt werden. Hiermit können die Herstellungskosten HK anhand der Gleichung

$$HK = MaK_1 \cdot T_1 + MaK_2 \cdot T_2 + \dots + MaK_i \cdot T_i + AK + PK \quad (6.14)$$

berechnet werden. AK bezeichnet die fertigungsbedingten, resultierenden Ausschusskosten und PK stellt die entstehenden Prüfkosten zur Qualitätssicherung dar. Anhand der berechneten Herstellungskosten für verschiedene Toleranzeinstellungen kann die Toleranz-Kosten Funktion $f_{K,i}(\Delta_i)$ des Bauteils erstellt werden. Die Beziehung zwischen Toleranzen und Fertigungskosten kann üblicherweise mit einem exponentiellen Verlauf beschrieben werden [WMJV13]. Wird durch enge Toleranzforderungen ein Folgeprozess notwendig, ergibt sich im Funktionsverlauf ein Sprung durch die entstehenden Zusatzkosten. Anhand der statistischen Analyse und den hinterlegten quantitativen Kostendaten, können für unterschiedliche Toleranzeinstellungen Bewertungskennzahlen berechnet werden. Mit diesen kann eine Rangfolge zur kostenspezifischen Toleranzoptimierung festgelegt werden. Die Bewertungszahl ergibt sich, basierend auf Überlegungen nach [Yan94], zu:

$$R_{\Delta_i} = \frac{\left| \frac{d(f_{K,i}(\Delta_i))}{d(\Delta_i)} \right|}{\left(\frac{\delta Y}{\delta \Delta_i} \right)^2} \quad (6.15)$$

Die Rangzahl R_{Δ_i} setzt sich aus dem Betrag der Ableitung der Toleranz-Kosten Funktion sowie der Sensitivität des eingestellten Toleranzfeldes Δ_i hinsichtlich der Zielfunktion Y zusammen. Die Ableitung der Toleranz-Kosten Funktion kann als Kostengradient der untersuchten Toleranzeinstellung angesehen werden. Aus diesem Wert können Rückschlüsse auf die Entwicklung der Toleranzänderungskosten gewonnen werden. Ein betragsmäßig großer Wert von $\left| \frac{d(f_{K,i}(\Delta_i))}{d(\Delta_i)} \right|$, führt zu einem höheren Gradienten der Toleranz-Kosten Funktion und damit auf hohe Toleranzänderungskosten. Systemparameter, mit einem geringen Wert der Rangzahl R_{Δ_i} , bewirken eine vergleichsweise große Zielfunktionsbeeinflussung, bei geringen Toleranzänderungskosten. Infolgedessen sind DPs mit kleinen Rangzahlen vorrangig bei der Toleranzoptimierung zu betrachten.

Semi-quantitative Kostenanalyse

Diese Art der Kostenanalyse wird bei vorhandenen, jedoch unvollständigen oder mit Unsicherheit behafteten Kostendaten angewandt und unterscheidet sich im Vergleich zur *quantitativen* Vorgehensweise in der Aufstellung der Toleranz-Kosten Funktion und der möglichen Eingrenzung der Bauteile. Die Klassifizierung der Bauteile, die Zuweisung der Herstellungsverfahren sowie die Bestimmung der Bewertungskennzahl R_{Δ_i} erfolgt identisch wie bei der *quantitativen* Analyse. Die Eingrenzung der Bauteile wird analog nach dem *qualitativen* Vorgehen umgesetzt. Daher wird im Folgenden lediglich die Bestimmung der *semi-quantitativen* Toleranz-Kosten Funktionen vorgestellt.

Abhängig von der erforderlichen Toleranzklasse wird die Kostenfunktion auf Basis der von [KR07] angenommenen Entwicklung der Fertigungskosten bestimmt. Anhand des

zugehörigen Revisionsstandes der Konstruktionszeichnung kann die Ist-Toleranzklasse der Bauteile ermittelt werden. Mit den Einkaufskosten als Bezugskosten und der zugehörigen Toleranzklasse, kann mit der Annahme nach Bild 6.28, auf diese zurückgerechnet werden. Die Einkaufskosten teilen sich dabei in einen fixen Anteil aus Material- und Personalkosten und einen variablen Teil auf, der durch die Tolerierung des Bauteils bedingt ist. Nach [VDI15] beträgt der Materialkostenanteil 45 % und der Kostenanteil für Personal 17 % der Gesamtkosten K_{ges} . Somit bestimmt sich der fixe Kostenanteil zu 62 % der Gesamtkosten¹⁶:

$$K_{fix} = 0,62 \cdot K_{ges} \quad , \quad (6.16)$$

der variable Kostenanteil K_{var} ergibt sich invers zu

$$K_{var} = (1 - 0,62) \cdot K_{ges} \quad . \quad (6.17)$$

Die variablen Kosten der jeweiligen Toleranzklassen können anhand der Annahme nach Bild 6.28 berechnet werden. Dabei ist für das vorliegende Herstellungsverfahren die herstellbare Toleranzklasse aus Tabelle A.20 zu entnehmen. Bei Toleranzforderungen, die diese Herstellungsbreite übersteigen, wird entweder der Faktor für Sondermaßnahmen $K_{f_{SM}}$ und beziehungsweise oder der Faktor für ein notwendiges Folgeverfahren $K_{f_{fV}}$ durch Addition hinzugefügt. Der Faktor $K_{f_{SM}}$ berücksichtigt beispielsweise geringere, zeitliche Wartungs- und Wechselintervalle des Fertigungswerkzeugs, um die Toleranzforderungen zu erfüllen. Durch die Zusatzfaktoren können Toleranzklassen, welche Folgeverfahren oder Sondermaßnahmen benötigen, identifiziert werden.

Die Bewertung erfolgt in allen drei Kostenanalysearten hauptsächlich anhand Robustheits- und Kostenkriterien. Wird der Vergleich negativ bewertet, muss iterativ optimiert werden, andernfalls kann diese Iterationsschleife verlassen und in die R^2T -Phase übergegangen werden. Im Beispiel des $N3G^+$ erfolgt die Bauteileingrenzung bei einem Grenzwert $K_{lim} = 0,10\text{€}$. Darunter fallen sowohl die *SG* als auch die *ZS*. Zudem muss bei der *semi-quantitativen* Kostenbewertung der fixe und variable Kostenanteil ermittelt werden. Tabelle 6.15 zeigt die Aufteilung der jeweiligen Kostenanteile.

Tabelle 6.15: Einkaufskosten der *SG* und *ZS* unterteilt in fixen und variablen Anteil

Bauteil	Einkaufspreis [€]	Fixer- [€]	Variabler-Kostenanteil [€]
Schaltgabel	0,7136	0,4424	0,2712
Zahnrad	0,1989	0,1233	0,0756

Zur Modellierung der Kostenfunktion, auf Basis der in Bild 6.28 dargestellten Annahme, werden den IT-Toleranzklassen die Kostenfaktoren zugeordnet. Der Bezugswert stellt hierbei IT-11 dar, bei der der funktionale Verlauf der Kostenentwicklungsannahme den Faktor 1

¹⁶ Diese vereinfachte Annahme aus der Literatur muss hier getroffen werden, da aus Gründen der Geheimhaltung die tatsächliche Kostenverteilung nicht genannt werden kann. Unabhängig davon sei angemerkt, dass eine genaue Kostenermittlung im Unternehmen nicht immer durchführbar und zudem mit einem hohen Maß an Aufwand verbunden ist.

(100 %) hat. Auf diesen Bezugswert wird der variable Kostenanteil beider Bauteile umgerechnet. Im Beispiel der *SG* des *KLS*, entspricht der Kostenfaktor bei der Ausgangstoleranzklasse IT-10 1,2. Anhand des Verhältnisses der Kostenfaktoren kann der variable Kostenanteil des resultierenden Einkaufspreises für das Toleranzfeld nach IT-11 bestimmt werden:

$$K_{var,SG} = (1 - 0,62) \cdot 0,7136 \text{ €} = 0,2712 \text{ €} \quad , \quad (6.18)$$

$$\frac{1,2}{1,0} = \frac{K_{var,SG,IT-10}}{K_{var,SG,IT-11}} \quad , \quad (6.19)$$

$$K_{var,SG,IT-11} = \frac{K_{var,SG,IT-10} \cdot 1,0}{1,2} = \frac{0,2712 \text{ €}}{1,2} = 0,2260 \text{ €} \quad . \quad (6.20)$$

Für die Kostenfaktoren für Folgeverfahren wird $K_{f_{fv}} = 0,5$ und für Sondermaßnahmen $K_{f_{SM}} = 0,3$ definiert, deren Zuordnung nach Tabelle A.20 erfolgt. Daraus folgt das Kostenverhalten in Tabelle 6.16. Die dazugehörigen Kostenfunktionen können aus den ermittelten Kostenverhalten abgeleitet werden, vergleiche Bild 6.29.

Tabelle 6.16: Kostenverhalten der *SG* und *ZS* bei Toleranzänderung

Bauteil	IT-4	IT-5	IT-6	IT-7	IT-8	IT-9	IT-10	IT-11	IT-12	IT-13
ZS [€]	0,88	0,83	0,78	0,75	0,72	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16
SG [€]	1,75	1,60	1,44	1,34	1,24	0,71	0,68	0,64	0,59	0,56

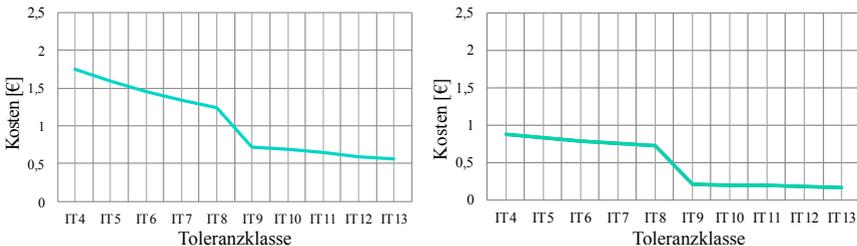


Bild 6.29: Semi-quantitative Kostenfunktion^a von *Schaltgabel* (links) und *Zwischenscheibe* (rechts)

^a Tatsächliche Kostenfunktion kann aus Geheimhaltungsgründen nicht gezeigt werden. Die gezeigten, berechneten Funktionen basieren auf den zuvor getroffenen, literarischen Annahmen.

6.4.6 Optimierung mittels Varianzzerlegung

Ziel der Optimierung ist die Varianzreduzierung im Gesamtsystem anhand der Analyse von zerlegten Einzelvarianzen. Zudem wird mit Unterstützung der ermittelten Rangzahlen R_{Δ_i} eine Kostenoptimierung erfolgen. Hierfür stehen die Ergebnisse aus der zuvor durchgeführten

ANOVA zur Verfügung, die das prozentuale Maß an der Gesamtstreuung der Zielfunktion den Parametern zuordnet. Die Maßzahl vergleicht allerdings nur die Parameter untereinander. Die Signifikanz hinsichtlich der Zielfunktion wird durch den *Fisher*-Wert dargestellt. Mit diesen tabellarisch aufgetragenen Werten können die Parameter bezüglich ihrer Signifikanz auf das System klassifiziert werden. Die Abbildung der Varianzzerlegung erfolgt mit der Gleichung 6.21:

$$\left(\frac{\sigma_{neu}}{\sigma_{alt}}\right)^2 = \left[\frac{\sigma_{neu,P_1}}{\sigma_{alt,P_1}}\right]^2 \cdot P_{P_1} + \left[\frac{\sigma_{neu,P_2}}{\sigma_{alt,P_2}}\right]^2 \cdot P_{P_2} + \dots + \left[\frac{\sigma_{neu,P_n}}{\sigma_{alt,P_n}}\right]^2 \cdot P_{P_n} + P_{Fehler} \quad (6.21)$$

Mit der Eigenschaft der Additivität von Varianzen:

$$Var(X + Y) = Var(X) + Var(Y) \quad , \quad (6.22)$$

$$\sqrt{Var(X + Y)} \neq \sqrt{Var(x)} + \sqrt{Var(Y)} \quad (6.23)$$

werden die Standardabweichungen zur Erreichung der Robustheitskriterien um ein bestimmtes Maß $\frac{\sigma_{neu}}{\sigma_{alt}}$ reduziert. Diese Änderung wird nach ihrer prozentualen Bedeutung P_q auf die einzelnen Parameter aufgeteilt und deren prozentualen Fehler p_{Fehler} addiert. Die Gleichung 6.21 kann mit der Systemvariation SS_T in Gleichung 6.8 wie folgt definiert werden:

$$SS_{T_{neu}} = SS_{P_2} + SS_{P_2} + \dots + SS_{P_m} + SS_E \quad , \quad (6.24)$$

mit dem Vorteil der Rechnung auf Basis absoluter Werte aufgrund der Einheitskonformität. Anhand des sich anschließenden numerischen Lösungsprozesses, können Toleranzgrenzen einzelner Parameter zielführend kontrolliert werden. Dabei sind mehrere Möglichkeiten gegeben, auf deren Basis dem Entwickler ein hohes Maß an Entscheidungsfreiheit gegeben wird. Eine Orientierung hierbei ist die Bedeutung P_{Fehler} des Fehlers, die maßgeblich zur Streuung der Zielfunktion beiträgt. Dies verdeutlicht die Umstellung von der Gleichung 6.21:

$$\left(\frac{\sigma_{neu}}{\sigma_{alt}}\right)^2 - P_{Fehler} = \left[\frac{\sigma_{neu,P_1}}{\sigma_{alt,P_1}}\right]^2 \cdot P_{P_1} + \left[\frac{\sigma_{neu,P_2}}{\sigma_{alt,P_2}}\right]^2 \cdot P_{P_2} + \dots + \left[\frac{\sigma_{neu,P_n}}{\sigma_{alt,P_n}}\right]^2 \cdot P_{P_n} \quad (6.25)$$

Ist die Bedeutung des Fehlers betragsmäßig größer als die Reduktion der Standardabweichung, liegt ein unlösbares, mathematisches Problem vor. Dies bedeutet, dass im System eine größere Streuung akzeptiert werden muss, da die minimale Streuung durch den vorliegenden Fehler vorgegeben ist. Mit den neu ermittelten Standardabweichungen kann eine abschließende Umrechnung in neue Toleranzgrenzen oder neue Prozessfähigkeiten erfolgen:

$$USG_{neu} = \mu - C_{pK} \cdot 3\sigma_{neu} \quad , \quad (6.26)$$

$$OSG_{neu} = \mu + C_{pK} \cdot 3\sigma_{neu} \quad . \quad (6.27)$$

6.4.7 Ableitung des prozessorientierten R^2 -Modells

Für die Modellierung des prozessorientierten $R^2_{Prozess}$ -Modells liegen zu diesem Zeitpunkt alle Informationen zur Funktion, Qualität und Kosten sowie deren Grenzen vor. Mit dem erstellten Modell, vergleiche Bild 6.30, können die Eigenschaften des *KLS* zur Erfüllung des konstruktiven Lüftspiels hinsichtlich Design, Qualität und Kosten betrachtet und bewertet

werden. Im ersten Quadranten wird die robuste Eigenschaft in Form der quasi-linearen Übertragungsfunktion von Verdrehwinkel Φ und gefordertem Lüftspiel s_{LS} eingestellt. Dieser simple Zusammenhang zeigt, dass eine Reduzierung beziehungsweise Erhöhung des KLS proportional in die Funktion des Lüftspiels eingeht. Zwar kann die Streuung des Lüftspiels nicht signifikant reduziert werden, durch die Steigung der Übertragungsfunktion jedoch direkt dessen Lage gesteuert werden. Die Ableitung des geforderten Lüftspiels bezüglich Qualität fordert entsprechend eine Qualitätsklasse bezüglich Fertigungs- und Herstellungsprozesse der SG und der ZS , welche zusammenfassend in eine Qualitätsfunktion respektive der vorgestellten Qualitätsklassen (IT-Klassen) dargestellt werden kann. Davon ausgehend können die Aufwandskosten in Abhängigkeit der Qualitätsklassen im dritten Quadranten mit Hilfe der definierten Kostenfunktion bestimmt werden. Dieser kompakte Zusammenhang

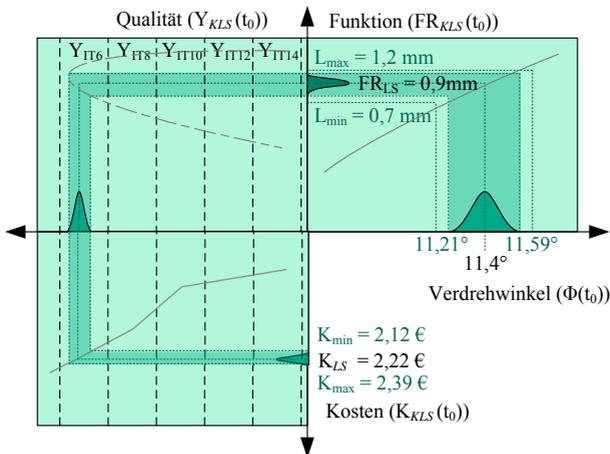


Bild 6.30: Prozessorientiertes R^2 -Modell des *Kulissenspiels* (schematische Darstellung)

zeigt die zulässigen Anforderungsgrenzen an die Konstruktion. Die finale Definition der Toleranzfelder und der sich daraus ergebenden Qualität respektive der Kosten, wird durch das Design eingehalten.

6.4.8 Handlungsempfehlungen

Nach Durchführung der Toleranzsynthese sowie Modellierung des $R^2_{Prozess}$ -Modells werden abschließend in der TD -Phase die Ergebnisse evaluiert und daraus dem Entwickler Handlungsempfehlungen hinsichtlich ZUV sowie des robusten Designs gegeben. Mit den Grenzmustern¹⁷ des B-Musterstandes werden erste Lebensdauerversuche bezüglich Funktion durchgeführt. Diese Erkenntnisse in Verbindung mit den VLE - beziehungsweise R^2 -Ergebnissen können in der Erprobung der darauffolgenden R^2T -Phase berücksichtigt werden.

¹⁷ Grenzmuster werden vor Serienbeginn definiert, um Anforderungen an die Komponente festzuhalten.

6.5 Robuste Zuverlässigkeitsabsicherung

Die Aufgabe der *Robusten Zuverlässigkeitserprobung* (R^2T)-Phase besteht darin, eine repräsentative Stichprobenanzahl und eine Teststrategie bei möglichst kleinem Testumfang und geringen Testkosten zu ermöglichen. Das Ziel ist ein aussagekräftiges Testergebnis mit geringerem finanziellen und zeitlichen Einsatz. Einen Überblick der chronologischen Vorgehensweise bietet Bild 6.31. Das R^2T basiert auf separaten Vorgängen und Methoden, die zu einer chronologischen Vorgehensweise zusammengesetzt sind. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen näher erläutert und bezüglich ihrer Anordnung in dieser Iterationschleife nachgewiesen. Das R^2T ist in vier Abschnitte unterteilt: die *Zuverlässigkeitsanalyse*, die *allgemeine Teststrategieplanung*, deren *Durchführung* sowie der *Zuverlässigkeits- und Robustheits-Nachweis*. Aufgrund der funktionalen Zuverlässigkeitsbestimmung und der sich daraus ergebenden Erprobungsstrategie muss das Zusammenwirken aller Funktionsbaugruppen im System betrachtet werden. Infolgedessen wird in dieser Phase die Vorgehensweise vorgestellt und am Gesamtsystem der *Nachstelleinheit* in Kapitel 7 veranschaulicht.

6.5.1 Zuverlässigkeitsanalyse

Die *ZUV*-analyse betrachtet auf Basis der geforderten *ZUV* des Kunden im ersten Schritt das vorliegende System beziehungsweise die Komponenten sowie deren Funktion. Hierbei wird von dem gegebenen Gesamtsystem auf ein reduziertes System geschlossen. In diesem System werden alle kritischen sowie fehleranfälligen Komponenten betrachtet, die zu einem Funktionsausfall führen können. Die Definition dieser Komponenten erfolgt in *SMAR²T* mittels dem *WZD* in der *SD*-Phase. Ergänzend können weitere Analysemethoden wie qualitative¹⁸ oder quantitative¹⁹ Verfahren angewandt werden. Anhand der reduzierten Betrachtung können mögliche Funktionsausfälle identifiziert und im Funktionsverbund funktionale Degradationsmerkmale definiert werden.

Das V-Diagramm nach [VDI93a] dient als stichhaltige Basis zur Erlangung von Vorwissen für das zuvor erstellte reduzierte System. Mit dieser Methode wird das Gesamtsystem in seine Komponenten zerlegt, diese werden optimiert, getestet und final zu einem System kombiniert, welches wiederum getestet wird. Ist das reduzierte System in seine signifikanten Komponenten zerlegt, kann eine weiterführende Betrachtung Aufschluss darüber geben, welche Vorinformationen vorhanden sind und wie diese auf Systemebene integriert werden können. Dies hat den Vorteil, dass das errungene Vorwissen auf Komponentenebene zur Reduzierung der Stichprobenanzahl auf Systemebene führt. Das modifizierte V-Diagramm, vergleiche Bild 6.32, erweitert die Ebenen-Betrachtung um die Funktionsebene. Diese Ebenen-Einführung schließt den Nachteil der Vernachlässigung der Funktion und des Zusammenwirkens übergeordneter Wirkzusammenhänge aus, da die Betrachtung der Komponenten losgelöst vom System erfolgt. Entsprechend wird der Ansatz einer Analyse der Funktionsfähigkeit innerhalb der System-/ Baugruppenebene verfolgt. Hierfür werden funktionale Degradationsmerkmale des Systems charakterisiert und modelliert. Die darauffolgenden Degradationsversuche untersuchen deren zeitliches Funktionsverhalten und geben Informationen über deren *ZUV*.

¹⁸ Verfahren wie *FMEA*, Fehlerbaumanalyse, Schadensstatistik, Design Reviews, Boole'sche Modellierung

¹⁹ Verfahren wie *FEM*-Berechnung, Fahrsimulationen, Betriebsfestigkeitsrechnung

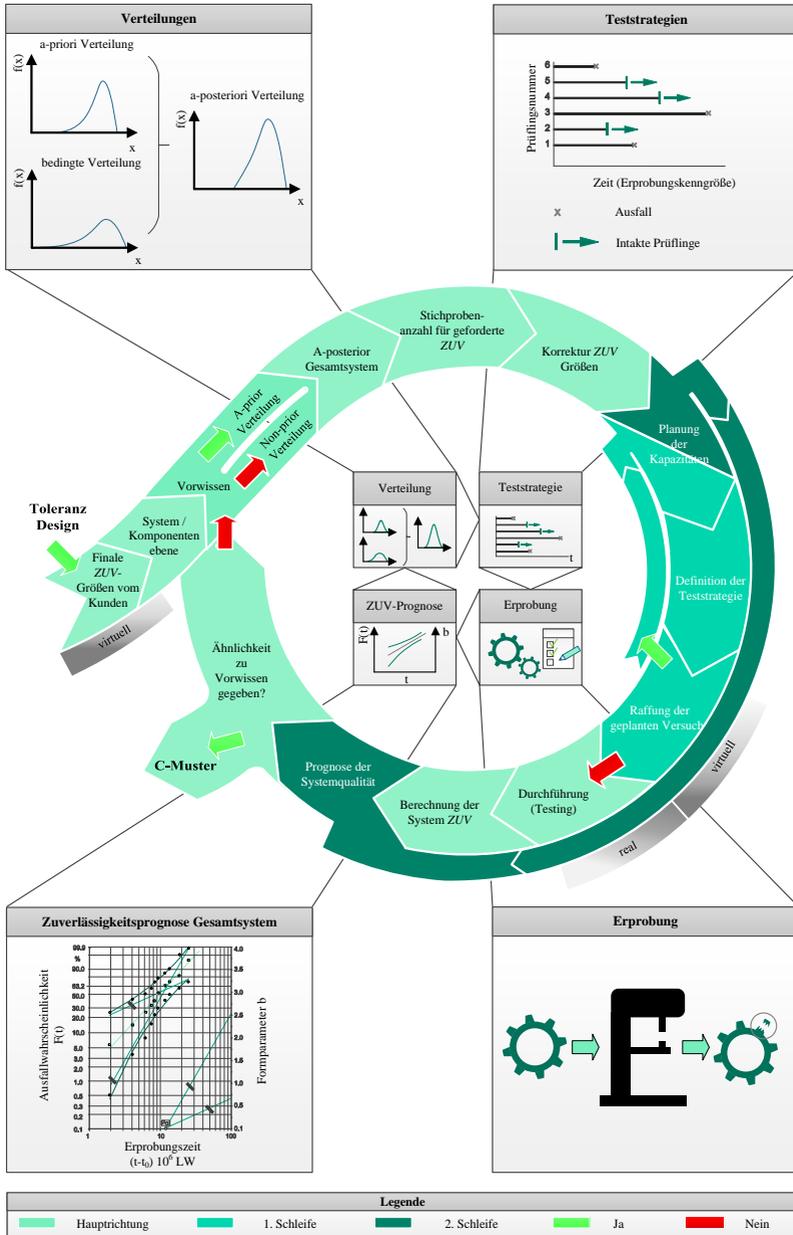


Bild 6.31: Robuste Zuverlässigkeitserprobung in SMAR²T

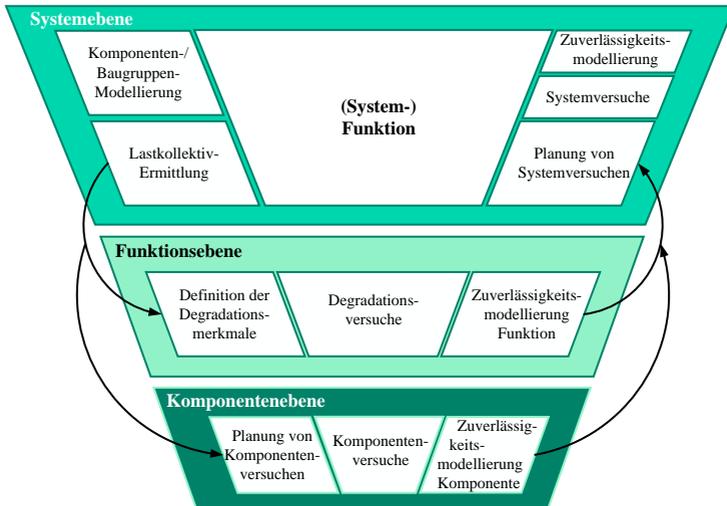


Bild 6.32: V-Diagramm: System-Funktion-Komponente

Integration des virtuellen Vorwissens

Bevor die Planung der Tests erfolgt sollten sämtliche Produktkenntnisse in Form von Vorversuchen, Expertenwissen, Vorgängerprodukten und getätigten Berechnungen (Simulationen) im Unternehmen²⁰ gesammelt werden. Dieses Vorwissen kann der Reduzierung des monetären und zeitlichen Prüfaufwands dienen, da der theoretisch ermittelte Stichprobenumfang oftmals die reelle Anzahl an zur Verfügung stehenden Prüflingen übersteigt.

Methoden zur Integration von Vorwissen haben überwiegend den Ansatz von *Bayes* gemeinsam, vergleiche Kapitel 3.2.4. Dabei entsteht aus Vorwissen in Form einer *a-priori-Dichte* in Kombination mit aktuellen Tests eine *a-posteriori-Dichte*. Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung von Vorinformationen in *SMAR²T* bietet das *R²*-Modell oder die *VLE*-Methode. Mit diesen ist es möglich, aus dem zeitlichen Funktionsverhalten des Produkts eine Ausfallverteilung zu generieren. Anhand dieser Vorinformation können die Nachweistests zielgerichteter geplant werden. Zudem kann neben den genannten zwei Möglichkeiten auch Vorwissen in Form einer *Noninformative-Prior* anstatt einer Gleichverteilung angenommen werden, da eine höhere *ZUV* in der Aussagewahrscheinlichkeit vorliegt. Mit der Verwendung von Vorwissen in *SMAR²T* kommt der Anwender geringen Testzeiten und einer kostengünstigeren Versuchsphase nach.

A-posteriori Gesamtsystem

Die *a-posteriori* Systemverteilung kombiniert das Vorwissen und die aktuellen Testergebnisse. [Mai07] gibt hierfür eine Zusammenfassung. Die Integration kann dabei durch zwei Methoden erfolgen: Annäherung durch eine Betaverteilung oder durch eine Rechteckverteilung

²⁰ Hilfestellung können hierfür beispielsweise Datenbanken, Intranet, und/oder Expertenrunden sein.

auf Basis der kritischen und fehleranfälligen Komponenten des zuvor erstellten reduzierten Systems entlang der seriellen Betriebsmodi-Struktur.

6.5.2 Allgemeine Planung der Teststrategie

Um zur tatsächlichen Teststrategie überzugehen, muss anhand der im Vorfeld bestimmten Vorinformation die Stichprobenanzahl in Abhängigkeit der geforderten Aussagesicherheit bestimmt und entsprechend daraus die Teststrategie in Abhängigkeit der gegebenen Rahmenbedingungen, wie Prüfstandskapazität oder Prüfdauer, definiert werden. Dies wird im Folgenden am Beispiel der ausfallfreien Testplanung dargestellt.

Stichprobenanzahl für geforderte Mindest-Zuverlässigkeit

Die Aussagewahrscheinlichkeit kann mit zunehmender Stichprobenanzahl erhöht werden beziehungsweise für die gleiche Aussagewahrscheinlichkeit kann mit Einsatz von Informationsgewinn die Stichprobenanzahl reduziert werden. Ohne Einsatz von Vorinformationen verhält sich der geforderte Stichprobenumfang zur geforderten Mindest-ZUV im Fall eines *Success Runs*²¹ im Allgemeinen nach Bild 6.33 (a). Dabei ergibt sich beispielsweise für eine Aussagewahrscheinlichkeit von 90 % für eine geforderte Zuverlässigkeit von 90 % ein notwendiger Stichprobenumfang von 22. Mit dem Einsatz des Transformationsfaktors kann

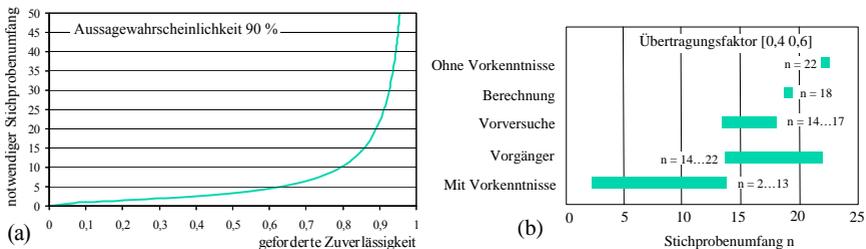


Bild 6.33: Stichprobenumfang im Verhältnis zur ZUV (a) und auf Basis des jeweiligen Vorwissens (b) nach [Kro04] und [Hit07]

dieser Umfang noch weiter reduziert werden [Hit07]. Allerdings kann dieser nur eingesetzt werden, wenn die Vorinformation auf den aktuellen Testversuch übertragen werden kann. In Bild 6.33 (b), nach dem Verfahren nach [Kro04], wird das individuelle Verhalten des Stichprobenumfangs in Abhängigkeit des jeweiligen Kenntnisstands gezeigt. Weitere Information zur Berechnung des Stichprobenumfangs siehe Kapitel 3.2.3 sowie [13].

Kapazitätsplanung

Die Gesamtkosten beziehungsweise die Kapazitätsplanung werden maßgeblich durch die folgenden Hauptkostenträger im Hinblick auf die Faktoren der Wirtschaftlichkeit der Testprozedur und die Aussagekraft der Prüfung beeinflusst:

²¹ Testablauf ohne auftretende Ausfälle

- ▶ *Prüflingskosten (Rüst- und Betriebsmittelkosten),*
- ▶ *Laufzeitkosten (Energiekosten- und Personalkosten).*

Auf Basis der ersten Schätzung des benötigten Stichprobenumfangs und der finalen Definition der geforderten Zuverlässigkeitsgrößen, können die für den Nachweis aufzubringenden Kapazitäten geplant werden. Unter den genannten Kostenträgern besteht eine Abhängigkeit. Diese führt zu einer wechselseitigen Testplanungs-Optimierung mit mehreren Unbekannten. Eine mögliche Vorgehensweise ist in [13] beschrieben, wobei es sich dort ausschließlich um eine ausfallorientierte Testplanung handelt, da eine zum Stand der Forschung und Technik nicht zufriedenstellende Vorgehensweise zur Auswahl einer geeigneten Teststrategie unter Berücksichtigung der Genauigkeit, Kosten und Testzeit, siehe dazu Tabelle A.23, existiert.

Definition der Teststrategie

Auf Basis von [13] und den in Bild 6.34 zur Verfügung stehenden Teststrategien, werden zu Beginn der Planung die maximalen Randbedingungen geklärt, siehe Tabelle A.17. Mit diesen Parametern werden unterschiedliche Teststrategien, vergleiche Bild 6.34 sowie Kapitel 3.2.3, miteinander verglichen und unter den gegebenen Bedingungen eine geeignete ausgewählt. Angemerkt sei, dass zum Stand dieser Arbeit und in [13] der Vergleich mit dem *Success-Run* Test noch aussteht, jedoch mit der Erweiterung der Parameterstudie mit der Zielsetzung eines reinen Lebensdauernachweises in Folgearbeiten vorgenommen wird. Nach [Yan07] kann die

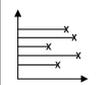
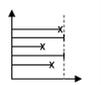
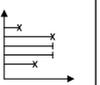
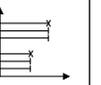
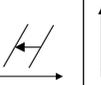
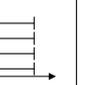
	Vollständig	Typ- I- zensiert	Typ- II- zensiert	Multiple Zensierung	Beschleu- nigte Tests	Success Run Tests
						
Informationsgehalt	++	-	+	--	-	---
Prüfzeit je Prüfling	--	+	-	++	+	+++

Bild 6.34: Übersicht der einzelnen Teststrategien

Zielsetzung auf Basis der jeweiligen Produktlebenszyklus-Stufe erfolgen. Hierzu werden in drei Phasen unterschieden, wonach ein Test begründet werden kann. Eine Übersicht hierzu gibt Tabelle 6.17. Bei der Zielsetzung der ersten drei Begründungen müssen meistens Verteilungsparameter einer Funktion bestimmt werden. Im Bereich des Fahrzeug- und Maschinenbaus sind dies die Parameter b und T der Weibull-Verteilung. In Abhängigkeit der Randbedingungen und des Stichprobenumfangs sowie der Teststrategie können einerseits entweder die Prüfkosten oder die Prüfdauer minimiert oder andererseits die Genauigkeit maximiert und zudem die Erfolgswahrscheinlichkeit betrachtet werden. Nach den Vorgaben der Optimierungs- und Zielgrößen muss die jeweils andere als Randbedingung definiert werden.

Für die Zielsetzung von Belastbarkeit und Belastung sowie für die Entdeckung von Fehlerursachen eignen sich besonders beschleunigte Prüfungen, allen voran die *HALT*-Methode. Bei

Tabelle 6.17: Gründe für Lebensdauertests nach [Yan07]

Gründe	Testempfehlung
Szenario 1: Design ist noch nicht exakt definiert	
1 Vergleich und Bewertung unterschiedlicher Komponenten und Materialien	Vergleichstests
2 Ermittlung von optimalen Designalternativen	Verteilungsparameter
3 Bestätigung der Effektivität einer Veränderung im Design	Lebensdauertests
4 Ermittlung von Belastbarkeit und Belastung	Beschleunigte Lebensdauertests
5 Entdeckung von Fehlerursachen	Beschleunigte Lebensdauertests
Szenario 2: Prototypen nach definiertem Design und Anforderungen	
6 Schätzung einer Zuverlässigkeit	Verteilungsbasierte Tests
7 Demonstration einer Zuverlässigkeit	Nachweistest (<i>Success-Run</i>)

diesen Tests ist die Beschreibung einer Genauigkeit oder einer Vorhersage von bestimmten Ausfallursachen aufgrund fehlender Funktionskenntnis nicht möglich, entsprechend können ausschließlich zu Testdauer oder -kosten Aussagen getroffen werden.

Die im *PEP* zeitlich versetzte Designvalidierung oder Vorserienerstellung wird eine geforderte B_q -Lebensdauer entweder mit Lebensdauertests oder mit *Success-Run* Tests auferlegt. Für die letzteren Tests wird der Nachweis einer Mindestzuverlässigkeit für eine geforderte Einsatzzeit nachgewiesen. Im Fall der Lebensdauertests werden die Verteilungsparameter und der Vertrauensbereich bestimmt. Empfohlen wird stets als letzte Variante auf den *Success-Run* Test zurückzugreifen, da eine genaue Produktkenntnis bezüglich Ausfallverhalten nicht erkannt wird und folglich eine Überdimensionierung vorhanden sein kann. In diesem Fall würde der *Success-Run* Test immer den geforderten Nachweis erbringen, allerdings würde sich für die meist nachfolgenden Designderivate keine gewinnbringende Erkenntnis ergeben. Zudem würden Optimierungspotentiale in beide Richtungen der Dimensionierung unterdrückt. Ein weiterer Grund für die Rangfolge des *Success-Run* Tests ist die Notwendigkeit der Angabe des Formparameters b bei der Verwendung des Lebensdauererhältnisses L_V , siehe [BL04]. Wird hierbei eine falsche Annahme getroffen, kann die Erfolgswahrscheinlichkeit für die Zielerreichung massiv sinken. Dies indiziert die Frage, ob eine Strategieänderung gewinnbringend wäre. Wie in Szenario 1 ist in Szenario 2 der Nachweis der *ZUV* mit einer festgelegten Aussagewahrscheinlichkeit P_A notwendig. Infolgedessen ist die Genauigkeit vorgegeben, was zur Optimierung der Kosten oder der Prüfdauer führt. Abschließend sei zusammengefasst, dass die Szenarien den unterschiedlichen Einsatz von Strategien beziehungsweise den Unterschied dieser aufzeigen, welches die Zuverlässigkeits- oder die Optimierungsgrößen sind. Nach der Definition der jeweiligen Größen kann, wie in [13] gezeigt, eine optimale, robuste Testplanung erfolgen.

Raffung der geplanten Versuche

Als nächster Schritt in R^2T erfolgt die Raffung der geplanten Versuche, analog zu den beschleunigten Lebensdauertests. Induziert wird dies im Versuch mit einer höheren Belastung der Bauteile als im normalen Beanspruchungskollektiv. Daraus resultieren frühere Schädigungen der Stichproben während der Versuche und damit niedrigere Lebensdauern. Zu Beginn dieser Versuche müssen die auf die Lebensdauer signifikanten Hauptgrößen bekannt sein und für einen zu erwartenden frühen Schädigungsprozess maximiert werden.

Es sei angemerkt, dass eine mögliche Zeitraffung der Versuche zu einer kürzeren Nutzungsdauer von Prüfständen führen kann, was in einer allgemeinen Kostenreduktion der Stichprobenprüfung mündet. Die Anordnung der Raffung nach der Planung der Kapazitäten und der Auswahl der Teststrategie gründet auf der Tatsache, dass die Raffung eine Diskrepanz bezüglich der Testergebnisse bewirken kann, da theoretische Vereinfachungen getroffen werden. Dementsprechend muss geprüft werden, ob es überhaupt einer Raffung bedarf, da ansonsten bereitwillig eine potentielle Fehlerquelle ermöglicht wird. Demnach liefert die Planung der Kapazitäten und die Auswahl der Teststrategie die Erkenntnis, ob die Prüflingsversuche gerafft werden müssen. Falls eine Raffung benötigt wird und durchführbar ist, muss aus dieser Phase heraus wieder in die Planung der Kapazitäten eingestiegen werden. Die Kapazitäten können demnach an die neuen Testzeiten angepasst und möglicherweise abgebaut werden.

6.5.3 Zuverlässigkeits- und Robustheits-Nachweis

In dieser Phase wird die definierte Anzahl an Stichproben der realen Prüfung an den Prüfständen unterzogen. Dabei wird sowohl die Planung der Kapazitäten als auch die ausgewählte Teststrategie realisiert, um eine optimale Durchführung hinsichtlich Kosten und Aussagefähigkeit zu ermöglichen. Nach durchgeführter Prüfung wird am Ende der R^2T -Phase auf Basis der berechneten Systemzuverlässigkeit der Zuverlässigkeits- und Robustheitsnachweis erbracht und eine Prognose der Systemqualität gegeben.

Berechnung der Systemzuverlässigkeit

Mit den realen Daten aus der Testdurchführung können in diesem Schritt die Zuverlässigkeitsgrößen, wie beispielsweise Ausfallwahrscheinlichkeit, Ausfallrate, Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte, B_q -Lebensdauer oder Standardabweichung berechnet werden. Die Berechnung erfolgt entweder auf Basis des zuvor bestimmten reduzierten Systems oder falls zu diesem Zeitpunkt lediglich Ergebnisse aus den Komponentenversuchen vorliegen, anhand einer *a-priori* Systemverteilung, die eine Berechnung der Systemzuverlässigkeit erlaubt.

Prognose der Systemzuverlässigkeit

Mit Hilfe der errechneten Systemzuverlässigkeit kann die Qualität des betrachteten Systems prognostiziert werden. Mit der Anwendung von $SMAR^2T$ werden die Produkte stets auf ihre ZUV untersucht und optimiert. Dies mündet in einer späteren Ausfallzeit und somit in einer höheren Systemqualität.

Ähnlichkeit zu Vorwissen

Dieser Schritt ermöglicht eine Iterationsschleife im R^2T . Hierbei wird im Nachgang der Prüfung und Prognose der Systemqualität abgefragt, ob das erzielte Resultat eine Ähnlichkeit zu dem in der Schleife eingebrachten Vorwissen aufweist. Falls keine Ähnlichkeit festgestellt wird, muss die Iterationsschleife des R^2T redundant durchlaufen werden. Zudem kann das Vorwissen und der Übertragungsfaktor überprüft werden. Mögliche Abweichungen korrigieren den Übertragungsfaktor im Hinblick auf eine verbesserte Anpassung von dem Vorgänger- und dem aktuellem Design. Bei einer Änderung der Stichprobenanzahl werden alle Schritte bis zur Planung der Kapazitäten nochmals durchgeführt. Aufgrund der aus der ersten Iterationsschleife definierten Testplanung kann im Nachgang der Planung der Kapazitäten sofort in die Phase der Prognose der Systemqualität eingestiegen und weiter verfahren werden.

6.5.4 Weitere Vorgehensweise und finale Schritte

Nach dem erfolgreichen Durchlauf der R^2T -Phase erfolgt die endgültige Parameterdefinition. Hierfür werden signifikante Systemparameter in ihrer finalen Definition festgehalten. Wurde in der R^2T die Teststrategie auf Ausfallbasis festgelegt, erfolgt im darauffolgenden Schritt die Dokumentation der Test- und Ergebnisparameter. Es sollten alle Vorgänge stichhaltig und lückenlos dokumentiert werden, da dies der Wiederverwendbarkeit und der Nachvollziehbarkeit des Verfahrens dient. Können die aktuellen Ergebnisse beziehungsweise die Vorgehensweise auf ähnliche oder sogar andere Projekte übertragen werden, sollte diese Übertragbarkeit dringend durchgeführt werden.

6.6 Adaptive Simulationsmethode für effektive Parameterstudien

Ein unterstützender Indikator zur Gestaltung von robusten und zuverlässigen Produkten ist die virtuelle Produktentwicklung, allen voran die Simulationstechnik im *PEP*. Damit das Verhalten der Produkte beziehungsweise die Funktion früh im *PEP*, unter Berücksichtigung einer Vielzahl variierender Einflussgrößen, vorhergesagt werden kann und dadurch Ressourcen eingespart werden können, werden zunehmend Simulationswerkzeuge eingesetzt. Eines davon ist die *FEM*. Auf Basis von Simulationsergebnissen dieser Methode kann die *Robustheit* von Produkten mittels den *RD*-Methoden *RDO* oder *TM* gesteigert und optimiert werden. Eine simulativ-gestützte Vorgehensweise, sowohl bei der *RDO* als auch bei der *TM*, ist die Erstellung von *META*-Modellen, die aus mehreren Designpunkten als Ergebnis der *FEM* mittels mathematischen Regressions-Modellen definiert werden und den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangseigenschaften beschreiben. Mittels diesen Regressionsmodellen können simulativ die *Robustheit* und die dazu gehörenden optimalen Parametereinstellungen beschrieben werden. Allerdings ist darauf zu achten, dass ein fertigungsgerechtes Design bestimmt und mittels gezielter und realer Versuche validiert wird.

6.6.1 Optimierungsplan nach *RDO* und Taguchi

Die Vorgehensweise der *RDO*-Methode basiert auf einer optimalen Parametereinstellung (Zielwert) mit geringer Zielgrößenstreuung als Randbedingung. In den meisten Fällen wird

bei dieser Vorgehensweise keine getrennte Optimierung bezüglich Zielwert und –streuung verfolgt. Mit der *Taguchi-Optimierung* wird im klassischen Sinne zuerst die Parametereinstellung hinsichtlich des Zielwerts optimiert und im Folgenden deren Streuung minimiert. Diese Vorgehensweise hat je nach Ressourcenaufwand der Simulationaufgabe den Vorteil, dass eine nominell optimale Parameterkombination gefunden werden kann, bei der zuerst die technische Realisierung beziehungsweise Fertigung geprüft wird. Bei geeignetem Design kann im nächsten Schritt die Streuung unter Berücksichtigung der Prozessparameter minimiert werden.

6.6.2 Quantitativer Vergleich beider Methoden

Zusammenfassend ist in Tabelle 6.18 eine Übersicht der Vorgehensweise der beiden Methoden und in Tabelle 6.19 deren grundlegenden Unterschiede gelistet. Im Vergleich zur *RDO* zielt die *TM* einerseits auf die Erhöhung der *Robustheit* ab, andererseits erfolgt der Optimierungsprozess mithilfe der *orthogonalen Felder (OFs)* überwiegend manuell statt mit Optimierungsalgorithmen. Hierbei werden die Parameter durch Felder klar getrennt. Nach der Sensitivitätsanalyse werden bei *RDO*, je nach Simulationsstrategie und Kapazität, alle oder nur die signifikanten Steuer- und Störgrößen betrachtet. Es werden dabei die signifikanten Parameter bevorzugt, die sowohl Stör- als auch Steuergrößen sein können, da zu viele Parameter die Approximationsqualität des *META*-Modells und den Optimierungsalgorithmus beeinträchtigen können und zudem ein zu großes Rauschen entstehen kann. Bei *TM* ist es einfacher beispielsweise alle Parameter zu berücksichtigen, indem ein größeres *OF* für die *DOE* verwendet wird. Allerdings müssen hierbei nach [Men06] die Toleranzgrenzen mit Sorgfalt gewählt werden, da ansonsten die Signifikanzen überdeckt würden. Beide

Tabelle 6.18: Übersicht zur Vorgehensweise der *RDO* und *TM* im Vergleich

<i>RDO</i>	<i>TM</i>
1. System- und Parameteruntersuchung	
2. Aufbau des Simulationsmodells (bei <i>TM</i> nicht zwingend notwendig)	
3. Durchführung der Sensitivitätsanalyse und Festlegung des <i>MOP</i>	
4. Festlegung der Verteilungsfunktion	4. Festlegung der Parameter-Teststufen
5. Auswahl des Optimierungsverfahren	5. <i>DOE</i> (orthogonale Felder)
6. Optimierung mit Zielgröße und Randbedingungen	6. Verringerung der Streuung
	7. Anpassung des Mittelwerts

Methoden verfolgen das gemeinsame Ziel, ein robustes Design zu definieren. Um dieses Ziel zu erreichen, weisen beide Methoden Unterschiede in ihrer Vorgehensweise beziehungsweise in ihrem Optimierungsvorgehen auf, vergleiche Tabelle 6.18. Die Effekte der *DPs* werden über verschiedene Realisierungsverfahren (*Sampling* oder *DOE*) der Verteilungsfunktion

Tabelle 6.19: Grundlegender Unterschied von *RDO* und *TM*

<i>RDO</i>	<i>TM</i>
- Nur sensitive Designs werden betrachtet	- Klare Parameter-Trennung durch Felder
- Zielgröße und Randbedingung sind vorgegeben	- Keine direkte Vorgabe von Randbedingungen
- Gleichzeitige Optimierung von μ und σ	- Getrennte Optimierung von μ und σ
- Optimum meist technisch nicht realisierbar	- Parameterbemessung nach fertigungs-technischen Gesichtspunkten

untersucht. *TM* begrenzt sich hauptsächlich darauf, die Haupteffekte zu ermitteln, während *RDO* zusätzlich die Wechselwirkung mitbetrachtet. Die Optimierung erfolgt bei *RDO* kombiniert mittels unterschiedlicher Algorithmen und bei *TM* durch die Verringerung der Streuung mit anschließender Mittelwertanpassung. Hierfür müssen bei *TM* die Einstellstufen der Parameter festgelegt werden. Infolgedessen gesehen und aufgrund von aufwendigen Simulationen oder realen Versuchen ist die Anwendung von *TM* empfehlenswert.

Nach der in [11] vorgestellten Untersuchung sind viele Gemeinsamkeiten zwischen den beiden Optimierungsmethoden zu finden. Falls dasselbe *META*-Modell verwendet wird, werden ähnliche Ergebnisse von *TM* und *RDO* erzielt und die Robustheitsoptimierung erreicht. Die *TM* ist im Allgemeinen eine universale Methode, die überwiegend in der *DOE* Anwendung findet. Dank ihrer niedrigen Versuchszahl ist diese Methode sowohl bei realen Versuchen als auch bei Simulationen anwendbar. Folglich ist ein *META*-Modell nicht zwingend erforderlich. Ein mögliches Rauschen im Ergebnis wird unterbunden, da die Verteilungsfunktionen der Parameter in Gleichverteilungen mit groben Abstufungen umgewandelt werden. Jedoch ist *TM* aufgrund des manuellen Optimierungsverfahrens nur auf relativ einfache Optimierungsprobleme mit geringer Parameteranzahl begrenzt. Wenn Randbedingungen beim Optimieren betrachtet werden müssen, ist die Optimierung komplizierter und aufwendiger. Darüber hinaus ist das Optimierungsergebnis wegen der groben Abstufung nicht sehr genau. Im Vergleich zur *RDO* zielt *TM* einerseits auf die Erhöhung der *Robustheit* ab, andererseits erfolgt der Optimierungsprozess mithilfe der *OFs* manuell anstatt mit Optimierungsalgorithmen. Hierbei werden die Parameter durch Felder klar getrennt. Beim manuellen Optimieren können die nicht signifikanten Parameter mit niedriger Priorität zum Schluss optimiert werden. Allerdings beeinträchtigt eine große Parameteranzahl auch die Genauigkeit des *MOP*. Eine konkrete Vorgehensweise als Zusammenfassung der Untersuchung ist in Form eines Flussdiagramms in Bild B.10 dargestellt. Es gibt dem Entwickler entsprechende Handlungsempfehlungen zur Anwendung beider Methoden sowohl losgelöst als auch in Anbetracht der Anwendung mit der Methodik *SMAR²T*.

6.6.3 Vorgehensweise *SIM-SMAR²T*

Um die beschriebenen Kriterien für ein geeignetes Simulationsmodell in den Phasen *PD* und *TD*, siehe Kapitel 6, zu erfüllen, soll ein adaptives Simulationsmodell (*SIM-SMAR²T*) entwickelt werden, welches gleichzeitig flexibel gestaltet und gleichungsbasiert ist. Dieses Modell soll für detailliertere Untersuchungen lokal um struktur-mechanische *SUB*-Modelle erweitert werden. Diese Vorgehensweise ergänzt *SMAR²T* einerseits in der simulativen Gestaltung von robusten *DPs* und andererseits in ihren Zuverlässigkeitsprognosen sowohl in der *PD*- als auch in der *TD*-Phase. Im ersten Schritt der Sensitivitätsanalyse in der *PD*-Phase werden die Parameter des Systems nach *SMAR²T* identifiziert, klassifiziert und in einem globalen P-Diagramm erfasst. Unter den identifizierten *DPs* können *DPs* bestehen, die sich nur mittels einer *FE*-Simulation berechnen lassen, wie etwa Temperatur- oder Verschleißefflüsse. Aufgrund der hohen *Komplexität* der Produkte ist es nur unter erheblichem Aufwand möglich, eine ganzheitliche *FE*-Simulation zu realisieren. Es werden enorme Kapazitäten benötigt, um entsprechende Simulationen zu berechnen. Sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht, sind daher schnell die Grenzen der Umsetzbarkeit erreicht. Im Kontrast dazu sind für die Optimierungen und für die Robustheitsanalysen, aufgrund von potentiell durchzuführenden Iterationsschleifen, kurze Rechenzeiten von Vorteil. Die Basis

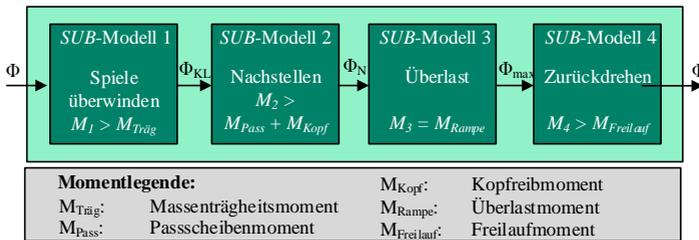


Bild 6.35: Globale Simulationsstrategie

der Simulationsstrategie, vergleiche Bild 6.35, bildet ein eindimensionales (*ID*) analytisches Grundmodell, welches in entsprechende *SUB*-Modelle aufgeteilt ist. Die Aufteilung des komplexen Gesamtsystems sollte nach funktionalen Gesichtspunkten vorgenommen werden. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die funktionalen Wirkzusammenhänge des Material-, des Kraft- und des Energieflusses im System erhalten bleiben. Im weiteren Schritt kann anhand der Zuordnung der Parameter zu den *SUB*-Modellen und den entsprechenden Betriebsmodi entschieden werden, welche *SUB*-Modelle näher untersucht werden sollen. *SUB*-Modelle, die einen hohen funktionalen Anteil am Gesamtsystem haben, können anhand neu aufgestellter lokaler Grenzen analysiert werden. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen werden geeignete *META*-Modelle generiert, die wiederum in *SIM-SMAR²T* implementiert werden. Daraus können Erkenntnisse hinsichtlich der globalen Optimierungsgröße gewonnen werden.

Grundlegende Voraussetzung eines adaptiven Simulationsmodells ist die funktionale Systemanalyse auf Basis von Wirkzusammenhängen. Unterstützend hierfür kann die in *SMAR²T* angewandte *AD* Methode eingesetzt werden. Für das in dieser Dissertation gewählte Anwendungsbeispiel eignet sich besonders die Momentbetrachtung der einzelnen Betriebsmodi.

Grund hierfür sind die unterschiedlichen Beanspruchungen des Produkts je Betriebsmodus. Zum Beispiel wird beim *Nachstellen* ein anderer Momentbereich benötigt als bei dem Betriebsmodus *Überlast*. Folglich kann ein gesamter Momentbereich in Form eines Momentverlaufs für alle aufeinanderfolgenden Betriebsmodi bestimmt werden. Zudem bleibt bei dieser Betrachtungsweise der funktionale Wirkzusammenhang weiterhin gewährleistet. Danach wird entschieden, welche *SUB*-Modelle näher untersucht werden sollen. Die Entscheidung erfolgt nach dem *P-Diagramm* beziehungsweise nach der Parameterzuordnung zu den einzelnen *SUB*-Modellen. Dabei entspricht ein *SUB*-Modell einem bestimmten Betriebsmodus, vergleiche Bild 6.35. Für jedes *SUB*-Modell kann ein definierter Parametersatz festgelegt werden, mit dem eine getrennte beziehungsweise lokale Betrachtung von einzelnen Parametern möglich ist. Beispielsweise bewirkt eine Degradation in der Überlastkupplung ein anderes Momentverhalten als eine Degradation im Nachstellmoment. Die erwähnten Betriebsmodi sind die ersten vier Betriebsphasen in Kapitel 7.

Für die Simulation ist die rotatorische Bewegung $\Phi(M)$ die Eingangs- und Steuergröße, dabei wird das Moment im jeweiligen *SUB*-Modell erfasst. Die einzelnen Betriebsmodi beziehungsweise *SUB*-Modelle folgen seriell einem definierten Winkel Φ . Beispielsweise setzt der Betriebsmodus *Nachstellen* erst ein, wenn das konstruktive Lüftspiel überwunden ist. Dieser Zeitpunkt wird als Winkel Φ_{KLS} bezeichnet. Danach wird solange nachgestellt, bis die Beläge die Scheiben berühren. Dieser Zeitpunkt wird als Nachstellwinkel Φ_N definiert. Der Betriebsmodus *Überlast* erfolgt bedingt durch die hohe Anpresskraft und durch das unmittelbar hoch ansteigende Gegenmoment auf den Nachsteller. Dieser Betriebsmodus bleibt solange aktiv, bis die Bremsphase beendet ist. Dieser Zeitpunkt wird als Φ_{max} bezeichnet. Im Anschluss wird der Nachsteller durch den Hebel in Ausgangsposition zurückgedreht.

Nachdem die Simulationsstrategie anhand der einzelnen Betriebsmodi bestimmt wurde, können die *SUB*-Modelle aufgebaut werden. Der Fokus liegt hierbei auf den beteiligten Bauteilen pro Betriebsmodus, die einen Einfluss auf den Momentverlauf haben. Diese erste Vereinfachung bewirkt eine erste Verkürzung der Simulationszeit. Der weitere Vorteil dieser Aufteilung ist das parallele Arbeiten am jeweiligen *SUB*-Modell. Zudem kann je nach gewünschten Änderungen am Produkt das einzelne *SUB*-Modell relativ schnell ergänzt und erweitert werden. Der Zusammenschluss der *SUB*-Modelle erfolgt in *SIM-SMAR²T* (Basis-Modell), vergleiche Bild 6.36. In diesem Modell werden alle Informationen zusammengefasst und verarbeitet. Grundlage ist ein zu Beginn erstelltes analytisches Modell mit dem Änderungen, wie Durchmesser oder Reibwert, direkt beschrieben und der resultierende Momentverlauf aufgenommen werden kann. Parameter wie Temperatur oder tribologische Untersuchungen können in diesem Modell nicht explizit beschrieben werden. Folglich sollen solche Parameter in einem *FE*-Modell simuliert und anhand von Abhängigkeitsmodellierungen in das jeweilige *SUB*-Modell überführt werden. Die Vorgehensweise gliedert sich dabei in drei Schritte. Im ersten Schritt wird das *META*-Modell (Systemgleichung) in der *FE*-Umgebung aufgebaut und die entsprechenden Parameter definiert. Im zweiten Schritt wird eine *DOE* durchgeführt, mit welchem eine Systemabhängigkeit modelliert wird. Hat das *META*-Modell eine zufriedenstellende Modellanpassung kann es im dritten Schritt in *SIM-SMAR²T* integriert werden. Hierfür wird auf Grundlage der *Moving-Least-Squares Approximation* in Kapitel 2.2.3 und dessen weiterentwickeltes Derivat von [MW11], ein Regressionsschätzer abgeleitet und modifiziert, mit dessen Aufruf für beliebige Parameter-

einstellungen der entsprechende Momentverlauf aus dem Parameterraum zurückgegeben wird. Dieser Regressionschätzer²² ist in [18] näher beschrieben und wird an dieser Stelle nicht weiter besprochen.

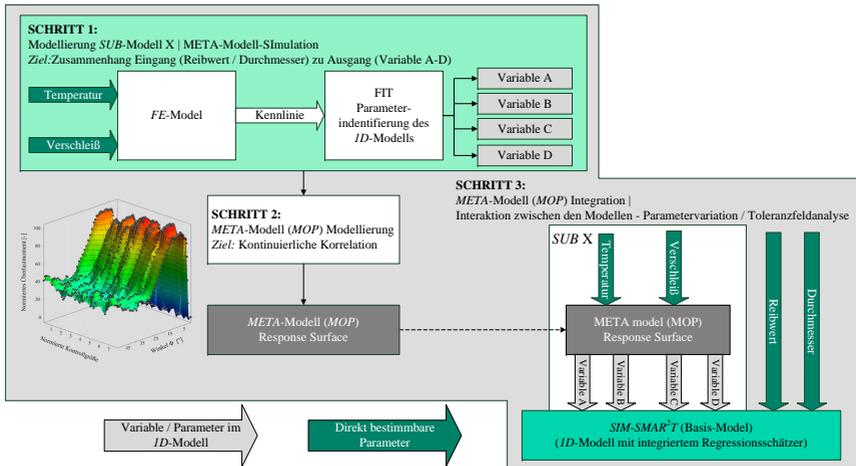


Bild 6.36: Vorgehensweise der Robustheitsoptimierung und simulativen Taguchi-Methode

Angemerkt sei, dass bei der Definition des diskreten Samplings darauf zu achten ist, dass die Parametergrenzen berücksichtigt werden. Bei einem kontinuierlichen Sampling werden aufgrund geringer Stichproben, häufig die Parametergrenzen nicht erfasst, wodurch folglich der Parameterraum nicht ganz abgedeckt wird. Zudem sollten in den Randbereichen mehr Designs ausgewählt werden, damit eine bessere Modellqualität des *MOP* entsteht. Eine genaue Vorgabe der Designpunkte der Parameter sowie deren Dezimaltaktung sind empfehlenswert. Grund hierfür ist die sehr gute Approximation des *META*-Modells zu den simulierten Designs.

6.7 Grundphilosophie der Arbeit

Abschließend werden in diesem Kapitel die neuen Ansätze und Vorgehensweisen: die Methodik *SMAR²T*, die R^2 -Theorie mit dem R^2 -Modell und deren Bezug zur Anwendbarkeit sowie deren Bedeutung für die Praxis zusammengefasst. Die vorgestellte R^2 -Theorie sowie deren chronologische Umsetzung nach dem *PEP* mit der Methodik *SMAR²T* können als effektiver und adäquater Zusammenschluss der Theorien *ZUV* und *RDM* mit deren Methoden im Qualitätsmanagement platziert werden, vergleiche Bild 6.37. R^2 ist eine zusammenfassende Theorie, die während des *PEP* sowohl auf die *ZUV* als auch auf die *Robustheit* der Produkte eingeht und deren Kosten berücksichtigt. Somit können zwei Theorien zu einer gemeinsamen

²² *CMLS*- Angepasster Regressionschätzer durch einen variablenabhängigen Koeffizienten bezüglich der Gewichtungsfunktion der Moving-Least-Squares-Methode

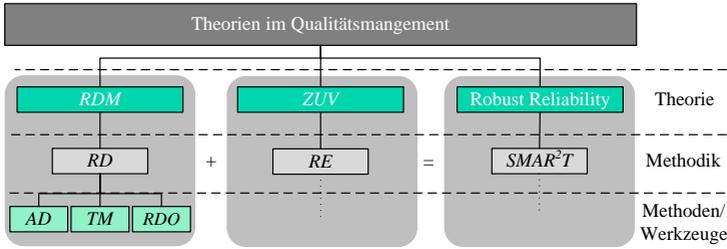


Bild 6.37: R^2 im Qualitätsmanagement

Theorie zusammengeschlossen und der Entwicklungsprozess um ein großes Spektrum an Methoden und Werkzeugen erweitert werden. Dies führt zur Vereinfachung, Verbesserung und Beschleunigung der Entwicklung von neuen Produkten beziehungsweise Prozessen. Mit der R^2 -Theorie sollen zugleich robuste und zuverlässige Produkte entstehen. Dazu geht die Theorie bis auf die Produktgestalt eines Systems zurück. Produkte und Prozesse bestehen fast immer aus mehreren, verschiedenen Bauelementen, die physikalisch, informationell oder energetisch miteinander verbunden sind. Gemeinsam verfolgen sie die Aufgabe eine oder mehrere Gesamtfunktionen des Systems zu erfüllen. Je nach Zustand, Dynamik, Anzahl und Art der Elemente entsteht dadurch eine gewisse *Komplexität*. Dies hat zur Folge, dass zwangsläufig, je nach vorhandenem Informationsgehalt, Unsicherheiten entstehen, die sich negativ auf die Qualität des Systems auswirken. Grund dafür sind die entstehenden Schwankungen der Anforderungen beziehungsweise Eigenschaften. Die Unempfindlichkeit gegenüber diesen Schwankungen wird im Maschinenbau als *Robustheit* definiert. Kann die *Robustheit* über einen bestimmten Zeitraum erfüllt werden, wird von einem zuverlässigen Produkt gesprochen. *ZUV* und *Robustheit* sind wiederum Anforderungen der Qualität, vergleiche Bild 6.38. Die R^2 -Theorie bildet damit einen roten Faden durch die vier Domänen

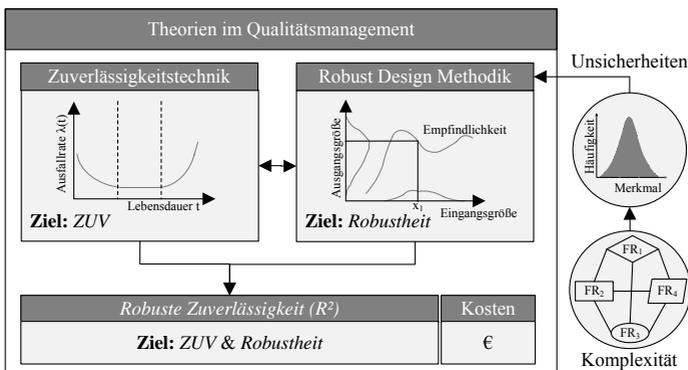


Bild 6.38: R^2 im Zusammenhang

Komplexität, Unsicherheit, Robustheit und *ZUV* unter Berücksichtigung der Kosten. Sie zeigt, dass jede der genannten Bereiche lediglich eine Abfolge des Vorherigen ist und dadurch ein potentielles Risiko für die Qualität des Systems darstellt. Mit dieser Sichtweise kann durch die Beherrschung der jeweiligen Domäne final das Ziel einer erfolgreichen Umsetzung des *QM* erreicht werden.

6.8 Zusammenfassung und Bewertung von *SMAR²T*

Mit der vorgestellten integralen Methodik *SMAR²T* wird ein Vorgehen aufgezeigt, wie robuste, zuverlässige Produkte oder Prozesse gestaltet werden können. Somit wird die bislang bestehende Freiheit in der Vorgehensweise strukturiert und dem Entwickler eine Schritt-für-Schritt Vorgehensweise an die Hand gegeben. Mit Hilfe von *SMAR²T* wurden in diesem Kapitel die Funktionsbaugruppen: *Freilauf*, *Überlastkupplung* und *Kulissenspiel* in der jeweiligen Phase, unter dem Aspekt der R^2 -Theorie, untersucht und entwicklungsbegleitend robust und zuverlässig gestaltet.

Die *SD*-Phase zeigt mit ihrer Anwendung eine strukturierte Vorgehensweise zur Konzeptfindung. Im Beispiel des *Freilaufs* konnte dadurch bereits frühzeitig die *Komplexität* im System beschrieben werden. Mit der Anwendung der *AD*-Methode wurde zum Ende der Phase ein *Freilauf*-Konzept mit einem niedrigen *Informationsgehalt* und folglich mit einer hoher Erfolgswahrscheinlichkeit zur weiteren Betrachtung im *PD* ausgewählt. In der *PD*-Phase wurde mit dem *P-Diagramm* die Einflussfaktoren auf die Funktionsbaugruppe *Überlastkupplung* kategorisiert und entsprechend eine Simulationsstrategie nach der *SIM-SMAR²T*-Methode, siehe nachfolgendes Kapitel 6.6, definiert. Anschließend wurden Versuchspläne mit *Innere*m und *Äußerem Feld* aufgestellt. Zuvor konnte das allgemeine Verhalten der Parameter mittels einer Sensitivitätsanalyse ermittelt werden. Nach erfolgreicher Durchführung der Versuche wurden die Ergebnisse anhand der *ANOM* und der *ANOVA* ausgewertet und somit eine Optimierungsrichtung für die verschiedenen Zielgrößen vorgegeben. Zusätzlich wurde das Funktionsverhalten über der Einsatzzeit mit der *VLE*-Methode simulativ bestätigt. Die Durchführung von Bestätigungsexperimenten verifiziert die Ergebnisse. Mit diesen und dem R^2 -Modell kann sowohl die *Robustheit* abgesichert als auch die *ZUV* abgeschätzt werden.

Die *TD*-Phase verknüpft den Kostenaspekt mit der *Robustheit* auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen. Es werden Kostenmodelle vorgestellt um die resultierenden Kosten auf *qualitativer*, *semi-quantitativer* oder *rein quantitativer* Betrachtungsebene zu ermitteln und zu bewerten. Die Wahl der Betrachtungsebene bestimmt sich hierbei aus den vorliegenden Daten zur Kostenentwicklung bei Toleranzänderungen. Die Toleranzuntersuchung erfolgt analog der *PD*-Phase mit Versuchsplänen nach *Taguchi*. Als Ergebnisse des *TD* werden die robusten und kosten-optimalen Toleranzfelder definiert. Ebenso werden Handlungsempfehlungen hinsichtlich *Robustheit* und Kosten, im Bezug zum ursprünglichen Design, formuliert. Mit der Anwendung der zusammengefassten Vorgehensweise konnte ein *Kulissenspiel* kosten-optimiert definiert werden.

In der letzten Phase, der R^2T -Phase, werden Kernpunkte der Produkterprobungsphase zu einer aufeinander aufbauenden, geordneten Vorgehensweise verknüpft. Basierend auf den kundenspezifischen *ZUV*-Kenngrößen wird das betrachtete System in ein reduziertes System mit kritischen und potenziell zum Ausfall führenden Funktionsmerkmalen zerlegt. Mit

der Integration des Vorwissens können Informationen aus verschiedenen Quellen die ZUV-Aussage erhöhen und damit den geforderten Stichprobenumfang für Lebensdauerversuche reduzieren. Zudem kann mit Hilfe des R^2 -Modells, mit der integrierten VLE als Vorwissen, eine zielgerichtete Testplanung definiert und somit der Stichprobenumfang weiter reduziert werden, vergleiche hierzu weiterführend [16]. Mit der anschließenden Prüfstrategie (Testzeit und Aussagegehalt) und dem Nachweisverfahren kann aus verschiedenen Testarten gewählt werden, wie es beispielhaft in [13] gezeigt wird. Nach der Durchführung der Versuche, der Berechnung der Systemzuverlässigkeit und der Prognose über die Systemqualität, schließt das R^2T mit der Frage ab, ob das erzielte Resultat eine Ähnlichkeit zum eingeleiteten Vorwissen aufweist. Ist diese Ähnlichkeit gegeben, wird die Iterationsschleife verlassen und mündet schließlich in einem für die C-Musterphase gestalteten Design mit Handlungsempfehlungen. Mit dem R^2T wurde somit ein Vorgehen entwickelt, welches eine stichhaltige und ressourcensparende Möglichkeit bietet, Produkte zu erproben.

Zur Bewertung der *Robustheit* von Produkten werden Parameterstudien angewandt. Für eine umfassende Untersuchung und Aussagesicherheit in diesem Parameterraum, ist eine hohe Abdeckung an Versuchsergebnissen von Vorteil. Bei aufwendigen Simulationen sowie bei einer hohen Anzahl an Parametern kann dies zu einem exponentiellen Aufwand führen, entsprechend sind geringe Simulationszeiten anzustreben. Das hier zusammengefasste und in [5] und [11] diskutierte adaptive Simulationsmodell basiert auf einem flexibel gestalteten und gleichungsbasierten Grundmodell, welches für eine detailliertere Untersuchung lokal um struktur-mechanische Submodelle erweitert wurde. Diese Vorgehensweise bietet die Möglichkeit in kurzer Zeit erste Erkenntnisse über die Funktionalität des Produkts zu erlangen und um weitere Designstadien iterativ ergänzt zu werden.

Die vorgestellte Vorgehensweise zur Erstellung eines adaptiven Simulationsmodells kann im Allgemeinen auf weitere Simulationsaufgaben angewandt werden. Weitere große Vorteile des funktional adaptiven Simulationsmodells sind die flexible Erweiterbarkeit beispielsweise um weitere *META*-Modelle sowie die einfache Integration von geänderten *DPs* innerhalb der *META*-Modelle.

7 Anwendungsbeispiel: Nachstelleinheit N3G⁺

Als abschließender Validierungspunkt wird in diesem Kapitel die *SMAR²T*-Methodik angewandt und anhand eines komplexen, mechanischen Industriebeispiels vorgestellt. Aufgrund des Detaillierungsgrads wird hierbei der Fokus ausschließlich auf die für die Methodik notwendigen Ergebnisse gelegt. Weitere Veröffentlichungsarbeiten zu diesem Thema sind gegeben, vergleiche Veröffentlichungsliste im Anhang.

7.1 Das Anwendungsbeispiel: Eine kurze Vorstellung

Als Anwendungsbeispiel wird eine, dieser Dissertation zugrunde liegende, Nachstelleinheit für Nutzfahrzeuggremssystemen der Firma *Knorr-Bremse - Systeme für Nutzfahrzeuge SfN* untersucht. Dabei handelt es sich um eine innovative Neuentwicklung auf Basis einer bestehenden Vorgängergeneration. Der Einstieg in das *SD* erfolgt mittels gegebener Anforderungsliste und Definition der *Design Matrix (DM)*.

7.1.1 Die Betriebsbremse und ihre Funktionsweise

Nutzfahrzeuge werden heutzutage in Europa fast ausschließlich mit druckluftbetriebenen Scheibenbremsen ausgestattet [BB12]. Die gängigste Form ist der Aufbau mit schwimmend gelagertem Bremsattel, durch welchem eine beidseitige Bremskrafteingriffswirkung bei einseitiger Betätigung erreicht wird. Die hier beschriebene pneumatische Scheibenbremse ist mit zwei Stempeln zur Zuspannung und mit Schwimmsattel ausgeführt, vergleiche Bild 7.1. Bei Betätigung der Betriebsbremse durch den Fahrzeugführer wird der *Hebel (A)* durch das Pleuel des Pneumatikzylinders (im Bild nicht dargestellt) betätigt und aus der Rotationsbewegung des Hebels mittels exzentrischer Lagerung, eine translatorische Verschiebung der Traverse (Brücke) erreicht. Die Traverse beinhaltet die Aufnahme der Gewindespindel sowie die Synchronisierungseinheit zwischen diesen. Durch die konstruktive Begebenheit des Hebels wird eine konstante Hebelübersetzung bewerkstelligt, welche die Bremskraft verstärkt. Die translatorische Bewegung an den inneren *Bremssattel (D)* wird durch Druckstücke, die an den Gewindespindeln befestigt sind, übertragen. Beim Betätigen der Bremse muss der Abstand des inneren Bremsbells zur *Bremsscheibe (E)*, das sogenannte *Lüftspiel*, überwunden werden, damit bei Kontakt der beiden Komponenten die Bremskraft zur Verzögerung des Fahrzeugs eingeleitet werden kann. Die Einleitung der Bremskraft erfolgt durch den im *Bremsträger (F)* schwimmend gelagerten Bremsattel und durch den äußeren Belag.

7.1.2 Die Nachstelleinheit

Um den Verschleiß der Bremsbeläge sowie der Bremsscheibe während des Betriebs auszugleichen, wird ein *Verschleißnachstellsystem (C)* verbaut. Die Wirkungsweise dieses

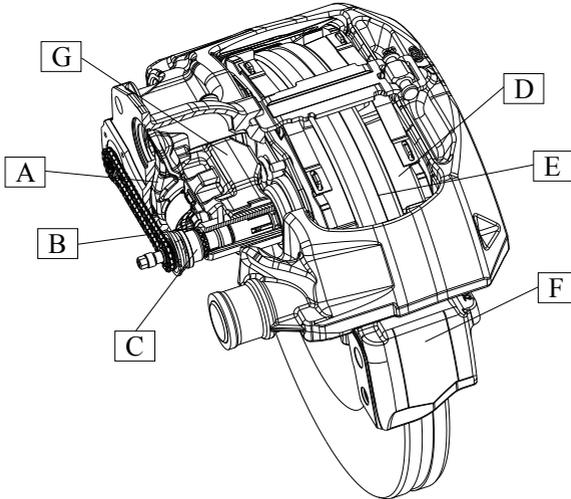


Bild 7.1: Isometrische Darstellung einer Scheibenbremse

mechanischen Systems ist unabhängig von verschiedenen Bauarten und vergleichbar [BB12].

Die Funktion des Nachstellers beinhaltet die Ausführung von fünf Betriebsmodi:

- ▶ Betriebsmodus 1: *Konstruktives Lüftspiel überwinden*,
- ▶ Betriebsmodus 2: *Nachstellen*,
- ▶ Betriebsmodus 3: *Überlast – Entkoppeln*,
- ▶ Betriebsmodus 4: *Rückdrehbewegung – Startposition* und
- ▶ Betriebsmodus 5: *Servicefunktion*.

Zu Beginn der Bremsbetätigung wird vom *Hebel (A)* die Bewegung über die *SG (07)* eingeleitet. Es wird ein Leerhub ausgeführt, bis das konstruktive Lüftspiel überwunden ist. Anschließend wird im zweiten Betriebsmodus über den Schwenkhub des *Hebels (A)* das Antriebsdrehmoment in den Nachsteller eingeleitet, das über den *Klemmrollen-Freilauf (KRF) (b)*, vergleiche *SD-Phase* in Kapitel 6.2, und der *Überlastkupplung (a)* auf die *Gewindespindeln (GS) (B)* weitergeleitet wird. Durch die Verdrehung der *GS (B)* wird ein zu großes Lüftspiel korrigiert. Die Nachstellbewegung erfolgt bis der *Bremsbelag (D)* an der *Bremsscheibe (E)* anliegt. Dies hat zur Folge, dass ein Gegenmoment aufgebaut wird, welches die Nachstellbewegung stoppt. An dieser Stelle beginnt Betriebsmodus 3. Aufgrund des Gegenmoments können sich die *GSs (B)* nicht mehr verdrehen und es kann nicht mehr nachgestellt werden. Der *Hebel (A)* hingegen leitet nach wie vor eine Antriebsbewegung in den Nachsteller ein, weshalb das System von der Drehbewegung entkoppelt werden muss, was durch die *Überlastkupplung (a)* realisiert wird. Das Drehmoment wird nur bis zu einem bestimmten Grenzwert übertragen. Bei einem höheren Wert des eingeleiteten Drehmoments wird das System in eine translatorisch axiale Verschiebung entkoppelt, vergleiche *PD-Phase* in Kapitel 6.3.

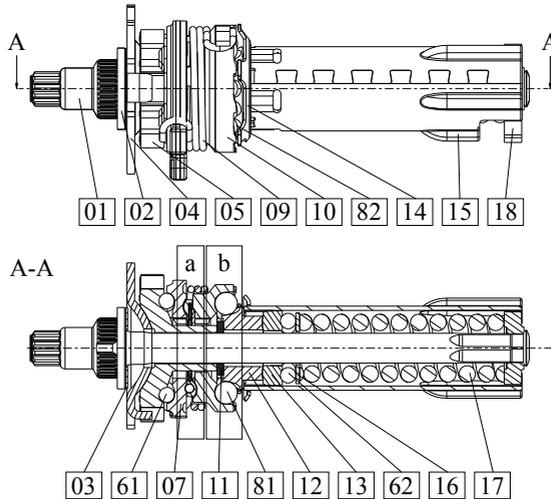


Bild 7.2: Schnittdarstellung der Nachstelleinheit *N3G⁺* - dargestellt Nachstelleinheit *N2G*

Im Betriebsmodus 4 wird die Bremse gelöst und somit die Antriebsbewegung umgekehrt. Es muss verhindert werden, dass die *GSs (B)* sich ebenfalls zurückdrehen, da sonst das Lüftspiel größer werden würde. Der *KRF (b)* ermöglicht diese Funktion. In Antriebsrichtung wird er durch konstruktive Maßnahmen gesperrt, während er bei der Umkehrung der Bewegung geöffnet bleibt. Bei korrekt eingestelltem Lüftspiel entspricht der Brückenweg exakt dem konstruktiven Lüftspiel. In diesem Fall wird die komplette Antriebsbewegung von der *Überlastkupplung (b)* aufgenommen, da die *GSs (B)* bereits mit Gegenmoment beaufschlagt werden bevor ein Antrieb in den Nachsteller eingeleitet wird.

Die Servicefunktion in Betriebsmodus 5 ermöglicht ein manuelles Zurückdrehen, was bei einer Wartung der Bremse erforderlich ist. Wartungen finden ausschließlich außerhalb des regulären Einsatzes des Produktes Anwendung und sind daher für die zu untersuchende Zielgröße nicht weiter relevant.

7.2 System Design der Nachstelleinheit nach *SMAR²T*

Zu Beginn des *SD* nach *SMAR²T* werden, analog zur beschriebenen Funktionsbaugruppe des Freilaufs, das Konzept des *N3G⁺* nach der Anforderungsliste entworfen. Zur verbesserten Systemkenntnis empfiehlt sich ein *FBD*, vergleiche Bild B.3, aufzustellen, welches als Grundlage für die Beschreibung der Wirkstruktur, vergleiche Bild B.4, dient. Das *FBD* gruppiert und visualisiert zusätzlich die Funktionsbaugruppen. Es ist ersichtlich, dass diese über eine zentrale, axiale Lagerung miteinander verbunden sind. Durch die redundante Lagerung weist das Konzept des *N3G⁺* eine qualitativ gering komplexe Struktur auf. Für eine eindeutigere Beurteilung der *Komplexität* soll im nächsten Schritt die *DM* aufgestellt

sowie deren *Reorganisation* durchgeführt werden, vergleiche Bild B.5. Die *DM* wird nach der vorgestellten Ebenenstruktur auf Basis der R^2 und des *AD* strukturiert. Dabei ergeben sich beim $N3G^+$ vier Hauptfunktionsbaugruppen und -betriebsmodi: *Konstruktives Lüftspiel*, *Nachstellen*, *Überlast* und *Zurückstellen*. Eine elementare Funktion in allen vier genannten Gruppen ist die Lagerung des Nachstellers an der Systemgrenze, diese ist indirekt in allen vertreten. Diesbezüglich und aufgrund der sich aus der Anforderung ergebenden Konstruktionsumgebung ist durch die Lösung mit einer Fest- und Loslagerung eine entkoppelte Struktur gegeben.

Die *Reorganisation* der *DM* ergibt eine nahezu entkoppelte Struktur gegenüber der ursprünglich aufgestellten *DM*. Nach Überprüfung aller in Kapitel 6.2.7 genannten Reorganisationsmethoden wird für diese Aufgabenstellung die Methode nach [BR11] angewandt. Auf dieser Basis wird im darauffolgenden Schritt in der *SD*-Phase der *Informationsgehalt* bestimmt. Aufgrund der Übersichtlichkeit wird im Folgenden ausschließlich der *Informationsgehalt* der genannten vier Hauptbaugruppen beziehungsweise -funktionsgruppen gezeigt. Hierbei wird im Konzept für das *Konstruktive Lüftspiel* mit einer Zielspanne, in Abhängigkeit des *Lüftspiels*, von $z_{s1} = [0,7 \dots 1,2]$ mm bereits eine Systemspanne von $z_{s1} = [0,8 \dots 1,1]$ mm erreicht. Daraus kann für das Konzept ein *Informationsgehalt* für den eindeutigen Zustand von $I_1 = 0$ bit berechnet werden. Auf Basis des erstellten kinematischen Simulationsmodells wird für die Funktionsbaugruppe *Nachstellen* mit einer Zielspanne von $z_{s2} = [3,2 \dots 7,0]$ Nm und eine Systemspanne von $s_{s2} = [3,0 \dots 8,0]$ Nm sowie für die Funktionsbaugruppe *Überlast* eine Zielspanne von $z_{s3} = [9,0 \dots 12,5]$ Nm und eine Systemspanne von $s_{s3} = [8,0 \dots 12,0]$ Nm berechnet. Für den vierten Betriebsmodus wird eine Zielspanne von $z_{s4} = [14,0 \dots 25,5]$ Nm verlangt. Im Konzept wird eine Systemspanne von $z_{s4} = [15,0 \dots 21,0]$ Nm erreicht. Daraus ergeben sich für der *Informationsgehalt* der jeweiligen Funktionsgruppe $I_2 = 1$ bit, $I_3 = 0$ bit und $I_4 = 0$ bit. Zusammen kann daraus der *Informationsgehalt* des Systems berechnet werden zu:

$$I_{\text{sys}} = - \sum_{i=1}^4 \log_2 P(FR_i | FR_j) = 0,205 \text{ bit} \quad . \quad (7.1)$$

Der *Informationsgehalt* ist geringer als 1 bit. Dies deutet auf eine höhere Erfolgswahrscheinlichkeit hin, da die Einnahme eines Zustandes wahrscheinlicher ist, als die von zwei Zuständen. Alle berechneten *Informationsgehalte*, bis auf Funktionsbaugruppe 2, streben einen eindeutigen Zustand an. Dies bietet für die spätere Design- und Toleranzoptimierung eine sehr gute Ausgangslage. Entsprechend kann nach *SMAR²T* das *SD* erfolgreich abgeschlossen werden, da sowohl das *Unabhängigkeits-* als auch das *Informationsaxiom* mit hinreichender Erfolgswahrscheinlichkeit das Konzept bewerten.

7.3 Parameter Design der Nachstelleinheit nach *SMAR²T*

Im *PD* wird zu Beginn das *P-Diagramm* definiert, auf dessen Grundlage die Simulationsstrategie abgeleitet und deren Umsetzung modelliert werden kann. Mit Hilfe der kategorisierten Parameter können erste Modellierungsmöglichkeiten abgeleitet sowie deren Strategie bestimmt werden. Nach Durchführung der Simulation sowie der Interpretation und Bewertung

der Ergebnisse, kann das R^2 -Modell aufgestellt werden. Abschließend erfolgt eine Prognose hinsichtlich *Robustheit* und *ZUV* des Produkts.

7.3.1 P-Diagramm der Nachstelleinheit

Das *P-Diagramm*, vergleiche Bild B.6, unterteilt die nach dem Konzept aus dem *SD* einhergehende *FRs* und *DPs* nach ihrer Eigenschaft in Steuer-, Kontroll- und Störgrößen sowie die Zielfunktion (Einhaltung des Lüftspiels von 0,9-1,2 mm) und zu deren Erreichung angegebenen Randbedingungen¹. Die Rauschfaktoren sind im Allgemeinen alterungsbedingte Erscheinungen, wie Bauteilverschleiß oder Reibungsänderungen. Zudem sollen Temperatur- und Feuchtigkeits-Schwankungen sowie dynamische Effekte, beispielsweise Vibration, berücksichtigt werden. Belagausdreheffekte sowie Kippwirkung an der Systemschnittstelle sind weitere Störgrößen. Kontrollgrößen hingegen sind Reibmomente, Spiel, Verdrehwinkel, Ansprechwinkel und Bauteiltoleranzen. Konstante beziehungsweise steuernde Größen sind Eingangsgrößen, wie Kräfte des Bremszylinders, Belagverschleiß sowie Einbaulage der $N3G^+$ -Lagerung, die aus den Schnittstellen des Systems hervorgehen.

7.3.2 Simulationsstrategie

Nach der Definition der zuvor genannten Größen wird im nächsten Schritt eine geeignete Simulationsstrategie definiert, die möglichst alle zu untersuchenden Effekte umfasst. Auf Basis der in Kapitel 6.6 genannten Simulationsmethodik *SIM-SMAR²T* wird diese auf den $N3G^+$ abgewandelt und entsprechend umgesetzt. Ergänzend zur vorgestellten Strategie wird ein weiteres Bewertungsmaß, die *Nachstellgeschwindigkeit*, definiert. Diese ergibt sich aus dem Betrag h_N , der bei der Betätigung der Bremse nachgestellt wird und ist proportional zum Differenzbetrag aus Leerhub h_{leer} und konstruktivem Lüftspiel s_{KLS} , der als Überhub bezeichnet wird und einem Nachstellfaktor der Bremse f_N , vergleiche Gleichung 7.2. Der Nachstellfaktor stellt ein wichtiges Qualitätskriterium der Nachstelleinheit dar:

$$h_N = f_N(h_{leer} - s_{KLS}) \quad . \quad (7.2)$$

7.3.3 Durchführung der Simulation

Nachdem die Simulationsstrategie anhand der einzelnen Betriebsmodi bestimmt wurde, können die *SUB*-Modelle modelliert werden. Der Fokus liegt hierbei auf den beteiligten Bauteilen pro Betriebsmodus, die einen Einfluss auf den Momentverlauf haben. Diese erste Vereinfachung bewirkt eine erste Verkürzung der Simulationszeit. Der weitere Vorteil dieser Aufteilung ist das parallele Arbeiten am jeweiligen *SUB*-Modell. Zudem kann je nach gewünschten Änderungen am Produkt das einzelne *SUB*-Modell relativ schnell ergänzt und erweitert werden. Analog zum beschriebenen Vorgehen zur Erstellung des *META*-Modells der *Überlastkupplung* in Kapitel 6.3.3 werden die anderen *META*-Modelle erstellt. Es ist darauf zu achten, dass die jeweiligen lokalen Anforderungen an die *SUB*-Modelle entsprechend im *P-Diagramm* angepasst werden.

Nachdem alle *META*-Modelle erstellt sind, können sie in die einzelnen *SUB*-Modellen in *SIM-SMAR²T* überführt werden. Im Weiteren müssen die Eingabeparameter mit den Parame-

¹ Übersetzt aus dem angelsächsischen *Error States*

ter des *META*-Modells nach dem entwickelten Regressionsschätzer, verknüpft werden. Sind alle *META*-Modelle in *SIM-SMAR²T* integriert, können diese miteinander kombiniert werden. Daraufhin werden die entsprechenden Parameter dem Regressionsschätzer und folglich dem jeweiligen *META*-Modell übergeben. Für die Parameter wird aus dem *META*-Modell der zugehörige Momentverlauf zurück an *SIM-SMAR²T* gegeben. Der Zusammenschluss der jeweiligen Momentverläufe $M(\Phi_n)$ erfolgt seriell über die definierten Randbedingungen der Grenzwinkel Φ_n . Bei den definierten Winkel Φ_n wird im einzelnen Momentverlauf $M(\Phi_n)$ das Moment M_n erfasst und im nächsten Momentverlauf $M(\Phi_{n+1})$ an dem entsprechend gleichen Momentniveau M_{n+1} :

$$M_n(\Phi_n) = M_{n+1}(\Phi_{n+1}) \quad (7.3)$$

angeknüpft, bei fortführendem Winkel Φ . Somit wird der gesamte Momentverlauf $M(\Phi)$ fortgeführt. Dies erfolgt für die weiteren *SUB*-Modelle analog, bis der gesamte Nachstellvorgang (*i*-Takt) beendet ist und bis sich ein konstantes Lüftspiel s_l ergibt. Ein exemplarischer Momentverlauf für eine Betätigung und eine Eintaktkurve sind in Bild 7.3 dargestellt. Angemerkt

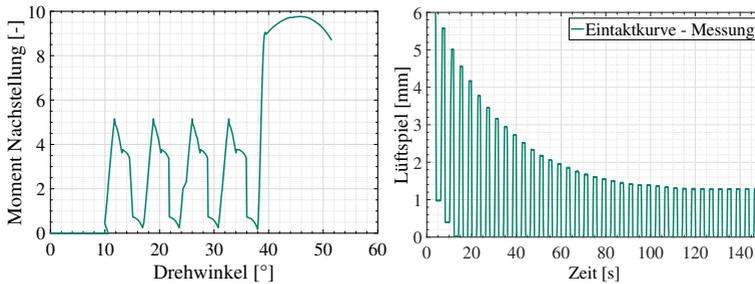


Bild 7.3: Exemplarische Darstellung eines Momentverlaufs je Betätigung (links) und einer Eintaktkurve (rechts)

sei, dass der beschriebene Übergang der Momente und folglich der *SUB*-Modelle realitätsnah mit einem stochastischen Übergangsfenster² simuliert wird. Dies widerspiegelt die Unsicherheit von ungewollten Nachstellbewegungen, ab wann der Überlastschutz aufgrund von Steifigkeiten und elastische Verformungsvorgänge eintritt.

7.3.4 Interpretation der Ergebnisse

In Kapitel 6.6 wurde auf die Möglichkeit der Simulationsdurchführung nach *Taguchi* oder *RDO* sowie auf deren jeweiligen Vort- und Nachteile hingewiesen. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wird die Vorgehensweise nach *Taguchi* gewählt. Bevor auf die Ergebnisse eingegangen wird, soll zunächst die Validierung der Simulationsstrategie mit dem Bestätigungsexperiment erfolgen.

² Im Übergang von Nachstellen zu Überlast wird ein Winkelbereich Φ_Δ definiert und daraus das stochastische Überlastmoment definiert.

Validierung mit Bestätigungsexperiment

Zur Validierung der Zielgrößenberechnung des konstanten Lüftspiels dient die Eintaktkurve. Diese wird durch den Einbau des Nachstellers in einen Komponentenprüfstand realisiert. Das Lastkollektiv wird über 100 Takte am Prüfstand eingeleitet und das sich ergebene Lüftspiel ermittelt. Die Gegenüberstellung der ermittelten Eintaktkurve mit der Simulation ist in Bild 7.4 dargestellt. Justierparameter zur Validierung sind die an den Systemgrenze eingehende Schnittstellen-Parameter, wie beispielsweise die Hebelkinematik. Als Ergebnis

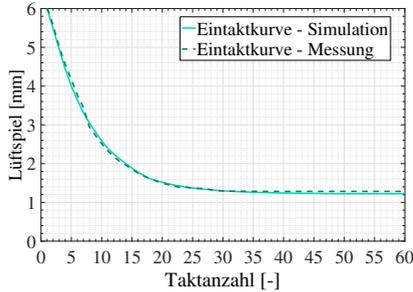


Bild 7.4: Validierung der Simulation bezüglich Eintaktverhalten, dargestellt für 60 Taktungen

liegt eine sehr gute Näherung des simulierten gegenüber des realen Eintaktverhaltens vor. Dies zeigt folgende Fehlerabweichung von der am Komponentenprüfstand gemessene Nachstellgeschwindigkeit am 10. Takt von $NSG_{10,Messung} = 13,42\%$ im Vergleich zur Simulation $NSG_{10,Simulation} = 13,65\%$:

$$NSG_{10,rel.Fehler} = 1 - \frac{13,42}{13,65} = 1,68\% \quad . \quad (7.4)$$

Zudem wird ein konstantes Lüftspiel mit minimaler Fehlerabweichung $s_{LS,rel.Fehler}$ erreicht:

$$s_{LS,rel.Fehler} = 1 - \frac{1,226\text{ mm}}{1,284\text{ mm}} = 4,52\% \quad . \quad (7.5)$$

Sensitivitätsanalyse

Zur Bewertung der systeminternen Wechselwirkungen und Parameterbeeinflussungen wird auf Basis einer Sensitivitätsanalyse lineare und quadratische Abhängigkeiten der Parameter analysiert. Hierfür muss eine geeignete statistische Ausgangsbasis geschaffen sein, um den Parameterraum hinreichend gut abzudecken. Am gezeigten Beispiel werden 50, 100 und 150 virtuelle Versuche zur Identifikation von systeminternen Wechselwirkungen und Korrelationen durchgeführt. In Bild B.9 wird das Ergebnis der Untersuchung in Form von Histogramme und *Anthill*-Diagramme³ gezeigt. Die Stichprobenziehung basiert auf dem *ALHS* nach [Ye98]. Die gezeigten Sensitivitäten stehen ohne Parameterbezug, da im Vordergrund

³ Angelsächsisch für *Ameisenhaufen*, steht für die Darstellungsform eines Punktediagramms, welche auch als *Scatterplot* (Streudiagramm) bezeichnet wird.

die Darstellung der Korrelationskoeffizienten bei verschiedener Stichprobenanzahl steht. Ergebnis der Untersuchung ist die Erkenntnis, dass bei 50 Stichproben der Parameterraum unvollständig abgedeckt wird, wodurch Wechselwirkungen in der Korrelation identifiziert werden, die auf einem lückenhaften Design-Raum basieren. Eine deutliche Verbesserung zeigt die Stichprobe nach 100 Ziehungen und gibt eine Minderung der Parameterkorrelation. Eine Ziehung mit 150 Stichproben hingegen zeigt eine weitestgehende Abdeckung des Parameterraums. Entsprechend werden für die nachfolgenden Untersuchungen eine Stichprobenziehung mit *ALHS* von 150 Designs empfohlen und durchgeführt.

Ergebnisinterpretation

Das eingetaktete Lüftspiel s_{LS} soll innerhalb der Spezifikationsgrenzen von 0,7 mm – 1,2 mm liegen. Als Zielmittelwert wird $0,9 \pm 0,05$ mm als Robustheitskriterium gesetzt. Für die Parametertoleranzen wird der Funktionsbereich um 10 % von der oberen beziehungsweise unteren Grenze eingengt, andernfalls gelten zum jeweiligen Längen- oder Winkelmaß die Allgemeintoleranzen nach ISO 2768. Es sei darauf hingewiesen, dass die definierten Parameterbereiche der nominellen Einstellstufen im anschließenden *TD* genügend Spielraum zur Toleranzoptimierung zulassen. Als Simulationsgrundlage wird eine *DOE* nach *Taguchi* mit einem L_{81} (3^{32})-Versuchsplan für das *innere Feld* und ein L_{12} (2^{11})-Versuchsplan für das *äußere Feld* definiert. Dieser Plan wird durch die Parameterzuweisung aus dem *P-Diagramm* und aus wirtschaftlicher Sicht zusätzlich durch die reduzierte Versuchsanzahl unter Berücksichtigung der hohen Signifikanz der Kinematik-Parameter auf die Zielgröße definiert. Die robusten, nominellen Einstellstufen werden mittels *ANOM*-Verfahren durch die Angabe der Optimierungsrichtung bestimmt. Diese erfolgt mit dem Nominalwert von 0,9 mm im Funktionsbereich von 0,5 mm – 1,2 mm. Mit Hilfe der maximalen *SN*-Ratios der Parameter kann die Streuung der nominellen Einstellstufen verringert werden, vergleiche Bild B.8. Im Fall einer deutlichen Optimierungsrichtung, vergleiche Φ_{KLS} muss die

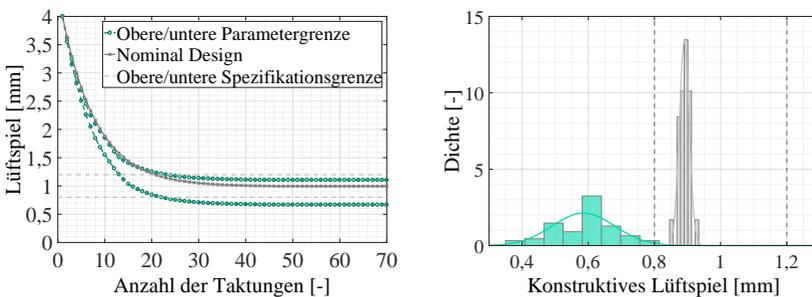


Bild 7.5: Ergebnisse des Bestätigungsexperiments: Eintaktkurve (links) und Lüftspiel (rechts)

nominelle Einstellstufe in Abhängigkeit des Mittelwerts festgelegt werden. Hier sollte die Verschiebung des Mittelwerts in Richtung Optimum auf die obere Einstellstufe erfolgen. Hingegen sollte für das *Zahnflankenspiel* Φ_{ZFS} die mittlere, nominale Einstellstufe gewählt werden. Für eine abschließende Robustheitsbewertung wird das Eintakt- sowie das konstante

Lüftspielverhalten vor und nach der Definition der nominellen Einstellstufen untersucht, vergleiche Bild 7.5. Es ist deutlich ersichtlich, dass das Eintaktverhalten der Parametergrenzen sich an den Spezifikationsgrenzen orientieren, Bild 7.5 (links), und die neu definierten Einstellstufen das konstante Lüftspiel sowohl in der Mittelwertlage als auch in der Streuung in Richtung *Robustheit* verlagert, vergleiche Bild 7.5 (rechts).

7.3.5 Robuste Zuverlässigkeitsbetrachtung

Wird das konstante Lüftspiel s_{LS} nach dem R^2 -Modell betrachtet, soll auf Basis der Parameterstudie des *RD*, vergleiche Bild 7.5 (b), und den Erkenntnissen aus dem R^2 -Modell des *PD* der Überlastkupplung, siehe Kapitel 6.3.9, sowie mit den anderen R^2 -Modellen der Funktionsbaugruppen, das zeitliche Verhalten betrachtet werden. Die Forderung an das konstante Lüftspiel innerhalb der Spezifikationsgrenzen ist bedingt durch die Forderung einerseits an die Brems-Leistungsfähigkeit und andererseits an die Sicherheit gegen das Zustellen der Bremse. Aus Kapitel 6.3.9 wird ersichtlich, dass das Überlastmoment sich mit zunehmender Einsatzzeit verändert. Für eine virtuelle Zuverlässigkeitsabschätzung liegen in dieser Phase die nominellen Einstellstufen aus der Robustheitsbewertung, die strukturmechanischen Simulationsergebnisse und Expertenwissen zu Grunde. Bevor eine zeitliche, zuverlässigkeitsbasierte Funktionsabschätzung erfolgt, müssen zuerst potentiell funktionskritische Ausfallorte lokalisiert und Bewertungsmaße auf Basis der geforderten *ZUV* definiert werden.

Zuverlässigkeitsanalyse des *N3G⁺*

Als Zuverlässigkeitsziel gilt nach Tabelle 7.2 die Lüftspielkonstanz im Spezifikationsbereich innerhalb einer Einsatzzeit von 15 Jahren, was einer Lastwechselanzahl (Betätigungsanzahl) von $3,75 \cdot 10^6$ normierte LW entspricht. Wird für die Bremse ein *ZUV*-Nachweis von beispielsweise einer B_{10} -Lebensdauer mit einem 90 %igen Vertrauensbereich verlangt, kann nach der *Boole'schen Systemtheorie* die Modellierung der Systemzuverlässigkeit erfolgen.

Systemzuverlässigkeit

Die Bestimmung der Systemzuverlässigkeit erfolgt mittels Aufteilung nach der *Boole'schen* Systembetrachtung. Die Bremse kann hierfür in Funktionsbaugruppen eingeteilt werden. Daraus ergeben sich für die jeweilige Baugruppen respektive *ZUV*-Anforderungen. Im Beispiel des *N3G⁺* wird eine *ZUV* von $R_n = 0,98$ berechnet. Die Berechnung der Systemzuverlässigkeit ist abhängig von der Teststrategie und wird in Kapitel 7.5.2 besprochen.

Komponenten-/ Funktionszuverlässigkeit

Zur Analyse der *ZUV* wird auf Basis der geforderten *ZUV* und des virtuellen Vorwissens das System *Nachsteller* auf quantifizierbare Funktions- und Degradationsmerkmale untersucht. Zur Einhaltung der genannten *ZUV*-Anforderung müssen entsprechende Sicherheitskriterien der Funktionsmomente sowie System-interne Spiele erfüllt sein, vergleiche Tabelle 7.1. Zur Quantifizierung dieser Funktions- und Degradationsmerkmale gibt Bild 7.6 eine Zusammenfassung. Im Allgemeinen darf das Überlastmoment der Kupplung nicht zu früh beziehungsweise zu spät wirken. Grund hierfür sind die Gefahr des Zustellens oder der Bremsleistungsreduzierung. Eine Betrachtung der Momentkette zeigt eine Summierung sämtlicher Momente

nach der Schnittstelle des Kegelrads in Wirkrichtung Brücke und Bremse. Alle Momente, wie die der Kette, Gewindespindeln und Mitnehmer sowie System-interne Momente wie das Zustellmoment dürfen nicht größer gleich der des maximalen Überlastmoments sein. Zudem darf diese nicht kleiner als das Zustellmoment (Kopfreibmoment mit Freilaufmoment und Haltemomente) sein. Zusätzlich zu den Momenten haben die Spiele eine hohe Signifikanz auf das Lüftspiel. Entsprechend wird ein Sicherheits-Spiel $\Phi_{SS} \geq 0$ betrachtet, welches die Differenz des möglichen Nachstellwegs (Summe aller Spiele in Wirkrichtung zusammen mit dem Verdrehwinkel (Hebelwinkel des KR)) von dem tatsächlichen Lüftspiel beschreibt. Eine weitere Betrachtung ist das *Robustheitsverhalten* bezüglich Toleranzen in der gesamten Wirkkette, die indirekt die Momente, die Spiele sowie die kinematischen Parameter beeinflussen. Für die außerhalb der Systemgrenze befindenden Gegenmomente M_{Kette} , M_{GS} und M_{MN} , werden mit normierten Nennmaß von $M_{Kette} = 0,5$ [-], $M_{GS} = 0,5$ [-] und $M_{MN} = 1,0$ [-] mit einer Streuung von circa $\sigma_{Kette} = 0,051$ [-], $\sigma_{GS} = 0,051$ [-] und $\sigma_{MN} = 0,010$ [-] betrachtet.

Tabelle 7.1: Randbedingungen zur Funktionserfüllung im Einsatzzeitraum des N3G⁺

#	Kennwert	Bedingung	Grenzen
(1)	Überlast-Sicherheitsmoment M_{RS}	$M_{RS} = M_{UM_{max}} \cdot M_{Gegen} - M_{KF}^b$	$M_{RS} \geq 0$ [-]
(2)	Nachstell-Sicherheitsmoment M_{NS}	$M_{NS} = M_{UM_{max}} + M_{Gegen} - M_{KF}$	$M_{NS} > 0$ [-]
(3)	Ratsch-Sicherheitsmoment M_{TS}	$M_{TS} = M_{RM}^c - M_{Gegen} - M_{KF}$	$M_{TS} > 0$ [-]
		mit $M_{Gegen}^d = M_{Kette} + M_{GS} + M_{MN}$	
(4)	Spiele-Sicherheit ϕ_{SS}	$\phi_{SS}^e = s_{LS} - (\phi_{ZFS} - \phi_{KES} - \phi_{AS} - \phi_{KS})$	$\phi_{SS} \geq 0^\circ$

^a M_{UM} (Überlastmoment) ^b M_{KF} (= $M_{KR_{max}} + M_{FL}$) mit M_{KR} (Kopfreibmoment), M_{FL} (Freilaufmoment)
^c M_{RM} (Ratschmoment) ^d mit M_{Kette} (Moment am Kettenrad), M_{GS} (Moment an der Gewindespindel), M_{MN} (Mitnehmermoment - bei zwei Spindeln)
^e mit ϕ_{HW} (Hebelwinkel), i_{KZS} (Übersetzung), ϕ_{ZFS} (Zahnflankenspiel), ϕ_{KES} (Kegelspiel), ϕ_{KLS} (Kulissenspiel), ϕ_{AS} (Antriebspiel) und p_{GS} (Gewindesteigung)

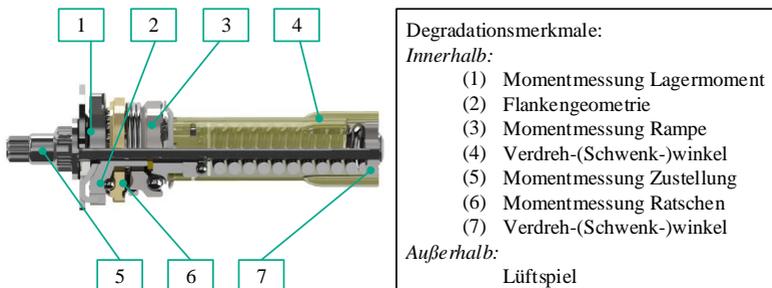


Bild 7.6: Degradationsmerkmale des N3G⁺

Die Modellbildung erfolgt nach [16] sowie nach der in Kapitel 6.3.8 vorgestellte virtuellen Degradationermittlung mit dem Modell des linearen Degradationsverlaufs mit der Modellfunktion:

$$y_{ij} = \alpha_{ij} + \beta_i(t) \quad , \quad (7.6)$$

wobei α_{ij} den Wert beziehungsweise die Verteilung zum Zeitpunkt des $t = 0$ und $\beta_i(t)$ die Steigung der Geraden repräsentiert. Die Zeit t bezieht sich auf die normierte Lastwechselzahl einer Bremsbetätigung. Nach Durchführung einer *MC*-Simulation zur Bestimmung des funktionalen Ausfallverhaltens der Population ergibt sich eine Zuverlässigkeitsabschätzung von $B_2 = 3,02 \cdot 10^6$ normierte Lastwechsel beziehungsweise $R(3,02 \cdot 10^6) = 0,98$ als Ergebnis der virtuellen Degradationsermittlung, vergleiche Bild 7.7 (links). Aus der Betrachtung der Degradation der Nachstell-Funktionsbaugruppen wird ein sich verringermes Nachstellmoment⁴ festgestellt. In Kombination mit einem steigenden Überlastmoment und dem sich verringermes Nachstellmoment sowie die Zunahme der System-internen Spiele, wird ein abnehmendes Lüftspiel die Folge sein. Ein kritisches Zustellen innerhalb der Einsatzzeit wird nicht erreicht, vergleiche Bild 7.7 (rechts). Zwar wird die geforderte Zuverlässigkeit von $R(3,75 \cdot 10^6) = 0,98$ nicht nachgewiesen, kann aber infolge einer nachfolgenden Tolerierung in der *TD*-Phase zielführend erreicht werden, zumal die in dieser frühen Phase der Entwicklung simulierten Abschätzung auf getroffenen Annahmen sich stützt und entsprechend die Varianz der Aussagesicherheit widerspiegelt. Diesbezüglich kann die *Robuste Zuverlässigkeit* als gegeben betrachtet und eine Empfehlung für die nominellen Einstellstufen für das anschließende *TD* gegeben werden.

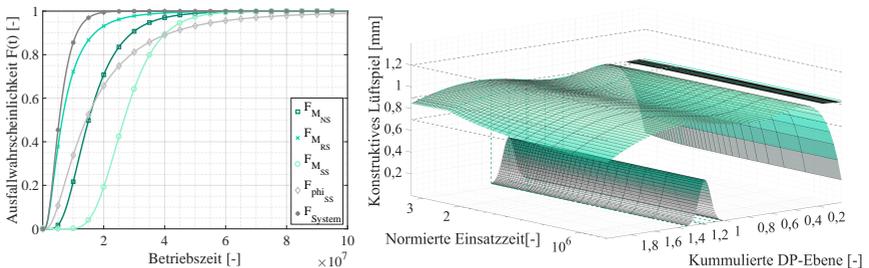


Bild 7.7: Die Zuverlässigkeitsabschätzung (links) und das R^2 -Modell des Lüftspiels (rechts)

7.4 Toleranz Design der Nachstelleinheit nach *SMAR²T*

Die Aufgabe des *TD* bezieht sich auf die Optimierung der Toleranzgrenzen bezüglich Kostenverringerung unter Beibehaltung beziehungsweise Erreichung der robusten, zuverlässigen Funktionserfüllung innerhalb der Einsatzzeit. Hierfür wird zu Beginn der Phase die Toleranzsynthese und deren Zielwerte definiert. Als normierten Kostengrenzwert wird

⁴ Bedingt durch die Zahngeometrie des Lagers, welche mit der Einsatzzeit zunehmenden verrundet und damit ein erleichtertes Nachstellen indiziert.

$K_{N3G^+,lim} = 11,00 - 11,40 \text{ €}$ gesetzt, was als entwicklungsbegleitende Kostenvorgabe gilt. Als Robustheits- und Zuverlässigkeitswert wird das eingetaktete Lüftspiel und die Eintaktgeschwindigkeit beim 10. Takt innerhalb der Einsatzzeit definiert, analog zum PD . Eine Zusammenfassung der Robustheitskriterien gibt Tabelle 7.2.

Tabelle 7.2: Robustheits- und Kostenkriterien für das Toleranz Design

Robustheitskriterien		Kostenkriterium
Lüftspiel		Maximale Kosten
Zielmittelwert	$1,0 \pm 0,05 \text{ mm}$	11,00 - 11,40 €
Zulässige Streuung	0,2 mm	
Eintaktgeschwindigkeit (10. Takt)	12 - 14 %	

7.4.1 Definition und Durchführung der Toleranzsimulation

Tabelle A.18 gibt die Übersicht über die zu untersuchenden Parameterstufen für den dreistufigen *Taguchi DOE*. Die dargestellte Dezimaltaktung ist nicht einheitlich, da aufgrund der ersten Untersuchung des iterativen Optimierungsprozess im TD die Robustheitsdefinition im Vordergrund steht. Zur virtuellen Versuchsdurchführung wird analog zum PD ein $L_{81} (3^{32})$ - als *inneres Feld* und ein $L_{12} (2^{11})$ -Versuchsplan als *äußeres Feld* festgelegt.

7.4.2 Versuchsauswertung

Für die Analyse der durchgeführten Versuche wird die Standardabweichung sowie der Mittelwert der Zielgrößenverteilung ermittelt. Dies erfolgt mit der *ANOVA*-Methode, deren Auswertung Rangzahlen ergeben, die in Abhängigkeit der Signifikanz der Zielgröße ermittelt wird. Anhand der Sensitivität der Parameter kann eine Rangfolge nach Tabelle A.22 berechnet werden. Als größte Einflussparameter ergeben sich analog zum PD die systeminternen Spiele. Zudem hat die Kinematik einen bedeutenden Einfluss auf die Zielgrößen, stellvertretend dargestellt in Bild 7.8 (links) das eingetaktete Lüftspiel. Es ist ersichtlich, dass sich die Mittelwerteinstellungen gemäß den Ergebnissen des PD , der Mittelwert der Zielgrößenverteilung in Richtung des eingetakteten Lüftspielzielwerts verschiebt. Zwar ist die Folge eine höhere Standardverteilung, dennoch bleibt diese innerhalb der Spezifikationsgrenzen. Die Zuverlässigkeitabschätzung mit den neu definierten Toleranzgrenzen verbessert sich im Gegensatz zum TD auf eine Reduzierung der Ausfallwahrscheinlichkeit von $B_2 = 3,90 \cdot 10^6$ normierte Lastwechsel beziehungsweise eine Steigerung der *ZUV* von $R(3,90 \cdot 10^6) = 0,98$ als Ergebnis der tolerierten, virtuellen Degradationsermittlung, vergleiche Bild 7.8 (rechts).

7.4.3 Semi-quantitative Kostenbetrachtung

In diesem weiterführenden Schritt werden die *semi-quantitative* Kostendaten anhand der vorliegenden, nach Kostenkriterien eingegrenzten, Bauteilauswahl ermittelt. Im Weiteren wird der dazugehörige Herstellungsprozess und die Ist-Toleranzklassen definiert und zur

Tabelle 7.3: Einkaufskosten der *N3G*⁺-Bauteile

Bauteil	E-Preis [€]	Anteil [%]	Bauteil	E-Preis [€]	Anteil [%]
Lagerbuchse	0,8883	16,71	Welle	0,1228	2,31
Schaltgabel	0,7136	13,42	Zahnscheibe	0,0835	1,57
Zwischenscheibe	0,6602	12,42	Scheibe	0,0758	1,42
Zahnscheibe	0,5255	9,88	Kugeln 3,5 mm	0,0702	1,32
Spannhülse	0,5080	9,56	Kugeln 3,5 mm	0,0702	1,32
Druckfeder	0,3740	7,03	Drehfeder	0,0655	1,23
Hülse	0,2630	4,95	Sicherungsring	0,0395	0,74
Lager	0,2469	4,64	Käfig	0,0365	0,69
Adapter	0,2136	4,02	Kugeln 5,4 mm	0,0258	0,49
Zahnrad	0,1989	3,74	Kugeln 4 mm	0,0242	0,46
Passscheibe	0,1630	3,07	Käfig	0,0173	0,33
Gesamt		5,3162 €	100 %		

Beschreibung der Kostenentwicklung bei Toleranzänderungen in eine *semi-quantitative* Kostenfunktion überführt. Zur Bauteileingrenzung zeigt Tabelle 7.3 die Einkaufskosten des *N3G*⁺-Bauteile sowie deren prozentuale Gewichtung hinsichtlich des Gesamtpreises. Zur Aufwandsreduzierung werden ausschließlich Bauteile diskutiert, die eine Abweichung von mehr als $EK_{lim} = 0,20\text{€}$ aufweisen.

Die für die Herstellung benötigte Verfahren und der daraus ergebenden Ist-Toleranzklassen werden primär unter Rücksprache mit Experten und Bauteilentwickler abgesprochen. Die daraus resultierende Toleranzklasse nach DIN-ISO 286-1 wird mit Hilfe der jeweiligen Konstruktionszeichnung bestimmt. Eine Zusammenfassung der Zurordnungsvorschrift gibt Tabelle A.19. Zur Bestimmung der *semi-quantitativen* Kostenbewertung müssen die fixen und die variablen Kostenanteile der Bauteile bestimmt werden. Diese Aufteilung ist in Tabelle 7.4 zusammengetragen. Mit dem variablen Kostenanteil kann die Kostenentwicklung der *N3G*⁺-Komponenten, in Abhängigkeit der Toleranzklasse und des Herstellungsverfahrens, modelliert werden.

Auf Basis der Kostenentwicklung je Toleranzklasse nach [KR07], Bild 6.28, angenommenen Entwicklung der Fertigungskosten in Abhängigkeit der erforderlichen Toleranzklasse und anhand des zugehörigen Revisionsstandes der Konstruktionszeichnung kann die Ist-Toleranzklasse der Bauteile ermittelt und die Kostenfunktion beschrieben werden. Mit den Einkaufskosten als Bezugskosten sowie mit der zugehörigen Toleranzklasse, kann auf die IT-Klassen IT-4 und IT-13 zurückgerechnet werden. In Bezug auf Kapitel 6.4.5 und Gleichung 6.16 und 6.17 sowie den herstellbaren Toleranzklassen nach Tabelle A.20 können die fixen und variablen Kosten berechnet werden. Bei Toleranzanforderungen, die diese Herstellungsbreite übersteigen, sei auf die Berücksichtigung von Faktoren nach Kapitel 6.4.5

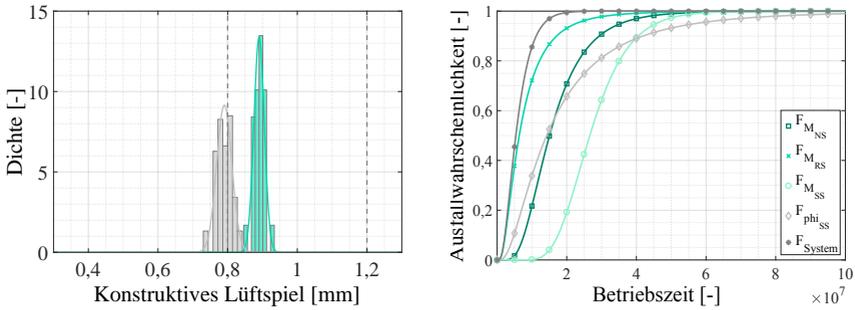


Bild 7.8: Ergebnisse des Toleranz Design

Tabelle 7.4: Fixer und variabler Kostenanteil der N3G⁺-Bauteile ($>K_{lim} = 0,20 \text{ €}$)

Bauteil	Einkaufspreis [€]	Fixer-	Variabler Kostenanteil
Lagerbuchse	1,7766	1,1014	0,6752
Schaltgabel	1,4272	0,8848	0,5424
Zwischenscheibe	1,3204	0,8186	0,5018
Zahnscheibe	1,0510	0,6516	0,3994
Spannhülse	1,0160	0,6300	0,386
Druckfeder	0,7480	0,4638	0,2842
Hülse	0,5260	0,3260	0,2000
Lager	0,4938	0,3062	0,1876
Adapter	0,4272	0,2648	0,1624
Zahnrad	0,3978	0,2466	0,1512
Passscheibe	0,3260	0,2022	0,1238
Welle	0,2456	0,1524	0,0932

hingewiesen. Beispielhaft soll die Ausgangstoleranzklasse der LB IT-10 mit zugehörigem Kostenfaktor von 1,2 und mit Verhältnis der Kostenfaktoren der variable Kostenanteil des resultierenden Einkaufspreises für das Toleranzfeld nach IT-11 bestimmt werden, siehe Gleichungen 7.7, 7.8 und 7.9.

$$K_{var, LB} = (1 - 0,62) \cdot 1,7766 \text{ €} = 0,6751 \text{ €} \quad (7.7)$$

$$\frac{1,2}{1,0} = \frac{K_{var, LB, IT-10}}{K_{var, LB, IT-11}} \quad (7.8)$$

$$K_{var, LB, IT-11} = \frac{K_{var, LB, IT-10} \cdot 1,0}{1,2} = \frac{0,6751 \text{ €}}{1,2} = 0,5626 \text{ €} \quad (7.9)$$

Als Kostenfaktor für ein Folgeverfahren wird $K_{FV} = 0,5$ und als Kostenfaktor für eine Sondermaßnahme $K_{SM} = 0,3$ festgelegt. Das Kostenverhalten der jeweiligen Bauteile zeigt Tabelle A.21. Aus dem ermittelten Kostenverhalten können die Toleranz-Kosten Funktionen abgeleitet werden. Eine komplette Auflistung aller Toleranz-Kosten Funktionen befindet sich im Anhang in Bild B.7. Eine abschließende Bestimmung der robusten und wirtschaftlichen Toleranzeinstellungen ergibt die Betrachtung der Versuchsergebnisse mit den Robustheits- und Kostenkriterien, die mit den untersuchten Parameter- und Toleranzeinstellungen erfüllt werden. Die Einkaufskosten der Bauteile bleiben aufgrund der unveränderten Toleranzfelder bei 10,632 €. Damit sind die geforderten Kriterien sowohl bezüglich der *Robustheit*, als auch hinsichtlich der Kosten erfüllt.

7.4.4 Handlungsempfehlungen zur Robustheit und Wirtschaftlichkeit

Bei Austritt aus dem *TD* sollten nach *SMAR²T* Grenzmusterversuche durchgeführt werden und zur Prognose der Systemqualität sowie den Handlungsempfehlungen hinsichtlich *Robustheit* und Wirtschaftlichkeit übergegangen werden. Die Grenzmusterversuche, die zur anschließenden *R²T*-Phase benötigt werden, bestätigen die Ergebnisse nach Bild 7.8.

Ermittlung der Systemqualität

Mit der ermittelten Standardabweichung von 0,021 mm kann mit Gleichung 7.10 eine Prognose der Systemqualität gegeben werden. Der Prognosekennwert berechnet sich ähnlich dem Prozessfähigkeitsindex C_{pK} zu:

$$Q_{System, Zielwert} = \frac{Max_{Vert. Zielwert} - Min_{Vert. Zielwert}}{\sigma_{System}} \quad (7.10)$$

Beim Anwendungsfall $N3G^+$ ergibt sich mit $Max_{N3G^+, LS} = 1,0186 \text{ mm}$ und $Min_{N3G^+, LS} = 0,9125 \text{ mm}$ der Systemqualitätsprognosewert:

$$Q_{N3G, LS} = \frac{1,0186 \text{ mm} - 0,9125 \text{ mm}}{0,021 \text{ mm}} = 5,05 \quad (7.11)$$

Für $Q_{System, Zielwert}$ gilt, je geringer der Wert, desto höher die prognostizierte Systemqualität. Dies geht aus einer Best/Worst-Case Betrachtung hervor. Wird angenommen, dass die Verteilung der Zielgröße die größtmögliche Streuung unter Berücksichtigung der Funktionalität aufweist, ergibt sich der Wert

$$Q_{N3G^+, LS} = \frac{1,2 \text{ mm} - 0,8 \text{ mm}}{0,021 \text{ mm}} = 19,05 \quad (7.12)$$

bei einer angenommenen minimierten Streuung von 0,01 mm folgt aus der Betrachtung:

$$Q_{N3G^+, LS} = \frac{0,01 \text{ mm}}{0,021 \text{ mm}} = 0,48 \quad (7.13)$$

Die Standardabweichung wird zur Veranschaulichung als konstant angenommen.

Handlungsempfehlung bezüglich *Robustheit* und *Kosten*

Als Handlungsempfehlung bezüglich der Systemrobustheit kann formuliert werden, dass mit den Mittelwerteinstellungen aus dem PD das Lüftspiel vergleichsweise näher am Zielwert bestimmt wird, als bei Betrachtung der Zeichnungsmittelwerte. Ebenfalls ist zur Sicherstellung einer hohen Systemqualität der qualitative Bewertungsfaktor $Q_{System.Zielwert}$ zu minimieren. Aus der Signifikanzanalyse der Parameter geht hervor, dass die systeminternen Spiele die Haupteinflussfaktoren bezüglich dem eingetakteten Lüftspiel darstellen und Potentiale für weitere Kostenoptimierungs-Maßnahmen zur Verfügung stehen.

7.5 Robuster ZUV -Nachweis der Nachstelleinheit nach $SMAR^2T$

Die Vorgehensweise zum robusten ZUV -Nachweis richtet sich nach der im Detail vorgestellten R^2T -Phase, die in Kapitel 6.5 beschrieben und in diesem Kapitel nicht ausführlicher behandelt wird, sondern sich ausschließlich auf die Ergebnisse beziehungsweise auf die zum Verständnis notwendigen Herleitungen beschränkt.

Im ersten Schritt der R^2T -Phase erfolgt die Zuverlässigkeitsanalyse. Diese ist bereits in Kapitel 7.3.5 erfolgt und wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, sondern direkt auf die Integration des bisherigen, generierten, virtuellen Vorwissens eingegangen.

7.5.1 Integration des virtuellen Vorwissens

Aus der bisherigen Entwicklung der Nachstelleinheit kann das prognostizierte R^2 -Verhalten synergetisch in die Versuchsplanung mit eingebunden werden. In der PD -Phase sowie in [16] wird auf Basis des *Robusten Designs* die VLE zur Gewinnung des zeitlichen Produktverhaltens zur Hilfe genommen. Die daraus gewonnene Erkenntnis zeigt, dass der $N3G^+$ seine zeitliche Funktionserfüllung innerhalb der geforderten Einsatzzeit leistet. Entsprechend könnte eine virtuelle Freigabe des $N3G^+$ erfolgen. Allerdings soll auf Kundenwunsch eine reale Erprobung als Nachweisverfahren dienen, dennoch kann das zeitliche Funktionsverhalten zur Planung der Teststrategie berücksichtigt werden. Die bis zu dieser Phase angewandten Validierungsversuche kann als reales Vorwissen in die Planung, wie in Kapitel 6.5.1, mit einbezogen werden, da am Design zum Zeitpunkt der Erprobung keine Änderungen mehr vorgenommen wurden. Zudem kann auf den bisherigen virtuellen Erkenntnissen auf eine ZUV -Erreichung der geforderten $3,75 \cdot 10^6$ normierten Lastwechsel mit dem vorliegenden Design geschlossen werden. Im Weiteren gilt es, die generierten Informationen zu bewerten und in die Testplanung zu übertragen. Eine vollständige Integration des Vorwissens aus den bisherigen Abschätzungen aus dem TD soll angenommen werden. Dies wird nach

[Kro04] zusätzlich durch eine höhere ZUV-Abschätzung als die geforderte ZUV begründet. Die Berechnung der Parameter der Beta-Verteilung erfolgt nach [Kro04] mit:

$$A = -\frac{\mu_R (\mu_R^2 - \mu_R + \text{var}(\mu_R))}{\text{var}(\mu_R)}, \quad (7.14)$$

$$B = \frac{(\mu_R - 1) (\mu_R^2 - \mu_R + \text{var}(\mu_R))}{\text{var}(\mu_R)}. \quad (7.15)$$

Auf Basis der abgeschätzten Ausfallverhalten und einem Transformationsfaktors von $\xi = 1^5$ berechnet sich $A = 81,2$ und $B = 8,9$. Mit einer Aussagesicherheit von $P_A = 90\%$ und einer geforderten ZUV von $R(3,75 \cdot 10^6) = 98\%$, ergibt sich mit

$$P_A = \int_R^1 \left(\frac{1}{\beta (\Phi A, \xi (B - 1) + 1)} \right) R^{\xi(A-1)} (1 - R)^{\xi(B-1)}, \quad (7.16)$$

ein reduzierter Stichprobenumfang von $n = 18$. Im Vergleich zu den Methoden nach [Kro04] und [Hit07], beschrieben in Kapitel 6.5.2, kann mit der ZUV-Forderung der Funktionsbaugruppe von 98% bei einem *Success-Run* mit Aussagesicherheit von 90%, der ursprüngliche Stichprobenumfang von $n = 110$ nur auf circa $n = 90$ Versuchen reduziert werden.

7.5.2 Planung der Teststrategie

Wie bereits in Kapitel 7.3.5 angemerkt, bedarf es für den ZUV-Nachweis eine geeignete Teststrategie, die den Zielkonflikt nach [13] berücksichtigt. Nach der in [13] genannten Vorgehensweise wird eine Teststrategie nach dem beschleunigten Testen mittels Degradation auf Basis der Prüfstrategie *EOL* empfohlen. Dies ist begründet auf den gegebenen Randbedingungen, wie beispielsweise eine Prüflingsanzahl von $n = 8$. Mit dieser Prüflingsanzahl würde beim gebräuchlichen *Success Run* nur eine Mindestzuverlässigkeit von $R_{sys} = 0,75^6$ nachgewiesen. Folglich ist diese Teststrategie keine für den vorliegenden Anwendungsfall geeignete Prüfung, da der Zeitaufwand und die enorme Prüflingsanzahl sich nicht rechtfertigt. Zwar wird bei der zuvor beschriebenen Vorwissensintegration eine Stichprobenanzahl von $n = 18$ berechnet, dennoch soll eine Ressourcen-bedingte Prüfung mit $n = 8$ Prüflingen erfolgen⁷. Zudem basiert die Berechnung der Stichprobenanzahl auf einer konservativen ZUV-Abschätzung, die eine Definition zu einer geringeren Stichprobe erlaubt. Von den acht Nachstellern werden bei sechs Nachstellern die genannten Degradationsmerkmale zeitlich diskret gemessen. Die zwei weiteren Nachsteller werden zu Vergleichszwecken und Überprüfung der diskreten Degradationsmessung vorbehalten, da bei dieser Messung die Nachstelleinheit aus dem Systemverbund *Bremse* jeweils de- und montiert werden muss.

Die Berechnung auf Systemebene wird mittels der *MC*-Methode umgesetzt. Hierfür werden die Verteilungen der jeweiligen *EOL*-Kriterien bestimmt. Anhand den Bedingungen nach Tabelle 7.1 kann eine ZUV-Prognose berechnet werden, die einen Vertrauensbereich von

⁵ begründet durch die validierte Simulation

⁶ Annahme: 2-parametrische Weibullverteilung, Prüflinge $n_i = 8$, Lebensdauerverhältnis $L_V = 1$, Vertrauensniveau $P_A = 0,9$, Laufleistung $LW_P = 3,75 \cdot 10^6$ LW

⁷ Eine B_{10} -Lebensdauerberechnung kann bereits mit einer Prüflingsanzahl von $n = 7$ erfolgen.

90 % an den Quantilen 5 und 95 % wiedergibt. Eine kurze Skizzierung gibt folgende Vorgehensweise:

Auf Basis der *EOL*-Verteilung der jeweiligen Bedingung wird die Population mittels Verteilungsfunktion geschätzt. Aufbauend werden *MC*-Ziehungen je Prüfling ($n = 6$) und je Stichprobe von ($N = 1000$) auf Basis jeder Ausfallart (K) gezogen. Im nächsten Schritt wird je Stichprobe die jeweiligen Weibull-Parameter $b_{n,N}$ und $T_{n,N}$ bestimmt. Mit diesen Stichproben wird abschließend die Systemzuverlässigkeit mittels *Boole* und eine erneuten *MC*-Ziehung mit $j = 1000$ bestimmt:

$$R_{ges,j}(t_1 \dots N, j) = \prod_{i=1}^n R(K_i)_{i,j}(t_{j,1 \dots N}) \quad . \quad (7.17)$$

7.5.3 Zuverlässigkeits- und Robustheitsnachweis

Bevor die zuvor beschriebene System-*ZUV* berechnet werden kann, wird im ersten Schritt die einzelnen Degradationsversuche je nach Funktionsbaugruppe ausgewertet und auf deren Basis mittels *MC*-Simulation die maximalen Grenzen ermittelt. Die Ergebnisse sind exemplarisch von den sechs diskret gemessenen Nachstelleinheiten in Bild 7.9 für die in Tabelle 7.1 notwendigen Momente und Spiele zur Berechnung der geforderten Sicherheitsmomente und -spiel dargestellt. Die in Kapitel 7.3.5 beschriebene Flankengeometrie zeigt keine sich ändernde Degradationsspur und wird folglich nicht weiter betrachtet. Werden die einzelnen Degradationsgeschwindigkeiten hinsichtlich der geforderten Einsatzzeit des *ZUV*-Nachweises von $t = 3,75 \cdot 10^6$ normierten LW betrachtet, wird dieser in allen vier Funktionsgruppen eingehalten. Für eine finale Aussage muss die Systemzuverlässigkeit des $N3G^+$ abschließend berechnet werden.

7.5.4 Ergebnis Robuste Zuverlässigkeitserprobung $N3G^+$

Die Berechnung auf die Systemzuverlässigkeit erfolgt mit der Annahme der geforderten *ZUV* aus der systembasierten Funktionsbetrachtung. Hierfür wird analog zur vorhergehenden Funktionsbetrachtung eine *MC*-Simulation durchgeführt. Die Prognose auf Basis der Versuchsdurchführung zeigt, dass die in Tabelle 7.1 genannten Bedingungen zwar innerhalb der Einsatzzeit Funktionsausfälle auftreten, allerdings die geforderte *ZUV* von 98 % nicht unterschreitet, vergleiche Tabelle 7.5. Dies bedeutet final eine nachgewiesene robuste, zuverlässige Nachstelleinheit. Es sei darauf hingewiesen, dass eine gewisse Fehlerfortpflanzung durch

Tabelle 7.5: Ergebnisse der R^2T -Phase des $N3G^+$

#	Kennwert	Grenzen	ZUV
(1)	Überlast-Sicherheitsmoment M_{RS}	$M_{RS} \geq 0$ [-]	$R_{RS}(t = 3,75 \cdot 10^6) = 98,1 \%$
(2)	Nachstell-Sicherheitsmoment M_{NS}	$M_{NS} > 0$ [-]	$R_{NS}(t = 3,75 \cdot 10^6) = 98,9 \%$
(3)	Ratsch-Sicherheitsmoment M_{TS}	$M_{TS} > 0$ [-]	$R_{TS}(t = 3,75 \cdot 10^6) = 99,6 \%$
(4)	Spiele-Sicherheit ϕ_{SS}	$\phi_{SS} \geq 0^\circ$	$\phi_{SS}(t = 3,75 \cdot 10^6) = 98,2 \%$

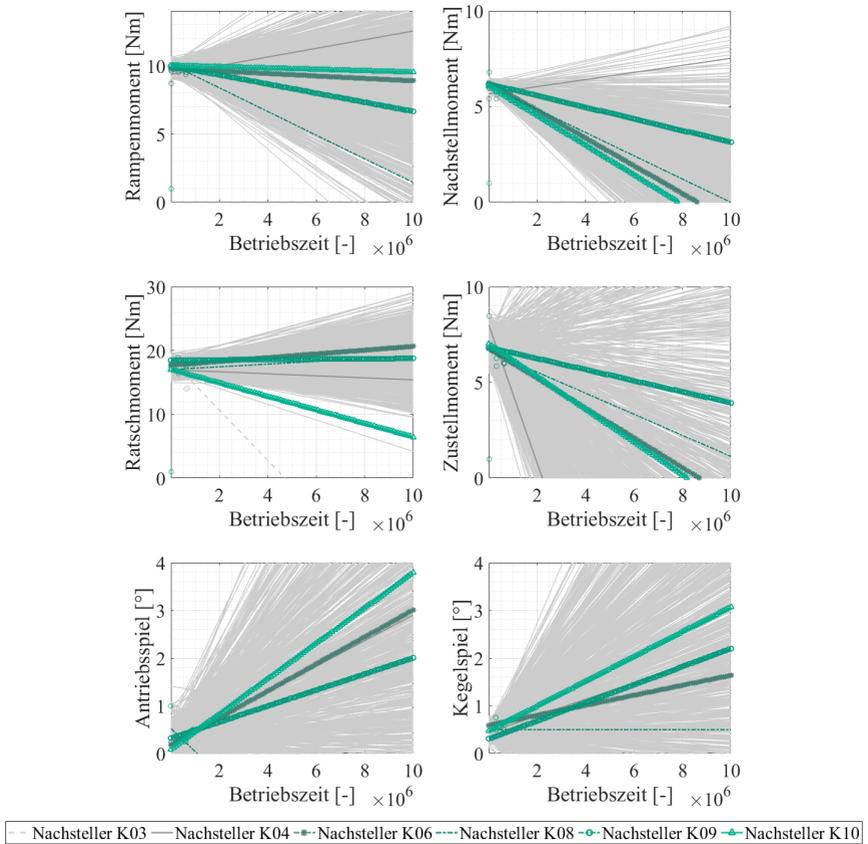


Bild 7.9: Degradationsauswertung der Funktionsmerkmale des *N3G⁺*

die Modellauswahl beziehungsweise Abweichung der Regressionsgeraden von den realen Messwerten und der anschließenden Extrapolation besteht. Zudem basiert die Auswertung des funktionalen Ausfallverhaltens auf der Datenbasis von acht Prüflingen.

7.6 Ergebnis der Nachsteller-Untersuchung nach *SMAR²T*

In der *SD*-Phase kann mittels der *AD*-Methoden-Betrachtung die Funktion des automatischen Verschleißnachstellers untersucht werden. Hierfür sind die Diagramme der Funktion *FBD* und der Wirkungsweise *WZD* elementar und erfassen diese umfassend. Nach der Dekomposition sind alle Beziehungen zwischen den *FR-DP*-Paarungen bekannt und die vollständige Entwurfsmatrix wird aufgestellt. Hierbei werden alle Elemente der jeweils untersten Ebene berücksichtigt, da diese alle übergeordneten Ebenen festlegen. Als Ergebnis lassen sich mit

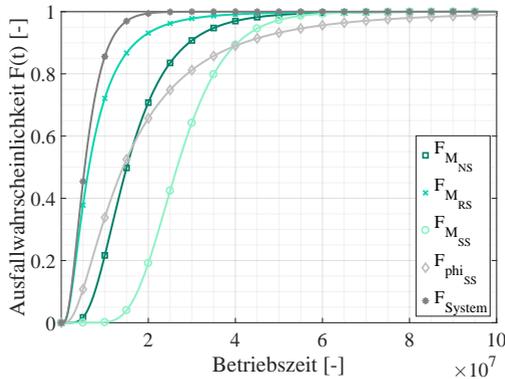


Bild 7.10: Zuverlässigkeitsprognose des N3G⁺

der vollständigen Entwurfsmatrix alle Widersprüche oder Schleifen in der Systemarchitektur erkennen. Nach der anschließenden *Reorganisation* und *Internalisierung* können viele Kopplungen aufgehoben und eine signifikante Verbesserung für die Entwurfsreihenfolge der *DPs* aufgezeigt werden. Eine bestehende Clusterbildung erleichtert die Interpretation der Matrix, da die zusammengehörigen Funktionen nahe beieinanderliegen.

Beginnend mit dem *P-Diagramm* in der *PD-Phase* wird durch die Konstruktion eines Versuchsplans nach *Taguchi* die robusten, nominellen Einstellstufen der *DPs* bestimmt. Mit diesen wird eine Verschiebung des Mittelwertes der Zielgröße (eingetaktetes Lüftspiel) in Richtung des Optimalwertes erreicht. Zusätzlich sind die Sensitivitäten der Nachsteller-Parameter bekannt, die mittels *ANOVA* zur Mittelwertsbetrachtung nach *ANOM* eine Streuungsminimierung erreichen. Eine darauffolgende Betrachtung mittels der *VLE* beweist eine strukturelle Lebensdauer in der geforderten Einsatzzeit. Zudem wird mittels der virtuellen Degradations-Simulation und dem Bestätigungsexperiment das R^2 -Modell modelliert und diesbezüglich die Funktionseinhaltung in der geforderten Einsatzzeit aufgezeigt.

Die Aufgabe der *TD-Phase* besteht hauptsächlich darin, den Kostenaspekt mit der *Robustheit* und der *ZUV* hinsichtlich deren Anforderung auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen in Einklang zu bringen. Zur Anwendung kommen hier nach der Toleranzsynthese das *semi-quantitative*-Kostenmodell. Die Wahl der Betrachtung bestimmt sich überwiegend aus den vorliegenden Daten zur Kostenentwicklung bei Toleranzänderungen. Als Ergebnis des *TD* werden die robusten, zuverlässigen und kostenoptimalen Toleranzfelder definiert sowie Handlungsempfehlungen hinsichtlich der genannten Domänen im Bezug zum ursprünglichen Design formuliert.

Die abschließende Phase des R^2T zeigt eine mögliche Anwendung der letzten *SMAR²T-Phase*. Aufgrund der allgemeinen Beschreibung der Vorgehensweise und der gezeigten Anwendung an der komplexen Nachstelleinheit zeigt einerseits die Freiheitsgrade und andererseits die Fähigkeit der Übertragbarkeit auf ein komplexes Anwendungsbeispiel der Methodik.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Maschinenbau gehört *Qualität* zu den Grundvoraussetzungen eines jeden Produktes oder Prozesses. Ziel der Unternehmen ist es, durch eine effiziente Produktentwicklung ein qualitativ hochwertiges Produkt für den Kunden zu entwickeln und auf dem Markt zu etablieren. Zu den in dieser Dissertation betrachteten Qualitätsanforderungen, gehören die Domänen *Zuverlässigkeit (ZUV)*, *Robustheit* und *Kosten*. Sie sind Bestandteile der *Qualität*, die es zu erfüllen gilt. Die Vorgehensweise zum Erzielen der *ZUV* und der *Robustheit* durch Anwendung verschiedener Methoden und Werkzeuge im Entwicklungsprozess wurden in Kapitel 3 vorgestellt. In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass *ZUV* nur durch hohe *Robustheit* und diese nur durch eine hohe *ZUV* erreicht werden kann. Die Kombination beider Theorien kann innerhalb eines Ansatzes eine höhere *Qualität* erreichen, als durch die getrennte Anwendung. Die bisherigen, diskutierten Theorien werden ausschließlich einem Teil der Anforderungen gerecht. Entsprechend wird eine Lösung gesucht, die beide Domänen miteinander verknüpft und daraus eine neue, eigenständige Methodik schafft sowie die zur Umsetzung notwendigen *Kosten* berücksichtigt und quantifiziert. Hierfür wurde eine Definition zur *Robusten Zuverlässigkeit R^2* als Wahrscheinlichkeit für die Leistung der geforderten Funktionsfähigkeit während der gesamten Einsatzzeit, unter Einfluss innerer und äußerer Störgrößen, mit geringer Varianz definiert. Zur verbesserten Veranschaulichung der Theorie dient das R^2 -Modell mit den Derivaten R^2_{Prozess} - und R^2_{Feld} -Modell. Zudem wurde eine Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten (*SMAR²T*) in Kapitel 6 entwickelt und deren Vorgehensweise und Methodenanwendung an Maschinenelement-Beispielen diskutiert und final an einem komplexen Anwendungsbeispiel einer Nachstelleinheit für Bremssysteme der Firma *Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH (SfN GmbH)* in Kapitel 7 angewandt. Die Tendenzen für heutige Herausforderungen zur effizienten Produktentwicklung zeigen in die Richtung der simulativ gestützten virtuellen Herangehensweise. Hierfür werden in der industriellen Entwicklung zunehmend Methoden angewandt, die unter Einsparung von notwendigen Ressourcen umfassende, realitätsnahe Ergebnisse liefern, wie die vorgestellte *Virtuelle Lebensdauerermittlung*. Diese Ergebnisse werden zielgerichtet an die jeweilige Anforderung optimiert. Hierbei sollen unerwünschte Resultate, wie Früh- und Zufallsausfälle, in der Produktentwicklung frühzeitig erkannt und im Design kostengerecht berücksichtigt werden. Diese Ausfälle sind Resultate einer geringen Produktzuverlässigkeit und mindern massiv die Systemqualität. Die *SMAR²T*-Methodik berücksichtigt diesen Aspekt in der frühen Phase der Produktentwicklung und verfolgt mit dem Zusammenschluss von *ZUV* mit der *Robust Design Methodik (RDM)* und mit den vier Entwicklungsphasen: *System Design (SD)*, *Parameter Design (PD)*, *Toleranz Design (TD)* und *Robuste Zuverlässigkeitserprobung (R^2T)* sowie mit der Kostenbetrachtung, das Ziel eines strukturierten Ablaufs zum Gestalten von robusten, zuverlässigen Produkten. Den Schwerpunkt setzt *SMAR²T*, neben der Reduzierung der *Komplexität* in *SD*, auch auf die Umsetzung einer geeigneten Simulationsstrategie

SIM-SMAR²T, mit der Simulationsmodelle in *PD* und *TD* effizient entwickelt und für Parameterstudien eingesetzt werden. Mit Hilfe dieser Studien wird das robuste Design definiert, die *ZUV* prognostiziert sowie geeignete Teststrategien im *R²T* abgeleitet.

Die *Qualität* eines Systems wird während des gesamten Entwicklungsprozesses beeinflusst. Die Kette der Beeinflussungsmöglichkeiten beginnt bereits im Produktgestaltungsprozess mit der *Komplexität*. Die *Robustheit* eines Produktes beziehungsweise Prozesses beschreibt die Unempfindlichkeit gegenüber auftretenden *Unsicherheiten*. Die Aufrechterhaltung dieser *Robustheit* über ein vorgegebenes Zeitintervall kann als *ZUV* definiert werden. Die Schnittmenge der verwendeten Methoden der *RDM* und *Zuverlässigkeitstechnik (RE)* bestätigt die Abhängigkeit. Die *R²*-Theorie verbindet die Herangehensweisen der *RDM* mit der *RE* und kann damit die komplette Linie aus den Qualitätsanforderungen *Komplexität*, *Unsicherheit*, *Kosten*, *Robustheit* und *ZUV* vereinen. Die Abhängigkeit von *Robustheit* und *ZUV* ist im Maschinenbau bereits seit einigen Jahren bekannt. Der Vergleich mit den ersten Definitionen zeigt hingegen, dass es sich bei der *R²*-Theorie um eine relativ neue Theorie handelt. Bislang war lediglich der Zusammenhang zwischen *Komplexität*, *Unsicherheit* und *Robustheit* bekannt. Die Erweiterung um die Domäne *ZUV* und die Kostenintegration in *R²* überführt den *PEP* zu einer umfassenderen Vorgehensweise. Somit kann die vom Kunden geforderte *Qualität* durch das Verfolgen einer einzigen Theorie gesteuert werden.

Die zu Beginn dieser Arbeit gestellten Ziele wurden mit der Validierung der Theorie, der Methodik sowie des Modells nach dem *Validating Square* in den entsprechenden Kapiteln umgesetzt. Beginnend mit dem Vergleich des Modells, der Methodik und Theorie infolge der vorgestellten Literaturarbeit und dem darauffolgenden Benchmark wurde der Neuheitsgrad überprüft und bestätigt. Mit der chronologischen Modellierung der Thematik konnte deren Relevanz überprüft und deren Methodenanwendung auf ähnliche Problemstellungen mit einer abschließenden Lösungsbewertung übertragen werden. Zur Lösungsbewertung nach industrieller Zielstellung wird die Methode auf das industrielle Anwendungsbeispiel übertragen, welches die geforderten Anforderungen aufweist und somit einem Design nach *R²* folgt.

Eine abschließende Methodik-Anwendung zur Problemlösung sowie Übertragbarkeit auf andere Aufgabenstellungen würde die Bedeutung von *R²*, der *SMAR²T*-Methodik und des *R²*-Modells festigen. Aus Gründen der Geheimhaltung wurden die gezeigten Ansätze zur Berücksichtigung von *Kosten* auf Basis der in der Literatur bekannten Kostenfunktionen umgesetzt. Die formulierten Ansätze geben die Richtung einer umfassenden Kostenbetrachtung in der Produktentstehung vor, dennoch sollte die Aufmerksamkeit für zukünftige Arbeiten auf einer systematisch strukturierten Abfolge zur quantitativen Kostenerfassung im Unternehmen liegen. Ein zusätzlicher Vergleich hinsichtlich adäquaten Ergebnissen aus anderen Methoden sowie deren *Qualität* würde die Anwendbarkeit weiter verallgemeinern und bestätigen. Das gezeigte Derivat des *R²*-Modells, das *R²_{Feld}*-Modell, wurde im Sinne der Vollständigkeit in dieser Arbeit vorgestellt, allerdings nicht angewandt. Eine Umsetzung des Modells erweitert die Argumentation für das *R²*-Modell. Um die Bedeutung und Stärken von *R²* in der Praxis noch tiefgründiger zu klären, ist in Kooperation mit der *Robust Design Group* an der *Dänischen Technischen Universität (DTU)* und dem Bereich der *Zuverlässigkeitstechnik* des *Instituts für Maschinenelemente* der *Universität Stuttgart* eine repräsentative, industrielle und forschungsbasierte Umfrage geplant.

Literaturverzeichnis

- [AB57] AITCHISON, J. ; BROWN, J. A. C.: *The lognormal distribution*. Cambridge : Cambridge University Press, 1957 (Zitiert auf Seite 10)
- [AB00] ABRAHAM, B. ; BRAJAC, M.: Variation Reduction and Robust Designs. In: *Taylor & Francis Group* (2000) (Zitiert auf Seite 214)
- [Abe00] ABERNETHY, R. B.: *The new Weibull handbook*. 4, 2000 (Zitiert auf den Seiten 11, 12 und 226)
- [AC98] AYYB, B. ; CHAO, R.: Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks. In: *Uncertainty Modeling and Analysis in Civil Engineering* (1998) (Zitiert auf Seite 202)
- [AC14] AHMED, H. ; CHATEAUNEUF, A.: Optimal number of tests to achieve and validate product reliability. In: *Reliability Engineering & System Safety* 131 (2014), S. 242–250 (Zitiert auf Seite 225)
- [AG07] ARVIDSSON, M. ; GREMYR, I.: Principles of Robust Design Methodology. In: *www.interscience.wiley.com* (2007) (Zitiert auf Seite 214)
- [AGH07] ARVIDSSON, M. ; GREMYR, I. ; HASENKAMP, T.: An operationalization of Robust Design Methodology. In: *Chalmers University of Technology* (2007) (Zitiert auf Seite 214)
- [AKT08] ARIZONA, I. ; KAWAMURA, Y. ; TAKEMOTO, Y.: Reliability tests for Weibull distribution with variational shape parameter based on sudden death lifetime data. In: *European Journal of Operational Research* 189 (2008), Nr. 2, S. 570–574 (Zitiert auf Seite 225)
- [And86] ANDERSON, H. L.: Metropolis, Monte Carlo and the MANIAC. In: *Los Alamos National Laboratory* 14 (1986) (Zitiert auf Seite 19)
- [And96] ANDERSSON, P.: *A Process Approach to Robust Design in Early Engineering Design Phases*. Lund, Schweden, Department of Machine Design, Lund Institute of Technology, Diss., 1996 (Zitiert auf Seite 65)
- [AO01] AN, J. ; OWEN, A.: Quasi-regression. In: *Journal of Complexity* 17 (2001), Dezember, Nr. 4, S. 588–607 (Zitiert auf Seite 32)
- [Apo90] APOSTOLAKIS, G. E.: The concept of probability in safety assessments of technological systems. In: *Science* 250 (1990), S. 1359–1364 (Zitiert auf den Seiten 5 und 6)
- [Arm98] ARMSTRONG, M.: *Basic Linear Geostatics*. Berlin : Springer Verlag, 1998 (Zitiert auf den Seiten 33 und 34)
- [AS09] ARNOLD, M. ; SCHIEHLEN, W.: *Simulation Techniques for Applied Dynamics*. Berlin : Springer Verlag, 2009 (Zitiert auf Seite 30)
- [Bar81] BARNETT, J. A.: Computational Methods for a Mathematical Theory of Evidence. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Intelligence*, 1981, S. 868–875 (Zitiert auf Seite 16)
- [Bar90] BARKER, T. B.: *Engineering quality by design - Interpreting the Taguchi approach*. Marcel Dekker, 1990 (Statistics, a Series of Textbooks and Monographs) (Zitiert auf den Seiten 27 und 129)
- [BB12] BREUER, B. ; BILL, K. H.: *Bremshandbuch - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik*. 4. Aufl. Berlin : Springer Vieweg Verlag, 2012 (Zitiert auf den Seiten 153 und 154)

- [BC09] BLESSING, L. T. M. ; CHAKRABARTI, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Springer Verlag, 2009 (Zitiert auf Seite 71)
- [BdLS09] BERGMAN, B. ; DEMARÉ, J. ; LORÉN, S. ; SVENSSON, T.: *Robust Design Methodology for Reliability*. John Wiley & Sons, Inc., 2009 (Zitiert auf den Seiten 42, 54, 65, 88 und 214)
- [Ber99] BERNOULLI, J.: *Ars conjectandi*. Leipzig : Engelmann, 1899 (Zitiert auf Seite 13)
- [Ber89] BERTSCHE, B.: *Zur Berechnung der System-Zuverlässigkeit von Maschinen-Produkten*, Universität Stuttgart, Diss., 1989 (Zitiert auf Seite 206)
- [BF07] BOX, G. ; FUNG, C. A.: Quality Quandaries - Is your Robust Design Procedure Robust? In: *Taylor & Francis Group* (2007) (Zitiert auf Seite 215)
- [BG95] BAILEY, T. C. ; GATRELL, A. C.: *Interactive Spatial Data Analysis*. Harlow : Longman, 1995 (Zitiert auf Seite 34)
- [BH96] BEN-HAIM, Y.: *Robust Reliability in the Mechanical Science*. Springer Verlag, 1996 (Zitiert auf Seite 63)
- [Bil99] BILL, R.: *Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analyse, Anwendungen und neue Entwicklungen*. Heidelberg : Herbert Wichmann Verlag, 1999 (Zitiert auf Seite 32)
- [Bin79] BINDER, Kurt: *Monte Carlo Simulation in Statistical Physics*. Springer Verlag, 1979 (Zitiert auf den Seiten 18 und 19)
- [Bin84] BINDER, K.: *Applications of the Monte Carlo method in statistical physics*. Springer Verlag, 1984 (Zitiert auf Seite 19)
- [Bir88] BIROLINI, A.: *Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme*. Springer Verlag, 1988 (Zitiert auf Seite 206)
- [Bir97] BIROLINI, A.: *Zuverlässigkeit von Geräten und Systeme*. Springer Verlag, 1997 (Zitiert auf den Seiten 206 und 210)
- [Bir14] BIROLINI, A.: *Reliability Engineering*. Springer Verlag, 2014 (Zitiert auf Seite 206)
- [BK08] BAE, S. J. ; KVAM, P. H.: Degradation models. In: *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability* (2008) (Zitiert auf Seite 122)
- [BL90] BEYER, R. ; LAUSTER, E.: Statistische Lebensdauerprüfpläne bei Berücksichtigung von Vorkenntnissen. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 35 (1990), Nr. 2, S. 93–98 (Zitiert auf Seite 226)
- [BL04] BERTSCHE, B. ; LECHNER, G.: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau-Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. 3. Aufl. Springer Verlag, 2004 (Zitiert auf den Seiten 9, 11, 12, 55, 56, 58, 59, 60, 68, 73, 80, 99, 142 und 206)
- [Bog87] BOGEN, K. T.: Integrating Uncertainty and Interindividual Variability in Environmental Risk Assessment. In: *Risk Analysis* 7 (1987) (Zitiert auf Seite 68)
- [Bot13] BOTHE, H. H.: *Fuzzy Logic - Einführung in Theorie und Anwendung*. 2. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 2013 (Zitiert auf Seite 15)
- [BR11] BENAVIDES, E. M. ; RODRIGUEZ, L. G.: Extended Algorithm for Design-Matrix Reorganization. In: *The Sixth International Conference on Axiomatic Design* (2011) (Zitiert auf den Seiten 47, 49, 106 und 156)
- [Bru14] BRUNNER, E.: *Mathematisches Argumentieren, Begründen und Beweisen*. Berlin : Springer Spektrum, 2014 (Zitiert auf Seite 47)
- [BS58] BRONSTEIN, I. N. ; SEMENDJAJEW, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik (Bronstein)*. B. G. Teubner, 1958 (Zitiert auf den Seiten 8, 9, 10, 12, 19 und 58)
- [BT01] BUYSKE, S. ; TROUT, R.: Robust Design and Taguchi Methods. In: *Rutgers* (2001) (Zitiert auf Seite 215)
- [BZ91] BRESZINSKI, C. ; ZAGLIA, M. R.: *Extrapolation Methods: Theory and Practice*. Amsterdam : North Holland, 1991 (Zitiert auf Seite 32)

- [BZ00] BILL, R. ; ZEHNER, M. L.: *Lexikon der Geoinformatik*. Heidelberg : Herbert Wichmann Verlag, 2000 (Zitiert auf Seite 32)
- [CATM96] CHEN, W. ; ALLEN, J. K. ; TSUI, K.-L. ; MISTREE, F.: A Procedure for Robust Design: Minimizing Variations caused by Noise Factors and Control Factors. In: *Georgia Institute of Technology* (1996) (Zitiert auf Seite 215)
- [CH12] CZICHOS, H. ; HENNECKE, M.: *HÜTTE - Das Ingenieurwissen*. 34. Aufl. Berlin : Springer Vieweg, 2012 (Zitiert auf Seite 99)
- [CZW15] CHENG, X. ; ZHANG, S. ; WANG, T.: Modelling and analysis of system robustness for mechanical product based on axiomatic design and fuzzy clustering algorithm. In: *Advances in Mechanical Engineering* (2015) (Zitiert auf den Seiten 88, 89 und 90)
- [Dö15] DÖRNER, D.: *Die Logik des Misslingens*. Rohwolt Verlag, 2015 (Zitiert auf Seite 38)
- [Dan04] DANESHKHAH, A. R.: Uncertainty in Probability Risk Assessment: A Review / University of Sheffield. 2004. – BEEP Working Paper: Bayesian Elicitation of Experts' Probabilities (Zitiert auf Seite 6)
- [DC00] DU, X. ; CHEN, W.: A Most probable point based method for uncertainty analysis / American Society of Mechanical Engineers. 2000. – Forschungsbericht (Zitiert auf den Seiten 202 und 215)
- [DeL98] DELAURENTIS, D.: *A probabilistic approach to aircraft design emphasizing stability and control uncertainties*, Georgia Institute of Technology, Diss., 1998 (Zitiert auf Seite 202)
- [Dem93] DEMANT, B.: *Fuzzy -Theorie oder Die Faszination des Vagen. Grundlagen einer präzisen Theorie des Unpräzisen für Mathematiker, Informatiker und Ingenieure*. Braunschweig : Vieweg, 1993 (Zitiert auf Seite 29)
- [Der08] DERELÖV, M.: Qualitative modelling of potential failures: on evaluation of conceptual design. In: *Journal of Engineering Design* (2008) (Zitiert auf Seite 65)
- [Det11] DETTMANN, K.-U.: *Probabilistic-based method for realizing safe and reliable mechatronic systems*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2011 (Zitiert auf Seite 55)
- [DGQ98] DGQ: *Band 17-01: Zuverlässigkeit komplexer Systeme aus Hardware und Software*. Beuth Verlag, 1998 (Zitiert auf Seite 206)
- [DIN81] DIN 25424: *Fehlerbaumanalyse- Methoden und Bildzeichen*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1981 (Zitiert auf Seite 211)
- [DIN82] DIN 55350: *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1982 (Zitiert auf Seite 22)
- [DIN85] DIN 25419: *Ereignisablaufanalyse*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1985 (Zitiert auf Seite 211)
- [DIN90] DIN 40041: *Zuverlässigkeit - Begriffe*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1990 (Zitiert auf Seite 205)
- [DIN91a] DIN ISO 2768-1: *Allgemeintoleranzen- Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragungen*. Deutsche Institut für Normung e.V., 1991 (Zitiert auf Seite 127)
- [DIN91b] DIN ISO 2768-2: *Allgemeintoleranzen - Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragungen*. Deutsche Institut für Normung e.V., 1991 (Zitiert auf Seite 127)
- [DIN00] DIN EN ISO 9000: *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2000 (Zitiert auf den Seiten 55 und 204)
- [DIN04] DIN EN 60300-2: *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 2: Leitfaden zum Zuverlässigkeitsmanagement*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2004 (Zitiert auf den Seiten 205 und 209)

- [DIN05] DIN EN ISO 17025: *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2005 (Zitiert auf Seite 71)
- [DIN06] DIN EN 61078: *Techniken für die Analyse der Zuverlässigkeit – Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Boole'sche Verfahren*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2006 (Zitiert auf Seite 211)
- [DIN07a] DIN EN 61025: *Fehlzustandsbaumanalyse*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2007 (Zitiert auf den Seiten 205 und 211)
- [DIN07b] DIN EN 61165: *Anwendung des Markoff-Verfahrens*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2007 (Zitiert auf Seite 211)
- [DIN09] DIN EN 61649: *Weibull-Analyse*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2009 (Zitiert auf Seite 211)
- [DIN10] DIN EN ISO 286-1: *ISO-System für Grenzmaße und Passungen*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2010 (Zitiert auf Seite 131)
- [DIN11] DIN EN ISO 12100: *Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2011 (Zitiert auf Seite 205)
- [DIN15a] DIN EN 13306: *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2015 (Zitiert auf Seite 205)
- [DIN15b] DIN EN 60300-1: *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 1: Leitfaden für Management und Anwendung*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2015 (Zitiert auf den Seiten 205 und 209)
- [DIN15c] DIN EN 60812: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2015 (Zitiert auf Seite 210)
- [DM00] DELAURENTIS, D. ; MAVRIS, D.: Uncertainty modeling and management in multidisciplinary analysis and synthesis. In: *AIAA Paper 2000*, 2000 (Zitiert auf Seite 202)
- [DS09] DIETRICH, E. ; SCHULZE, A.: *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. Carl Hanser Verlag, 2009 (Zitiert auf Seite 77)
- [Dyn13] DYNARDO GMBH (Hrsg.): *optiSLang - the optimizing Structural Language, Sensitivity Analysis, Multidisciplinary Optimization, Robustness Evaluation, Reliability Analysis and Robust Design Optimization*. 3.2.3. Weimar: Dynardo GmbH, 2013 (Zitiert auf Seite 20)
- [DZ88] D'ERRICO, J. R. ; ZAINO, N.: Statistical tolerancing using a modification of Taguchi's method. In: *Technometrics* 30 (1988), Nr. 4, S. 397–405 (Zitiert auf Seite 128)
- [EEH13] EIFLER, T. ; EBRO, M. ; HOWARD, T. J.: A classification of the industrial relevance of robust design methods. In: *International Conference on Engineering Design* (2013) (Zitiert auf den Seiten 40, 53, 61, 62, 63, 64, 65 und 215)
- [EH05] EL-HAIK, B. S.: *Axiomatic Quality*. John Wiley & Sons, Inc., 2005 (Zitiert auf Seite 215)
- [Eig03] EIGLER, H.: *Die Zuverlässigkeit von Elektronik- und Mikrosystemen: Ihr Zusammenhang mit Physik, Chemie und Metallkunde*. expert, 2003 (Zitiert auf Seite 206)
- [Eis74] EISENHART, C.: *Dictionary of Scientific Biography*. New York : Charles Scribner's Sons, 1974 (Zitiert auf Seite 18)
- [EKB⁺12] ENGELHARDT, R. ; KOENEN, J. ; BRENNEIS, M. ; KLOBERDANZ, H. ; BOHN, A.: An approach to classify methods to control uncertainty in load-carrying structures. In: *Applied Mechanics and Materials* 104 (2012), S. 33–44 (Zitiert auf den Seiten 6 und 17)
- [EKE⁺10] ENGELHARDT, R. ; KOENEN, J. ; ENSS, G. ; SICHAU, A. ; PLATZ, R. ; KLOBERDANZ, H. ; BIRKHOFFER, H. ; HANSELKA, H.: A Model to Categorise Uncertainty in Load-Carrying Systems. In: *MMEP Conference*, 2010 (Zitiert auf Seite 6)

- [Els12] ELSAYED, A.: *Reliability engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 2012 (Zitiert auf Seite 55)
- [EM13] EHRENSPIEL, E. ; MEERKAMM, H.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Carl Hanser Verlag, 2013 (Zitiert auf den Seiten 38, 66 und 68)
- [EMS⁺08] EGBERT, N. ; MCCOY, P. ; SCHWERIN, D. ; JONES, J. ; KARL, A.: Design for Process Excellence - Ensuring timely and cost-effective solutions. In: *26th International Congress of the Aeronautical Science* (2008) (Zitiert auf den Seiten 88 und 89)
- [FC95] FOWLKES, W. Y. ; CREVELING, C. M.: *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*. Corporate & Professional Publishing Group, 1995 (Zitiert auf den Seiten 39, 40, 42, 43, 45, 62 und 215)
- [FG96] FAN, J. ; GIBELS, I.: *Local Polynomial Modelling and its Applications*. London : Chapman and Hall, 1996 (Zitiert auf Seite 34)
- [FH07] FREUND, R. W. ; HOPPE, R. H. W.: *Stoer/Bulirsch: Numerische Mathematik I*. 10. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 2007 (Zitiert auf Seite 35)
- [Fie09] FIEGE, R.: *Axiomatic Design: Eine Methode zur serviceorientierten Modellierung*. Gabler Verlag, 2009 (Zitiert auf Seite 45)
- [Fis26] FISHER, R. A.: The arrangement of field experiments. In: *Journal of the Ministry of Agriculture of Great Britain* 33 (1926), S. 503 – 513 (Zitiert auf Seite 22)
- [Fis35] FISHER, R. A.: *The Design of Experiments*. Oliver and Boyd, 1935 (Zitiert auf den Seiten 22 und 27)
- [FLS05] FANG, K.-T. ; LI, R. ; SUDJIANTO, A.: *Design and Modeling for Computer Experiments*. London : Chapman and Hall, 2005 (Zitiert auf Seite 27)
- [Fri06] FRITZSCHE, R.: *Erstellung von Parameter-Diagrammen in der Automobilindustrie*. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), 2006 (Zitiert auf Seite 215)
- [FW07] FRÖBA, S. ; WASSERMANN, A.: *Die bedeutendsten Mathematiker*. Marix Verlag, 2007 (Zitiert auf den Seiten 7, 9, 30, 36 und 59)
- [Gü10] GÜNTHER, S.: *Design for Six Sigma*. Gabler Verlag, 2010 (Zitiert auf Seite 219)
- [GAJ03] GREMYR, I. ; ARVIDSSON, M. ; JOHANSSON, P.: Robust Design Methodology: Status in the Swedish Manufacturing Industry. In: *Quality and Reliability Engineering International* 19 (2003), July/August, Nr. 4, S. 285–293 (Zitiert auf den Seiten 63, 64 und 65)
- [Gal15] GALERKIN, B. G.: On electrical circuits for the approximate solution of the Laplace equation. In: *Vestnik Inzh.* (1915), S. 897–908 (Zitiert auf Seite 33)
- [GGP13] GEROKOSTOPOULOS, A. ; GUO, H. ; POHL, E.: Determining the Right Sample Size for Your Test: Theory and Application. In: *Reliability and Maintainability Symposium*, 2013 (Zitiert auf Seite 225)
- [GH11] GREMYR, I. ; HASENKAMP, T.: Practices of robust design methodology in practice. In: *The TQM Journal* (2011) (Zitiert auf Seite 216)
- [Gig07] GIGER, B.: Einführung in die Statistische Versuchsplanung. In: *TQU AG* (2007) (Zitiert auf Seite 219)
- [GJSS09] GAMWEGER, J. ; JÖBSTL, O. ; STROHRMANN, M. ; SUCHOWERSKYJ, W.: *Design for Six Sigma: Kundenorientierte Produkte und Prozesse fehlerfrei entwickeln*. Carl Hanser Verlag, 2009 (Zitiert auf Seite 61)
- [GKL12] GASCH, R. ; KNOTHE, K. ; LIEBICH, R.: *Strukturdynamik*. 2. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 2012 (Zitiert auf Seite 30)
- [GL16] GUO, S. X. ; LI, Y.: Robust reliability method and reliability-based performance optimization for non-fragile robust control design of dynamic system with bounded parametric uncertainties. In: *Optimal Control Applications and Methods* (2016) (Zitiert auf Seite 63)

- [GM07] GUO, H. ; METTAS, A.: Improved Reliability Using Accelerated Degradation & Design of Experiments. In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (2007) (Zitiert auf Seite 63)
- [Goh07] GOH, T. N.: The Role of Statistical Design of Experiments in Six Sigma: Perspectives of a Practitioner. In: *Taylor & Francis Group* (2007) (Zitiert auf Seite 215)
- [GP02] GUIDA, M. ; PULCINI, G.: Automotive reliability inference based on past data and technical knowledge. In: *Reliability Engineering & System Safety* 76 (2002), Nr. 2, S. 129–137 (Zitiert auf Seite 226)
- [Gra01] GRAMS, T.: *Grundlagen des Qualitäts- und Risikomanagements: Zuverlässigkeit, Sicherheit, Bedienbarkeit*. Vieweg Verlagsgesellschaft, 2001 (Zitiert auf Seite 206)
- [Gun04] GUNDLACH, C.: *Entwicklung eines ganzheitliche Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statischen Versuchsplanung*. Kassel University Press, 2004 (Zitiert auf den Seiten 21, 23, 27 und 219)
- [Guo14] GUO, S. X.: Non-probabilistic robust reliability method and reliability-based performance optimisation for active vibration control of structures and dynamic systems with bounded uncertain parameters. In: *Journal of Vibration Control* (2014), S. 1–20 (Zitiert auf Seite 63)
- [GW10] GERHORST, F. ; WIRTH, K. M. amd K. M. amd Kuhlbach: Application of Monte-Carlo-Simulation and most probable limit state on gasoline DI combustion system Poptimization / SAE Interantional. 2010. – Forschungsbericht (Zitiert auf Seite 215)
- [Hac07] HACKER, L.: Design for Reliability: Overview of the Process and Applicable Techniques. In: *Reliability Edge* 8 (2007) (Zitiert auf den Seiten 65 und 91)
- [HACA07] HASENKAMP, T. ; ADLER, T. ; CARLSSON, A. ; ARVIDSSON, M.: Robust Design Methodology in a Generic Product Design Process. In: *Total Quality Management* 18 (2007), Nr. 4 (Zitiert auf Seite 88)
- [HAG08] HASENKAMP, T. ; ARVIDSSON, M. ; GREMYR, I.: A review of practices for Robust Design Methodology. In: *Taylor & Francis Group* (2008) (Zitiert auf Seite 216)
- [Has09] HASENKAMP, T.: *Designing for Robustness*. Chalmers University of Technology, 2009 (Zitiert auf Seite 216)
- [HB07] HABERHAUER, H. ; BODENSTEIN, F.: *Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung*. Berlin : Springer Verlag, 2007 (Zitiert auf Seite 223)
- [HD03] HELTON, J.C. ; DAVIS, F.J.: Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. In: *Reliability Engineering and System Safety* 81 (2003), Juli, Nr. 1 (Zitiert auf Seite 20)
- [Hei01] HEIDEMANN, B.: *Trennende Verknüpfung: ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2001 (Zitiert auf Seite 46)
- [Hei02] HEISE, W.: *Praxisbuch Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit*. Hanser Verlag, 2002 (Zitiert auf Seite 207)
- [HG79] HEINHOLD, J. ; GAEDE, K. W.: *Ingenieur-Statistik*. 4. Aufl. München : Oldenbourg Verlag, 1979 (Zitiert auf Seite 14)
- [HH94] HERTZ, H. ; HELMHOLTZ, H.: *Die Principien der Mechanik in neuem Zusammenhang dargestellt*. Leipzig : Akad. Verl.-Ges., 1894 (Zitiert auf Seite 29)
- [Hit07] HITZIGER, T.: *Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitsplanung*, Universität Stuttgart, Diss., 2007 (Zitiert auf den Seiten 140 und 169)
- [HJ09] HUNG, Z. ; JIN, Y.: Extension of stress and strength interference theory for conceptual design-for-reliability. In: *Journal of Mechanical Design* (2009) (Zitiert auf Seite 65)
- [HMRW11] HATCHUEL, A. ; MASSON, P. L. ; REICH, Y. ; WEIL, B.: A Systematic Approach of Design Theories Using Generativeness and Robustness. In: *Interantional Conference of Engineering Design ICED*, 2011 (Zitiert auf Seite 49)

- [Hoc02] HOCHHEIMER, N.: *QM-Lexikon*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2002 (Zitiert auf den Seiten 54 und 207)
- [Hol95] HOLST, G.: *Systematisierung der Planungsphase der statistischen Versuchsmethodik für die industrielle Anwendung*, TU Hamburg-Harburg, Diss., 1995 (Zitiert auf Seite 23)
- [Hsi94] HSIEH, H.K.: Average type-II censoring times for the 2-parameter Weibull distribution. In: *IEEE Transactions on Reliability* 43 (1994), August, Nr. 1, S. 91–96 (Zitiert auf Seite 225)
- [HTB98] HERING, E. ; TRIEMEL, J. ; BLANK, H.P.: *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. Springer Verlag, 1998 (Zitiert auf Seite 207)
- [Hu14] HU, M.: Robustness Thinking in Design for Reliability. In: *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)* (2014) (Zitiert auf den Seiten 62, 63 und 216)
- [HW08] HUANG, S.-R. ; WU, S.-J.: Reliability Sampling Plans Under Progressive Type-I Interval Censoring Using Cost Functions. In: *IEEE Transactions on Reliability* 57 (2008), August, Nr. 3, S. 445–451 (Zitiert auf Seite 225)
- [HW13] HAB, G. ; WAGNER, R.: *Projektmanagement in der Automobilindustrie*. Springer Gabler, 2013 (Zitiert auf den Seiten 87 und 88)
- [HYT00] HU, M. ; YANG, K. ; TAGUCHI, S.: Enhancing Robust Design with the Aid of TRIZ and Axiomatic Design (Part 1). In: *TRIZ Journal* (2000) (Zitiert auf Seite 216)
- [IEC02] IEC 60050-191: *Dependability and quality of service*. International Electrotechnical Commission, 2002 (Zitiert auf Seite 55)
- [IEC03a] IEC 60300-1: *Dependability management - Part 1: Dependability management systems*. International Electrotechnical Commission, 2003 (Zitiert auf Seite 209)
- [IEC03b] IEC 60300-2: *Dependability management - Part 2: Guidance for dependability programme management*. International Electrotechnical Commission, 2003 (Zitiert auf Seite 209)
- [IEC07a] IEC 60050-191: *International Electrotechnical Vocabulary - Part 191: Dependability*. International Electrotechnical Commission, 2007 (Zitiert auf Seite 208)
- [IEC07b] IEC 62502: *Analysis techniques for dependability - Event tree analysis*. International Electrotechnical Commission, 2007 (Zitiert auf Seite 211)
- [IEC15] IEC 60050-192: *International electrotechnical vocabulary - Part 192: Dependability*. International Electrotechnical Commission, 2015 (Zitiert auf Seite 208)
- [IEV02] IEV-191: *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Kapitel 191: Zuverlässigkeit und Dienstgüte*. DKE, 2002 (Zitiert auf Seite 208)
- [IEV15] IEV-192: *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 192: Zuverlässigkeit*. DKE, 2015 (Zitiert auf Seite 208)
- [IKKN06] ION, R. A. ; KALISHOEK, H. ; KARYDAS, D. M. ; NITESCU, I.: Bayesian model for early reliability prediction. In: *Reliability and Maintainability Symposium*, 2006 (Zitiert auf Seite 226)
- [ISO11] ISO 26262-1: *Road vehicles- Functional safety- Part 1: Vocabulary*. Internationale Organisation für Normung, 2011 (Zitiert auf Seite 216)
- [ISO13] ISO 33534-3: *Statistic - Vocabulary and symbols - Part 3: Design of experiments*. Internationale Organisation für Normung, 2013 (Zitiert auf Seite 22)
- [Jä04] JÄGER, P.: A New Approach To Gathering Failure Behavior Information About Mechanical Components Based On Expert Knowledge. In: *Reliability and Maintainability Symposium*, 2004 (Zitiert auf Seite 226)
- [Jay57] JAYNES, E. T.: Information Theory and Statistical Mechanics. In: *The Physical Review* 106 (1957), Mai, Nr. 4, S. 620–630 (Zitiert auf Seite 21)

- [JBS⁺12] JOHANNESSON, P. ; BERGMAN, B. ; SVENSSON, T. ; ARVIDSSON, M. ; LÖNQVIST, A. ; BARONE, S. ; DEMARÉ, J.: A Robustness Approach to Reliability. In: *Quality and Reliability Engineering International* (2012) (Zitiert auf den Seiten [61](#), [62](#) und [216](#))
- [JF07] JUGULUM, R. ; FREY, D.D.: Toward a taxonomy of concept designs for improved robustness. In: *Journal of Engineering Design* (2007) (Zitiert auf Seite [53](#))
- [JJ09] JONES, B. ; JOHNSON, R. T.: Design and Analysis for the Gaussian Process Model. In: *Quality and Reliability Engineering International* (2009), Nr. 25, S. 515–524 (Zitiert auf Seite [21](#))
- [JM08] JANSON, K. ; MARGRAF, M.: *Approximative Algorithmen und Nichtapproximierbarkeit*. Berlin : de Gruyter, 2008 (Zitiert auf Seite [35](#))
- [JMY90] JOHNSON, M. E. ; MOORE, L. M. ; YLVISAKER, D.: Minimax and maximin distance designs. In: *Journal of Statistical Planning and Inference* 26 (1990), Oktober, Nr. 2, S. 131–148 (Zitiert auf Seite [27](#))
- [Kö05] KÖNNING, M.: Kombination von Optimierung und Robustheit in der Simulation mechanische Systeme. In: *www.dynardo.de/library* (2005) (Zitiert auf Seite [50](#))
- [Kac85] KACKAR, R.: Off-Line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method. In: *Journal of Quality Technology* 17 (1985), Nr. 4, S. 176–188 (Zitiert auf Seite [42](#))
- [Kam13] KAMISKE, G. F.: *Handbuch QM-Methoden: Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen*. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2013 (Zitiert auf den Seiten [128](#), [207](#), [217](#) und [219](#))
- [KBG⁺97] KLEYNER, A. ; BHAGATH, S. ; GASPARINI, M. ; ROBINSON, J. ; BENDER, M.: Bayesian techniques to reduce the sample size in automotive electronics attribute testing. In: *Microelectronics Reliability* 37 (1997), Nr. 6, S. 879–883 (Zitiert auf Seite [226](#))
- [Kec02] KECECIOGLU, D.: *Reliability engineering Handbook*. 2., 2002 (Zitiert auf Seite [226](#))
- [KF88] KLIR, G. ; FOLGER, T.: *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*. Prentice Hall, 1988 (Zitiert auf den Seiten [7](#) und [202](#))
- [KH06] KIRCHNER, E. ; HÄUSSLER, R. Girwidz P.: *Physikdidaktik - Theorie und Praxis*. Berlin : Springer Verlag, 2006 (Zitiert auf Seite [29](#))
- [Kit] KITANO, H.: System Drug Design. In: *The Systems Biology Institute* (Zitiert auf Seite [217](#))
- [Kle11] KLEIN, B.: *Versuchsplanung- DoE*. 3. Aufl. Springer Verlag, 2011 (Zitiert auf den Seiten [22](#), [27](#), [128](#), [129](#) und [130](#))
- [Kle12] KLEIN, B.: *FEM - Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 9. Aufl. Springer Vieweg, 2012 (Zitiert auf Seite [31](#))
- [Kle13] KLEPPMANN, W.: *Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren*. 8. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2013 (Zitiert auf den Seiten [22](#), [25](#) und [128](#))
- [Kle14a] KLEIN, B.: *Prozessorientierte Statistische Tolerierung im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 3. Aufl. expert verlag, 2014 (Zitiert auf Seite [125](#))
- [Kle14b] KLEIN, B.: *TRIZ/TIPS - Methodik des erfinderischen Problemlösens*. 3. Aufl. Berlin : De Gruyter Oldenbourg Verlag, 2014 (Zitiert auf den Seiten [99](#) und [219](#))
- [Kne03] KNETSCH, T.: *Unsicherheit in Ingenieurberechnungen*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2003 (Zitiert auf den Seiten [5](#) und [6](#))
- [Kol33] KOLMOGOROFF, A.: *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Springer, 1933 (Zitiert auf Seite [7](#))
- [Kol08] KOLMER, A.: Robust Design - Robustheitsmaße. In: *Fraunhofer* (2008) (Zitiert auf Seite [217](#))
- [KR07] KOETHER, R. ; RAU, W.: *Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure*. Carl Hanser Verlag, 2007 (Zitiert auf den Seiten [131](#), [132](#) und [165](#))

- [Kra07] KRAFFT, F.: *Die wichtigsten Naturwissenschaftler im Porträt*. Marix Verlag, 2007 (Zitiert auf den Seiten 29 und 30)
- [Kre79] KREUZER, E.: Symbolische Berechnung der Bewegungsgleichungen von Mehrkörpersystemen. In: *Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften* 11 (1979), Nr. 32 (Zitiert auf Seite 30)
- [Kro04] KROLO, A.: *Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen*, Universität Stuttgart, Diss., 2004 (Zitiert auf den Seiten 59, 140, 169 und 226)
- [KT08] KURTOGLU, T. ; TUMER, I.Y.: A graph-based fault identification and propagation framework for functional design of complex systems. In: *Journal of Mechanical Design* (2008) (Zitiert auf Seite 65)
- [KZ11] KUHN, M. ; ZAJONTZ, Y.: *Industrielles Marketing*. Oldenbourg Verlag, 2011 (Zitiert auf Seite 87)
- [Lee03] LEE, T.: *Complexity Theory in Axiomatic Design*, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 2003 (Zitiert auf den Seiten 49 und 50)
- [Lee06] LEE, T.: Optimal strategy for eliminating coupling terms from a design matrix. In: *Journal of Integrated Design and Process Science* 10 (2006), Nr. 2, S. 45–55 (Zitiert auf den Seiten 47, 48, 49 und 106)
- [Lev98] LEVIN, D.: The Approximation Power of Moving Least-Squares. In: *Mathematics of Computation* 67 (1998), Oktober, Nr. 224, S. 1517–1531 (Zitiert auf Seite 33)
- [LF08] LÜTTICH, M. ; FIEGE, R.: Anwendung von Axiomatic Design für den Entwurf Serviceorientierter Architekturen. In: *Technische Universität Ilmenau* (2008) (Zitiert auf den Seiten 45, 46, 47, 48, 49 und 106)
- [LJ06] LEE, T. ; JEZIOREK, P. N.: Understanding the value of eliminating an off-diagonal term in a design matrix. In: *Proceedings of ICAD 2006*, 2006 (Zitiert auf den Seiten 49 und 106)
- [LM90] LOCHNER, R. ; MATAR, J.: *Designing for quality - An introduction to the best of Taguchi and Western methods of statistical experimental design*. United Kingdom : Chapman and Hall, 1990 (Zitiert auf Seite 27)
- [LM09] LINDEMANN, U. ; MAURER, M.: *Structural Complexity Management*. Springer Verlag, 2009 (Zitiert auf den Seiten 38 und 66)
- [LMJ⁺12] LUNAU, S. ; MERAN, R. ; JOHN, A. ; STAUDTER, C. ; ROENPAGE, O.: *Six Sigma+Lean Toolset: Mindset zur erfolgreich Umsetzung von Verbesserungsprojekten*. 3. Aufl. Springer Verlag, 2012 (Zitiert auf Seite 127)
- [LO80] LISZKA, T. ; ORKISZ, J.: The finite difference method at arbitrary irregular grids and its application in applied mechanics. In: *Computer and Structures* 11 (1980) (Zitiert auf Seite 32)
- [LS05] LI, R. ; SUDJANTO, A.: Analysis of computer experiments using penalized likelihood in gaussian kriging models. In: *Technometrics* 47 (2005), Mai, Nr. 2, S. 111–120 (Zitiert auf Seite 34)
- [Mag90] MAG, W.: *Grundzüge der Entscheidungstheorie*. Verlag Vahlen, 1990 (Zitiert auf Seite 6)
- [Mai07] MAISCH, M.: *Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten*, Universität Stuttgart, Diss., 2007 (Zitiert auf den Seiten 59, 139 und 226)
- [MBBBG⁺71] MESSERSCHMITT-BÖLKOW-BLOHM ; BITTER, P. ; GRAEWE, D. ; GROSS, H. ; HIL-LEBRAND, H. ; OHLERT, H. ; SCHMIDT, D.: *Technische Zuverlässigkeit: Problematik, Grundlagen, Untersuchungsmethoden*. Springer Verlag, 1971 (Zitiert auf den Seiten 68 und 207)

- [MBC79] MCKAY, M. D. ; BECKMAN, R. J. ; CONOVER, W. J.: A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. In: *Technometrics* 21 (1979), May, Nr. 2, S. 239–245 (Zitiert auf Seite 20)
- [MC00] MOHSEN, H. A. ; CEKECEK, E.: Thoughts on the use of axiomatic designs within the product development process. In: *Proceeding of ICAD2000, First International Conference on Axiomatic Design*, 2000, S. 188–195 (Zitiert auf Seite 217)
- [ME98] MEEKER, W. Q. ; ESCOBAR, L. A.: *Statistical Methods for Reliability Data*. John Wiley & Sons, Inc., 1998 (Zitiert auf Seite 60)
- [MEL98] MEEKER, W. Q. ; ESCOBAR, L. A. ; LU, C. J.: Accelerated Degradation Tests: Modeling and Analysis. In: *American Society for Quality* (1998) (Zitiert auf Seite 58)
- [Mel99] MELCHERS, R.: *Uncertainties in reliability assessment*. John Wiley & Sons, Inc., 1999 (Zitiert auf Seite 202)
- [Mel03] MELVIN, J. W.: *Axiomatic System Design*, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 2003 (Zitiert auf den Seiten 46, 47, 106 und 217)
- [Men06] MENG, J.: *Integrated robust design using computer experiments and optimization of a diesel HPCR injector*, The Florida State University- College of Engineering, Diss., 2006 (Zitiert auf Seite 145)
- [Mes15] MESCHÉDE, D.: *Gerthsen Physik*. 25. Aufl. Springer Spektrum, 2015 (Zitiert auf Seite 30)
- [Mey07] MEYWERK, M.: *CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2007 (Zitiert auf den Seiten 29 und 33)
- [MH90] MORGAN, O. ; HENRION, M.: *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis / Cambridge University Press*. 1990. – Forschungsbericht (Zitiert auf Seite 202)
- [Mil81] MILLING, P.: *Systemtheoretische Grundlagen zur Planung der Unternehmenspolitik*. Berlin : Duncker & Humblot, 1981 (Zitiert auf Seite 38)
- [MIT] MIT: *Robust Design: Experiments for better Products*. In: *MIT* (Zitiert auf Seite 217)
- [MM89] MEISSNER, U. ; MENZEL, A.: *Die Methode der finiten Elemente*. Berlin : Springer Verlag, 1989 (Zitiert auf den Seiten 30 und 31)
- [Moc95] MOCK, R.: *Methoden zur Datenhandlung in Zuverlässigkeitsanalysen*. Zürich : vdf Hochschulverlag AG, 1995 (Zitiert auf den Seiten 11 und 12)
- [Mon91] MONTGOMERY, D.C.: *Design and Analyse of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc., 1991 (Zitiert auf den Seiten 22 und 40)
- [Mon12] MONTGOMERY, D. C.: *Design and Analysis of Experiments*. 8. Aufl. John Wiley & Sons, Inc., 2012 (Zitiert auf den Seiten 20 und 22)
- [Mor91] MORI, T.: *The new experimental design - Taguchi's approach to quality engineering*. Dearborn : ASI Press, 1991 (Zitiert auf Seite 26)
- [Mor09] MORGENSTERN, C.: Axiomatic Design - ein Werkzeug zur Reduzierung der Komplexität von Entwicklungen. In: *TEQ Technologietransfert & Qualitätssicherung GmbH* (2009) (Zitiert auf Seite 219)
- [Mos06] MOSLER, K.: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik*. 2. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 2006 (Zitiert auf den Seiten 13 und 14)
- [MP43] MCCULLOCH, W. S. ; PITTS, W. H.: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. In: *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 (1943), S. 115–133 (Zitiert auf Seite 35)
- [MP10] MEYNA, A. ; PAULI, B.: *Zuverlässigkeitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren*. 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, 2010 (Zitiert auf Seite 207)

- [MW91] MARTZ, H. F. ; WALLER, R. A.: *Bayesian reliability analysis*. Krieger Pub. Co. Verlag, 1991 (Zitiert auf Seite 226)
- [MW08] MOST, T. ; WILL, J.: Metamodel of Optimal Prognosis - An automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection. In: *Weimar Optimization and Stochastic Days*, 2008 (Zitiert auf den Seiten 34 und 36)
- [MW11] MOST, T. ; WILL, J.: Sensitivity analysis using the Metamodel of Optimal Prognosis. In: www.dynardo.de/en/library (2011) (Zitiert auf den Seiten 32, 33, 34 und 148)
- [Nel04] NELSON, W. B.: *Applied Life- Data Analysis / Wiley-Interscience*. 2004. – Forschungsbericht (Zitiert auf Seite 60)
- [NKNW96] NETER, J. ; KUTNER, M. H. ; NACHTSHEIM, C. J. ; WASSERMAN, W.: *Applied linear statistical models*. 4. Aufl. New York : McGraw-Hill Book Company, 1996 (Zitiert auf den Seiten 35 und 36)
- [OA93] OTTO, K. ; ANTONSSON, E.: Tuning parameters in engineering design. In: *ASME Journal of Mechanical Design* 115 (1993), Nr. 1, S. 14–19 (Zitiert auf Seite 202)
- [O’C90] O’CONNOR, P.: *Zuverlässigkeitstechnik*. John Wiley & Sonst, 1990 (Zitiert auf Seite 207)
- [ODR⁺99] OBERKAMPF, W. ; DELAND, S. ; RUTHERFORD, B. ; DIEGERT, K. ; ALVIN, K.: A new methodology for the estimation of total uncertainty in computational simulation. In: *AIAA Paper 99*, 1999 (Zitiert auf Seite 202)
- [OHS01] OBERKAMPF, W. ; HELTON, J. ; SENTZ, K.: Mathematic representation of uncertainty. In: *AIAA Paper 2001*, 2001 (Zitiert auf Seite 202)
- [OK12] O’CONNOR, P. T. ; KLEYNER, A.: *Practical reliability engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 2012 (Zitiert auf den Seiten 60, 62, 81 und 217)
- [OW03] OTTO, K.N. ; WOOD, K.L.: Product design: Techniques in reverse engineering and new product development. In: *Tsinghua Science and Technology* (2003) (Zitiert auf Seite 99)
- [Pap14] PAPULA, Lothar: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 1*. 14. Aufl. Springer, 2014 (Zitiert auf Seite 8)
- [Pap15] PAPULA, Lothar: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 2*. 14. Aufl. Springer, 2015 (Zitiert auf Seite 8)
- [Pap16] PAPULA, Lothar: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3*. 7. Aufl. Springer, 2016 (Zitiert auf den Seiten 10 und 14)
- [Par07] PARK, G.-J.: *Analytic Methods for Design Practice*. Springer Verlag, 2007 (Zitiert auf den Seiten 50, 52, 53 und 217)
- [PB77] PAH, G. ; BEITZ, W.: *Konstruktionslehre*. Springer, 1977 (Zitiert auf den Seiten 38 und 68)
- [PBWC95] PAHL, G. ; BEITZ, W. ; WALLACE, K. ; COUNCIL, D.: *Engineering design*. Springer, 1995 (Zitiert auf Seite 99)
- [PEB⁺00] PEDERSEN, K. ; EMBLEMSVÅG, J. ; BAILEY, R. ; ALLEN, J. K. ; MISTREE, F.: Validating Design Methods & Research: The Validation Square. In: *ASME Design Engineering Technical Conferences*. Baltimore / USA, 2000 (Zitiert auf den Seiten 3, 71 und 72)
- [Pet91] PETERSON, H.: *Grundlagen der Statistik und der statistischen Versuchsplanung – Teil 2: Grundlagen der statistischen Versuchsplanung*. Landsberg/Lech, 1991 (Zitiert auf den Seiten 24 und 25)
- [Pfe01] PFEIFER, T.: *Qualitätsmanagement (Strategien, Methoden, Techniken)*. Hanser, 2001 (Zitiert auf Seite 207)
- [Pha89a] PHADKE, M. S.: *Quality Engineering Using Robust Design*. PTR Prentice- Hall, Inc., 1989 (Zitiert auf den Seiten 40, 53, 62 und 217)

- [Pha89b] PHADKE, M. S.: *Quality Engineering: Using Robust Design: Robuste Prozesse durch Quality Engineering*. Prentice-Hall Inc., 1989 (Zitiert auf Seite 40)
- [Pha06] PHAM, H.: *Handbook of engineering statistics*. Springer Verlag, 2006 (Zitiert auf Seite 217)
- [Pic08] PICKARD, K.: *Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen*, Universität Stuttgart, Diss., 2008 (Zitiert auf Seite 226)
- [PK01] PAPADIMITRIOU, C. ; KATAFYGIOTIS, L. S.: Updating robust reliability using structural test data. In: *Probabilistic Engineering Mechanics* 16 (2001), S. 103–113 (Zitiert auf Seite 63)
- [PLLH06] PARK, G.-J. ; LEE, T.-H. ; LEE, K. H. ; HWANG, K.-H.: Robust Design: An Overview. In: *AIAA Journal* 44 (2006), Nr. 1 (Zitiert auf den Seiten 27 und 39)
- [Pop10] POPOV, V. L.: *Kontaktmechanik und Reibung*. 2. Aufl. Heidelberg : Springer, 2010 (Zitiert auf den Seiten 122 und 123)
- [Pow87] POWELL, M. J. D.: Radial basis functions for multivariable interpolation: a review. In: *Algorithms for approximation* (1987), S. 143–167 (Zitiert auf Seite 34)
- [PS07] PFEIFER, T. ; SCHMITT, R.: *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*. Carl Hanser Verlag, 2007 (Zitiert auf Seite 207)
- [Rö99] RÖTSCH, D.: *Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen*. Springer Verlag, 1999 (Zitiert auf Seite 208)
- [RG12] RAHEJA, D. ; GULLO, L. J.: *Design For Reliability*. John Wiley & Sons, Inc., 2012 (Zitiert auf den Seiten 65 und 91)
- [RH00] REUTER, R. ; HÜLSMANN, J.: Achieving design targets through stochastic simulation. In: *Madymo's User's Conference* (2000) (Zitiert auf Seite 217)
- [RH15] RADETZKI, M. ; HÖTZEL, T.: Robust eingebetete Systeme. In: *Themenheft Forschung - Intelligente Fahrzeuge* Universität Stuttgart: Institut für Technische Informatik (2015) (Zitiert auf den Seiten 39 und 61)
- [RM15] ROOS, E. ; MAILE, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure - Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. 4. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 2015 (Zitiert auf Seite 122)
- [Rob90] ROBERT BOSCH GMBH: Qualitätssicherung der Bosch-Gruppe Nr. 1-12. (1990) (Zitiert auf Seite 214)
- [Rob09] ROBERT BOSCH GMBH: Wie machen wir unsere Produkte zuverlässig? In: *Bosch Product Engineering* (2009) (Zitiert auf Seite 207)
- [Rob10] ROBERT BOSCH GMBH: Robust Design als Design for Six Sigma Baustein bei der Robert Bosch GmbH. In: www.dynardo.de/library (2010) (Zitiert auf Seite 214)
- [Rom13] ROMER, A.: Beschleunigter Zuverlässigkeitsnachweis unter Berücksichtigung von Vorinformationen und Hardware-in-the-Loop Simulation. In: *26. Tagung Technische Zuverlässigkeit*, 2013 (Zitiert auf Seite 226)
- [Ros88] ROSS, P.: *Taguchi techniques for quality engineering. Loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1988 (Zitiert auf Seite 27)
- [Rot00] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen - Band 1: Konstruktionslehre*. Springer Verlag, 2000 (Zitiert auf den Seiten 102 und 103)
- [RS14] RILL, G. ; SCHAEFFER, T.: *Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 (Zitiert auf Seite 30)
- [RSB02] RZEPKA, B. ; SCHRÖPEL, H. ; BERTSCHE, B.: Studie zur Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden in der Industrie. In: *21. Tagung Technische Zuverlässigkeit*, 2002 (Zitiert auf den Seiten 57, 63 und 64)

- [Sac97] SACHS, L.: *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden*. Springer, 1997 (Zitiert auf den Seiten 10 und 13)
- [San08] SANDER, M.: *Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen*. Springer Verlag, 2008 (Zitiert auf Seite 208)
- [SBT10] SIEBERTZ, K. ; BEBBER, D. van ; T., Hochkirchen: *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Springer Verlag, 2010 (Zitiert auf den Seiten 20, 21, 32, 33, 34 und 128)
- [Sch97] SCHEFFLER, E.: *Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung*. Bd. 3. Stuttgart : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997 (Zitiert auf Seite 24)
- [Sch03] SCHLITTTGEN, R.: *Einführung in die Statistik: Analyse und Modellierung von Daten*. Oldenbourg Verlag, 2003 (Zitiert auf Seite 18)
- [Sch06] SCHIEHLEN, W.: Computational dynamics: theory and applications of multibody systems. In: *European Journal of Mechanics A/Solids* 25 25 (2006) (Zitiert auf Seite 30)
- [SE79] SHULTIS, J. ; ECKHOFF, N.: Selection of Beta Prior Distribution Parameters from Component Failure Data. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 98 (1979), Nr. 2, S. 400–407 (Zitiert auf Seite 226)
- [SH61] STÖLZLE, K. ; HART, S. ; KOLLMANN, K. (Hrsg.): *Freilaufkupplungen - Berechnung und Konstruktion*. Springer Verlag, 1961 (Zitiert auf den Seiten 96 und 102)
- [SH14] SOMMER, K. ; HEINZ, R.: *Verschleiß metallischer Werkstoffe*. Wiesbaden : Springer-Vieweg, 2014 (Zitiert auf Seite 122)
- [Sha48] SHANNON, C. E.: A Mathematical Theory of Communication. In: *The Bell System Technical Journal* 27 (1948), Juli und Oktober, S. 379–423, 623–656 (Zitiert auf Seite 27)
- [Sha76] SHAFER, G.: *A mathematical theory of evidence*. Princeton University Press, 1976 (Zitiert auf Seite 16)
- [She82] SHETTY, H.V.K.: Concept of Built-In Reliability in the design of large induction motors. In: *Electric Machines & Power Systems* (1982) (Zitiert auf Seite 65)
- [SL11] SCHUKAJLOW, S. ; LEISS, D.: Selbstberichtete Strategienutzung und mathematische Modellierungskompetenz. In: *Journal für Mathematik-Didaktik* 32 (2011), Februar, Nr. 1, S. 53 – 77 (Zitiert auf Seite 31)
- [SLC01] SIMPSON, T. W. ; LIN, D. K. J. ; CHEN, W.: Sampling Strategies for Computer Experiments: Design and Analysis. In: *International Journal of Reliability and Applications* 2 (2001), Nr. 3, S. 209–240 (Zitiert auf Seite 37)
- [Slo84] SLOANE, N. J. A.: The Packing of Spheres. In: *Scientific American* 250 (1984), Januar, Nr. 1, S. 116–125 (Zitiert auf Seite 21)
- [SM94] SAVCHUK, V. ; MARTZ, H.: Bayes reliability estimation using multiple sources of prior information: binomial sampling. In: *IEEE Transactions on Reliability* 43 (1994), Nr. 1, S. 138–144 (Zitiert auf Seite 226)
- [Sou03] SOUZA, D. I. D.: Application of a Bayesian approach to sequential life testing with an underlying Weibull model. In: *European Conference on System Dependability and Safety*, 2003, S. 617–621 (Zitiert auf Seite 226)
- [SSS+04] STELLING, J. ; SAUER, U. ; SZALLASI, Z. ; DOYLE, F. J. ; DOYLE, J.: Robustness of Cellular Functions. In: *Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems* (2004) (Zitiert auf Seite 217)
- [Sta77] STANGE, K.: *Bayes-Verfahren - Schätz- und Testverfahren bei Berücksichtigung von Vorinformationen*. Berlin : Springer Verlag, 1977 (Zitiert auf Seite 59)
- [Ste99] STEIN, M. L.: Interpolation of Spatial Data. In: *Springer Series in Statistics*. Springer, 1999 (Zitiert auf Seite 34)
- [Ste12] STEINHORST, W.: *Sicherheitstechnische Systeme*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (Zitiert auf Seite 208)

- [Sto10] STOCKINGER, A.: *Computer Aided Robust Design- Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements*, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2010 (Zitiert auf Seite 218)
- [Suh90] SUH, N.P.: *The Principles of Desgin*. Oxford University Press, Inc., 1990 (Zitiert auf den Seiten 45 und 49)
- [Suh97] SUH, N.P.: Design of Systems. In: *Annals of the CIRP* 46 (1997), Nr. 1 (Zitiert auf Seite 45)
- [Suh01] SUH, N. P.: *Axiomatic Design: Advances and Applications*. Oxford University Press, Inc., 2001 (Zitiert auf den Seiten 45, 46, 47, 49, 50, 99, 106, 108 und 218)
- [SW00] SONTE, R.B. ; WOOD, K.L.: Development of a functional basis for design. In: *Journal of Mechanical Design* (2000) (Zitiert auf Seite 99)
- [SWMW89] SACKS, J. ; WELCH, W. J. ; MITCHELL, T. J. ; WYNN, H.P.: Design and Analysis of Computer Experiments. In: *Statistical Science* 4 (1989), November, Nr. 4, S. 409 – 423 (Zitiert auf Seite 20)
- [Tag78] TAGUCHI, G: Performance analysis design. In: *The International Journal of Production Research* 16 (1978), Nr. 6, S. 521–530 (Zitiert auf den Seiten 42 und 53)
- [Tag86] TAGUCHI, G.: *Introduction to Quality Engineering - Designing Quality into Products and Processes*. Asian Productivity Organization, 1986 (Zitiert auf den Seiten 42, 68 und 218)
- [TCMT56] TURNER, M. J. ; CLOUGH, R. W. ; MARTIN, H. C. ; TOPP, L. J.: Stiffness and deflection analysis of complex structures. In: *Journal of the Aeronautical Sciences* 23 (1956), S. 805–823 (Zitiert auf Seite 30)
- [TCT00] TAGUCHI, G. ; CHOWDHURY, S. ; TAGUCHI, S.: *Robust Engineering*. American Supplier Institute, 2000 (Zitiert auf Seite 218)
- [TCW05] TAGUCHI, G ; CHOWDHURY, S. ; WU, Y.: *Praise for Taguchi's Quality Engineering Handbook*. John Wiley & Sons, Inc., 2005 (Zitiert auf den Seiten 26, 27, 39, 42, 53 und 62)
- [TEH89] TAGUCHI, S. ; ELSAYED, A. ; HSIANG, T. C.: *Quality Engineering in Product Systems*. McGraw-Hill Book Company, 1989 (Zitiert auf den Seiten 40 und 87)
- [Tho03] THORNTON, A.C.: *Variation Risk Management: Focusing Quality Improvements in Product Development and Production*. New Jersey : John Wiley & Sons Inc., 2003 (Zitiert auf Seite 65)
- [Thu05] THUNNISSEN, D.P.: *Propagating and Mitigating Uncertainty in the Design of Complex Multidisciplinary Systems*, California Institute of Technology, Diss., 2005 (Zitiert auf den Seiten 6 und 202)
- [Til93] TILLI, T.: *Fuzzy-Logik. Grundlagen, Anwendungen, Hard- und Software*. München : Franzis Verlag GmbH, 1993 (Zitiert auf Seite 29)
- [Tim02] TIMISCHL, W.: *Qualitätssicherung- Statistische Methoden*. Carl Hanser Verlag, 2002 (Zitiert auf Seite 208)
- [TK09] TOUTENBURG, H. ; KNÖPFLE, P.: *Six Sigma: Methoden und Statistik für die Praxis*. 2. Aufl. Springer Verlag, 2009 (Zitiert auf Seite 39)
- [Tsu92] TSUI, K.-L.: An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design. In: *IIE Transactions* (1992) (Zitiert auf Seite 218)
- [Tsu14] TSUI, K.-L.: A critical look at Taguchi's modelling approach for robust design. In: *Taylor & Francis* (2014) (Zitiert auf Seite 218)
- [TT06] THOMPSON, J. ; THOMPSON, M.: A Proposal for the Calculation of Wear, 2006 (Zitiert auf Seite 123)
- [UD91] UNAL, R. ; DEAN, E. B.: Taguchi approach to design optimization for quality and cost: An Overview. In: *Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts* (1991) (Zitiert auf Seite 93)

- [Van83] VANMARCKE, E.: *Random Field: Analysis and Synthesis*, Cambridge: MIT Press, Diss., 1983 (Zitiert auf Seite 81)
- [VDA00a] VDA: *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten - Teil 1: Zuverlässigkeitsmanagement*. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 2000 (Zitiert auf Seite 209)
- [VDA00b] VDA: *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten - Teil 2: Zuverlässigkeits-Methoden und -Hilfsmittel*. 3. Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 2000 (Zitiert auf den Seiten 209, 210 und 211)
- [VDI72] VDI 4004-2: *Überlebenskenngrößen*. Verein Deutscher Ingenieure, 1972 (Zitiert auf Seite 210)
- [VDI93a] VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Verein Deutscher Ingenieure, 1993 (Zitiert auf den Seiten 87, 94 und 137)
- [VDI93b] VDI-GIS: *Software-Zuverlässigkeit – Grundlagen, konstruktive Maßnahmen, Nachweisverfahren*. Verein Deutscher Ingenieure, 1993 (Zitiert auf Seite 218)
- [VDI98] VDI 4001-1: *Allgemeine Hinweis zum VDI-Handbuch Technische Zuverlässigkeit*. Verein Deutscher Ingenieure, 1998 (Zitiert auf den Seiten 55 und 210)
- [VDI99] VDI 4008-6: *Monte-Carlo-Simulation*. Verein Deutscher Ingenieure, 1999 (Zitiert auf Seite 211)
- [VDI00] VDI 3542-4: *Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme Zuverlässigkeit und Sicherheit komplexer Systeme (Begriffe)*. Verein Deutscher Ingenieure, 2000 (Zitiert auf den Seiten 209 und 218)
- [VDI02] VDI 4006-1: *Menschliche Zuverlässigkeit Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung*. Verein Deutscher Ingenieure, 2002 (Zitiert auf Seite 210)
- [VDI04] VDI 4003: *Zuverlässigkeitsmanagement*. Verein Deutscher Ingenieure, 2004 (Zitiert auf Seite 210)
- [VDI06] VDI 4001-2: *Terminologie der Zuverlässigkeit*. Verein Deutscher Ingenieure, 2006 (Zitiert auf den Seiten 55 und 210)
- [VDI10] VDI 4002-1: *Zuverlässigkeitsingenieur/Zuverlässigkeitsingenieurin- Berufsbild*. Verein Deutscher Ingenieure, 2010 (Zitiert auf Seite 55)
- [VDI11] VDI 4002-2: *Zuverlässigkeitsingenieur/Zuverlässigkeitsingenieurin - Anforderungen an die Qualifizierung*. Verein Deutscher Ingenieure, 2011 (Zitiert auf Seite 210)
- [VDI12] VDI 4007: *Zuverlässigkeitsziele - Ermittlung, Überprüfung, Festlegung, Nachweis*. Verein Deutscher Ingenieure, 2012 (Zitiert auf Seite 210)
- [VDI15] VDI: *Qualifizierung Ressourceneffizienz für Berater*. Stuttgart : VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, 2015 (Zitiert auf Seite 133)
- [VP93] VAIDYA, N. F. ; PRADHAN, D. K.: *Fault-Tolerant Design Strategies for High Reliability and Safety*. In: *IEEE Transactions on Computers* 42 (1993), S. 1195–1206 (Zitiert auf Seite 208)
- [Wal02] WALTON, M.: *Managing uncertainty in space systems conceptual design using portfolio theory*, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 2002 (Zitiert auf Seite 202)
- [Wal09] WALDHERR, S.: *Uncertainty and robustness analysis of biochemical reaction networks via convex optimisation and robust control theory*, Universität Stuttgart, Diss., 2009 (Zitiert auf Seite 218)
- [Wan06] WANKA, R.: *Approximationsalgorithmen - Eine Einführung*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2006 (Zitiert auf Seite 35)
- [Wei08] WEIGT, M.: *Systemtechnische Methodenentwicklung: Diskursive Definition heuristischer prozeduraler Prozessmodelle als Beitrag zur Bewältigung von informationeller Komplexität im Produktleben*, Universität Karlsruhe, Diss., 2008 (Zitiert auf Seite 38)

- [WEM⁺13] *Kapitel Modellierung von Unsicherheit in der Produktentwicklung.* In: WIEBEL, M.; EIFLER, T.; MATHIAS, J.; KLOBERDANZ, H.; BOHN, A.; BIRKHOFFER, H.: *Exploring Uncertainty: Ungewissheit und Unsicherheit im interdisziplinären Diskurs.* Springer Verlag, 2013, S. 245–269 (Zitiert auf den Seiten 68 und 218)
- [Wer11] WERDICH, M.: *FMEA-Einführung und Moderation: durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung (inkl. Methoden im Umfeld).* Springer Verlag, 2011 (Zitiert auf den Seiten 208, 210, 211, 218 und 219)
- [Wes06] WESTKÄMPER, E.: *Einführung in die Organisation der Produktion.* Springer Verlag, 2006 (Zitiert auf Seite 208)
- [WG05] WELLMITZ, J.; GLUSCHKE, M.: Leitlinie zur Methodenvalidierung / Umweltbundesamt. 2005. – Forschungsbericht (Zitiert auf Seite 71)
- [WH09] WU, C. F. J.; HAMADA, M. S.: *Experiments- Planning, Analysis, and Optimization.* John Wiley & Sons, Inc., 2009 (Zitiert auf den Seiten 21 und 22)
- [WM99] WEIL, A.; MATTMÜLLER, M.: *Die Werke von Jakob Bernoulli.* Birkhäuser Verlag, 1999 (Zitiert auf Seite 13)
- [WMJV13] WITTEL, H.; MUHS, D.; JANNASCH, D.; VOSSIEK, J.: *Roloff / Matek - Maschinenelemente.* Wiesbaden : Springer Verlag, 2013 (Zitiert auf den Seiten 131 und 132)
- [WMW76] WATERMAN, M. S.; MARTZ, H. F.; WALLER, R. A.: Fitting beta prior distributions in Bayesian reliability analysis: a set of tables / Los Alamos Scientific Laboratory report LA-6395-MS. 1976. – Forschungsbericht (Zitiert auf Seite 226)
- [WRR03] WILL, J.; ROOS, D.; RIEDEL, J.: Robustheitsbewertung in der stochastischen Strukturmechanik. In: www.dynardo.de/de/bibliothek (2003) (Zitiert auf Seite 219)
- [Wu97] WU, N.: *The Maximum Entropy Method.* Berlin : Springer Verlag, 1997 (Zitiert auf Seite 21)
- [Wut12] WUTTKE, F.: *Robuste Auslegung von Mehrkörpersystemen - Frühzeitige Robustheitsoptimierung von Fahrzeugmodulen im Kontext modulbasierter Entwicklungsprozesse,* Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2012 (Zitiert auf den Seiten 45 und 51)
- [WW00] WU, Y.; WU, A.: *Taguchi Methods for Robust Design.* New Jersey : ASME Press, 2000 (Zitiert auf Seite 26)
- [WW01] WEDMAN, S.; WALLASCHEK, J.: Condition Monitoring in mechatronischen Systemen am Beispiel des Lebensdauerbeobachters / Universität Paderborn. VDI; 1999, 2001. – Forschungsbericht (Zitiert auf Seite 208)
- [XC08] XIAO, R.; CHENG, X.: An analytic approach to the relationship of axiomatic design and robust design. In: *International Journal of Materials and Product Technology* (2008) (Zitiert auf Seite 89)
- [Yan94] YANG, K.: *Robust Design and Reliability Engineering - An integrated approach.* Detroit, Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Wayne University, Diss., 1994 (Zitiert auf Seite 132)
- [Yan05] YAN, W.: Designing a Reliability Test Plan Using Customer Usage and Bench Life Test Data. In: *Reliability and Maintainability Symposium*, 2005 (Zitiert auf Seite 226)
- [Yan07] YANG, G.: *Life cycle reliability engineering.* John Wiley & Sons, Inc., 2007 (Zitiert auf den Seiten 40, 55, 62, 63, 69, 70, 91, 141, 142 und 219)
- [Ye98] YE, K.Q.: *Orthogonal column Latin hypercubes and their application in computer experiments.* S.1430-1439 : Journal of the American Statistical Association 93, 1998 (Zitiert auf Seite 159)
- [YEH03] YANG, K.; EL-HAIK, B. S.: *Design for Six Sigma: A Road for Product Development.* McGraw-Hill Book Company, 2003 (Zitiert auf den Seiten 44 und 45)
- [Zad65] ZADEH, L. A.: Fuzzy Sets. In: *Department of Electrical Engineering and Electronic Research Laboratory* (1965) (Zitiert auf den Seiten 14, 15 und 29)

-
- [Zim86] ZIMMERMANN, H. J.: *Fuzzy Set Theory - and Its Applications*. Bd. 2. Kluwer-Nijhof, 1986 (Zitiert auf den Seiten [14](#), [18](#) und [29](#))
- [ZT67] ZIENKIEWICZ, O. C. ; TAYLOR, R. L.: *The Finite Element Method*. McGraw-Hill Book Company, 1967 (Zitiert auf den Seiten [30](#) und [31](#))

Eigene Veröffentlichungen

- [1] M. Stohrer, S. Kemmler, O. Koller, P. Zeiler, B. Bertsche. Zuverlässigkeitsorientierte Online-Optimierung von Betriebsstrategien mechatronischer Produkte. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP)*, Stuttgart, Juni 2013.
- [2] S. Kemmler, O. Koller, B. Bertsche. ERA – Energiebasierte Zuverlässigkeitsanalyse. *Konstruktion*, Jahrgang 66(7):68 – 74, Juli 2014.
- [3] S. Kemmler und B. Bertsche. Systematic Method for Axiomatic Robustness-Testing (SMART). In *Proceedings of the International Symposium on Robust Design*, pages 101–112, Copenhagen, August 2014.
- [4] S. Kemmler und B. Bertsche. Gestaltung robuster und zuverlässiger Produkte nach der SMART-Methode. In *Proceedings of the 25th Symposium on Design for X*, pages 169–180, Bamberg, October 2014. (Zitiert auf Seite [62](#))
- [5] S. Kemmler, M. Dazer, T. Leopold, B. Bertsche. Method for the development of a functional adaptive simulation model for designing robust products. In *11th Weimar Optimization and Stochastic Days*, Weimar, November 2014. (Zitiert auf den Seiten [114](#) und [152](#))
- [6] S. Kemmler und B. Bertsche. Schwachstellen im Fokus - Analyse kritischer Systemstellen. *Qualität und Zuverlässigkeit*, Jahrgang 59(12):26 – 27, Dezember 2014.
- [7] S. Kemmler, T. Leopold, J. Fricke, B. Bertsche. Robust Design method for the development of commercial vehicle braking systems. In *EuroBrake*, Dresden, May 2015.
- [8] S. Kemmler, T. Eiffer, B. Bertsche, T.-J. Howard. Robust reliability or reliable robustness? – Integrated consideration of robustness- and reliability-aspect. In *27. Tagung Technische Zuverlässigkeit*, pages 87 – 97, Leonberg, May 2015. (Zitiert auf den Seiten [61](#), [63](#), [64](#) und [78](#))
- [9] O. Koller, S. Kemmler, B. Bertsche. Kluge Teilchen – Zuverlässigkeit im Betrieb aktiv gestalten. *Qualität und Zuverlässigkeit*, Jahrgang 60(08):34 – 38, August 2015.
- [10] S. Kemmler, A. Fuchs, T. Leopold, B. Bertsche. Systematisches Toleranz Design unter Berücksichtigung von Funktions- und Kostenaspekten nach der robusten Zuverlässigkeitsmethode SMAR²T. In *Proceedings of the 26th Symposium on Design for X*, pages 209–220, München, Oktober 2015. (Zitiert auf Seite [130](#))
- [11] S. Kemmler, A. Fuchs, T. Leopold, B. Bertsche. Comparison of Taguchi Method and Robust Design Optimization (RDO). In *12th Weimar Optimization and Stochastic Days*, Weimar, November 2015. (Zitiert auf den Seiten [146](#), [152](#) und [217](#))
- [12] D. Dazer, S. Kemmler, T. Leopold, J. Fricke, B. Bertsche. Stochastic simulation approach for realistic lifetime forecast and assurance of commercial vehicle braking systems. In *12th Weimar Optimization and Stochastic Days*, Weimar, November 2015. (Zitiert auf den Seiten [65](#), [81](#), [120](#) und [122](#))
- [13] D. Dazer, M. Stohrer, S. Kemmler, B. Bertsche. Planning of reliability life tests within the accuracy, time and cost triangle. In *Accelerated Stress Testing and Reliability Conference*, Florida, September 2016. (Zitiert auf den Seiten [58](#), [140](#), [141](#), [142](#), [152](#), [169](#) und [225](#))
- [14] S. Kemmler und B. Bertsche. Benefits of a robust, reliable quantification of uncertainties for product development. *International Symposium for Reliability Engineering*, Daejeon, Korea, Oktober 2016. (Zitiert auf Seite [122](#))

-
- [15] S. Kemmler und B. Bertsche. Robuste Zuverlässigkeit (R^2) - Vorteile einer robusten und zuverlässigen Quantifizierung von Unschärfen. *DVM - Zuverlässigkeit und Probabilistik*, München, November 2016.
- [16] S. Kemmler, D. Dazer, B. Bertsche. Lebensdaueranalyse auf Basis von multidimensionaler Zuverlässigkeits- und Robust Design Simulation - Integrale Betrachtung der Robusten Zuverlässigkeit. In *28. Tagung Technische Zuverlässigkeit*, pages 97 – 108, Leonberg, Mai 2017. (Zitiert auf den Seiten [123](#), [152](#), [163](#) und [168](#))
- [17] S. Kemmler, T. Eifler, B. Bertsche. ROBUST RELIABILITY (R^2) - Methodology for an integrated consideration of robustness and reliability in mechanical design. *International Journal of Reliability and Safety*, in print, 2018. (Zitiert auf den Seiten [61](#) und [71](#))
- [18] M. Henss, S. Kemmler, A. Kremer, B. Bertsche. Moving Least Squares Regression for noisy Time-Series: An Approach for Customised Weight Parameters. *Forschung im Ingenieurwesen*, in print, 2018. (Zitiert auf den Seiten [33](#) und [149](#))

Betreute studentische Arbeiten

2017:

- Cuiliang Feng Robustheit und Stabilität eines Sandwichbodenmoduls im Crash-Gesamtfahrzeugmodell
Masterarbeit, Daimler AG - Ulm
- Henriette Ortwein Robuste Testplanung und Zuverlässigkeitsnachweis von Komponenten eines Bremssystems für Nutzfahrzeuge
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Chuanpeng Xiong Weiterentwicklung der Robusten Zuverlässigkeit sowie deren Absicherung
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Hao Wu Effizientes Postprocessing zur Bewertung von technischen Produkten
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Fan Mo Entwicklung einer allgemeingültigen Modellierung des R^2 -Modells innerhalb der $SMAR^2T$ -Methodik
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Ying Li Konzeption und Ausarbeitung eines Hauptfachversuchs für robuste Zuverlässigkeitstechnik
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Zhenyuan Sun Automatisierte Planung, Durchführung und Auswertung von statistischen Versuchen in $SMAR^2T$
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart

2016:

- Lili Wang Parametrische strukturmechanische Untersuchung von Freilaufvarianten einer Nachstelleinheit für Bremssysteme
Diplomarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Lin Zhong Adaptive Entwicklung und Integration einer allgemeinen Vorgehensweise zur Optimierung einer Nachstelleinheit nach $SMAR^2T$
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Yilu Ni Funktionsbasierte Lebensdaueruntersuchung mittels Degradations-Merkmalen am Beispiel einer Überlastkupplung nach dem R^2 -Modell
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Wei Tu META-Modellierung von Komponenten einer Nachstelleinheit für Bremssysteme für Nutzfahrzeuge
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Cuiliang Feng Aleatorische und Epistemische Betrachtungsweisen in Robust Design
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

- Julian Nestel Umfassende zeitliche Grundlagenbetrachtung der Robust Reliability Theorie
Bachelorarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Michael Lang Entwicklung einer umfassenden Konstruktionsrichtlinie zur zielgerichteten Parameterstudie unter Berücksichtigung eines bestehenden Product-Lifecycle-Management
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Alexander Idrisov Durchführung des Toleranz Designs und Erweiterung der Robust Testing Phase in $SMAR^2T$
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Stefan Reck META-Modellierung eines Bremssystems für Nutzfahrzeuge
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Hao Wu Entwicklung und Verifizierung einer parametrischen Postprocessing-Methode zur Bewertung von technischen Produkten
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Milan Nedeljković Robuste Zuverlässigkeitsbewertung von Konzepten im System Design einer Nachstelleinheit für Nutzfahrzeuggremssystemen
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Sergej Walker Zustandsüberwachung von prozessrelevanten Kenngrößen und Ermittlung der Wirkzusammenhänge beim Außenschleifen
Masterarbeit, Robert Bosch GmbH - Fellbach
- 2015:**
- Toni Müller Prüfstreckenabhängige Anregungsspektren im Fahrwerk
Masterarbeit, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG - Weissach
- Alexander Fuchs Konzept zur Bestimmung von Toleranzfelder eines robusten und zuverlässigen Designs für Bremssysteme
Masterarbeit, Knorr-Bremse Sfn GmbH - München
- Zeyi Wang Robustheitsoptimierung von Komponenten einer Nachstelleinheit für Bremssysteme nach Aspekten der Robust Design – Methode SMART
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Guo Zheng Zuverlässigkeitsbasierter Regressionsschätzer zur Identifikation von sensitiven Parameter eines Bremssystems für Nutzfahrzeuge
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Julian Palenga Einsatz von Zuverlässigkeitsmethoden bei der Entwicklung von robusten Bremssystemen für Nutzfahrzeuge
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart
- Sergej Walker Zuverlässigkeitsbasiertes Konzept zur Entwicklung robuster Produkte und Prozesse
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Jens Rheinländer Modellierung und dynamische Simulation einer Nachstelleinheit von Nutzfahrzeugsbremssystemen
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Marco Sommer Prüfstandssimulation für eine Nachstelleinheit von Nutzfahrzeugsbremssystemen unter Berücksichtigung externer Einflüsse
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart

2014:

Philippe Wolters Konstruktion einer Vorrichtung zur Gewährleistung der Betriebssicherheit an einem Hydropulsprüfstand
Bachelorarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Markus Haberkern Konstruktive Funktionsoptimierung eines Hydropulserprüfstandes für Komponenten eines PKW-Starters
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Adam Krist Bewertung eines Leichtbaukonzepts für lichttechnische Komponenten mit Methoden der Zuverlässigkeitstechnik
Diplomarbeit, BMW Group - München

Lukas Coulon Konzept einer zuverlässigkeitsbasierten Methode zur Gestaltung robuster Produkte
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Martin Dazer Robust Design Untersuchungen einer Nachstelleinheit für Bremssysteme
Masterarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Tino Hager Ganzheitliche Betrachtung der energiebasierten Zuverlässigkeitsanalyse (ERA) anhand eines Bremssystems für Nutzfahrzeuge
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Johannes Schäfer Robust Design - Einordnung und Vergleich vorhandener Methoden
Bachelorarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Tang Xiao Konzept zur virtuellen Lebensdauerermittlung von Bremssystemen für Nutzfahrzeuge
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Dominik Herre Gestaltung eines robusten Designs an einem technischen Anwendungsbeispiel mit der SMART-Methode
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Henriette Ortwein Konzept zur zuverlässigkeitsbasierten Erprobung von technischen Anwendungen in der frühen Phase der Produktentwicklung auf Basis der SMART und VLE - Methode
Bachelorarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Steffen Freund Zuverlässigkeitsorientiertes Konzept zur virtuellen Lebensdauerermittlung eines Bremssattels für Nutzfahrzeuge
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Vishnu Nagarajan Concept for a Simulative Robustness Analysis of a Slack adjuster for commercial vehicle braking system
Masterarbeit, Knorr-Bremse Sfn GmbH - München

2013:

Alexander Fuchs Konzept zur Zuverlässigkeitsanalyse von mechatronischen Systemen
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Mohamed Sammoud Konstruktion und Inbetriebnahme einer Hydropuls-Prüfein-richtung
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Sebastian Rehm Zuverlässigkeitsorientierte Optimierung von Start-Stopp-Vorgängen mit PKW-Startern
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Markus Müller Zuverlässigkeitsbewertung eines umformtechnisch hergestellten Kupplungslamellenträgers
Studienarbeit, IFU - Universität Stuttgart

Thimo Wagner Verifizierung der Vorgehensweise der energiebasierten Zuverlässigkeitsanalyse (ERA)
Bachelorarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Toni Müller Vorausschauende Betriebsstrategien unter Berücksichtigung von Zuverlässigkeitsaspekten in Automobilanwendungen
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Anna Winter Zuverlässigkeitsorientierte Definition eines Verschleißmaßes anhand von DoE-Degradation-Versuchen an einem Hydropulsprüfstand
Studienarbeit, IMA - Universität Stuttgart

Daniel Keilbach Sensitivitätsanalyse wichtiger Applikationsparameter eines Starters in Bezug auf mechanische Lastkollektive
Masterarbeit, Robert Bosch GmbH - Schwieberdingen

LEBENS LAUF

PERSÖNLICHES

Kemmler, Stefan

17.09.1983

geboren in Tübingen;

Familienstand: verheiratet, ein Kind.

AUSBILDUNG

1994 - 2003

Allgemeinbildendes Gymnasium in Tübingen

2004 - 2006

Industriemechaniker - Feinwerktechnik (Reutlinger Modell)

Stoll GmbH & Co. KG | Reutlingen

2004 - 2010

Studium: Allgemeiner Maschinenbau

Bachelor of Engineering | Hochschule Reutlingen

2010 - 2012

Studium: Maschinenwesen

Diplom Ingenieur | Universität Stuttgart

BERUFSWEG

2012 - 2017

Akademischer Mitarbeiter

Institut für Maschinenelemente (IMA) | Universität Stuttgart

seit 01.05.2017

Berechnungsingenieur

Knorr-Bremse SfN GmbH | München

Anhang

A Tabellen

Tabelle A.1: Modellübersicht zur Klassierung von Unsicherheiten

Modell zur Unsicherheitsklassierung in ...			
... Wirtschaft	[Thu05]	... Konstruktion	[Thu05]
... Politik und Risikoanalyse	[MH90]	... Maschinenbau	[OA93]
... Physikwissenschaft	[MH90]	... Projektplanung	[KF88]
... Luft- & Raumfahrt		[DeL98], [DM00] und [Wal02]	
... Modellierung & Simulation		[ODR ⁺ 99], [OHS01] und [DC00]	
... Bauingenieurwesen und Umweltechnik		[AC98] und [Mel99]	

Tabelle A.2: Chronologische Übersicht der Begriffsdefinition *Zuverlässigkeit*

Jahr	Herausgeber	Bemerkung
1972	VDI 4004-2	Zuverlässigkeitskenngrößen; Überlebenskenngrößen
1977	Messerschmitt	Technische Zuverlässigkeit
1977	VDI 4001-1	Allgemeine Hinweise zum VDI-Handbuch Technische Zuverlässigkeit
1982	VDI 4001-2	Termologie der Zuverlässigkeit
1985	Birolini	Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme
1988	DIN 40041	Zuverlässigkeit Begriffe
1989	Bertsche	Zur Berechnung der System-Zuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
1990	O'Connor	Zuverlässigkeitstechnik
1990	IEC 60050-191	International Electrotechnical Vocabulary - Part 191: Dependability
1990	Bertsche und Lechner	Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau
1993	Pfeife	Qualitätsmanagement (Strategien, Methoden, Techniken)
1993	Vaidya	Fault-Tolerant Design Strategies for High Reliability and Safety
1993	VDI 3542-4	Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme Zuverlässigkeit und Sicherheit komplexer Systeme (Begriffe)
1993	IEC 60300-1	Dependability management - Part 1: Dependability management systems

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Jahr	Herausgeber	Bemerkung
1994	Masing	Handbuch Qualitätsmanagement
1994	Biolini	Reliability Engineering
1995	IEC 60300-2	Dependability management - Part 2: Guidance for dependability programme management
1995	IEV Kapitel 191	Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Kapitel 191: Zuverlässigkeit und Dienstgüte
1995	Timischl	Qualitätssicherung
1996	DIN 60300-2	Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 2: Leitfaden zum Zuverlässigkeitsmanagement
1996	Hering	Qualitätsmanagement für Ingenieure
1997	Biolini	Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen
1998	DIN EN ISO 9000	Qualitätsmanagementsysteme- Grundlagen und Begriffe
1998	DIN EN 13306	Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung
1999	Steinhorst	Sicherheitstechnische Systeme
1999	VDI 4006-1	Menschliche Zuverlässigkeit- Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung
1999	Rötsch	Zuverlässigkeit von Rohrleitungssystemen
2000	VDA Band 3.1	Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten: Teil 1: Zuverlässigkeitsmanagement
2000	VDA Band 3.2	Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie: Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten: Teil 2: Zuverlässigkeits-Methoden und -Hilfsmittel
2001	Wedman	Condition Monitoring in mechatronischen Systemen am Beispiel des Lebensdauerbeobachters
2001	Grams	Grundlagen des Qualitäts- und Risikomanagements
2001	DGQ	Band 17-01: Zuverlässigkeit komplexer Systeme aus Hardware und Software
2002	Heise	Praxisbuch Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit
2002	Meyna	Zuverlässigkeitstechnik
2002	Hochheimer	Das kleine QM-Lexikon
2003	Eigler	Die Zuverlässigkeit von Elektronik- und Mikrosystemen
2004	DIN EN 60300-1	Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 1: Leitfaden für Management und Anwendung
2004	VDI 4003	Zuverlässigkeitsmanagement

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Jahr	Herausgeber	Bemerkung
2005	Westkämper	Einführung in die Organisation der Produktion
2007	DIN EN 61025	Fehlzustandsbaumanalyse
2008	Sander	Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen
2009	DIN EN ISO 12100	Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung
2009	Robert Bosch GmbH	Wie machen wir unsere Produkte zuverlässig?
2010	VDI 4002-2	Zuverlässigkeitsingenieur/Zuverlässigkeitsingenieurin- Anforderungen an die Qualifizierung
2011	Werdich	FMEA- Einführung und Moderation
2011	VDI 4007	Zuverlässigkeitsziele- Ermittlung, Überprüfung, Festlegung, Nachweis
2012	Kamiske	Handbuch QM-Methoden
2015	IEV Kapitel 192	Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 192: Zuverlässigkeit
2015	IEC 60050-192	International electrotechnical vocabulary - Part 192: Dependability

Tabelle A.3: Definition *reliability, maintainability, availability* nach IEC 60050-191

Begriff	Definition
availability	„ability to be in a state to perform as required, under given conditions, at a given instant, or over a given time interval.“
dependability	„ability to perform as and when required“
maintainability	„ability to be retained in, or restored to a state in which it can perform as required, under given conditions of use and maintenance“
reliability	„ability to perform as required under given conditions for a given time interval“

Tabelle A.4: Definitionen der *Zuverlässigkeit* nach DIN

Richtlinie	Definition(en)
DIN EN ISO 9000 [DIN00]	„Fähigkeit zur Ausführung in der geforderten Art und zum geforderten Zeitpunkt“

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Richtlinie	Definition(en)
DIN EN ISO 12100 [DIN11]	„Fähigkeit einer Maschine oder von deren Teilen oder Ausrüstung, eine geforderte Funktion unter festgelegten Bedingungen und für einen vorgegebenen Zeitraum ohne Ausfall zu erfüllen.“
DIN EN 13306 [DIN15a]	„Fähigkeit einer Einheit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für eine gegebene Zeitspanne zu erfüllen.“
DIN 40041 [DIN90]	„Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsanforderungen zu erfüllen.“ „Teil der Qualität im Hinblick auf das Verhalten der Einheit während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen.“
DIN EN 60300-1 [DIN15b]	„Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Einheit, sich bei und nach Aufforderungen wie gefordert zu verhalten. Zuverlässigkeit ist ein Begriff zur Beschreibung der zeitabhängigen Merkmale einer Einheit in Verbindung mit deren leistungsbezogenen Merkmalen. Zuverlässigkeit umfasst Merkmale wie die Verfügbarkeit, Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Unterstützbarkeit unter gegebenen Nutzungs- und Instandhaltungsbereitschaftsbedingungen. Zuverlässigkeit beschreibt das Maß, zu dem man Vertrauen in eine Sache haben kann, sich wie erwartet zu verhalten.“ „Fähigkeit zu funktionieren, wie und wann gefordert.“ „Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Einheit, sich bei und nach Aufforderungen wie gefordert zu verhalten. Zuverlässigkeit ist somit die Fähigkeit, die Anforderungen und Erwartungen an eine Einheit durchgängig zu erfüllen. Zuverlässigkeit schafft Werte, indem die Einheit ihre Leistungsfähigkeit bewahrt, wie gewünscht funktioniert und die Kundenbedürfnisse und Erwartungen zufriedenstellt.“
DIN EN 60300-2 [DIN04]	„Zuverlässigkeit steht für die Verfügbarkeit eines Produktes. Die Verfügbarkeit ergibt sich aus der Funktionsfähigkeit, der Instandhaltbarkeit und der Instandhaltungsbereitschaft. Zuverlässigkeit ist eine technische Disziplin, die geplant und gelenkt werden muss, damit Ziele und Nutzen der Zuverlässigkeit erreicht werden können.“ „Zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft.“
DIN EN 61025 [DIN07a]	„Funktionsfähigkeit und Verfügbarkeit“

Tabelle A.5: Zuverlässigkeits-Definitionen der freien Literatur

Autor	Definition(en)
Bertsche [Ber89]	„Die Zuverlässigkeit eines Produktes beschreibt seine Eigenschaft, während einer definierten Zeitdauer unter gegebene Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht auszufallen. Die Zuverlässigkeit erfaßt damit das Ausfallverhalten einer Produktes und ist deshalb, neben den Funktionseigenschaften, ein wichtiges Kriterium für die Produkt-Beurteilung.“
Bertsche [BL04]	„Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt“
Birolini [Bir97]	„Die Zuverlässigkeit ist die Eigenschaft einer Betrachtungseinheit, funktions-tüchtig zu bleiben. Sie wird mit R bezeichnet und durch die Wahrscheinlichkeit ausgedrückt, dass die geforderte Funktion unter vorgegebenen Arbeitsbedingungen während einer festgelegten Zeitdauer T ausfallfrei ausgeführt wird.“
Birolini [Bir14]	„Ability of the item to perform its required function under given conditions at a stated instant of time“ „Dependability is used generally in a qualitative sense to describe the ability to perform the required function under stated conditions at a given instant or for a given time interval, including thus its influencing factors like reliability, maintainability, and logistic support.“
Birolini [Bir88]	„Die Zuverlässigkeit ist ein Maß für die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, funkti-onstüchtig zu bleiben. Sie wird mit R bezeichnet und durch die Wahrscheinlichkeit ausgedrückt, dass die geforderte Funktion unter vorgegebenen Arbeitsbedingungen während einer festgelegten Zeitdauer T ausfallfrei bleibt.“
DGQ Band 17-01 [DGQ98]	„Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, denjenigen durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen zu genügen, die an das Ver-halten ihrer Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer unter festgelegten Bedingungen gestellt werden.“
Eigler [Eig03]	„Das bedeutet eine bestimmte Zeit aller Wahrscheinlichkeit nach in Übereinstimmung mit den zu Beginn vorhandenen technischen Kenndaten innerhalb der zulässigen Toleranzen zu funktionieren. Diese unikale Eigenschaft ist die Zuverlässigkeit.“
Grams [Gra01]	„Grad des Vertrauen, das aufgrund geringer Versagenswahrscheinlichkeiten oder geringer Ausfall- bzw. Versagensrate gerechtfertigt erscheint.“ „Fähigkeit eines Systems, für eine gegebene Zeit korrekt zu arbeiten. Dabei wird vorausgesetzt, dass das System zu Anwendungsbeginn korrekt ist und nur Ausfä-le zur Unkorrektheit führen können. Kenngrößen: Zuverlässigkeitsfunktion und daraus abgeleitete.“

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Autor	Definition(en)
Heise [Hei02]	„Zuverlässigkeit R beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Maschine oder Einrichtung kontinuierlich, ohne Ausfall, für einen definierten Zeitraum unter festgelegten Bedingungen funktioniert. Eine verbesserte R bedeutet weniger Ausfälle der Produktionseinrichtung und damit weniger Stillstandzeit und Produktionsverluste.“
Hering [HTB98]	„Die Systemzuverlässigkeit kann als Eintrittswahrscheinlichkeit für das unerwünschte Ereignis definiert werden.“
Hochheimer [Hoc02]	„Die Zuverlässigkeit als zeitraumbezogene Betrachtung von Qualität und kann ausgedrückt werden als die Wahrscheinlichkeit, dass eine Einheit unter festgelegten Bedingungen währen einer bestimmten Zeitdauer funktionsfähig bleibt.“ „Die Fähigkeit einer betrachteten Einheit (z.B. Bauelemente, Baugruppe, Gerät, Anlage oder System) innerhalb der vorgegebenen Grenzen den durch den Verwendungszweck bestimmten Anforderungen zu genügen.“ „Die Zuverlässigkeit ist ein von der Zeit abhängiges Qualitätsmerkmal, ihre wichtigsten Kenngrößen sind die Lebensdauer, Ausfallbestand, Ausfallrate, Überlebens- und Ausfallwahrscheinlichkeit.“
Kamiske [Kam13]	„Erfüllung der Anforderung über die Zeit.“
Messerschmitt [MBBBG ⁺ 71]	„Die Zuverlässigkeit ist eine Sacheigenschaft, die durch eine statistisch zu messende Größe aufgrund beobachteter Ausfallhäufigkeiten empirisch oder mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung abgeschätzt werden kann.“
Meyna [MP10]	„Zuverlässigkeit ist Qualität auf Zeit.“
O'Connor [O'C90]	„Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Produkt eine geforderte Funktion erfüllt, ohne unter bestimmten Bedingungen über einen bestimmten Zeitraum zu versagen.“
Pfeifer [Pfe01]	„Zuverlässigkeit reflektiert die Wahrscheinlichkeit, nach der ein Produkt innerhalb einer bestimmten Zeitspanne versagt. Charakteristische Größe ist hier die Zeitspanne zwischen dem Auftreten zweier unerwünschter Ereignisse.“ „Ein Produkt gilt dann als zuverlässig, wenn es über seine Lebensdauer in möglichst wenig Ausfallzustände gelangt und dann als sicher, wenn von allen Funktionen und möglichen Ausfallzuständen keine Gefahr ausgeht.“
Pfeifer [PS07]	„Zuverlässigkeit wird verbunden mit Ausfallfreiheit im Betrieb, d.h. kein Versagen von Funktionen und Komponenten.“
Robert Bosch GmbH [Rob09]	„Zuverlässigkeit ist die Erzeugniseigenschaft, eine geforderte Funktion im vorgegebenen Betriebsbereich über eine festgelegte Gebrauchsdauer auszuführen.“

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Autor	Definition(en)
Rötsch [Rö99]	„Im Allgemeinen ist die Zuverlässigkeit definiert als die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, die beabsichtigte Funktion unter vorgegebenen Bedingungen für einen bestimmten Zeitraum zu erfüllen, die den vorgegebenen Betriebsarten und Bedingungen der Nutzung, der Instandhaltung, der Lagerung und des Transports entsprechen.“
Sander [San08]	„Aus sicherheitstechnischen Gründen muss ein Bauteil in jedem Fall zuverlässig sein, d.h. es darf während einer definierten Zeitdauer unter angegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfallen.“
Steinhorst [Ste12]	„Zuverlässigkeit ist ein System, solange es seine Funktion erfüllt.“
Timischl [Tim02]	„Wahrscheinlichkeit, dass eine Einheit während der Betriebsdauer t zuverlässig funktioniert, erwarteter Anteil, der t überlebt.“
Vaidya [VP93]	„Die Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das System korrekte Ausgaben bewirkt.“
Wedman [WW01]	„Redundanz in besonders sicherheitsrelevanten Funktionen“
Werdich [Wer11]	„Abwesenheit von Fehlern.“
Westkämper [Wes06]	„Zuverlässigkeit ist eine Beschreibung der Leistung eines Produktes, einer Dienstleistung oder eines Prozesses bezüglich Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren: Leistung bezüglich Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsunterstützung. Zuverlässigkeit ist einer der zeitbezogenen Aspekte der Qualität.“

Tabelle A.6: Zuverlässigkeits-Definitionen nach IEC

Richtlinie	Übereinstimmung	Definition
IEC 60050-191 [IEC07a]	IEV Kapitel 191 [IEV02]	IEC: „Ability of an item to perform as and when required“ IEV: „The collective term used to describe the availability performance and its influencing factors: reliability performance, maintainability performance and maintenance support performance.“
IEC 60050-192 [IEC15]	IEV Kapitel 192 [IEV15]	IEV: „Dependability includes availability, reliability, recoverability, maintainability, and maintenance support performance, and, in some cases, other characteristics such as durability, safety and security.“

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Richtlinie	Übereinstimmung	Definition
IEC 60300-1 [IEC03a]	DIN EN 60300-1 [DIN15b]	IEC: „Collective term used to describe the availability performance and its influencing factors: reliability performance, maintainability performance and maintenance support performance.“
IEC 60300-2 [IEC03b]	DIN EN 60300-2 [DIN04]	IEC: „Collective term used to describe the availability performance and its influencing factors: reliability performance, maintainability performance and maintenance support performance.“

Tabelle A.7: Zuverlässigkeits-Definitionen des VDA

Richtlinie	Definition(en)
VDA Band 3 Teil 1 [VDA00a]	„Ein Produkt gilt als zuverlässig, wenn es über seine Lebensdauer möglichst selten ausfällt“
VDA Band 3 Teil 2 [VDA00b]	„Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Ware, denjenigen durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen zu genügen, die an das Verhalten ihrer Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer unter festgelegten Bedingungen gestellt werden.“ „Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Erzeugnis unter gegebenen Betriebsbedingungen während einer bestimmten Zeit bestimmt Mindestwerte nicht unterschreitet.“

Tabelle A.8: Zuverlässigkeits-Definitionen des VDI

Richtlinie	Definition(en)
VDI 3542 [VDI00]	„Korrektheit auf Zeit“ „Fähigkeit eines Systems, für einen gegebene Zeit korrekt zu arbeiten. Dabei wird vorausgesetzt, dass das System zu Anwendungsbeginn korrekt ist und nur Ausfälle zur Unkorrektheit führen können.“ „Grad des Vertrauens, das aufgrund geringer Versagenswahrscheinlichkeit, großer Korrektheitswahrscheinlichkeit oder geringer Ausfall- bzw. Versagensrate gerechtfertigt erscheint.“

Fortsetzung auf nächster Seite . . .

Richtlinie	Definition(en)
VDI 4001 [VDI98] [VDI06]	<p>„Zuverlässigkeit ist ein Verhaltensmerkmal technischer Erzeugnisse, dessen Besonderheit darin liegt, daß dieser Art von Eigenschaftsmerkmalen stochastische Prozesse zugrunde liegen, deren Ergebnis nicht eindeutig vorhergesagt werden kann.“</p> <p>„Zusammenfassender Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft“</p>
VDI 4002 [VDI11]	„Fähigkeit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall zu erfüllen“
VDI 4003 [VDI04]	„Die Zuverlässigkeit wird in dieser Richtlinie als zusammenfassender Ausdruck für die Funktionszuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Sicherheit, Instandhaltbarkeit verwendet“
VDI 4004 [VDI72]	„Als Funktionszuverlässigkeit einer Einheit wird die Überlebenswahrscheinlichkeit gegenüber Ausfällen/Versagensereignissen bezeichnet, die eine/mehrere definierte Funktion/-en aufheben oder unzulässig beeinträchtigen“
VDI 4006 [VDI02]	<p>„Die Eignung von Systemen oder Teilsystemen, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsanforderungen zu erfüllen.“</p> <p>„Die Fähigkeit des Menschen, eine Aufgabe unter vorgegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall im Akzeptanzbereich durchzuführen.“</p>
VDI 4007 [VDI12]	<p>„Grad der Vermeidung unerwünschter Ereignisse“</p> <p>„Häufigkeit des Verlusts einer vorgesehenen Funktion“</p> <p>„Zeitlicher Anteil der Funktionserfüllung“</p>

Tabelle A.9: Übersicht der Methoden zur Bestimmung der *Zuverlässigkeit*

	Methode	Beschreibung	Quellen
qualitativ	FMEA	Die Fehlermöglichkeits- und -influssanalyse ist eine analytische Methode die bereits in der frühen Entwicklungs- und Planungsphase versucht, potentielle Fehler und deren Auswirkungen zu bewerten und damit das Risiko zu vermeiden bzw. zu vermindern.	[Wer11] [DIN15c]
	Checklisten	Anhand von vorgefertigten Listen, die eine Hand voll Fragen beinhaltet, werden der Reihe nach alle Punkte abgearbeitet und dadurch mögliches Risikopotential gesucht. Die Checkliste ist in Kategorien unterteilt.	[Bir97]
	Design Review	„Das Design Review ist eine formale und systematische Überprüfung eines Entwicklungsergebnisses zur Feststellung von Problemereichen und Unzulänglichkeiten“	[VDA00b]

Fortsetzung auf nächster Seite ...

	Methode	Beschreibung	Quellen
qualitativ	Ereignisablaufanalyse	Ein im System auftretendes Anfangsereignis (z.B. Komponentenausfall, Fehlbedienung) wird bis zu seinem möglichen Endzustand mit samt seinen Auswirkungen und Folgeereignissen untersucht und grafisch in Form von Verzweigungen dargestellt.	[IEC07b] [DIN85]
	Fehlerbaumanalyse (qualitativ)	Alle Verbindungen von Teilsystemausfällen, die letztendlich zu einem Gesamtsystemausfall führen, werden ermittelt und in einer baumstrukturähnlichen Darstellung logisch miteinander verknüpft. Die qualitative Methode dient zur Identifikation aller möglichen Ursachen des Ereignisses.	[DIN81] [DIN07a]
	ABC-Analyse	Alle Systemelemente werden nach Zuverlässigkeits- und Belastungskriterien in drei Klassen A,B oder C eingeordnet und anschließend nach Größe und Wichtigkeit geordnet und visualisiert.	[VDA00b] [Wer11]
quantitativ	Boole'sche Systemtheorie	Das Ausfallverhalten von Systemelementen kann durch sog. „Zuverlässigkeits-Schaltbilder“ graphisch dargestellt werden, wodurch die Auswirkung des Ausfalls eines einzelnen Elements auf das Gesamtsystem sichtbar wird.	[VDA00b] [DIN06]
	Monte-Carlo-Verfahren	Es wird eine endliche Anzahl von Eingangsgrößen zufällig generiert. Anhand von diesen Eingangsgrößen werden Ausgangsgrößen berechnet. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis eine zuverlässige Aussage über die Eigenschaften der Ausgangsgrößen möglich ist.	[VDI99]
	Markov-Theorie	Bei den Markoff-Verfahren wird ein Zustandsübergangsdiagramm verwendet, das eine bildhafte Darstellung des Zuverlässigkeitsverhaltens (Funktionsfähigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit) oder Sicherheitsverhaltens eines Systems ist; hieraus können die Leistungsgrößen des Systems berechnet werden. Mit dem Markoff-Verfahren kann das zeitliche Verhalten eines Systems modelliert werden.	[DIN07b]
	Weibullanalyse	Mit Hilfe von Weibull-Verteilungsfunktionen kann das Ausfallverhalten eines Systems analysiert werden.	[DIN09]
	Fehlerbaumanalyse (qualitativ)	Alle Verbindungen von Teilsystemausfällen, die letztendlich zu einem Gesamtsystemausfall führen, werden ermittelt und in einer baumstrukturähnlichen Darstellung logisch miteinander verknüpft. Die quantitative Methode dient zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit unerwünschter Ereignisse.	[DIN81] [DIN07a]

Tabelle A.10: Erweiterte Methodenübersicht zur Bestimmung der *Zuverlässigkeit*

Hazard-Analyse	Kepner-Tregoe-Methode	Funktionsblockdiagramm
Belastungsartenanalyse	Fischgrätendiagramm	<i>MDE/BDE</i>
Zuverlässigkeits-Analyse	Verfügbarkeitsanalyse	Paretoanalyse
Zuverlässigkeitsprognose	Bauteilblockdiagramm	Funktionsblockdiagramm
Belastungsartenanalyse	Fischgrätendiagramm	Design Review
<i>HAZOP</i>	Wechselwirkungsanalyse	Erneuerungstheorie

Tabelle A.11: Chronologische Übersicht zur Begriffsdefinition der *Robustheit*

Jahr	Herausgeber	Bemerkung
1986	Taguchi	Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes
1989	Phadke	Quality Engineering using Robust Design
1990	Bosch	Qualitätssicherung der Bosch-Gruppe Nr. 1-12
1992	Tsui	An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design
1993	VDI 3542-4	Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme Zuverlässigkeit und Sicherheit komplexer Systeme (Begriffe)
1993	VDI-GIS	Software-Zuverlässigkeit- Grundlagen, konstruktive Maßnahmen, Nachweisverfahren
1995	Fowlkes	Engineering Methods for Robust Product Design
1996	Chen	A Procedure for Robust Design: Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors
2000	Taguchi	Robust Engineering
2000	Abraham	Variation Reduction and Robust Designs
2000	Hu	Enhancing Robust Design with the Aid of TRIZ and Axiomatic Design (Part I)
2000	Mohsen	Thopughts ion the use of Axiomatic Design wiwith the product development process
2000	Reuter	Achieving design targets through stochastic simulation
2000	Du	A most probable point based method for uncertainty analysis

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Jahr	Herausgeber	Bemerkung
2001	Suh	Axiomatic Design: Advances and Applications
2001	Buyske	Robust Design and Taguchi Methods
2003	Melvin	Axiomatic System Design: Chemical Mechanical Polishing Machine Case Study
2003	Will	Robustheitsbewertung in der stochastischen Strukturmechanik
2004	Stelling	Robustness of Cellular Functions
2005	El-Haik	Axiomatic Quality
2006	Pham	Springer Handbook of Engineering Statistics
2006	ISO 26262-1	Road vehicles- Functional safety- Part 1: Vocabulary
2006	Fritzsche	Erstellung von Parameter-Diagrammen in der Automobilindustrie: Richtlinien, Kriterien und Anwendungsbeispiele
2007	Arvidsson	Principles of Robust Design Methodology
2007	Arvidsson	An operationalization of Robust Design Methodology
2007	Park	Analytic Methods for Design Practice
2007	Box	Quality Quandaries- Is your Robust Design Procedure Robust?
2007	Goh	The Role of Statistical Design of Experiments in Six Sigma: Perspectives of a Practitioner
2007	Yang	Life cycle reliability engineering
2008	Hasenkamp	A review of practices for Robust Design Methodology
2008	Kolmer	Robust Design- Robustheitsmaße
2009	Hasenkamp	Designing for Robustness
2009	Bergman	Robust Design Methodology for Reliability
2009	Waldherr	Uncertainty and robustness analysis of biochemical reaction networks via convex optimisation and robust control theory
2010	Stockinger	Computer Aided Robust Design- Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtuelle Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements
2010	Bosch	Robust Design als Design for Six Sigma Baustein bei der Robert Bosch GmbH
2010	Gerhorst	Application of Monte-Carlo-Simulation and Most Probable Limit State on Gasoline DI Combustion System Optimization
2011	Greymr	Practices of robust design methodology in practice
2011	Werdich	FMEA- Einführung und Moderation
2012	Johannesson	A Robustness Approach to Reliability

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Jahr	Herausgeber	Bemerkung
2012	Kamiske	Handbuch QM-Methoden: Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen
2012	O'Connor	Practical Reliability Engineering
2013	Eifler	A classification of the industrial relevance of Robust Design Methods
2013	Wiebel	Modellierung von Unsicherheit in der Produktentwicklung
2014	Hu	Robustness Thinking in Design for Reliability
2014	Tsu	A critical look at Taguchi's modelling approach for robust design
2015	Kemmler	Comparison of Taguchi Method and Robust Design Optimization (RDO)

Tabelle A.12: Robustheits-Definitionen der freien Literatur

Autor	Definition(en)
Abraham [AB00]	„This is a special experimental arrangement in which the opportunity is provided to find controllable factors which can be used to reduce variation induced by the noise factors.“
Arvidsson [AG07]	„Robust Design Methodology means systematic efforts to achieve insensitivity to noise factors. These efforts are based on an awareness of variation and are applicable in all stages of product design.“ „Through this review four central principles of robust design are identified: awareness of variation, insensitivity to noise factors, application of various methods, and application in all stages of a design process.“
Arvidsson [AGH07]	„We characterize Robust Design Methodology by three principles: awareness of variation, insensitivity to noise factors, and continuous applicability.“ „Robust design...has been developed to improve the quality and reliability of the product in engineering.“
Bergman [BdLS09]	„Robust Design Methodology is a systematic search for design solutions insensitive to variation in usage, manufacturing and deterioration of products as well as to varying system environments.“ „Robust Design Methodology means systematic efforts to achieve insensitivity to noise factors. These efforts are founded on an awareness of variation and can be applied in all stages of product design.“
Bosch [Rob10]	„Robust Design ist, wenn ein Produkt/Prozess eine gleichmäßig hohe Qualität liefert, trotz bestehender Abweichungen und Streuungen.“
Bosch [Rob90]	„Robustheit = Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, auch bei Verletzung der spezifizierten Randbedingungen vereinbarte Funktion zu erfüllen bzw. ihre Funktionsfähigkeit zu erhalten“

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Autor	Definition(en)
Box [BF07]	„...minimizing sensitivity by appropriate choice specifications“ „Robustness means insensivity to variation.“
Buyse [BT01]	„Robust Design is a technique that reduces variation in a product by reducing the sensitivity of the design of the product to sources of variation rather than by controlling their sources.“ „The end result is a robust design, a design that has minimum sensitivity to variations in uncontrollable factors.[Woher stammt diese Definition?]“
Chen [CATM96]	„The fundamental principle in robust design is to improve the quality of a product by minimizing the effects of variation without eliminating these causes.“
Du [DC00]	„if the system output is considered as the constraint“
Eifler [EEH13]	„Initially RDM was centered on the concept of quantifying the societal loss due to variation in functional performance and on the use of experimental analysis to select values of design parameters, such that the resulting design became insensitive to changes in the design parameters.“
El-Haik [EH05]	„Robustness means that a design solution entity delivers its intended functional requirements under all operating conditions (different causes of variation) throughout its intended life.“
Fowlkes [FC95]	„Robust Design is a disciplined engineering process that seeks to find the best expression of a product design. "Best" is carefully defined to mean that the design is the lowest-cost solution to the product design specification, which is based on the customer needs.“
Fritzsche [Fri06]	„Unter Robustheit ist die Differenz zwischen der Belastung auf das Produkt und die Belastbarkeit zu verstehen. Einfach ausgedrückt kann die Robustheit auch als Abstand zur Fehlermöglichkeit beschrieben werden.“
Gerhorst [GW10]	„The main aspect of the optimization process to be discussed here will be stratified part load robustness which means misfire-free and smooth operation with a low level of cyclic fluctuations.“
Goh [Goh07]	„Robust design succeeded in expanding the horizon of industrial experimentation in two significant ways: 1. The application of design of experiments takes place much earlier, from the fine-tuning of existing physical systems to the optimization of new products or processes at their design stage: This would avoid costly changes due to quality problems that are realized after production is already in full swing. 2. By way of including, usually by simulation, potential noise factors in the experiments, designs can be suitably adjusted beforehand to counteract the impact of anticipated noise both during manufacturing and throughout the product life: this extends the contribution of design of experiments from a static quality focus to the realm of reliability engineering.“

Autor	Definition(en)
Gremyr [GH11]	<p>„methodology for gaining time, reducing costs and winning quality“</p> <p>„a means to achieve insensitivity to variation and that further facilitates the listing of important factors in early phases of product development.“</p> <p>„... to deliver customer expectations at a profitable cost, regardless of: customer usage, manufacturing variation, supplier variation, distribution, delivery and installation variation and degradation over product life.“</p> <p>„To the company, RDM means delivering customer expectations at a profitable cost, regardless of customer usage, manufacturing variation, supplier variation, distribution, delivery and installation variation and degradation over the product's life.“</p>
Hasenkamp [Has09]	<p>„The basic techniques and tools to be used for this during late stages of the development process are since quite long well known and its systematic usage is often called Robust Design Methodology or, in Japan, Quality Engineering.“</p> <p>„Here, a robust design constitutes a product that performs on target despite presence of noise factors, and consequently Robust Design Methodology (RDM) could be defined as a methodology for designing products in a way that makes their performance insensitive to noise factors.“</p> <p>„RDM can be described as a means of designing products in a way that makes their performance insensitive to noise factors.“</p>
Hasenkamp [HAG08]	<p>„Robust design methodology (RDM) comprises systematic efforts to achieve insensitivity of products or processes to sources of unwanted variation.“</p>
Hu [HYT00]	<p>„Within a given structure or design, how an engineered system can be optimized to desensitize the side effects of uncontrollable conditions.“</p>
Hu [Hu14]	<p>„Robust design, also known as Taguchi parameter design, can be used to achieve robust reliability; that is, to make a product's reliability insensitive to uncontrollable user environments.“</p> <p>„The ability to transform input to output as closely to ideal function as possible in the presence of uncontrollable user environment.“</p>
ISO 26262-1 [ISO11]	<p>„design that has the ability to function correctly in the presence of invalid inputs or stressful environmental conditions.“</p> <p>„for software, robustness is the ability to respond to abnormal inputs and conditions“</p> <p>„for hardware, robustness is the ability to be immune to environmental stress and stable over the service life within design limits“</p> <p>„in the context of ISO 26262, robustness is the ability to provide safe behaviour at boundaries“</p>
Johannesson [JBS+12]	<p>„Making the design insensitive to unavoidable variation is called robust design and is handled by (i) identification and classification of variation, (ii) design of experiments to find robust solutions, and (iii) statistically based estimations of proper safety margins.“</p>

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Autor	Definition(en)
Kamiske [Kam13]	„Ein Produkt ist robust, wenn die gewünschte Funktionalität und Performance des Produkts unabhängig von der Variation der Rohmaterialien, der Streuung des Herstellungsprozesses und den unterschiedlichen Betriebsbedingungen des Produkts ist.“ „Robustheit ist die Fähigkeit eines Produkts/Systems, seine Funktion auch bei Schwankungen der Umgebungsbedingungen aufrechtzuerhalten“
Kemmler [11]	„One approach to designing such products is the Robust Design Method (RDM), whose aim is to create products insensitive to uncontrollable variations (noise factors).“
Kitano [Kit]	„An ability of the system to maintain its functions even under external and internal perturbations.“
Kolmer [Kol08]	„Fähigkeit eines Systems, seine Funktion auch bei Schwankungen der Umgebungsbedingungen aufrecht zu erhalten.“
Melvin [Mel03]	„The premise of robust design is that product variance is caused by noise factors, which may come from many places, throughout the life of the product, and through experimentation it is possible to make the product and production process less sensitive to sources of variation, so it may always achieve its desired purpose.“
MIT [MIT]	„A Robust Product or Process performs correctly, even in the presence of noise factors.“
Mohsen [MC00]	„A robust system is expected to perform its intended function under all operating conditions (different causes of variations) throughout its intended life without necessarily eliminating noise factors (noise factors are defined as disturbance factors that cause system functional variability).“
O’Connor [OK12]	„An important reliability feature of software system design is robustness, the term used to describe the capability of a program to withstand error conditions without serious effect, such as becoming locked in a loop or ‘crashing’.“
Park [Par07]	„In robust design, quality improvement is attained by minimizing the change of product performance when there are tolerances on design variables or unknown environmental perturbation.“
Phadke [Pha89a]	„Robust Design is an engineering methodology for improving productivity during research and development so that high-quality products can be produced quickly and at low cost.“
Pham [Pha06]	„Robust design is a systematic methodology that uses statistical experimental design to improve the design of products and processes.“
Reuter [RH00]	„Robustness means finding an acceptable balance between the scatter of the input (=system parameters) and the scatter of the performance.“
Stelling [SSS+04]	„In general, robustness means the persistence of a system’s characteristic behavior under perturbations or conditions of uncertainty.“

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Autor	Definition(en)
Stockinger [Sto10]	„Robust Design ist eine Methode zur optimalen Auslegung von Produkten und Prozessen, so dass sie unempfindlich gegen über Variationen von Eingangsgrößen und Randbedingungen sind. Die Methodik wird eingesetzt, um die Qualität von Produkten und Prozessen zu steigern.“
Suh [Suh01]	„Robust design is defined as the design that satisfies the functional requirements even though the design parameters and the process variables have large tolerances for ease of manufacturing and assembly. This definition of robust design states that the information content is minimized.“ „a design that can always satisfy the functional requirements (i.e., 100 % of the time) by tolerating large variation in design parameters and process variables.“
Taguchi [TCT00]	„Robustness is the state where the technology, product, or process performance is minimally sensitive to factors causing variability (either in the manufacturing or the user's environment) and aging at the lowest unit manufacturing cost.“
Taguchi [Tag86]	„a product whose performance is minimally sensitive to factors causing variability (at the lowest possible cost)“
Tsui [Tsu14]	„Robust design is an important method for improving product quality, manufacturability and reliability at low cost. The main idea of robust design is to reduce the output variation from the target (the desired output) by making the performance insensitive to noise factors such as manufacturing imperfections, environmental variations and deterioration.“
Tsui [Tsu92]	Robust design is an efficient and systematic methodology that applies statistical experimental design for improving product and manufacturing process design.“
VDI 3542-4 [VDI00]	„Robustheit meint demgegenüber, dass ein System Bedienfehler verzeiht und gegenüber Abweichungen von den spezifizierten Betriebsbedingungen weitgehend unempfindlich ist.“
VDI-GIS [VDI93b]	„Fähigkeit eines Objekts, auch bei Verletzung der spezifizierten Randbedingungen vereinbarte Funktionen zu erfüllen bzw. seine Funktionsfähigkeit zu erhalten.“
Waldherr [Wal09]	„A robustness measure is defined by the extent of parametric uncertainty for which no local bifurcations occur.“
Werdich [Wer11]	„Unter robustem Design wird ein Design verstanden, welches gegen Schwankungen von Störgrößen (z. B. Toleranzüberschreitungen einzelner Merkmale) unempfindlich reagiert, d. h. die geforderten und erwarteten Funktionen auch dann nachweislich erfüllt.“
Wiebel [WEM ⁺ 13]	„Ein Produkt wird als robust bezeichnet, wenn es sich unempfindlich gegenüber den auftretenden Unsicherheiten seiner Lebenslaufprozesse verhält.“

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Autor	Definition(en)
Will [WRR03]	„Die Robustheit charakterisiert dabei die Empfindlichkeit der Systemantworten gegenüber unvermeidlichen, in Natura vorhandenen Streuungen in den Umweltbedingungen, übertragen auf die Inputvariablen der rechnerischen Simulation.“
Yang [Yan07]	„Robust design is a powerful technique for improving reliability at low cost in a short time. Robust design is a statistical engineering methodology for optimizing product or process conditions so that product performance is minimally sensitive to various sources of variation.“

Tabelle A.13: Auszug von *FDM*-Methoden

Methode	Beschreibung	Quellen
Axiomatic Design (AD)	Der Entwicklungsprozess wird in die vier Domänen: Kunden-Domäne, funktionale Domäne, physische Domäne und Prozess-Domäne unterteilt. Beim Durchlauf werden Schritt für Schritt Ziele (Anforderungen) und Lösungen gesucht und somit der Entwurf verfeinert.	[Mor09]
DOE	Die <i>Statistische Versuchsplanung (DOE)</i> plant und wertet Versuche statistisch aus. Durch gleichzeitiges variieren mehrerer Faktoren wird das Verhalten der Ergebnisse durch die Veränderung beobachtet.	[Gig07]
FTA	siehe Tabelle A.9	
FMEA	siehe Tabelle A.9	
P-Diagramm	Die Parameter werden als Stell-, Steuer- und Störgrößen in einem Diagramm visualisiert. Somit kann die Wirkung auf das Produkt sowie die Veränderungen leicht ersichtlich gemacht werden.	[Gun04] [Wer11]
Pareto-Diagramm	Anhand einer Häufigkeitsverteilung in Form eines Balkendiagramms wird eine Summenkurve gebildet und die Fehlerquellen in drei Klassen fallend nach Wichtigkeit eingeordnet.	[Kam13]
TRIZ	Eine Vielzahl von Methoden, eingeteilt in die vier Säulen Systematik, Wissen, Analogie und Vision, werden systematisch angewendet um Konflikte und Widersprüche im System aufzudecken.	[Gü10] [Kle14b]
QFD	Methode zur systematischen Planung der Qualität durch Bewertung von Lösungen, Zusammenhängen und Kundenanforderungen mit dem Ziel der Zeit- und Kostenoptimierung.	[Kam13]

Tabelle A.14: Ergebnisse der Versuchsplanung

# FK	SST_{SG}	BHR_{KR}	Zielwert Y [-]	S/N-Ratio η [dB]
1	FS_{-1}	FS_{-1}	0,9909	-49,14

Fortsetzung auf nächster Seite ...

# FK	SST_{SG}	BHR_{KR}	Zielwert Y [Nmm]	S/N -Ratio η [dB]
2	FS_0	FS_0	1,0459	-49,38
3	FS_0	FS_0	0,9731	-48,97
4	FS_{-1}	FS_{+1}	1,0139	-50,06
5	FS_{-1}	FS_0	0,8492	-49,07
6	FS_{-1}	FS_0	1,0464	-49,52
7	FS_0	FS_{-1}	1,0900	-50,29
8	FS_{+1}	FS_{+1}	1,1102	-49,87
9	FS_{-1}	FS_{-1}	0,9297	-49,70
10	FS_{-1}	FS_{+1}	0,9510	-49,83
11	FS_0	FS_{+1}	0,9587	-49,65
12	FS_{+1}	FS_{-1}	1,0503	-50,33
13	FS_{+1}	FS_0	1,0407	-50,39
14	FS_0	FS_{+1}	1,0398	-49,94
15	FS_{+1}	FS_0	1,0723	-48,79
16	FS_0	FS_{-1}	0,9461	-49,05
17	FS_0	FS_{-1}	0,9975	-49,82
18	FS_{+1}	FS_0	1,0395	-49,75
19	FS_0	FS_{-1}	1,0376	-50,06
20	FS_{+1}	FS_{+1}	0,9640	-50,03
21	FS_{+1}	FS_{-1}	1,1602	-49,98
22	FS_{+1}	FS_{+1}	0,9556	-48,62
23	FS_{+1}	FS_0	1,0437	-49,35
24	FS_{-1}	FS_{+1}	0,8845	-49,03
25	FS_{-1}	FS_0	0,9164	-49,15
26	FS_0	FS_{+1}	0,9157	-48,76
27	FS_{-1}	FS_{-1}	0,9585	-49,75
			$\bar{Y} = 9992,99$	$\bar{\eta} = -49,57$

Tabelle A.15: Design-Historie der Einstellstufen

Parameter	Einheit	Ausgangs-	Optimales-	Zielwert-Design
VR_{ZS}	[mm]	8,0	10,0	10,0
VR_{SG}	[mm]	8,0	8,0	8,0

Fortsetzung auf nächster Seite ...

Parameter	Einheit	Ausgangs-	Optimales-	Zielwert-Design
FST_{ZS}	[°]	6,0	8,0	8,0
FST_{SG}	[°]	6,0	4,0	4,0
RPD_{ZS}	[mm]	5,5	5,75	5,75
RPD_{SG}	[mm]	5,5	6,0	6,0
RPT_{ZS}	[mm]	0,5	0,35	0,35
RPT_{SG}	[mm]	0,5	0,5	0,5
SST_{ZS}	[°]	21,5	19,5	19,5
SST_{SG}	[°]	21,5	19,5	22,1
BHR_{KR}	[mm]	34,5	33,3	36,0

Tabelle A.16: Gesamte Parametertabelle im PD

#	Bezeichnung	Einheit	Kürzel	Min	Nom	Max	Quelle
P01	SG: Rastpunkt- durchmesser	[mm]	RPD_{SG}	5,5	5,75	6,0	Funktion
P02	SG: Steile Steigung	[°]	SST_{SG}	19,5	21,5	23,5	Annahme
P03	SG: Flache Steigung	[°]	FST_{SG}	4,0	6,0	8,0	Annahme
P04	SG: Verbindungs- radius	[mm]	VR_{SG}	6,0	8,0	10,0	Annahme
P05	SG: Rastpunkttiefe	[mm]	RPT_{SG}	0,35	0,5	0,65	Annahme
P06	ZS: Rastpunkt- durchmesser	[mm]	RPD_{ZS}	5,5	5,75	6,0	Funktion
P07	ZS: Steile Steigung	[°]	SST_{ZS}	19,5	21,5	23,5	Annahme
P08	ZS: Flache Steigung	[°]	FST_{ZS}	4,0	6,0	8,0	Annahme
P09	ZS: Verbindungs- radius	[mm]	VR_{ZS}	6,0	8,0	10,0	Annahme
P10	ZS: Rastpunkttiefe	[mm]	RPT_{ZW}	0,35	0,5	0,65	Annahme
P11	KR: Bahnradius	[mm]	BHR_{KR}	33,3	34,5	36,0	Geometrie
P12	Scheiben: E-Modul	[GPa]	EM_S	135,5	140,0	146,5	3 % Variation
P13	Kugeln: E-Modul	[GPa]	EM_K	205,5	210,0	214,5	3 % Variation
P14	Reibwert Kugel	[–]	MU_K	0,07	0,15	0,30	Funktion
P15	Betriebstemperatur	[°C]	T	–45	22	125	Vorgabe
P16	DF: Ausgangslänge	[mm]	L_{DF}	44,625	47,100	47,599	$\pm 40 N F_{Feder}$

Tabelle A.17: Eingangsparameter für Teststrategieplanung

Randbedingung		Erklärung
b	Weibull Formparameter	Streumaß und Ausfallkategorie
T	Charakteristische Lebensdauer	Lage der Ausfallzeit
n	Prüflingsanzahl	Prototypen, Muster
n_{PS}	Prüfstand	Prüfstand mit gleichen Bedingungen
K_{PL}	Prüfstandskosten	Belegung und Durchführung pro Stunde
K_{PS}	Prüflingskosten	Gesamtkosten inklusive Präparierung
AB	Abweichung	Genauigkeit Verteilungsparameterschätzung

Tabelle A.18: DOE-Einstellstufen des $N3G^+$

DP	SL_l	μ	SL_u	DP	SL_l	μ	SL_u
l_{H1}	83,814	84,2	84,586	y_H	147,589	150	152,410
Φ_{AS}	0,707	0,9	1,093	y_{ZS}	246,589	249	251,410
Φ_{KS}	11,207	11,4	11,593	z_{EZ}	0,762	0,81	0,858
Φ_{ZFS}	0,707	0,9	1,093	z_H	140,089	142,5	144,910
y_{EZ}	6,062	6,11	6,158	z_{ZS}	259,589	262	264,410
$D_{A,LB}$	21,452	21,5	21,548	RR_{LS}	0,208	0,23	0,252
$D_{I,LB}$	11,507	11,7	11,893	$D_{A,PS}$	21,784	21,9	22,016
$\Phi_{An,LB}$	67,018	67,5	67,982	$D_{I,PS}$	12,004	12,1	12,196
RR_{LB}	0,208	0,23	0,252	$D_{A,KS}$	24,507	24,7	24,893
$ST_{LB,LS}$	14,036	15	15,964	$D_{I,KS}$	17,655	17,8	17,945
BHR_{SG}	35,652	35,7	35,748	RT_{ZW}	0,404	0,5	0,596
FST_{SG}	7,018	7,5	7,982	R_{SG}	6,018	6,5	6,982
FST_{ZW}	5,518	6	6,482	R_{ZW}	7,518	8	8,482
RD_{SG}	5,702	5,75	5,798	SST_{SG}	21,018	21,5	21,982
RD_{ZW}	5,502	5,55	5,598	SST_{ZW}	19,518	20	20,482
RT_{SG}	0,404	0,5	0,596				
L_{DF}	46,811	47,1	47,389				

= Kinematik-Parameter

= Nachstellmoment-Parameter

= Überlastmoment-Parameter

= Globaler Parameter

Tabelle A.19: Herstellungsprozess und Toleranzklasse der N3G⁺-Bauteile

Bauteil	Prozess	IT-Klasse	Bauteil	Prozess	IT-Klasse
Lagerbuchse	Sintern	10	Welle	Kaltfließpressen	11
Zahnrad	Sintern	10	Lager	Sintern	9
Schaltgabel	Sintern	9	Hülse	Tiefziehen	10
Zwischenscheibe	Sintern	9	Druckfeder	Winden	13
Zahnscheibe	Stanzen	10	Adapter	Sintern	12
Passscheibe	Stanzen	10	Spannhülse	Tiefziehen	11

Tabelle A.20: Fertigungsverfahren und erreichbare Toleranzklassen nach [HB07]

Fertigungsverfahren	Toleranzklassen									
	IT-5	IT-6	IT-7	IT-8	IT-9	IT-10	IT-11	IT-12	IT-13	
Gießen						■	■	■	■	■
Sintern					■	■	■	■	■	■
Tiefziehen						■	■	■	■	■
Gesenkschmieden				■	■	■	■	■	■	■
Präzisionsschmieden				■	■	■	■	■	■	■
Kaltfließpressen		■	■	■	■	■	■	■	■	■
Walzen			■	■	■	■	■	■	■	■
Schneiden						■	■	■	■	■
Bohren							■	■	■	■
Fräsen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Hobeln		■	■	■	■	■	■	■	■	■
Drehen			■	■	■	■	■	■	■	■
Rundschleifen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

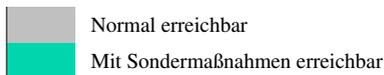


Tabelle A.21: Kostenverhalten der $N3G^+$ -Bauteile bei Toleranzänderung

Bauteil	IT-4	IT-5	IT-6	IT-7	IT-8	IT-9	IT-10	IT-11	IT-12	IT-13
Lagerbuchse	2,18	1,97	1,75	1,61	1,47	0,93	0,89	0,83	0,76	0,72
Zahnrad	0,88	0,83	0,78	0,75	0,72	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16
Schaltgabel	1,75	1,60	1,44	1,34	1,24	0,71	0,68	0,64	0,59	0,56
Zwischenscheibe	1,65	1,51	1,37	1,28	1,19	0,66	0,63	0,60	0,55	0,52
Zahnscheibe	1,49	1,37	1,24	1,16	1,08	1,05	0,53	0,49	0,45	0,43
Passscheibe	0,81	0,77	0,73	0,70	0,68	0,67	0,16	0,15	0,14	0,13
Welle	0,76	0,73	0,50	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10
Lager	0,93	0,88	0,83	0,79	0,76	0,25	0,24	0,22	0,21	0,20
Hülse	1,00	0,93	0,87	0,83	0,79	0,78	0,26	0,25	0,23	0,21
Druckfeder	1,68	1,50	0,82	0,71	0,89	0,55	0,52	0,47	0,41	0,38
Adapter	1,07	0,98	0,90	0,85	0,79	0,28	0,26	0,24	0,21	0,20
Spannhülse	1,59	1,44	1,30	1,20	1,10	1,08	0,55	0,51	0,46	0,43

Tabelle A.22: Signifikanzanalyse der Parameter im TD

Parameter	Bezeichnung	Rangzahl
ϕ_{KS}	Kulissenspiel	1
ϕ_{ZFS}	Zahnflankenspiel	2
ϕ_{AS}	Antriebsspiel	3
y_{EZ}	Höhe Drehpunkt Hebel bis Mittelpunkt Kreis	4
z_H	Einbaumaß Mitte Bremsscheibe bis Hebel	5
z_{EZ}	Länge Drehpunkt Hebel bis Mittelpunkt Kreis	6
$\phi_{AN,LB}$	Anschlagswinkel Lagerbuchse	7
$D_{A,LB}$	Außendurchmesser Lagerbuchse	8
y_H	Einbaumaß Drehachse Bremsscheibe bis Hebel	9
y_{ZS}	Einbaumaß Drehachse Bremsscheibe bis Kolbenstange	10

Tabelle A.23: Vergleich wissenschaftlicher Literatur zu Testplanungsstrategien

Quelle	Zielsetzung	Voraussetzung	Einschränkung	Bewertung		
				G ^a	K ^b	Z ^c
[AKT08]	<i>MTTF</i> und zugehöriges $\alpha - / \beta$ -Fehler schätzen	Max. Grenzen für b , T , vordefinierte $\alpha - / \beta$ -Fehler	Sudden-Death-Test, bezogen auf <i>MTTF</i>	+	(+)	(+)
[GGP13]	Benötigter Stichprobenumfang und Lastniveau für Vertrauensbereichsdefinition	b und T bekannt, beschleunigte Lebensdauertests	Vollständige und beschleunigte Lebensdauertests	+	0	0
[Hsi94]	Durchschnittsdauern für Typ-II-Zensierungen zur besseren Testplanung	b durch Vorversuche bekannt, Näherungen mit geringem Fehler für hohe Stichprobenzahlen	vollständige & Typ-II-Tests	0	0	+
[AC14]	Designparameteroptimierung für Produkte mit Stichprobengröße < 5	Sehr gute Kenntnis über Stress-Strength-Modell des Produktes notwendig	Keine Ermittlung von Verteilungsparameter	0	+	0
[HW08]	Geeigneter Stichprobenumfang für vorgegebene $\alpha - / \beta$ -Fehler unter Minimierung einer Kostenfunktion	Vordefinierter $\alpha - / \beta$ -Fehler	Exponentialverteilung Zensierung mit Intervallen	+	(+)	(+)
[13]	Möglichst genaue Schätzung der Verteilungsparameter b und T	Kennung oder Schätzung von b und T möglich	2-parametrische Weibullverteilung	+	+	+

^a Genügendkeit ^b Testkosten ^c Prüfzeit

B Diagramme

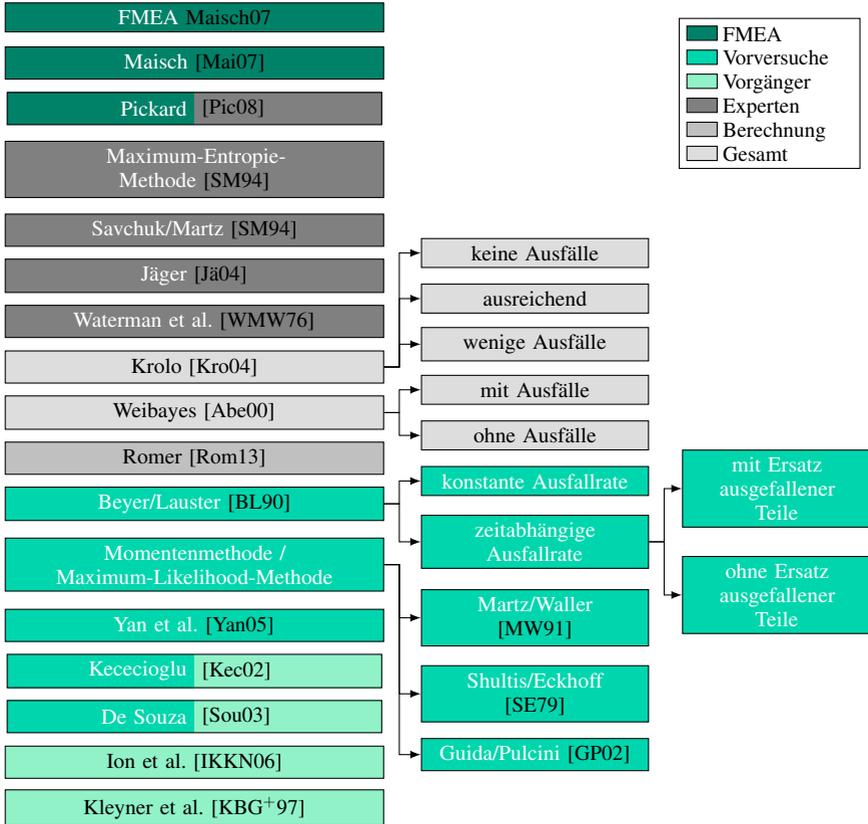


Bild B.1: Methodenübersicht zur Integration von Vorwissen

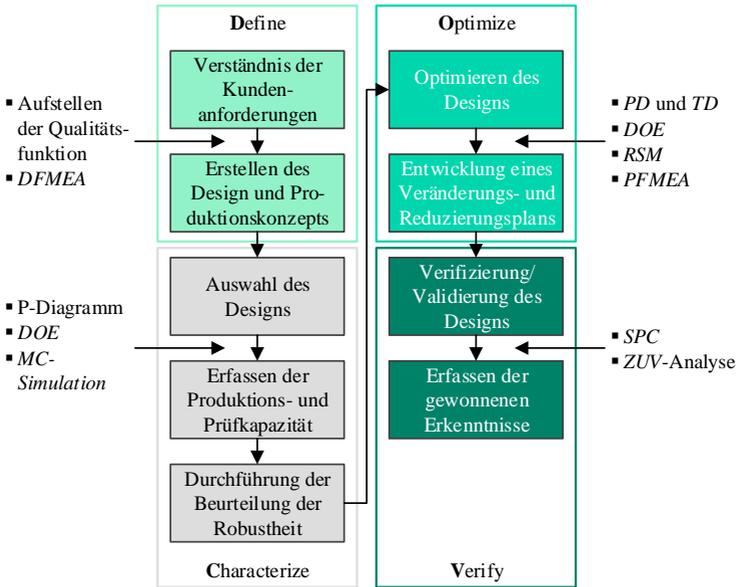


Bild B.2: Schematischer Ablauf des DCOV-Modells

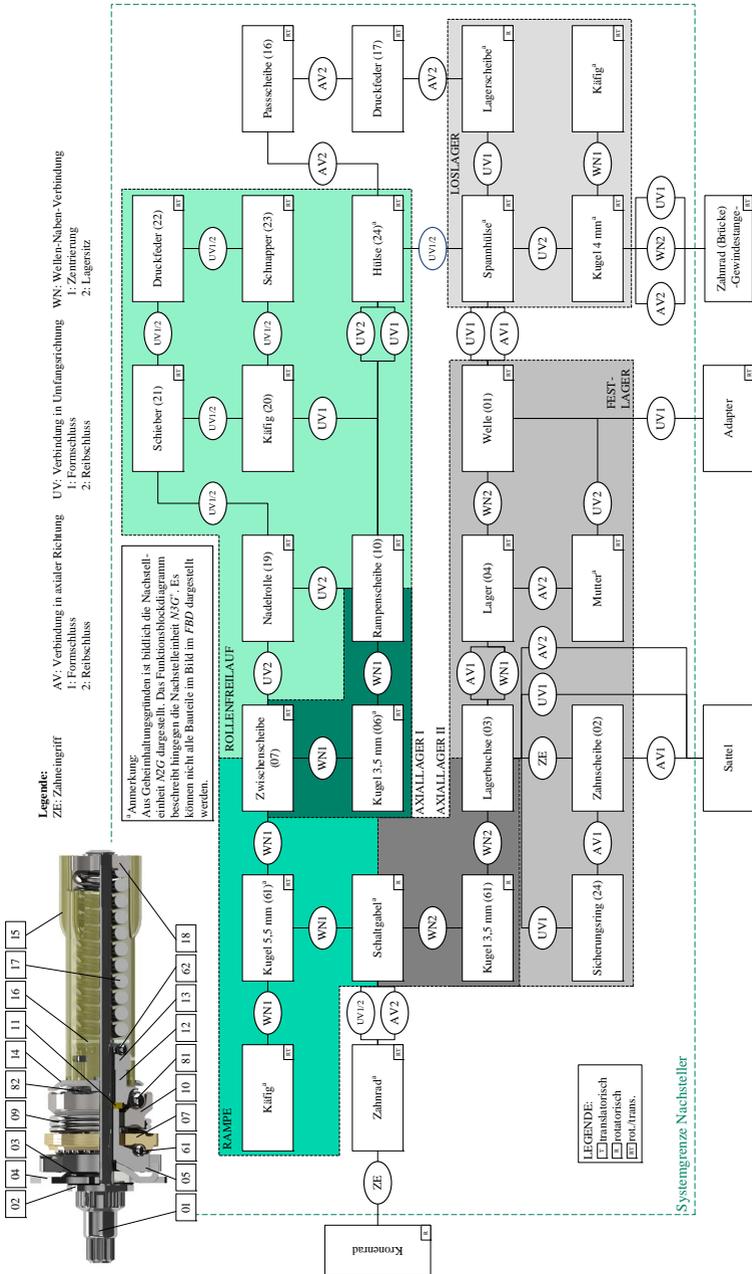


Bild B.3: Funktionsblockdiagramm N3G+ - dargestellt Nachsteleinheit N2G

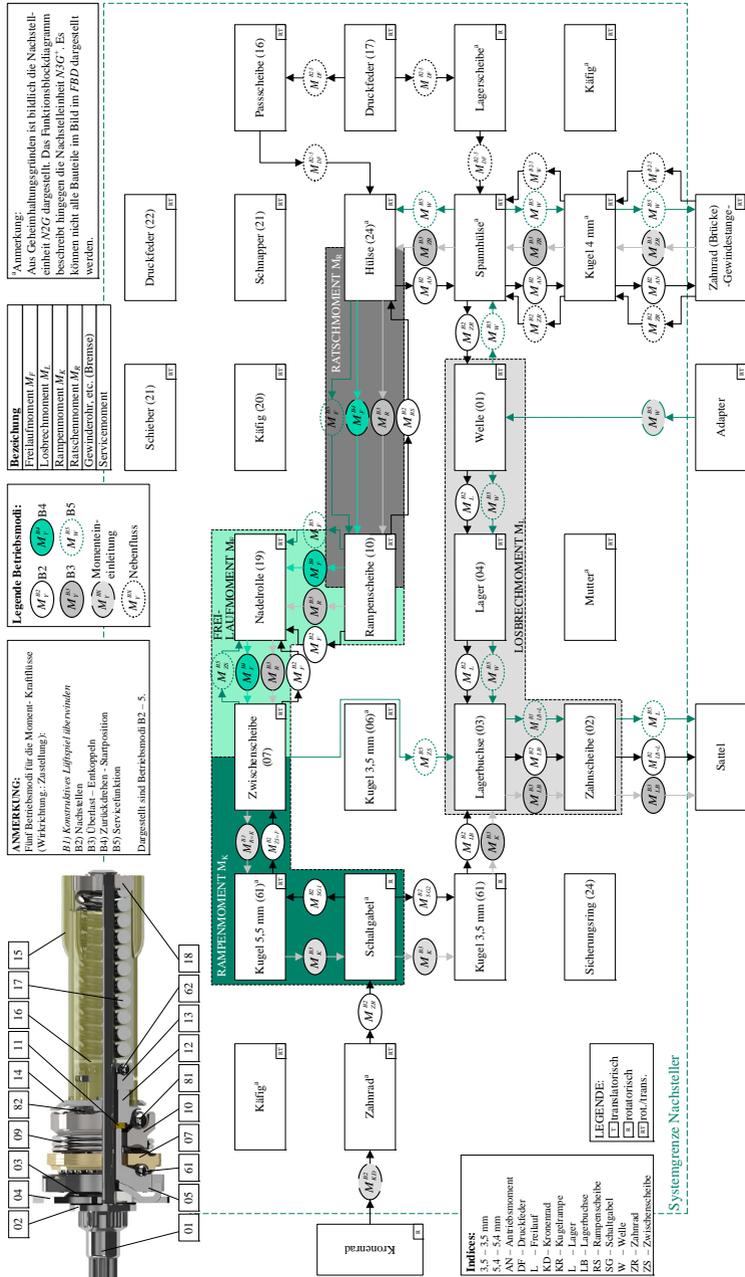


Bild B.4: Wirkzusammenhangsdiagramm N3G⁺ - dargestellt Nachstelleinheit N2G

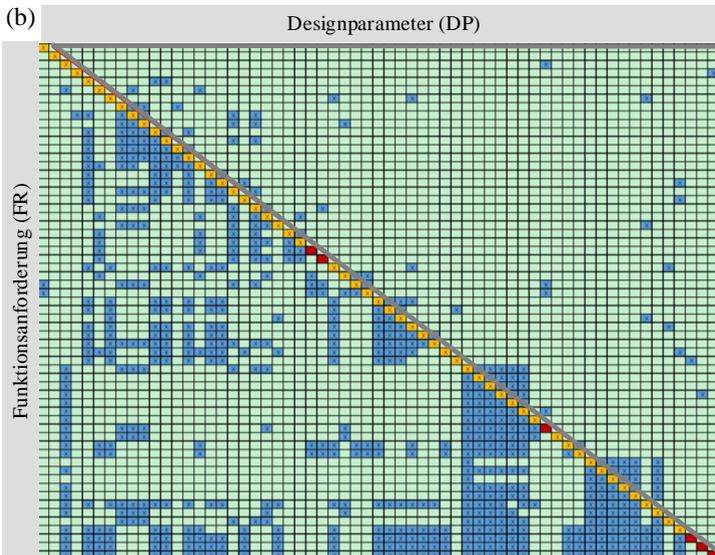
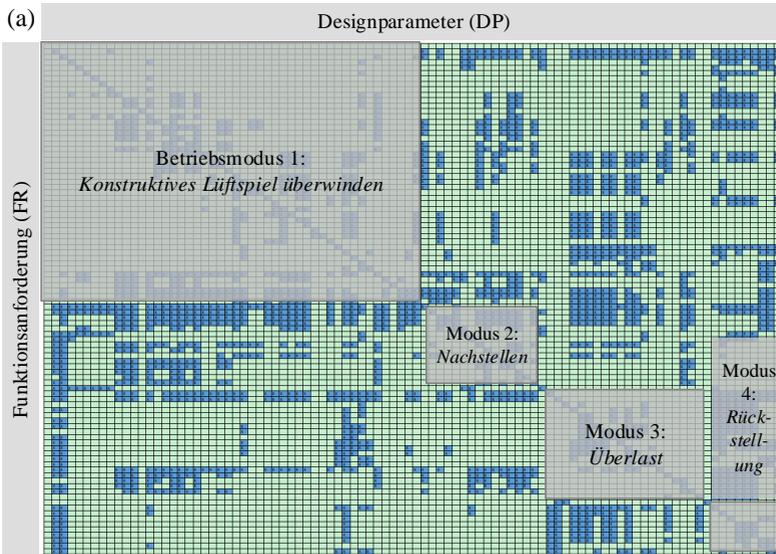


Bild B.5: Design Matrix des $N3G^+$: (a) vor und (b) nach der Reorganisation

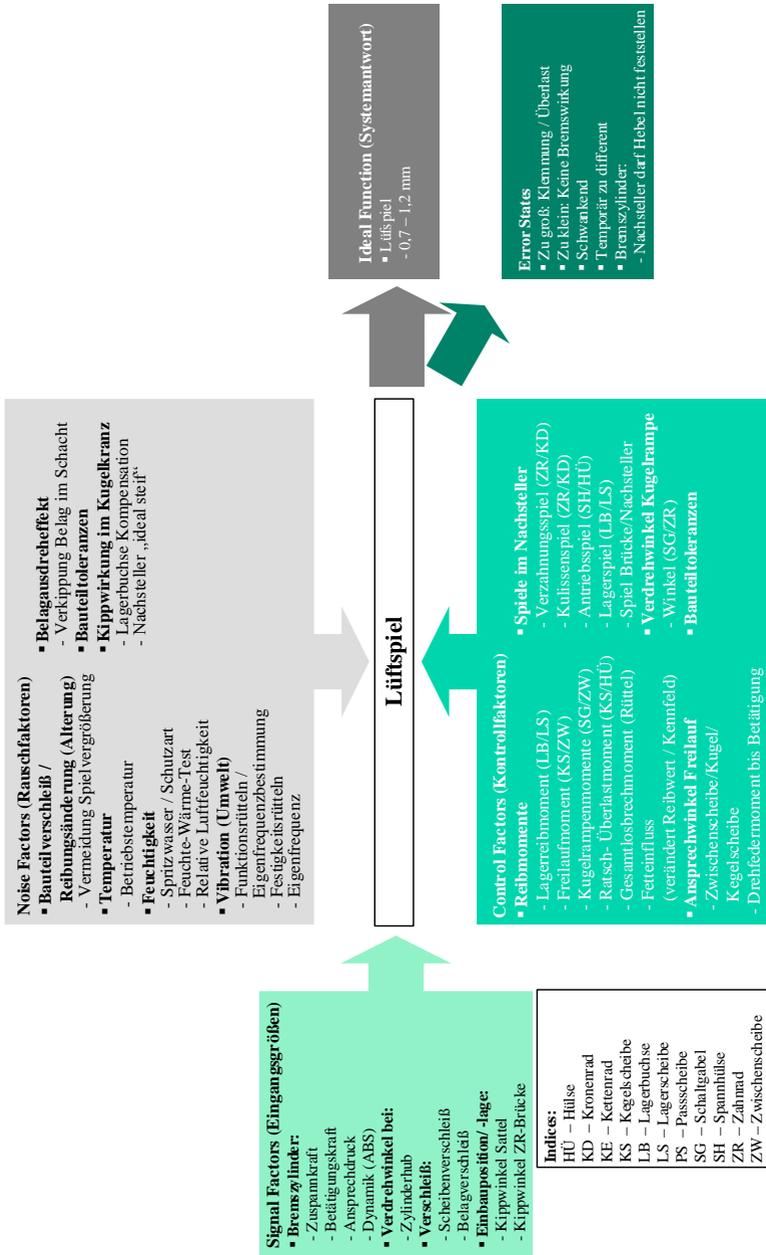


Bild B.6: Das P-Diagramm des N3G+

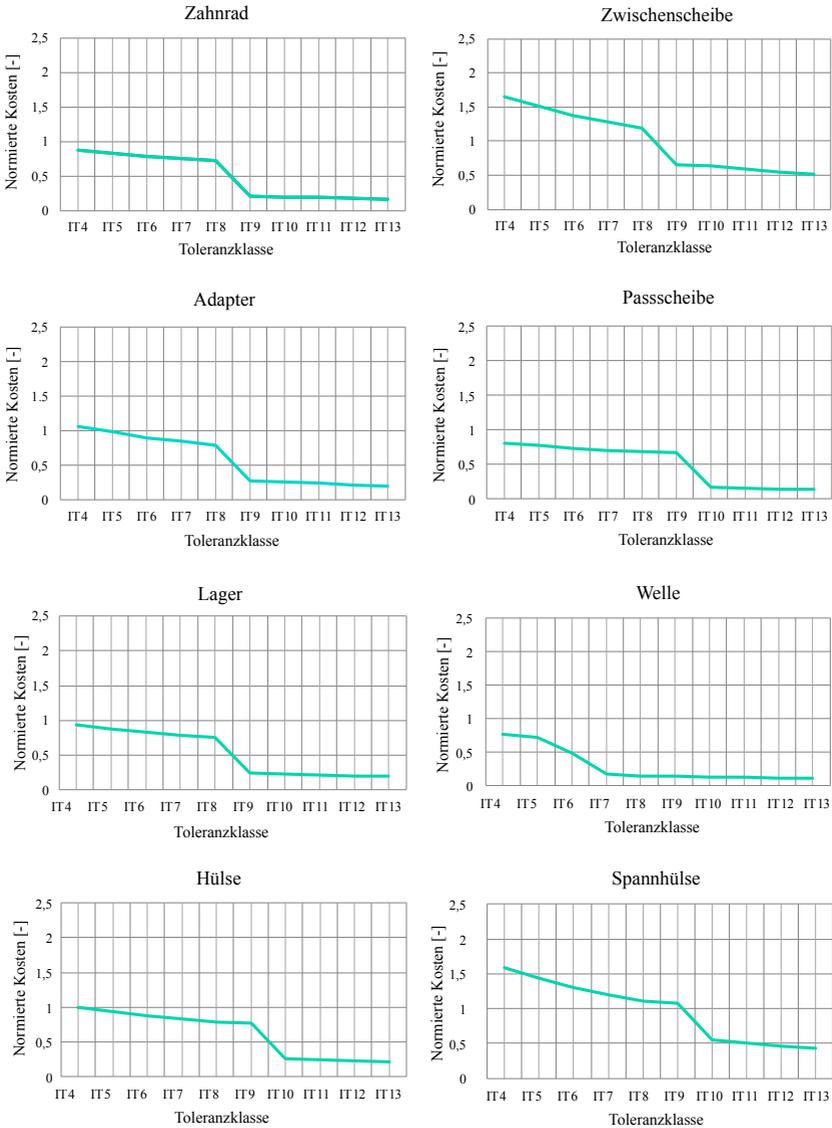


Bild B.7: Semi-quantitative Kostenfunktionen des N3G⁺

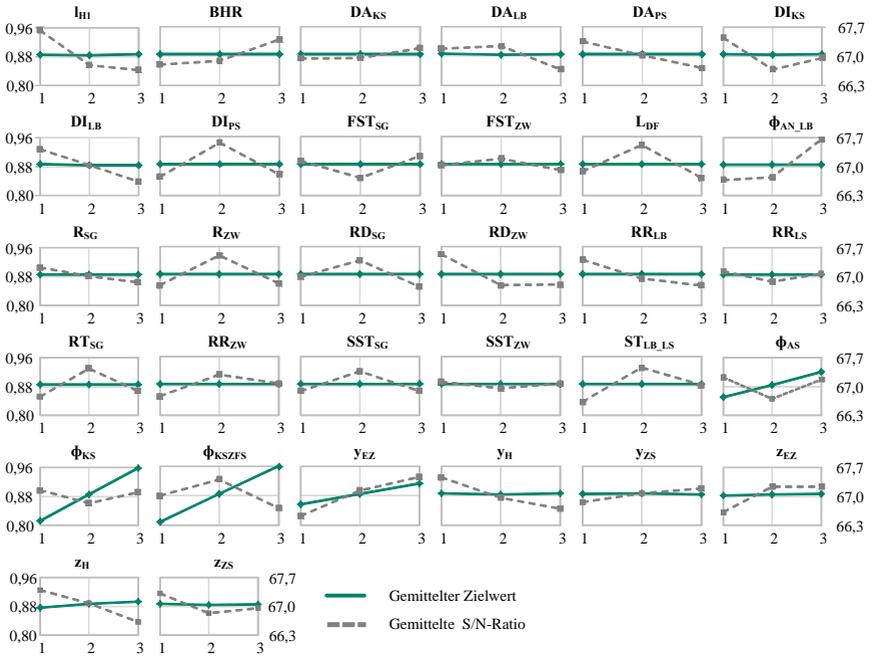


Bild B.8: Mittelwerte und S/N-Ratios nach Taguchi

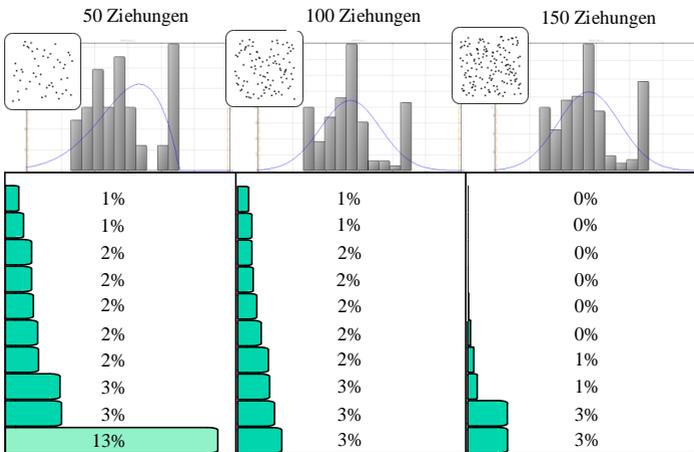


Bild B.9: Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten bezüglich Stichprobenanzahl

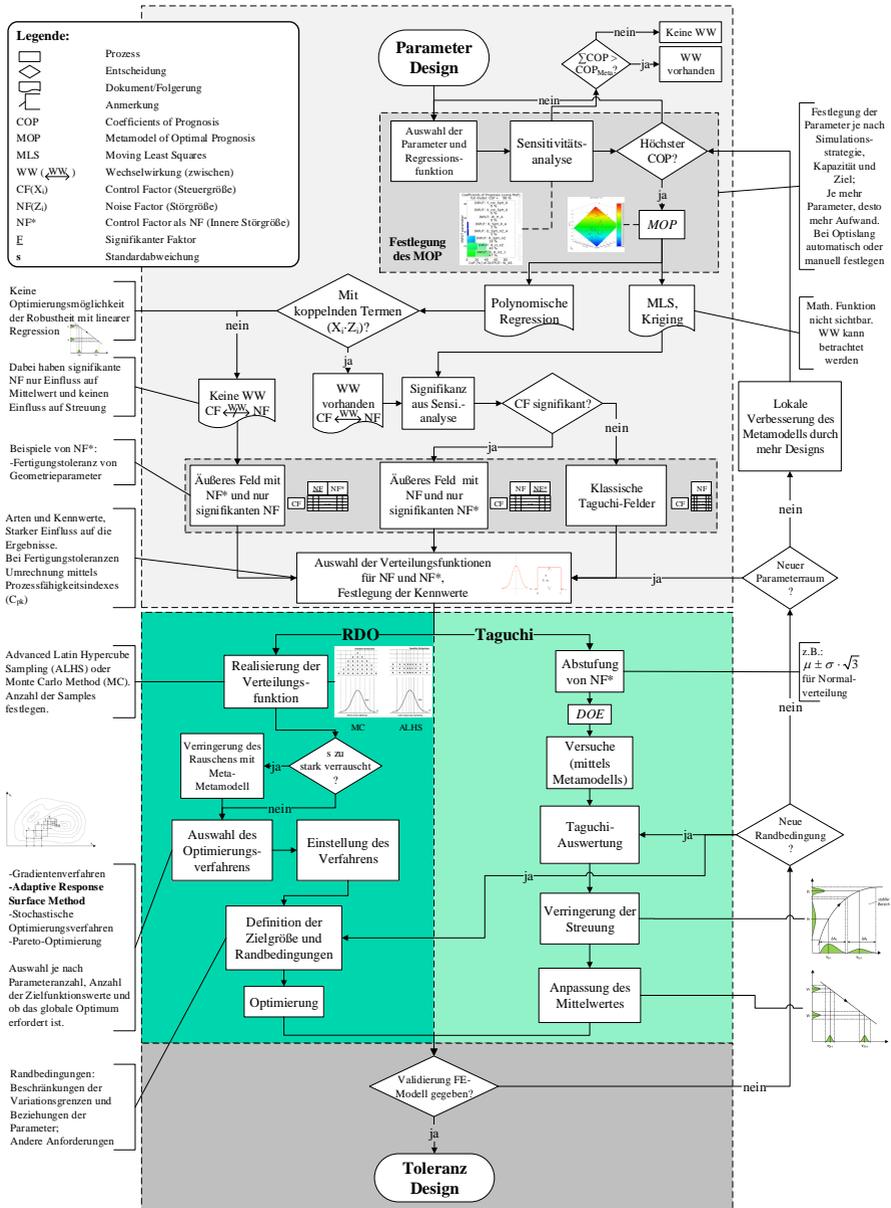


Bild B.10: Vorgehensweise der Robustheitsoptimierung und simulativen Taguchi-Methode

Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszyinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewin-dewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahnern mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellen-dichtringen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruck-dichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenver-zahnter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtringen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmen-genschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner;	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	K.-H.Hirschmann;	
	B. Bertsche	
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluor-äthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflan-kenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinaten-tasters
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas;	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog
	H.K. Müller	

Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Nauthheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätssysteminformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zellmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräseherstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Bearbeitungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozeß
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haier	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper- und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichting, Gegenauflfläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Losteilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. Delonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spirallrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben
128	M. Trost	Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren
129	P. Lambeck	Unterstützung der Kreativität von verteilten Konstrukteuren mit einem Aktiven Semantischen Netz
130	K. Pickard	Erweiterte qualitative Zuverlässigkeitsanalyse mit Ausfallprognose von Systemen
131	W. Novak	Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung
132	M. Henzler	Radialdichtungen unter hoher Druckbelastung in Drehübertragern von Werkzeugmaschinen
133	B. Rzepka	Konzeption eines aktiven semantischen Zuverlässigkeitsinformationssystems
134	C.G. Pflüger	Abdichtung schnelllaufender Hochdruck-Drehübertrager mittels Rechteckring und hocheffizient strukturierter Gleitfläche
135	G. Baitinger	Multiskalenansatz mit Mikrostrukturanalyse zur Drallbeurteilung von Dichtungsgegenauflflächen

Nr.	Verfasser	Titel
136	J. Gäng	Berücksichtigung von Wechselwirkungen bei Zuverlässigkeitsanalysen
137	Ch. Maisch	Berücksichtigung der Ölalterung bei der Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsprognose von Getrieben
138	D. Kirschmann	Ermittlung erweiterter Zuverlässigkeitsziele in der Produktentwicklung
139	D. Weber	Numerische Verschleißsimulation auf Basis tribologischer Untersuchungen am Beispiel von PTFE-Manschettendichtungen
140	T. Leopold	Ganzheitliche Datenerfassung für verbesserte Zuverlässigkeitsanalysen
141	St. Jung	Beitrag zum Einfluss der Oberflächencharakteristik von Gegenläufigen auf das tribologische System Radial-Wellendichtung
142	T. Prill	Beitrag zur Gestaltung von Leichtbau-Getriebegehäusen und deren Abdichtung
143	D. Hofmann	Verknüpfungsmodell zuverlässigkeitsrelevanter Informationen in der Produktentwicklung mechatronischer Systeme
144	M. Wacker	Einfluss von Drehungleichförmigkeiten auf die Zahnradlebensdauer in Fahrzeuggetrieben
145	B. Jakobi	Dichtungsergüsse am Beispiel von Pkw-Lenkungen – Analyse und Abhilfemaßnahmen
146	S. Kiefer	Bewegungsverhalten von singulären Zahnradstufen mit schaltbaren Koppelungseinrichtungen
147	P. Fietkau	Transiente Kontaktberechnung bei Fahrzeuggetrieben
148	B. Klein	Numerische Analyse von gemischten Ausfallverteilungen in der Zuverlässigkeitstechnik
149	M. Kläiber	Betriebs- und Benutzungsseigenschaften im Dichtsystem Radial-Wellendichtung am Beispiel von additiven synthetischen Schmierölen
150	A. Baumann	Rasselgeräuschminimierung von Fahrzeuggetrieben durch Getriebeöle
151	M. Kopp	Modularisierung und Synthese von Zuverlässigkeitsmethoden
152	M. Narten	Abdichten von fließfettgeschmierten Getrieben mit Radialwellendichtungen – Reibungsminimierung durch Makrostrukturierung der Dichtungsgegenläufige
153	P. Schuler	Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung
154	A. Romer	Anwendungsspezifischer Zuverlässigkeitsnachweis auf Basis von Lastkollektiven und Vorwissen
155	A. Daubner	Analyse, Modellierung und Simulation von Verschleiß auf mehreren Skalen zur Betriebsdauervorhersage von Wellendichtungen aus PTFE-Compound
156	J. Rowas	Ökologischer Einsatz der Traktionsarten im System Bahn
157	D. J. Maier	Sensorlose online Zustandserfassung von Vorschubantriebskomponenten in Werkzeugmaschinen
158	J.-P. Reibert	Statisches Abdichten auf nicht idealen Dichtflächen in der Antriebstechnik
159	M. Sommer	Einfluss des Schmierfetts auf das tribologische System Radial-Wellendichtung – Betriebsverhalten und Funktionsmodell
160	W. Haas	Basics der Dichtungstechnik
161	U. Nißler	Dichtheit von Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
162	S. M. Neuberger	Entwicklung einer gasgeschmierten Gleitringdichtung für den Einsatz im Verbrennungsmotor
163	W. Goujavin	Strömungsmechanische Untersuchungen zur Funktionsweise von Manschetendichtungen aus PTFE-Compounds mit Rückförderstrukturen
164	K. Mutter	Simulation der Zuverlässigkeit von Gesamtfahrzeugfunktionen am Beispiel Fahrkomfort
165	S. Sanzenbacher	Reduzierung von Getriebegeräuschen durch Körperschallminderungsmaßnahmen
166	O. Koller	Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen im elektrischen Antriebsstrang
167	M. Rempis	Untersuchungen zum Förderverhalten von Dichtsystemen mit Radial-Wellendichtungen aus Elastomer
168	M. Baumann	Abdichtung drallbehalteter Dichtungsgegenläufigen – Messung, Analyse, Bewertung und Grenzen
169	M. Schenk	Adaptives Prüfstandsverhalten in der PKW-Antriebsstrangerprobung
170	J. Gözl	Manschettendichtungen aus PTFE-Compounds, Funktionsmechanismus von PTFE-Manschettendichtungen und Entwicklung von Rückförderstrukturen für beidseitig drehende Wellen
171	J. Kümmel	Schmutzabdichtung mittels Fettgefüllter Berührungsfreier Wellendichtungen
172	S. Bader	Gehäusedichtungen unter korrosiver Last
173	J. Juskowiak	Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsprognosen
174	F. Jakob	Nutzung von Vorkenntnissen und Raffungsmodellen für die Zuverlässigkeitsbestimmung
175	N. P. Tonius	Klauenschaltelemente in Stufenautomatgetrieben
176	V. Schweizer	Berücksichtigung und Bewertung streuender Einflussgrößen in der Zuverlässigkeitssimulation
177	F. Bosch	Abdichtung trockener Stäube mit fettgefüllten berührungsfreier Wellendichtungen
178	M. Botzler	Präventive Diagnose abnutzungsabhängiger Komponentenausfälle
179	C. Fehrenbacher	Förderverhalten im Dichtsystem Radial-Wellendichtung

Nr.	Verfasser	Titel
180	B. Heumesser	Optimierung des Klapper- und Rasselgeräuschverhaltens bei Doppelkupplungsgetrieben
181	A. Eipper	Einfluss transienter Betriebsbedingungen auf den RWDR im System Radial-Wellendichtung
182	Alexander Buck	Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Verschleiß an Hydraulikstangendichtungen
183	Andrea Buck	Simulation und Optimierung der Instandhaltung unter Berücksichtigung sich ändernder Belastungen mittels Petrinetzen