





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden  
Beurteilung der Montagequalität von Kolbendichtungen**

Dipl.-Ing. (Univ.)  
**Christoph Sieben**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Die Dissertation wurde am 13.01.2015 bei der Technischen Universität  
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am  
15.06.2015 angenommen.



Christoph Sieben

**Entwicklung eines Prognosemodells zur  
prozessbegleitenden Beurteilung der  
Montagequalität von Kolbendichtungen**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 303

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4510-7

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.





## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Ingenieur in der Fertigungsplanung Aggregate der AUDI AG Ingolstadt und als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fraunhofer IWU Projektgruppe für Ressourceneffiziente mechanische Verarbeitungsmaschinen (RMV) in Augsburg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter der Projektgruppe RMV, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Herrn Thomas Rolka, Leiter Fertigungsplanung R5-/V-Motoren der AUDI AG Ingolstadt, danke ich für die konsequente Unterstützung dieser Arbeit.

Für den kollegialen Zusammenhalt, die fruchtbaren Diskussionen, aber auch für willkommene Zerstreuungen während meiner Zeit am Institut bedanke ich mich bei meinen Kollegen, allen voran Emin Genc, Martin Schmid und Dr.-Ing. Stefan Lutzmann danke ich für die intensive Durchsicht meiner Arbeit. In technisch diffizilen Belangen konnte ich mich auf Werkstattleiter Kurt Hartmann verlassen. Auch hierfür herzlichen Dank.

Neben allen offiziellen Voraussetzungen und Erfordernissen einer Dissertation konnte diese Arbeit nur aufgrund eines starken sozialen Rückhalts auch abseits des Arbeitsumfeldes entstehen. Meinen Freunden danke ich für das Verständnis und das immense Maß an Zuversicht, das mir über die Jahre im Rahmen meiner Dissertation entgegengebracht wurde. In den richtigen Momenten konnten Sie für Ablenkung sorgen und waren stets eine wichtige Motivationsquelle. Vielen Dank an Michael Ott, Xaver Betz, Benjamin Puna, Michael Günter, Moritz Schulz, Sheldon Branagh, Miguel Burgaleta, Alexander Schwarz, Fabian Herfurth und alle anderen.

Besonderer Dank gilt meiner Mutter Christiana Sieben und meinem Vater Norbert Sieben. Ihr bedingungsloser Rückhalt in allen akademischen und persönlichen Belangen ist Grundstein und Wegweiser meiner bisherigen Laufbahn. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet. Meinen Brüdern Sebastian und Florian Sieben danke ich für die Inspiration und Motivation, diese nun vollendete Dissertation überhaupt erst in Angriff zu nehmen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>x</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>xi</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation der Arbeit .....	1
1.2 Zielsetzung und Betrachtungsrahmen .....	3
1.3 Vorgehensweise.....	4
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>7</b>
2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik.....	7
2.2 Montageverfahren für Kolbendichtungen.....	11
2.2.1 Manuelle Montage.....	11
2.2.2 Mechanisierte Montage .....	13
2.3 Handlungsbedarf.....	14
2.3.1 Unsicherheiten manueller Montageprozesse .....	14
2.3.2 Unsicherheiten manueller Montageprozesse von Kolbendichtungen .....	19
2.3.3 Auswirkungen von Montageunsicherheiten auf die Produktqualität von Kolbendichtungen.....	21

<b>3</b>	<b>Systemanalyse .....</b>	<b>28</b>
3.1	Allgemeines .....	28
3.2	Systemgrenze .....	28
3.3	Materialeigenschaften elastomerer Dichtungswerkstoffe .....	30
3.4	Modelle der Elastomerreibung .....	38
3.4.1	Trockene Reibung.....	38
3.4.2	Reibung unter Einsatz von Schmiermitteln .....	46
3.5	Detailanalyse der Fügephasen .....	49
<b>4</b>	<b>Prozessüberwachungskonzept.....</b>	<b>57</b>
4.1	Allgemeines .....	57
4.2	Anforderungen an Prozesskennwerte.....	57
4.3	Auswahl der Prozesskennwerte .....	58
4.4	Definition und Ermittlung des Soll-Zustands.....	59
4.5	Modellierung des Soll-Zustands .....	60
4.6	Vergleich von Soll- und Ist-Zustand .....	62
<b>5</b>	<b>Entwicklung eines empirischen Prognosemodells .....</b>	<b>64</b>
5.1	Allgemeines .....	64
5.2	Methodik des Vorgehens .....	65
5.3	Systemanalyse im Rahmen der statistischen Versuchsplanung .....	66
5.4	Versuchsstrategie .....	71
5.4.1	Faktorenauswahl .....	71
5.4.2	Aufstellung des Versuchsplans.....	77
5.5	Versuchsdurchführung .....	83
5.5.1	Versuchsstand.....	83

5.5.2	Versuchsablauf .....	86
5.6	Versuchsauswertung .....	87
5.6.1	Regressionsanalyse und Modellerstellung .....	88
5.6.2	Effektanalyse .....	101
<b>6</b>	<b>Verifizierung und Validierung des Prognosemodells .....</b>	<b>109</b>
6.1	Allgemeines .....	109
6.2	Modellverifizierung .....	109
6.3	Modellvalidierung .....	110
6.3.1	Umfang der Validierungsversuche .....	111
6.3.2	Ergebnis der Validierung .....	112
6.4	Diskussion der Validierungsergebnisse .....	116
6.4.1	Transienz des Verschleißverhaltens .....	116
6.4.2	Modellansatz .....	121
6.4.3	Einschränkung der Modellfunktion .....	123
6.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....	124
<b>7</b>	<b>Zielgrößenoptimierung durch Modellanwendung .....</b>	<b>126</b>
7.1	Allgemeines .....	126
7.2	Berechnungsbeispiel einer Zielgrößenoptimierung .....	127
<b>8</b>	<b>Schlussbetrachtung .....</b>	<b>130</b>
8.1	Technische und wirtschaftliche Bewertung .....	130
8.2	Zusammenfassung .....	133
8.3	Ausblick .....	136

<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>139</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>151</b>
10.1	Tabellarische Dokumentation der Modellkennwerte.....	151
10.2	Eingesetzte Software .....	152
<b>11</b>	<b>Studienarbeiten .....</b>	<b>153</b>

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Aufbau der Arbeit .....	6
Abbildung 2:	Zuordnung gängiger Dichtungssysteme in Anlehnung an MATEK ET AL. (2011) .....	7
Abbildung 3:	Einbauarten einer O-Ring-Dichtung .....	8
Abbildung 4:	Verteilung der Dichtungsfälle in Fahrzeugaggregaten und Beispielanwendungen .....	8
Abbildung 5:	Pressungsverteilung eines entspannten (links), verpressten (Mitte) und druckbelasteten (rechts) O-Rings in Anlehnung an ALBERS ET AL. (2012) .....	9
Abbildung 6:	Anpassung des Elastomers an die Kontaktfläche des Dichtungspartners in Anlehnung an SCHMITT (1987) .....	10
Abbildung 7:	Primär- und Sekundärleckage an einer O-Ring-Dichtung .....	10
Abbildung 8:	Abfolge der manuellen Kolbendichtungs montage .....	12
Abbildung 9:	Schematische Darstellung auftretender Kräfte während des Fügevorgangs von Kolbendichtungen .....	13
Abbildung 10:	Einflussfaktoren auf die menschliche Zuverlässigkeit in Anlehnung an BARTSCH (2004) .....	16
Abbildung 11:	Leistungsbeeinflussende Faktoren in Anlehnung an VDI 4006 (2002) .....	16
Abbildung 12:	Menschliche Leistungskurve in Prozent des Tagesdurchschnitts in Anlehnung an GRAF (1961) .....	17
Abbildung 13:	Folgen von Abweichungen vom optimalen Arbeits- bereich in Anlehnung an LINS & BRITZKE (2010) .....	17
Abbildung 14:	Kategorisierung menschlicher Fehlhandlungen in Anlehnung an VDI 4006 (2003) .....	18
Abbildung 15:	Funktionen der Montage in Anlehnung an LOTTER (2005) .....	19
Abbildung 16:	Folgen fehlerhafter Produkte und mangelnder Produktqualität in Anlehnung an SCHMITT & PFEIFER (2010) .....	21
Abbildung 17:	Skalen der Beschädigungsstufen eines O-Rings .....	23
Abbildung 18:	Beschädigungsformen eines O-Rings. Bilder oben: eigene Darstellung; a: RICHTER (2002); b: PARKER (2007) .....	25
Abbildung 19:	Unsichere Montageprozesse für Kolbendichtungen .....	26

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 20:	Schematische Darstellung eines Systems in Anlehnung an STEBERTZ ET AL. (2010) .....	29
Abbildung 21:	Definierte Systemgrenze der untersuchten Kolbendichtung.....	29
Abbildung 22:	Schematische Darstellung eines Elastomermoleküls im geknäulten und gestreckten Zustand in Anlehnung an POPOV (2010) .....	31
Abbildung 23:	Gängige Modelle zur Beschreibung von viskoelastischem Materialverhalten in Anlehnung an BONNET (2009).....	32
Abbildung 24:	Poynting-Thomsen-Modell in Anlehnung an SCHMITT (1987).....	34
Abbildung 25:	Darstellung des Verlustwinkels im Zeiger-Diagramm (links) und des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs eines Kelvin-Voigt-Körpers (rechts) in Anlehnung an ANDREAS ET AL. (2012) .....	36
Abbildung 26:	Abhängigkeit des komplexen Elastizitätsmoduls von der Anregungsfrequenz in Anlehnung an LINDNER (2005) .....	37
Abbildung 27:	Anteile der Elastomerreibung in Anlehnung an MOORE (1972).....	39
Abbildung 28:	Schematische Darstellung der Kontaktzone zwischen Elastomer- und festem Gegenkörper in Anlehnung an CHERNYAK & LEONOV (1986).....	41
Abbildung 29:	Schematisches Modell des Hystereseanteils der Elastomerreibung in Anlehnung an MOORE & GEYER (1974) .....	42
Abbildung 30:	Kelvin-Voigt-Modell zur Darstellung der Hysterese- reibung in Anlehnung an KUMMER (1966).....	43
Abbildung 31:	Selbstaffine, fraktale Oberfläche in Anlehnung an PERSSON ET AL. (2005) .....	45
Abbildung 32:	Glättung der Rauheitsspitzen durch Einbettung von Schmiermittel in Anlehnung an PERSSON ET AL. (2005) .....	47
Abbildung 33:	Darstellung der Reibungs-/Schmierungszustände anhand der Stribeck-Kurve in Anlehnung an ANTONSSON & GROTE (2008).....	47
Abbildung 34:	Schmiermittelverteilung an der Kontaktfläche einer O-Ring-Dichtung .....	49



Abbildung 35:	Schematischer Kraftverlauf des Fügevorgangs einer Kolbendichtung .....	50
Abbildung 36:	Phasen des Fügekraftverlaufs in Anlehnung an REINHART & SIEBEN (2013) .....	51
Abbildung 37:	Kräfteparallelogramm der auf den O-Ring wirkenden Normalkraft .....	52
Abbildung 38:	Durch Tastschnittverfahren erzeugtes Messprotokoll einer technischen Oberfläche .....	53
Abbildung 39:	Binarisierte Abbildung der wahren Kontaktfläche eines O-Rings bei unterschiedlichen Verpressungsraten (engl. compression rate) in Anlehnung an OKAMURA ET AL. (2002) .....	54
Abbildung 40:	Veränderung des Kräfteparallelogramms der Normalkraft $F_N$ in Abhängigkeit vom Fasenwinkel $\alpha_i$ .....	55
Abbildung 41:	Qualitative Darstellung der kontribuierenden Komponenten der erforderlichen Fügekraft.....	56
Abbildung 42:	Auswahlkriterien für Prozesskennwerte .....	58
Abbildung 43:	Fügekraft als Prozesskennwert.....	59
Abbildung 44:	Ableich zwischen Soll- und Ist-Zustand des Prozesskennwerts .....	60
Abbildung 45:	Aufteilung der fixierten und flexiblen Stützpunkte entlang der Fügekurve .....	61
Abbildung 46:	Zustandsableich und Beurteilung zwischen Soll- und Ist-Wert des Prozesskennwerts am Beispiel der Fügekurve.....	63
Abbildung 47:	Systematisierte Vorgehensweise der statistischen Versuchsplanung in Anlehnung an SCHMITT & PFEIFER (2010) .....	66
Abbildung 48:	Darstellung der Einfluss-, Stör- und Zielgrößen eines Prozesses in Anlehnung an PETERSEN (1991).....	66
Abbildung 49:	Fehlerbaumanalyse einer O-Ring-Dichtverbindung in Anlehnung an SIEBEN & REINHART (2014) .....	69
Abbildung 50:	Auswirkung von Einflussgrößen auf den Fügekraftverlauf .....	72
Abbildung 51:	Veränderung der Antwortfläche bei Erweiterung des Polynoms in Anlehnung an SCHEFFLER (1986) .....	74
Abbildung 52:	Faktoren der Kategorie Konstruktion .....	76
Abbildung 53:	Faktoren der Kategorie O-Ring und Prozess .....	77

Abbildung 54:	Sinnvolle Wahl des Stufenabstands in Anlehnung an PETERSEN (1991).....	79
Abbildung 55:	Darstellung von Faktoren unterschiedlicher physikalischer Einheiten in einer Grafik durch Transformation.....	80
Abbildung 56:	Exemplarische Darstellung der Versuchsteile.....	84
Abbildung 57:	Versuchsstand (Aufbau und Komponenten).....	85
Abbildung 58:	Codierung der Komponenten zur Bauteil- identifizierung am Beispiel einer Nabe.....	86
Abbildung 59:	Ablaufdiagramm der Versuchsdurchführung.....	87
Abbildung 60:	Prinzipdarstellung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in Anlehnung an SORAVIA & ORTH (2000).....	89
Abbildung 61:	Wahrscheinlichkeitsnetz zum Test auf Normal- verteilung für die Messwerte von $F_{max}$ .....	90
Abbildung 62:	Box-Cox-Plot für die Messwerte von $F_{max}$ .....	92
Abbildung 63:	Verteilung der Messwerte von $F_{max}$ nach durchgeführter Transformation.....	93
Abbildung 64:	Schrittweise Regression der Zielgröße $\hat{y}_{F_{max}}$ .....	94
Abbildung 65:	Grafische Ermittlung von Ausreißern.....	95
Abbildung 66:	Wahrscheinlichkeitsdiagramm der Residuen von $\hat{y}_{F_{max}}$ .....	96
Abbildung 67:	Schematische Darstellung von Hetero- und Homoskedastizität.....	97
Abbildung 68:	Streudiagramm der Residuen über Modellschätzer für $\hat{y}_{F_{max}}$ .....	97
Abbildung 69:	Abweichungen eines Beobachtungswerts in Anlehnung an JANSSEN & LAATZ (2013).....	99
Abbildung 70:	ARG für Faktoren der Kategorie Konstruktion.....	102
Abbildung 71:	ARG für Faktoren der Kategorie O-Ring.....	103
Abbildung 72:	ARG für den Faktor Beschichtung an verschiedenen Positionen des Fügewegs.....	104
Abbildung 73:	Zusammenhang zwischen Innendurchmesser und Kontaktfläche eines O-Rings.....	105
Abbildung 74:	ARG für Faktoren der Kategorie Prozess.....	106
Abbildung 75:	Einfluss der Winkelabweichung auf die Querschnitts- verformung des O-Rings.....	107

Abbildung 76:	ARG für Faktoren der Kategorie Fügehilfsmittel .....	108
Abbildung 77:	Schematische Darstellung eines Versuchsraums mit Stützpunkten und Validierungsversuchen in Anlehnung an GUNDLACH (2004) .....	110
Abbildung 78:	Abgleich der Modell- und Messwerte für Kolbendichtung 1 .....	112
Abbildung 79:	Abgleich der Modell- und Messwerte für Kolbendichtung 2 .....	113
Abbildung 80:	Abgleich der Modell- und Messwerte für Kolbendichtung 3 .....	114
Abbildung 81:	Modell-ANOVA-Tabelle für das Modell $F_{max}$ .....	115
Abbildung 82:	Darstellung der Beschädigungsstufen in Abhängigkeit von der maximalen Fügekraft .....	118
Abbildung 83:	Auswirkung der Beschädigungsart auf den Fügekraftverlauf .....	119
Abbildung 84:	Versuchsergebnis bei identischer Parametrierung unter Einsatz einer Bohrungskomponente aus Acrylglas .....	120
Abbildung 85:	Bilderfolge der Deformation und Beschädigung eines O-Rings an der Einführfase .....	121
Abbildung 86:	Polynomische Verlaufskurven der Fügekraft in Abhängigkeit von der Fügegeschwindigkeit (REINHART & SIEBEN 2013) .....	122
Abbildung 87:	Fehlerhafte Annahme des Modellansatzes bei großem Versuchsraum und weiten Faktorstufen .....	123
Abbildung 88:	Ergebnis der Zielgrößenoptimierung (Response-vs.-Predictors-Graph) .....	129
Abbildung 89:	Prototypische Montagezelle zur Automatisierung der Kolbendichtungsmontage .....	130
Abbildung 90:	Interface der Zentralsteuerung .....	131
Abbildung 91:	Empirische Zehnerregel in Anlehnung an SCHMITT & PFEIFER (2010) .....	133

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Elemente der Fehlerbaumanalyse nach DIN 25424 (1981) und HAASL ET AL. (1981) .....	68
Tabelle 2:	Detaillierung der auftretenden Beschädigungsstufen .....	73
Tabelle 3:	Übersicht der Faktoren .....	75
Tabelle 4:	Berechnung des adjustierten Bestimmtheitsmaßes für $\hat{y}_{F_{max}}$ .....	100
Tabelle 5:	Parameter der Validierungsversuche .....	111
Tabelle 6:	Übersicht der Faktorstufen des Referenzbauteils und zu berücksichtigender Faktoren der Zielgrößenoptimierung .....	127
Tabelle 7:	Zusammenfassung des Optimierungsergebnisses.....	128

**Abkürzungsverzeichnis**

AC	Alternating current (Wechselstrom)
ANOVA	Analysis of Variance
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
ARG	Adjusted Response Graph
CIP	Cured-in-Place
CVD	Chemical Vapour Deposition
df	Degrees of freedom (deutsch: Freiheitsgrad)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DM	Durchmesser
DMS	Dehnmessstreifen
DoE	Design of Experiments
€	Euro
EN	Europäische Norm
EHL	Elastohydrodynamic Lubrication
engl.	englisch
EPDM	Ethen-Propen-Dien-Kautschuk
e.V.	eingetragener Verein
F	Force (Kraft)
FEM	Finite-Elemente-Methode
FG	Freiheitsgrad
FIP	Form-in-Place
FKM	Fluor-Kautschuk
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse
FTA	Fault-Tree-Analysis

## Abkürzungsverzeichnis

---

F-A	Auftragsort Fügemittel (Faktor)
F-v	Viskosität (Faktor)
Gl.	Gleichung
GLT	Großladungsträger
HEP	Human Error Probability
$H_0$	Nullhypothese
$H_1$	Alternativhypothese
Im	Imaginärteil
ISO	International Organization for Standardization
KLT	Kleinladungsträger
KMS	Kraft-Momenten-Sensor
K-C	Verpressung (Faktor)
K-R	Faserrundung (Faktor)
$K-R_a$	Oberfläche (Faktor)
$K-\alpha$	Fasewinkel (Faktor)
LMM MA	Leitmerkalmethode Manuelle Arbeitsprozesse
LoF	Lack-of-Fit
Log	Logarithmische Transformation
m	Meter
$\mu\text{m}$	Mikrometer
mm	Millimeter
MP	Messpunkt
N	Newton
n. w. s.	nicht weiter spezifiziert

OFAT	One-Factor-at-a-Time
O-B	Beschichtung O-Ring (Faktor)
O-d1	Innendurchmesser O-Ring (Faktor)
O-d2	Schnurdurchmesser O-Ring (Faktor)
O-H	Härte O-Ring (Faktor)
O-M	Material O-Ring (Faktor)
physiolog.	physiologisch
%	Prozent
PSF	Performance Shaping Factors
PTFE	Polytetrafluorethylen
P-p	Positionsabweichung (Faktor)
P-v	Fügeschwindigkeit (Faktor)
P-w	Winkelabweichung (Faktor)
P-x	Fügeweg (Faktor)
Re	Realteil
SAE	Society of Automotive Engineers
SP	Stützpunkt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WLF	William-Landel-Ferry

# Verzeichnis der Formelzeichen

### Große lateinische Buchstaben

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$A_k$	$m^2$	Kontaktfläche
$E$	$N/m^2$	Elastizitätsmodul
$E^*$	$N/m^2$	Komplexer Elastizitätsmodul
$E'$	$N/m^2$	Speichermodul
$E''$	$N/m^2$	Verlustmodul
$E_d$	J	Dissipierte Energie
$E_i$	$N/m^2$	Elastizitätsmodul des i-ten Elements
$E(\varepsilon)$	-	Erwartungswert der Residuen
$F_{Adh}$	N	Adhäsionsanteil der Reibungskraft
$F_{Füge}$	N	Fügekraft
$F_{Hyst}$	N	Hystereseeanteil der Reibungskraft
$F_i$	N	Bindungskraft einer Molekularbindung
$F_{max}$	N	Maximale Fügekraft
$F_{Normal}$	N	Normalkraft
$F_{Nx}$	N	Normalkraftanteil in x-Richtung
$F_{Nz}$	N	Normalkraftanteil in z-Richtung
$F_{Reibung}$	N	Reibungskraft
$FG$	-	Freiheitsgrad
$HEP$	-	Human Error Probability
$K$	-	Anzahl Koeffizienten
$L$	m	Charakteristische Wegstrecke



$N$	-	Anzahl der Versuche
$N_{Fehler}$	-	Gesamtanzahl möglicher Fehler
$N_m$	-	Summe der Molekularbindungen
$N_{opt}$	-	Optimale Versuchsanzahl
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$R^2_{adj}$	-	Adjustiertes / korrigiertes Bestimmtheitsmaß
$R_a$	$\mu\text{m}$	Mittenrauwert
$R_z$	$\mu\text{m}$	Mittlere Rautiefe
$SG_{in/out}$	-	Signifikanzgrenzen der schrittweisen Regression
$SS_{LoF}$	-	Varianz verursacht durch einen Modellanpassungsfehler
$SS_{p.e.}$	-	Varianz verursacht durch den reinen Fehler
$SS_{Reg}$	-	Durch Regressionsmodell erklärte Varianz
$SS_{Res}$	-	Durch Regressionsmodell nicht erklärte Varianz
$SS_{Tot}$	-	Gesamtvarianz
$T_g$	K	Glasübergangstemperatur
$W$	J	Arbeit

**Kleine lateinische Buchstaben**

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$a$	m	Halbe Höhe eines Rauheitshügels
$b_0$	-	Regressionskonstante
$b_i$	-	Regressionskoeffizient
$b_k$	m	Kontaktbreite
$c$	-	Anzahl Realisierungen eines Versuchspunkts

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$d_1$	mm	Innendurchmesser O-Ring
$d_2$	mm	Schnurdurchmesser O-Ring
$e$	-	Eulersche Zahl
$k$	-	Anzahl der Faktoren
$n$	-	Stichprobenumfang
$n_{Fehler}$	-	Anzahl der beobachteten Fehler
$p$	N/m <sup>2</sup>	Betriebsdruck
$p_d$	N/m <sup>2</sup>	Kontaktpressung
$p_v$	N/m <sup>2</sup>	Initialpressung einer O-Ring-Dichtung
$r$	-	Anzahl wiederholt durchgeführter Versuche
$r_i$		i-te Versuchswiederholung
$s_R$	-	Standardabweichung der Regression (Prognosegenauigkeit)
$t$	s	Zeit
$v_F$	m/s	Fügeschwindigkeit
$x_{fix}$	mm	Fixierte Stützpunktposition
$x_{flex}$	mm	Flexible Stützpunktposition
$x_{Fmax}$	mm	Position der maximalen Fügekraft
$x_i$	-	Polynomvariable
$x_{mittel}$	-	Mittlere Faktorstufe
$x_{oben}$	-	Obere Faktorstufe
$x_{transformiert}$	-	Transformierte Faktorstufe
$x_{unten}$	-	Untere Faktorstufe
$x_{Zentrum}$	-	Kalkulatorisches Zentrum einer Faktorstufe
$y$	-	Messwert

$\bar{y}$	-	Mittelwert der Messwerte
$\hat{y}$	-	Regressionswert
$z$	m	Deformationsweg
$\dot{z}$	m/s	Deformationsgeschwindigkeit
$z_0$	m	Vorspannung

**Griechische Buchstaben**

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha_i$	rad	Fasenwinkel
$\alpha_s$	-	Signifikanzniveau
$\beta_0$	-	Polynomkonstante
$\beta_i$	-	Polynomkoeffizient
$\delta$	rad	Verlustwinkel
$\delta_R$	m	Distanz verursacht durch Mikrorauheiten
$\varepsilon$	-	Dehnung
$\varepsilon_{\text{Dämpfer}}$	-	Dehnung eines Dämpfers
$\varepsilon_{\text{Feder}}$	-	Dehnung einer Feder
$\varepsilon_i$	-	Residuum am i-ten Datenpunkt
$\dot{\varepsilon}$	-	Dehnungsgeschwindigkeit
$\hat{\varepsilon}$	-	Komplexe Dehnung
$\zeta$	-	Vergrößerungsstufe
$\eta$	Ns/mm <sup>2</sup>	Dynamische Viskosität
$\lambda$	m	Wellenlänge
$\lambda_T$	-	Transformationsparameter

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$\mu_{\text{dynamisch}}$	-	Dynamischer Reibungskoeffizient
$\mu_{\text{statisch}}$	-	Statischer Reibungskoeffizient
$\pi$	-	Kreiszahl Pi
$\sigma$	N/m <sup>2</sup>	Spannung
$\sigma_{\text{Dämpfer}}$	N/m <sup>2</sup>	Spannung an einem Dämpfer
$\sigma_{\text{Feder}}$	N/m <sup>2</sup>	Spannung an einer Feder
$\sigma_{\text{Hooke}}$	N/m <sup>2</sup>	Hookesche Spannung
$\sigma_{\text{Newton}}$	N/m <sup>2</sup>	Newtonsche Spannung
$\hat{\sigma}$	N/m <sup>2</sup>	Komplexe Spannung
$\tau$	s	Retardationszeit
$\bar{\tau}$	s	Relaxationszeit
$\omega$	1/s	Anregungsfrequenz

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation der Arbeit

Internationale Märkte unterliegen einem stetigen Wandel. Unternehmen müssen sich dabei kontinuierlich auf geänderte Rahmenbedingungen, verursacht durch diverse Megatrends, einstellen. Hierzu zählen u.a. eine fortschreitende Globalisierung, eine Dynamisierung der Produktlebenszyklen sowie der demographische Wandel (ABELE & REINHART 2011). Eine starke Diversifizierung der Kundenwünsche, eine zunehmende Internationalisierung und Marktsättigung sowie eine daraus resultierende Verschärfung des Wettbewerbs erfordern eine hohe Innovationsdynamik hinsichtlich Produkten und Produktionsprozessen (WIENDAHL 2004). Qualität ist dabei zu einem (mit-)entscheidenden Erfolgsfaktor geworden und rückt zunehmend in den Vordergrund unternehmerischen Handelns (WESTKÄMPER 1999, LINß 2011). Kunden erwarten heute bei niedrigem Preis und schneller Lieferzeit gleichzeitig höchste Produktqualität (KLETTI & SCHUMACHER 2011).

Das Deutsche Institut für Normung e.V. definiert den Begriff *Qualität* als „*Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale (...) Anforderungen (...) erfüllt*“ (DIN EN ISO 9000 2005). Dieser Definition folgend entspricht *Produktqualität* dem Erfüllungsgrad der impliziten und expliziten Forderungen des Kunden an das Produkt (SCHMITT & PFEIFER 2010). Hochwertige Produkte realisieren eine hohe technische Zuverlässigkeit und beeinflussen somit zukünftige Kaufentscheidungen (LINß 2011).

Eine singuläre Betrachtung der Produktqualität ohne Berücksichtigung des Produktentstehungsprozesses ist jedoch nicht möglich. Der moderne Qualitätsbegriff umfasst daher nicht nur die Beschaffenheit der Produkte, sondern bezieht auch die Herstellungsprozesse mit ein. Hohe Produktqualität setzt eine ebenso hohe Prozessqualität voraus (HUMMEL & MALORNY 2008, SCHMITT & PFEIFER 2010, LINß 2011). In Anlehnung an die oben aufgeführte Definition wird Prozessqualität hier als Grad der Erfüllung aller an den Prozess gestellten Anforderungen verstanden. Eine hohe Prozessqualität zeichnet sich durch positive Effekte auf die Maschinenauslastung und Materialdurchlaufzeit aus. Daraus resultiert eine Reduzierung erforderlicher Puffer und kostenintensiver Nacharbeit (HUMMEL & MALORNY 2008).

## 1.1 Motivation der Arbeit

---

Zur Erreichung von Qualitätszielen in produzierenden Unternehmen sind Maßnahmen in allen Firmen- und Fertigungsbereichen umzusetzen. Als letztes Glied in der Fertigungskette nimmt die Montage aufgrund des hohen Wertschöpfungsanteils eine besondere Rolle ein (ABELE & REINHART 2011). Durch die systematische Ausführung definierter Füge-, Handhabungs- und Kontrollvorgänge entsteht aus einzelnen Komponenten ein Produkt höherer Komplexität (WARNECKE ET AL. 1975, LÖHR 1977, REINHART & SCHNEIDER 1996). Dabei stellt die prozesssichere Ausführung von Montageabläufen aufgrund erhöhter Produktkomplexität und -qualität eine zentrale Herausforderung der Montageplanung dar (FELDMANN ET AL. 2004). Ausschuss und Nacharbeit mindern den Wertschöpfungsanteil der Montage und verursachen hohe Folgekosten. Als Gegenmaßnahme werden häufig aufwendige Prüfprozesse in den Fertigungsablauf integriert. Eine nachgelagerte Prüfung erlaubt dabei nur die Detektion von Fehlern, nicht jedoch die Eliminierung von deren Ursachen und damit deren nachhaltige Abstellung. Daher erlangt in der Industrie die Erkenntnis immer mehr an Bedeutung, „(...) dass Qualität nur erzeugt, nicht aber erprüft werden kann“ (SCHMITT & PFEIFER 2010).

Um Qualität erzeugen zu können, müssen Unsicherheiten im Fertigungsprozess systematisch erkannt und beseitigt werden. Gerade der Bereich der Montage, das Sammelbecken aller im Vorfeld auftretenden technischen und organisatorischen Fehler (REINHART & SCHNEIDER 1996), stellt eine Herausforderung dar, wenn es zur Planung und Realisierung von qualitätssteigernden Maßnahmen kommt. Dies ist neben der Komplexität der Produkte vor allem auf einen hohen Anteil an manuell durchgeführten Prozessen zurückzuführen. Die Montage bindet ca. 25 % der Mitarbeiterkapazität in der Fertigung (REINHART & SCHNEIDER 1996). Gerade bei manuell durchgeführten Tätigkeiten rückt der Werker in den Fokus des Fertigungsprozesses (LOTTER 2005). Geringe Fehlerquoten lassen sich daher nur durch die Minimierung menschlichen Fehlverhaltens realisieren (TRÄGER 2008). In diesem Kontext sind besonders kritische Montageprozesse kontinuierlich hinsichtlich ihres Automatisierungspotenzials zu bewerten, um eine durchgängig hohe Prozessqualität zu erzielen. Der Wunsch nach einer Optimierung von Prozessen und Produkten fungiert hier als Treiber von Automatisierungsbemühungen. Ziel ist die Unterstützung der Werker bei qualitätsbestimmenden Montageprozessen durch selektive Automatisierung (REINHART & SIEBEN 2011).

Besonderes Augenmerk gilt dabei der Montage von Dichtungen. Ausfälle von Dichtungsverbindungen verursachen jährlich direkte und indirekte Folgekosten in Millionenhöhe (RICHTER 2010). Die Konsequenzen können bis hin zum erheb-

lichen Imageverlust für die produzierenden Unternehmen reichen. Eine Vielzahl der Ausfälle ist dabei auf Montagefehler zurückzuführen (RICHTER 2010).

Um die Produktqualität sicherzustellen, sind der Montage daher meist Funktions- und Dichtheitsprüfungen nachgeschaltet. Werden jedoch erst in diesem fortgeschrittenen Abschnitt der Fertigung Fehler detektiert, hat dies einen hohen Rückbauaufwand des Produkts oder eine Deklaration als Ausschuss zur Folge (REINHART & MILBERG 1997). Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von Elastomerdichtungen und temporären Abdichteffekten von hochviskosen Fügehilfsmitteln besteht zudem die Gefahr, dass defekte Dichtungen Prüfprozesse undetektiert durchlaufen (REINHART & SIEBEN 2013). Bei der Montage von Dichtungen ist demnach höchste Prozessqualität und eine Überwachung des Montageprozesses erforderlich, um Produktausfälle oder hohe Folgekosten zu verhindern (REINHART & MILBERG 1997).

### 1.2 Zielsetzung und Betrachtungsrahmen

O-Ring-Dichtungen zählen zu den meist verbauten Dichtungen im Maschinenbau, der Fluidtechnik und in der Automobilindustrie (WEIß 1999). Dennoch existieren kaum fundierte Kenntnisse über qualitätsrelevante Vorgänge und Parameter, die das Montageergebnis von O-Ring-Kolbendichtungen beeinflussen. Dies bedingt eine erfahrungsbasierte, nicht aber eine qualitätsorientierte Auslegung der Montageprozesse. Schwankungen der Produktqualität aufgrund von Unsicherheiten in der Montage können daraus resultieren und verursachen ggf. schwerwiegende Folgen für das produzierende Unternehmen.

Ziel dieser Arbeit ist daher der Aufbau eines grundlegenden Prozessverständnisses für die Montage von O-Ring-Kolbendichtungen und die Entwicklung eines Überwachungskonzepts zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität. Abweichungen und Fehler können so bereits während der Entstehung detektiert werden. Die Qualitätskontrolle erfolgt prozessintegriert. Eine Weitergabe fehlerbehafteter Bauteile an nachfolgende Arbeitsschritte und die daraus resultierenden Nachteile können vermieden werden. Die zur Beurteilung der Montagequalität erforderlichen Daten werden sensorisch und prozessbegleitend erfasst. Prozessüberwachung wird dabei als Methode verstanden, wesentliche Merkmale des Fügeprozesses aufzunehmen und daraus entsprechende Schlüsse über die erzeugte Produktqualität zu ziehen (KUHLE 2014). Die Montagequalität kann demnach als Grad der Übereinstimmung von erfassten und erwarteten Prozess-

merkmalen bestimmt werden. Eine Überwachung von Fügeprozessen stellt jedoch aufgrund der großen Anzahl an Wechselwirkungen, die zwischen Produkt und Prozess berücksichtigt und in die Schlussfolgerung mit eingebunden werden müssen, eine große Herausforderung dar (WISBACHER 1992). Der Betrachtungsrahmen dieser Arbeit wird dabei auf Kolbendichtungen mit Elastomerdichtringen (O-Ring) als einen der meist eingesetzten Dichtungstypen gelegt.

### 1.3 Vorgehensweise

Das Vorgehen dieser Arbeit orientiert sich an der Zielsetzung aus Kapitel 1.2. Der Aufbau der einzelnen Kapitel ist in Abbildung 1 dargestellt. Im ersten Abschnitt erfolgt eine thematische Einführung in die aktuelle Situation der produzierenden Unternehmen. In der Ausgangssituation werden Defizite hinsichtlich Qualität und Wertschöpfung der Montage von Dichtungen beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt die Definition der Zielsetzung dieser Arbeit. Abschließend wird die daraus abgeleitete Vorgehensweise aufgezeigt.

Ein grundlegendes Verständnis für Kolben- bzw. O-Ring-Dichtungen wird im zweiten Kapitel vermittelt. Es erfolgt eine Vorstellung des Untersuchungsgegenstands *O-Ring* in allgemeiner Weise. Relevante technische Attribute werden im Detail beleuchtet und ein Überblick zu gängigen Montageverfahren von Kolbendichtungen gegeben. Darauf aufbauend wird der Handlungsbedarf detailliert aufgeschlüsselt und beschrieben. Eine kritische Bewertung des Werkereinflusses zeigt die daraus resultierenden Unsicherheiten für den Montageprozess auf. Die Relevanz einer hohen Montagequalität verdeutlicht sich durch die Darstellung möglicher Auswirkungen beschädigter O-Ring-Dichtungen. Beschädigungsmechanismen, die aufgrund unzureichender Prozessüberwachung gängiger Montageverfahren an O-Ringen auftreten können, werden vorgestellt.

Zur wissenschaftlichen Aufbereitung eines technischen Komplexes ist ein tiefgreifendes System- und Prozessverständnis erforderlich. Hierfür wird in Kapitel 3 zunächst das relevante System abgegrenzt und die systemrelevanten Komponenten werden im Detail beschrieben. Im Fokus steht hierbei das Materialverhalten von Elastomerdichtungen. Modelle der Viskoelastizität von Elastomeren und deren Auswirkungen auf das Reibungsverhalten von O-Ringen werden beschrieben. Eine logische Verknüpfung zwischen materialbedingten Reibungscharakteristiken des Elastomerdichtrings und dem idealtypischen Kraftverlauf der Fügeoperation von Kolbendichtungen schließt das Kapitel ab.



In Kapitel 4 erfolgt die Darstellung des Überwachungsmodells des Fügeprozesses. Die Überwachungsgröße sowie ein Ansatz zur modelltechnischen Beschreibung dieser Größe wird vorgestellt. Der erforderliche Abgleich des Soll- und Ist-Zustands wird im Rahmen des Überwachungskonzepts beschrieben.

Die Umsetzung des Modellkonzepts erfolgt in Kapitel 5. Zum methodisch abgesicherten Modellaufbau werden wesentliche Elemente der statistischen Versuchsplanung herangezogen. Die Ausarbeitung basiert auf den Anforderungen, die an das Modell gestellt werden. Hierzu zählen die Bestimmung zu berücksichtigender Einflussparameter sowie die eigentliche Aufstellung des Versuchsplans. Entsprechend der gewählten Versuchsstrategie wird der Versuchsplan umgesetzt. Die Auswertung nimmt einen exponierten Teil dieser Arbeit ein. Die Regressionsanalyse umfasst die mathematische Erstellung der Prognosemodelle. Die Beachtung und Einhaltung statistisch abgesicherter Vorgehensweisen ist hier von besonderer Relevanz, um eine maximale Prognosefähigkeit zu gewährleisten. Gleichzeitig ermöglichen die umfangreichen Versuchsdaten eine detaillierte Analyse prozessrelevanter Einflussgrößen.

Um die Aussagefähigkeit und Konsistenz eines Modells sicherzustellen, ist vor dem ersten Praxiseinsatz eine Verifizierung und Validierung durchzuführen. In Kapitel 6 erfolgt die Verifizierung durch Kontrolle der Konsistenz und der formalen Korrektheit des Modells. Die Validierung wird anhand anwendungsspezifischer sowie industrierelevanter Bestätigungsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse der Validierung werden im Rahmen des Kapitels abschließend interpretiert und die Einsatzfähigkeit des Modells diskutiert.

Das Ergebnis der durchgeführten Regressionsanalyse bietet Beschreibungsmodelle der Zielgrößen. Es wird angestrebt, für jede Zielgröße, abhängig von der Zielsetzung, einen optimalen Einstellbereich der Faktoren zu ermitteln. Das Vorgehen und eine exemplarische Kalkulation werden im Rahmen des Kapitels 7 beschrieben.

Als Teil der Schlussbetrachtung erfolgt eine technische und wirtschaftliche Bewertung für den Serienmontageprozess. Der Einsatz des entwickelten Überwachungsmodells erfordert die Diversifizierung von vorrangig manuellen Montageprozessen hin zum Einsatz von automatisierten Montagezellen. Unter Berücksichtigung unternehmerischer Aspekte wird ein automatisiertes Montagekonzept entwickelt und vorgestellt. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf resultierende Handlungsfelder und Anknüpfungspunkte für weiterführende Arbeiten.

<b>Kapitel 1: Einleitung</b>	
Motivation	
Definition der Zielsetzung und Vorgehensweise	
<b>Kapitel 2: Stand der Technik</b>	
Einführung in die Dichtungstechnik	
Detailbetrachtung von Kolbendichtungen mit O-Ring	
Übersicht zu Montageverfahren für Kolbendichtungen	
Ursachen und Auswirkungen von Montagefehlern	
<b>Kapitel 3: Systemanalyse</b>	
Systembeschreibung der Kolbendichtung	
Materialanalyse und Reibungsmodelle von Elastomeren	
Detailanalyse der Fügephasen des Montageprozesses	
<b>Kapitel 4: Prozessüberwachungskonzept</b>	
Entwicklung des Überwachungskonzepts	
Definition des Zustandsabgleichs und relevanter Grenzwerte	
<b>Kapitel 5: Entwicklung eines empirischen Prognosemodells</b>	
Aufbau und Durchführung des Versuchsplans	
Auswertung der Versuche	
Modellierung des Prognosemodells	Analyse der Einflussfaktoren
<b>Kapitel 6: Verifizierung und Validierung des Prognosemodells</b>	
Durchführung der formalen Verifizierung	
Validierung durch Bestätigungsversuche	
Ergebnisinterpretation	
<b>Kapitel 7: Zielgrößenoptimierung durch Modellanwendung</b>	
<b>Kapitel 8: Schlussbetrachtung</b>	

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik

Die Aufgabe einer Dichtung besteht darin, zwei Räume mit unterschiedlichen Drücken und Medien gegeneinander abzuschließen (HABERHAUER & BODENSTEIN 2011). Nach GAWLINSKI (2007) ist die Funktion noch weiter gefasst und liegt zudem im Schutz der Umwelt vor Leckage und im Schutz der Maschine vor dem Eindringen von Verschmutzungen. Die Dichtfunktion wird durch Dichtungselemente realisiert. Diese können je nach Anwendungszweck in verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Tritt eine Relativbewegung zwischen dem Dichtkörper und der Dichtfläche auf, wird dies als dynamische Anwendung bezeichnet. Eine starre Verbindung ist als statische Anwendung definiert. In Abhängigkeit von der Berührungsart kann eine Klassifizierung in berührungsfreie und berührende sowie lösbare und unlösbare Dichtungen erfolgen (MATEK ET AL. 2011). Abbildung 2 zeigt die Zuordnung gängiger Dichtungssysteme.

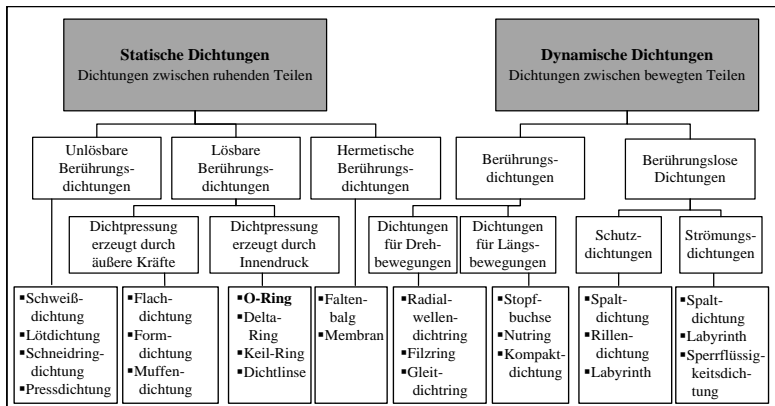


Abbildung 2: Zuordnung gängiger Dichtungssysteme  
in Anlehnung an MATEK ET AL. (2011)

Zu den meist verwendeten Dichtungen im Maschinenbau wie auch in der Automobilindustrie gehören O-Ringe (TIETZE 1999). O-Ringe sind aus elastischem Werkstoff (meist Elastomeren) hergestellte Runddichtringe mit kreisförmigem Querschnitt (SCHMITT 1987). Sie zählen zu den berührenden, lösbaren Dichtungen und werden vorwiegend bei statischen Anwendungen eingesetzt. O-Ringe

## 2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik

sind je nach Einbauart und Nutanordnung als Kolben- oder Stangendichtung ausgeführt. Ist ein axialer Einbau erforderlich, wird der Dichtungsfall als Flanschdichtung bezeichnet (vgl. Abbildung 3).

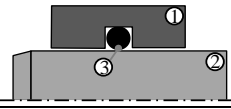
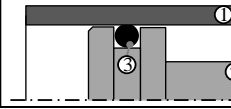
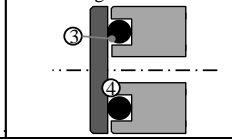
Stangendichtung	Kolbendichtung	Flanschdichtung
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Radiale Verpressung des O-Rings</li> <li>▪ Nut in Nabe</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Radiale Verpressung des O-Rings</li> <li>▪ Nut in Welle</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Axiale Verpressung des O-Rings</li> </ul> 
① Nabe      ② Welle	③ O-Ring	④ Flanschverbindung

Abbildung 3: Einbauarten einer O-Ring-Dichtung

Bei einer Vielzahl technischer Anwendungen, vor allem im Bereich des Motorenbaus der Automobilindustrie, ist die Kolbendichtung die häufigste Einbauart. Dies zeigt eine eigenständige Analyse von mehr als 400 O-Ring-Dichtverbindungen in unterschiedlichen Fahrzeugaggregaten. Über 90 % der Dichtungsfälle werden als statische Kolbendichtung ausgeführt. Vorwiegend als Steckverbindungen dienen sie zur Abdichtung von Sensoren, medienführenden Rohren, Stutzen etc. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Analyse sowie typische Anwendungsfälle von O-Ring-Kolbendichtungen. Aufgrund der hohen Bedeutung dieser Einbauart werden im weiteren Verlauf der Arbeit ausschließlich statische Kolbendichtungen betrachtet.

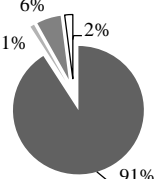


Ergebnis Dichtungsanalyse	Beispiele Kolbendichtungen	
	Kühlwasserrohr	Sensor
 <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kolbendichtung</li> <li>■ Stangendichtung</li> <li>■ Flanschdichtung</li> <li>□ weitere</li> </ul>		

Abbildung 4: Verteilung der Dichtungsfälle in Fahrzeugaggregaten und Beispielanwendungen

Neben vielen wirtschaftlichen Vorteilen (geringe Beschaffungskosten, internationale Verfügbarkeit etc.) zeigen Elastomerrunddichtungen hervorragende Dichtungseigenschaften. Sie zeichnen sich durch eine hohe Elastizität, ein geringes Kriech- und Relaxationsverhalten, eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Abrasion, ein hohes Maß an Impermeabilität, eine sehr gute Beständigkeit gegen verschiedenste Medien und vor allem durch eine Einsatzfähigkeit bei Drücken von bis zu 1.000 bar (und mehr) aus (GAWLINSKI 2007, MATEK ET AL. 2011).

Die Variabilität des Einsatzbereichs ist auf eine selbstverstärkende (automatische) Dichtwirkung des Elastomerrings zurückzuführen. In der Einbaulage wird dem Elastomer aufgrund der konstruktiven Auslegung des Einbauraums und des resultierenden Übermaßes des Dichtrings eine definierte Verformung aufgezungen. Dadurch entsteht eine Initialpressung ( $p_v$ ) an der Kontaktfläche zwischen O-Ring, Nabeninnenseite und Nutgrund. Der auftretende Betriebsdruck ( $p$ ) an der Dichtstelle überlagert sich mit dem vorherrschenden Initialdruck. Daraus resultiert eine zum Betriebsdruck proportional ansteigende Pressung ( $p_d$ ) an der Kontaktfläche des O-Rings (vgl. Abbildung 5). Dieser Effekt wird durch die Werkstoffeigenschaften der Inkompressibilität und Elastizität des Elastomers hervorgerufen. Die Dichtwirkung ist gewährleistet, solange der Betriebsdruck am O-Ring geringer ist als der Druck an jeder Stelle der Kontaktfläche (GOHL 1991).

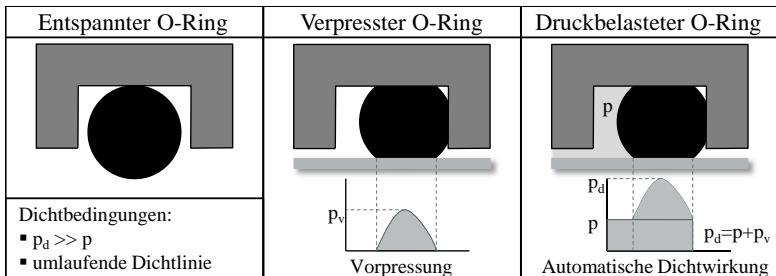


Abbildung 5: *Pressungsverteilung eines entspannten (links), verpressten (Mitte) und druckbelasteten (rechts) O-Rings in Anlehnung an ALBERS ET AL. (2012)*

Bereits bei geringen Kräften passt sich der O-Ring an makroskopische Unebenheiten der Kontaktfläche an und verschließt auf diese Weise Leckagekanäle. Durch das Kriechverhalten des Elastomers erfolgt mit zunehmender Stillstandszeit auch ein Eindringen der Dichtung in die Täler der Mikrounebenheiten (SCHMITT 1987). Eine weitere Verbesserung der Dicht-

## 2.1 Grundlagen der Dichtungstechnik

fähigkeit ist die Folge. Abbildung 6 zeigt die Anpassung des Elastomers an die Oberfläche einer metallischen Gegenfläche nach kurzer und längerer Anpresszeit.

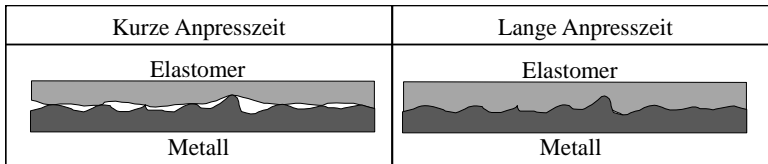


Abbildung 6: Anpassung des Elastomers an die Kontaktfläche des Dichtungspartners in Anlehnung an SCHMITT (1987)

Trotz guter Abdichteigenschaften von O-Ringen können Leckagen auftreten. Dies ist häufig nicht auf ein Versagen des Dichtkörpers, sondern auf ein Versagen des Dichtverbunds zurückzuführen. Zwei Leckagearten können differenziert werden (vgl. Abbildung 7):

- *Strömungsleckage* (Primärleckage) tritt auf, wenn es zu einer ungewollten viskosen Strömung des abzudichtenden Mediums zwischen dem Dichtkörper und der Gegenfläche kommt. Unregelmäßigkeiten auf der Dichtfläche (z.B. Riefen auf der Nabeninnenseite, Beschädigungen am O-Ring etc.) können einen Leckagestrom verursachen.
- *Diffusionsleckage* (Sekundärleckage) tritt aufgrund der Permeabilität von Elastomeren auf. Diffusion entsteht durch Konzentrationsunterschiede an der Dichtung. Die Differenz verursacht einen Stofftransport in Richtung abnehmender Konzentration (KOCKELMANN 1996). Die aus der Permeabilität des Dichtkörpers resultierende Leckage ist bei richtiger Dichtungsauswahl sehr gering, lässt sich jedoch nicht vollständig vermeiden.

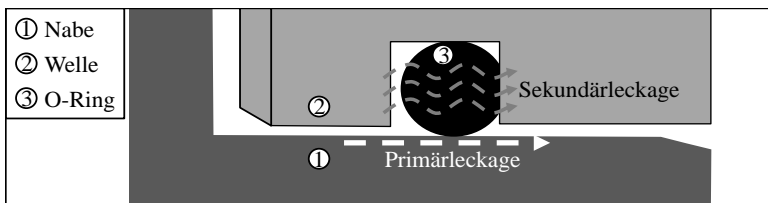


Abbildung 7: Primär- und Sekundärleckage an einer O-Ring-Dichtung

Absolute Dichtheit ist nicht realisierbar. Im Kontext von technischen Produkten wird daher der Begriff der *technischen Dichtheit* verwendet. Dabei wird eine für den Anwendungsfall zulässige Leckagerate definiert (TIETZE 2005). In DIN EN 13555 (2005) werden allgemeine Leckageklassen in Abhängigkeit von der Leckagerate beschrieben.

Die Abdichtfähigkeit von Elastomeren hängt weitestgehend von deren Materialkennwerten ab. Wie bereits erläutert, wirken sich Inkompressibilität, Elastizität sowie das Kriechverhalten positiv auf die Dichtfunktion aus. Gleichzeitig lassen sich negative Eigenschaften ebenfalls auf Materialkennwerte zurückführen. Elastomere weisen eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit auf. Das Materialverhalten variiert mit der Temperatur. Sinkt die Temperatur unter die sog. Glasstemperatur, versprödet das Material zunehmend. Bei hohen Temperaturen wird das Elastomer weicher und es kann ebenfalls zu einer Beeinflussung des Dichtverhaltens kommen (TIETZE 2003). In beiden Zuständen besteht die Gefahr, dass der Kontaktdruck des Dichtrings unter den des Betriebsdrucks fällt und das abzudichtende Medium ungehindert austreten kann. Änderungen der Materialkennwerte können zudem aufgrund von Alterungseffekten auftreten (GAWLINSKI 2007). Eine detaillierte Analyse der Materialeigenschaften und deren Auswirkungen auf das Reibverhalten von Elastomeren erfolgt in Kapitel 3.3 und in Kapitel 3.4.

## 2.2 Montageverfahren für Kolbendichtungen

### 2.2.1 Manuelle Montage

WARNECKE ET AL. (1975) definieren manuelle Montageeinrichtungen als „ (...) *einzelne, nicht verkettete Montagearbeitsplätze (...), bei denen die Montagefunktionen entweder ausschließlich oder überwiegend vom Menschen ausgeführt werden. Er kann hierbei technische Einrichtungen und Hilfsmittel benützen, die seine Arbeit erleichtern und die Leistungsfähigkeit erhöhen*“.

Manuelle Prozesse zum Fügen von Kolbendichtungen sind in der industriellen Montage weit verbreitet. In der einschlägigen Fachliteratur existieren kaum Angaben zum Automatisierungsgrad der Montage von Kolbendichtungen. In einer eigenständig durchgeführten Analyse wurden die Montageprozesse von über 400 Dichtungsfällen an mehreren Montagelinien für Verbrennungsmotoren untersucht. Das Ergebnis der Analyse hinsichtlich des Automatisierungsgrads ist ein-

## 2.2 Montageverfahren für Kolbendichtungen

deutig. Unabhängig von der Komplexität des Motors sowie vom Automatisierungsgrad der Montagelinie werden keine voll automatisierten Vorrichtungen zur Montage von Kolben-, Stangen- oder Flanschdichtungen eingesetzt. Bei fast allen analysierten Kolbendichtungen wurde das Bauteil manuell positioniert und die erforderliche Fügekraft durch den Werker aufgebracht. In wenigen Fällen wurde zur Montage des Bauteils ein mechanisiertes Hilfsmittel, wie z.B. eine Kniehebelpresse, unterstützend eingesetzt.

Der Montageablauf von Kolbendichtungen wird nachfolgend schrittweise beschrieben (vgl. Abbildung 8). Die zu montierenden Bauteile werden dem Werker mit bereits vormontierten O-Ringen am Montagearbeitsplatz bereitgestellt. Die Bauteile sind meist in Kleinladungsträgern (KLT) angeordnet (z.B. Sensoren). Bei größeren Bauteilen ist auch eine Bereitstellung in Großladungsträgern (GLT) möglich (z.B. Hochdruckpumpen).

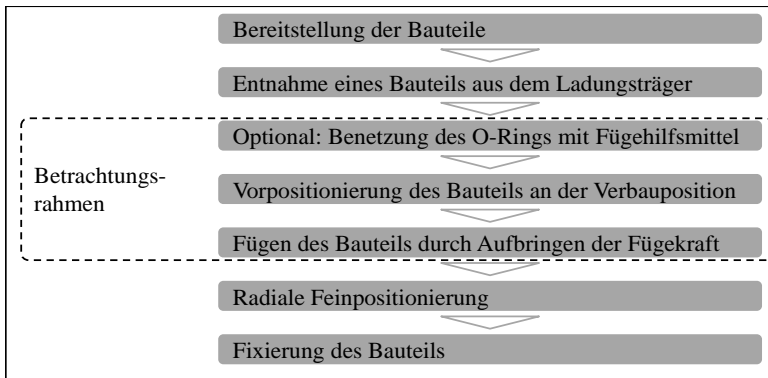


Abbildung 8: Abfolge der manuellen Kolbendichtungsmontage

Der Werker greift nach dem Bauteil und entnimmt es aus dem Ladungsträger. Optional wird, je nach Vorgabe der Montageanweisung, der O-Ring mit Fügehilfsmittel benetzt. Dies erfolgt durch einen Benetzungsautomaten oder manuell mit einer Sprühflasche, einem Tupfer, Roller, Schwamm etc. Im nächsten Schritt positioniert der Werker das Bauteil an der Montageposition. Durch Einführfasen an der Bohrung wird die Welle zentriert. Zur Montage muss eine Fügekraft aufgebracht werden. Diese verursacht eine Querschnittsverformung des O-Rings und ermöglicht ein Überwinden der Reibungskräfte. Das Bauteil wird bis zum Anschlag gefügt und in die endgültige Montageposition gebracht. Zur Fixierung





## **2.3 Handlungsbedarf**

---

Überschreitet die erforderliche Fügekraft die für die entsprechende Montagesituation zulässige Körperkraft, werden Hilfsmittel eingesetzt, die den Werker entlasten. Je nach Krafteinleitung können Montagehilfsmittel in zwei Kategorien unterteilt werden. Bei manuell betriebenen Pressen ist weiterhin eine Krafteinleitung durch den Werker erforderlich. Durch die Verstärkungswirkung der Presse muss jedoch nur ein Bruchteil der benötigten Kraft zum Fügen der Kolbendichtung aufgebracht werden (z.B. bei einer Kniehebelpresse). In der zweiten Kategorie erfolgt die Krafteinleitung pneumatisch, hydraulisch oder elektromechanisch. Der Werker übernimmt dann ausschließlich die Bestückung der Montagevorrichtung und initiiert den Fügeprozess über die Anlagensteuerung.

Die Fügekraft bei pneumatischer oder hydraulischer Krafteinleitung wird nach aktuellem Stand der Technik anhand von Erfahrungswerten eingestellt und nicht prozessbegleitend gemessen. Ein zusätzlicher externer Kraftsensor ist hierfür erforderlich. Bei elektromechanischen Pressen ist eine den Montageprozess begleitende, integrierte Kraft-Weg-Messung einfach realisierbar. Zur Bestimmung von Hüllkurven und den damit eingegrenzten Akzeptanzbereichen der Fügekraft sind bis dato jedoch eine Vielzahl von Vorversuchen für die jeweiligen Anwendungsfälle erforderlich. Dieses Vorgehen muss bei jeder Produkt- oder Prozessänderung erneut durchgeführt werden. WISBACHER (1992) nennt dabei die Vielzahl an zu berücksichtigenden Wechselwirkungen zwischen Produkt und Prozess als Grund für den seltenen Einsatz von Überwachungssystemen bei Fügeprozessen.

## **2.3 Handlungsbedarf**

### **2.3.1 Unsicherheiten manueller Montageprozesse**

Von Hand ausgeführte Tätigkeiten rücken den Menschen in den Mittelpunkt des Fertigungsprozesses (LOTTER 2005). Aufgrund seiner Vielzahl an Fertigkeiten ist der Mensch für die Montage prädestiniert. Auf der anderen Seite bestehen durch verschiedene intrinsische und extrinsische Einflussfaktoren auf das menschliche Handeln Fehlerrisiken in der Montage. Dies kann zu hohen Qualitätsrisiken am Produkt führen. Eine vollständige Prozessüberwachung zur Reduzierung des Fehlerrisikos ist bei der manuellen Ausführung von Montageprozessen nicht möglich (SIEBEN 2011).

Die Unsicherheiten eines manuellen Montageprozesses resultieren aus der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Werkers sowie bauteilspezifischen Faktoren. Die menschliche Zuverlässigkeit ist definiert als „(...) *Fähigkeit des Menschen, eine Aufgabe unter vorgegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall im Akzeptanzbereich durchzuführen*“ (VDI 4006 2002). Als Kennwert der Zuverlässigkeit kann die Wahrscheinlichkeit einer Fehlhandlung *HEP* (Human Error Probability) herangezogen werden. Hierfür wird die Anzahl der beobachteten Fehler  $n_{Fehler}$  in Relation zu der Gesamtanzahl der möglichen Fehler  $N_{Fehler}$  gesetzt (VDI 4006 2002):

$$HEP = \frac{\text{Zahl der beobachteten Fehler}}{\text{Zahl der möglichen Fehler}} = \frac{n_{Fehler}}{N_{Fehler}} \quad (2-2)$$

Die Fähigkeiten eines Menschen, die es ihm ermöglichen, einen Montageprozess auszuführen, werden in SIEBEN (2011) unter dem Begriff *Montageprozessqualifikation* zusammengefasst. Hierzu zählen die menschlichen Sinne, der gesamte Bewegungsapparat, kognitive Fähigkeiten, lösungsorientiertes Denken, Motivation etc. Aufgrund dieser Qualifikationen hält LOTTER (2005) den Menschen zur Durchführung von Montageaufgaben für unersetzbar. Je nach Ausprägung der Fähigkeiten entsteht ein „(...) *direkter Zusammenhang zwischen dem Qualitätsniveau des Endprodukts und den individuellen Fähigkeiten und Qualifikationen des Montagearbeiters*“ (REINHART & SIEBEN 2011).

Diese auf den Montageprozess positiv einwirkenden Eigenschaften werden durch verschiedene Ursachen negativ beeinflusst. Abbildung 10 zeigt die Vielzahl an potenziellen Einflussfaktoren, die die Ausführungsqualität manueller Montagefähigkeiten reduzieren können.

## 2.3 Handlungsbedarf

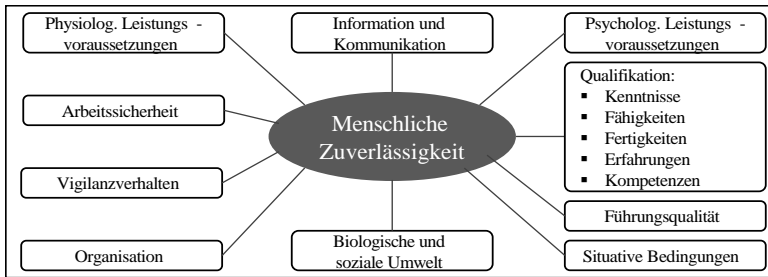


Abbildung 10: Einflussfaktoren auf die menschliche Zuverlässigkeit in Anlehnung an BARTSCH (2004)

„Alle Faktoren, die die Fähigkeit des Menschen, eine Aufgabe zuverlässig durchzuführen, beeinflussen, werden leistungsbeeinflussende Faktoren (Performance Shaping Factors, PSF) genannt“ (VDI 4006 2002). Als Folge von leistungs- und zuverlässigkeitsbedingten Unsicherheiten des Montageprozesses treten Fehlhandlungen des Werkers auf. Fehlhandlungen sind nach VDI 4006 (2002) definiert als menschliche Handlungen, die gesetzte Akzeptanzgrenzen überschreiten. Die Wahrscheinlichkeit von Fehlhandlungen und somit die Leistungsfähigkeit eines Werkers werden durch sachliche und menschliche Voraussetzungen beeinflusst (vgl. Abbildung 11).

Menschliche Leistung							
Sachliche Leistungsvoraussetzungen				Menschliche Leistungsvoraussetzungen			
Organisatorische Vorbedingungen		Technische Vorbedingungen		Leistungsfähigkeit		Leistungsbereitschaft	
Aufbauorganisation	Ablauforganisation	Aufgabenschwierigkeit	Situative Faktoren	Physische Leistungsfähigkeit	Psychische Leistungsfähigkeit	Physische Leistungsbereitschaft	Psychische Leistungsbereitschaft
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Management</li> <li>▪ Entlohnung</li> <li>▪ Weiterbildung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arbeitszeit</li> <li>▪ Arbeitsvorbereitung</li> <li>▪ Arbeitsanweisung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Betriebsmittelgestaltung</li> <li>▪ Arbeitsinhalt</li> <li>▪ Aufgabenauslegung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arbeitsplatzgestaltung</li> <li>▪ Gestaltung der Umwelt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konstitution</li> <li>▪ Geschlecht</li> <li>▪ Alter</li> <li>▪ Kondition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mentale Anlagen</li> <li>▪ Bildungsniveau</li> <li>▪ Übung/ Training</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Disposition</li> <li>▪ Tagesrhythmik</li> <li>▪ Krankheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Innere Motivation</li> <li>▪ Äußere Motivation</li> </ul>

Abbildung 11: Leistungsbeeinflussende Faktoren in Anlehnung an VDI 4006 (2002)

Im Bereich der Arbeitswissenschaft spielt zudem die biologische Leistungskurve des Menschen eine bedeutende Rolle (vgl. Abbildung 12). Der Werker ist dem-

nach nicht in der Lage, über einen längeren Zeitraum ein konstantes Leistungs-niveau beizubehalten (LOTTER 2005).

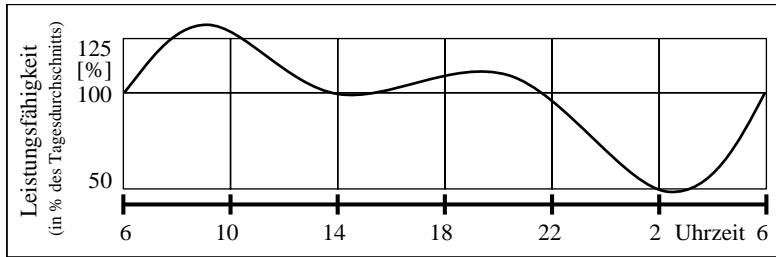


Abbildung 12: Menschliche Leistungskurve in Prozent des Tagesdurchschnitts in Anlehnung an GRAF (1961)

Aus den positiven und negativen Abweichungen von der Normalleistung resultiert ein schwankender Verlauf der Ausführungsqualität der Montagetätigkeiten. Neben dem tageszeitabhängigen Leistungsverlauf erfolgen weitere Erschöpfungserscheinungen durch die Arbeitsermüdung, d.h. die Inanspruchnahme der physischen und psychischen Ressourcen während der Tätigkeitsausführung (SCHLICK ET AL. 2010). Der Ermüdungsgrad hat eine direkte Auswirkung auf das Arbeitsergebnis und damit auch auf die Ausschussquote (WARNECKE ET AL. 1975). Abweichungen vom optimalen Arbeitsbereich hinsichtlich des erforderlichen Energieaufwands zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe, aber auch der Wiederholhäufigkeit wirken sich negativ auf die verfügbaren Ressourcen des Werkers aus (vgl. Abbildung 13).

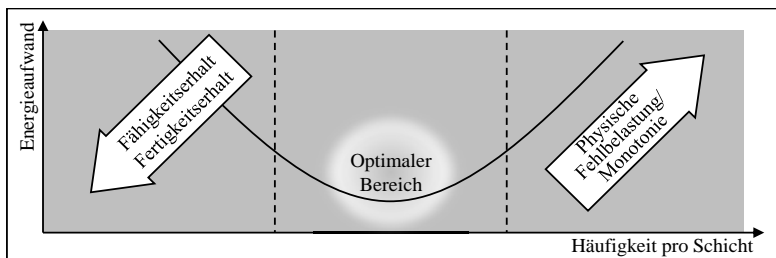


Abbildung 13: Folgen von Abweichungen vom optimalen Arbeitsbereich in Anlehnung an LINS & BRITZKE (2010)

## 2.3 Handlungsbedarf

---

Die hohe Anzahl an Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit des Werkers erhöht das Fehlerrisiko und führt zu einer Zunahme an Fehlhandlungen. VDI 4006 (2003) kategorisiert Fehlhandlungen in Unterlassungs- und Ausführungsfehler (vgl. Abbildung 14).

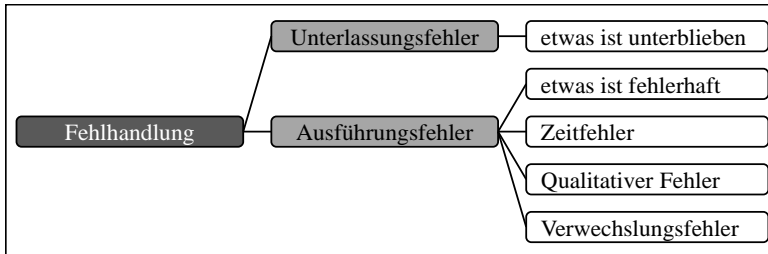


Abbildung 14: Kategorisierung menschlicher Fehlhandlungen  
in Anlehnung an VDI 4006 (2003)

LOTTER (2005) definiert die Werkerselbstprüfung als wichtigen Bestandteil eines manuellen Montagearbeitsplatzes. Ziel ist es, die Weitergabe von fehlerhaften Teilen an die nachfolgenden Arbeitsplätze zu verhindern. Der Worker prüft die von ihm durchgeführten Montagetätigkeiten und bewertet das Montageergebnis. Eine objektive Beurteilung ist jedoch nur bei quantitativen Merkmalen möglich (z.B. Bauteil vorhanden). Die menschenbedingte Subjektivität der Bewertung qualitativer Merkmale (z.B. erforderliche Einpresskraft) befördert die Weitergabe fehlerbehafteter Bauteile. Die Werkerselbstprüfung dient demnach nur als Hilfsmittel zur Reduzierung des Nacharbeitsumfangs, jedoch nicht zur Vermeidung von Fehlhandlungen.

Neben der mitarbeiterbeeinflussten Prozessebene ist auch die Produktebene zu betrachten, da Bauteile generell toleranzbehaftet sind. Abweichungen von Bauteilmaßen sowie -formen oder anderer Merkmale „(...) vom Sollzustand (z.B. Verunreinigungen) können in der Montage zu empfindlichen Störungen führen“ (KONOLD & REGER 2003). Durch Summation der Einzeltoleranzen können neben Montageproblemen auch Funktionsstörungen der Baugruppe verursacht werden (LOTTER 2005). Merkmalsabweichungen von Bauteilen in der Montage treten aufgrund vielfältiger Ursachen auf. Bei der mechanischen Bearbeitung der Bauteile kann es zu Toleranzabweichungen kommen. Bei der Handhabung, der Lagerung oder beim Transport können die fertig bearbeiteten Teile beschädigt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass in modernen Produktionssystemen aufgrund eines theoretisch durchgängigen Qualitätsmanagements sowohl bei inter-

nen als auch externen Lieferanten keine Qualitätskontrolle der Bauteile durch den Werker vor dem Montageprozess erfolgt. Eine Detektion der beschriebenen Unregelmäßigkeiten kann demnach nicht sichergestellt werden.

### 2.3.2 Unsicherheiten manueller Montageprozesse von Kolbendichtungen

Montagetätigkeiten können nach LOTTER (2005) in diverse Funktionen unterteilt werden (vgl. Abbildung 15). Im Rahmen dieses Kapitels soll ein kurzer Überblick zu möglichen Unsicherheiten des Montageprozesses von Kolbendichtungen im Rahmen der jeweiligen Montagefunktionen gegeben werden.

Montieren				
Fügen	Handhaben	Kontrollieren	Justieren	Sonderoperationen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zusammensetzen</li> <li>▪ Füllen</li> <li>▪ Anpressen/ Einpressen</li> <li>▪ Fügen durch Urformen</li> <li>▪ Fügen durch Umformen</li> <li>▪ Fügen durch Schweißen</li> <li>▪ Fügen durch Löten</li> <li>▪ Kleben</li> <li>▪ Textiles Fügen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Speichern</li> <li>▪ Mengen verändern</li> <li>▪ Bewegen</li> <li>▪ Sichern</li> <li>▪ Kontrollieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prüfen</li> <li>▪ Messen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Justieren durch Einformieren</li> <li>▪ Justieren durch Umformen</li> <li>▪ Justieren durch Trennen</li> <li>▪ Justieren durch Fügen von Ausgleichsteilen</li> <li>▪ Justieren durch Einstellen</li> <li>▪ Justieren durch Nachbehandeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Markieren</li> <li>▪ Erwärmen</li> <li>▪ Kühlen</li> <li>▪ Reinigen</li> <li>▪ Entgraten</li> <li>▪ Bedrücken</li> <li>▪ Abdecken</li> <li>▪ Abziehen</li> <li>▪ Auspacken</li> <li>▪ Ölen</li> <li>▪ Einsprühen</li> <li>▪ Abdichten</li> </ul>

Abbildung 15: Funktionen der Montage in Anlehnung an LOTTER (2005)

In VDI 2860 (1990) wird *Handhabung* als „(...) das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem“ definiert und bezeichnet hier die Zuführbewegung des Kolbens bzw. Bauteils (inkl. Dichtung) von der Bereitstellungsfläche bis zum Montageort. Bereits bei der Aufnahme des Bauteils durch den Werker bestehen Unsicherheiten hinsichtlich Vertauschung bzw. Verwechslung. Werden mehrere ähnliche Bauteiltypen bereitgestellt, besteht die Gefahr, dass Teile falsch kommissioniert werden und der Montagemitarbeiter trotz richtiger Griffposition das falsche Bauteil montiert. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, dass ein Bauteil an einer falschen Bereitstellungsfläche gegriffen wird. Nach Aufnahme des Bauteils besteht bei der Zuführung zum Montageort die Gefahr der Beschädigung durch unsachgemäße Handhabung, wie z.B. Anschlagen, Fallenlassen etc.

## 2.3 Handlungsbedarf

---

Nach der Handhabung und Positionierung des Bauteils erfolgt die Montagefunktion *Fügen*. DIN 8593 (2003) definiert den Fügevorgang als das „(...) *auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form (...)*“. Das Fügen von Kolbendichtungen erfordert das Aufbringen einer definierten Fügekraft zur Überwindung von Gegenkräften, hervorgerufen durch Reibungswiderstände. Der Fügeprozess ist beendet, wenn das Bauteil die vorgesehene Zielposition erreicht hat. Idealerweise wird die Kolbendichtung mit konstant niedriger Geschwindigkeit gefügt, um den Dichtring nicht erheblichen Reibungskräften auszusetzen. Durch den un stetigen Verlauf der erforderlichen Fügekraft ist eine kontrollierte und konstante Fügebewegung der Kolbendichtung manuell jedoch nicht umsetzbar. Die Gefahr der Bauteil- und Dichtungsbeschädigung wird durch unsachgemäße Fügemethoden (z.B. Einschlagen, Kipp- oder Drehbewegungen etc.) erhöht.

Eine *Justierung* während der Montage erfolgt lediglich durch eine radiale Grobpositionierung des Kolbens. Der Vorgang der *Justierung* bezeichnet dabei die durchzuführenden Tätigkeiten zur geometrischen „(...) *Feineinstellung funktional in Beziehung stehender Teile einer Baugruppe (...)*“ (WIENDAHL ET AL. 2014). Unsicherheiten treten während dieser Montagefunktion nicht oder nur im geringen Maß auf und sind nicht Teil des Betrachtungsrahmens dieser Arbeit.

*Kontrollieren* bzw. *Prüfen* ist in VDI 2860 (1990) als „(...) *Feststellen, ob bestimmte Eigenschaften oder Zustände erfüllt sind*“ definiert. Eine Prüfung durch den Werker erfolgt vor dem Fügevorgang, indem das Vorhandensein des O-Rings auf dem Kolben und nach der Montage das Vorhandensein des montierten Kolbens an der Zielposition kontrolliert wird. Eine Vernachlässigung der Prüfung birgt die Gefahr, dass Bauteile ohne Dichtring gefügt bzw. ganze Bauteile schlicht vergessen werden.

Zu den *Sonderoperationen* zählt bei der Montage von Kolbendichtungen die Benetzung des O-Rings oder der Bohrung mit einem Fügehilfsmittel (Schmiermittel). Wird die Benetzung automatisiert und rückverfolgbar durchgeführt, ist der Prozess robust gegen Unsicherheiten ausgelegt. Ist hingegen eine manuelle Benetzung durch Pinsel etc. vorgesehen, ist die Gefahr groß, dass die Benetzung vernachlässigt oder vergessen wird. Die Umsetzung einer Benetzungsstrategie sowie die Auswahl des Fügehilfsmittels obliegen meist der Verantwortung der Fertigungsabteilung. Technische Zeichnungen enthalten hierzu selten konkrete Vorgaben.



### 2.3.3 Auswirkungen von Montageunsicherheiten auf die Produktqualität von Kolbendichtungen

Die Folgen mangelnder Qualität bzw. fehlerhafter Produkte sind breit gefächert und können in interne und externe Konsequenzen gegliedert werden (vgl. Abbildung 16). Als interne Folgen werden Auswirkungen bezeichnet, die den Hersteller des fehlerhaften Produkts selbst betreffen. Hierzu zählen Beeinträchtigungen des Images, der Marktstellung und des Umsatzes. Als externe Folgen fehlerhafter Produkte werden Auswirkungen bei den Produktnutzern oder sonstigen Betroffenen verstanden. Gefährdungen einzelner Personen oder der Allgemeinheit, eine Wert- oder Tauglichkeitsbeeinträchtigung des Produkts und resultierende Folgeschäden wie Personen-, Sach- oder Vermögensschäden sind mögliche Konsequenzen (SCHMITT & PFEIFER 2010).

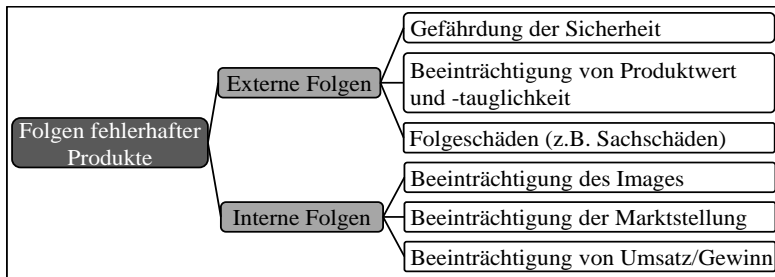


Abbildung 16: Folgen fehlerhafter Produkte und mangelnder Produktqualität in Anlehnung an SCHMITT & PFEIFER (2010)

Werden Qualitätsmängel noch vor Auslieferung an den Kunden bzw. noch während des Fertigungsprozesses festgestellt, können auch hier die Folgen beachtlich sein. Um die Ausfallmenge fehlerhafter Produkte auszugleichen, müssen Ressourcen in den Bereichen Personal, Material und Maschine aufgewendet werden (KLETTI & SCHUMACHER 2011).

Eine hohe Produktqualität wird u.a. durch eine hohe Prozessqualität erreicht und ist als „(...) Erfüllungsgrad der impliziten und expliziten Forderungen des Kunden an das Produkt definiert“ (SCHMITT & PFEIFER 2010). Die Grundanforderung an Dichtungen hinsichtlich Funktionserfüllung ist der Schutz der Umwelt vor Leckage aus Maschinen, Motoren etc. sowie der Schutz des Maschineninnenlebens vor Verunreinigung (z.B. Feuchtigkeit) aus dem Umfeld (GAWLINSKI 2007). Um diese Anforderung erfüllen zu können, ist eine beschädigungsfreie

## 2.3 Handlungsbedarf

---

Montage der Dichtungen erforderlich. Nach einer Analyse von RICHTER (2010) können dennoch 29,7 % der Ausfallursachen von O-Ring-Dichtungen auf Montagefehler oder fehlerhafte Einbauträume zurückgeführt werden. Dieser hohe Prozentsatz unterstreicht den signifikanten Einfluss des Montageprozesses auf die Qualität des Endprodukts. Nachfolgend werden mögliche Beschädigungsmechanismen während der Montage und daraus resultierende Folgen für das Gesamtprodukt diskutiert.

### Beschädigungsmechanismen von O-Ringen in der Montage

*„Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), hervorgerufen durch tribologische Beanspruchungen, d.h. Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers“* (CZICHOS & HABIG 2010). Es existieren vier Hauptverschleißmechanismen (ANTONSSON & GROTE 2008, CZICHOS & HABIG 2010):

- **Oberflächenzerrüttung** wird durch häufig wechselnde Spannungen an Mikrokontakten zwischen Grund- und Gegenkörper hervorgerufen. In den beanspruchten Gebieten kommt es zu Schadensakkumulation (Werkstoffermüdung) und Rissbildung.
- **Abrasion** tritt häufig auf, wenn der Grundkörper weicher ist als der Gegenkörper. Durch verschiedene Materialabtrennprozesse (z.B. Mikrozerspanung, Mikroflügen), hervorgerufen durch harte Rauheitshügel des Gegenkörpers oder harte Partikel zwischen den Wirkflächen der Körper, erfolgt abrasiver Verschleiß.
- **Adhäsion** wird verursacht durch Materialverbindungen auf molekularer Ebene zwischen dem Grund- und Gegenkörper. Hohe lokale Drücke bedingen ein Auflösen der oberen schützenden Materialschichten, so dass Grenzflächenverbindungen entstehen können. Diese Verbindungen haben häufig eine höhere Festigkeit als die Ausgangsmaterialien. Bei auftreten der Relativbewegung erfolgt ein Abtrennen des Materials des weicheren Kontaktpartners.
- **Tribochemischer Verschleiß** tritt sehr häufig bei metallischen Kontakten auf und wird durch chemische Reaktionen zwischen den Kontaktpartnern und dem Umgebungs- bzw. Zwischenmedium verursacht.

Der O-Ring bildet den Grundkörper des tribologischen Systems. Die Relativbewegung erfolgt durch die Fügebewegung der Welle in die Bohrung. Die konstruktiv bedingte Verpressung des O-Rings verursacht einen stetigen Kontakt zwischen Dichtung und Gegenfläche. Durch die Relativbewegung der beiden

Wirkflächen entstehen Kräfte, die eine Werkstoffbeanspruchung zur Folge haben. Für den hier betrachteten Montagevorgang ist Abrasion aufgrund der stark unterschiedlichen Härtegrade des O-Rings (weich) und der Oberfläche der Bohrung (hart) die prädominante Beschädigungsform (DEBLER 2005). Materialabtrennprozesse während des Fügevorgangs finden auf verschiedenen Skalen statt (vgl. Abbildung 17).

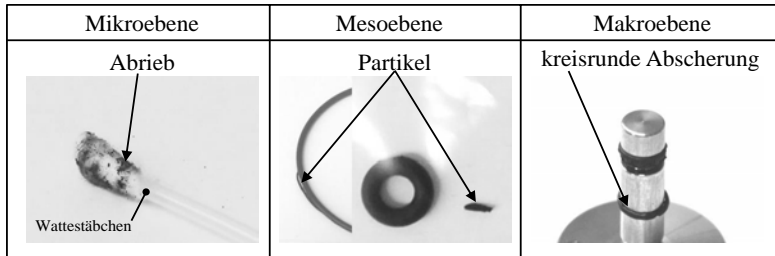


Abbildung 17: Skalen der Beschädigungsstufen eines O-Rings

Auf der Mikroskala werden durch Mikrorauheitshügel auf der Oberfläche der Bohrung Elastomerpartikel aus dem Dichtkörper getrennt (Abrieb). Auf der Mesoskala verursachen scharfe Kanten oder ein Grat an der Fase oder dem Fasenübergang die Abtragung ganzer Teile des O-Rings. Auf der Makroskala wird der gesamte O-Ring durch eine kreisrunde Abscherung so stark beschädigt, dass die Dichtfunktion vollständig verloren geht.

Wissenschaftliche Analysen zur Untersuchung von Dichtungsausfällen, z.B. von BAUER & JONGBLOED (1997), DEBLER (2005) oder KOWADA ET AL. (2008) konzentrieren sich in der Regel auf schadhafte Betriebsbedingungen (z.B. Spaltextrusion, chemischer Angriff etc.) oder Verschleiß während der Betriebsdauer. Der Montageprozess wird meist nur peripher betrachtet. Neben vielen betriebsbedingten Schadensbildern nennt SAE AIR1707 (2003) das *Abschälen* (skived installation damage) als Beschädigungsform in der Montage. Als Ursachen werden scharfe Kanten und unzureichende geometrische Ausprägungen der Bohrung genannt. VINARCIK (2009) differenziert bei Untersuchungen zur Montage einer Kraftstoffpumpe umlaufende (circumferential shear) und quer verlaufende (cross-sectional cut) Beschädigungen. Eine Ursachenanalyse der Beschädigungsformen ist jedoch nicht Bestandteil der Untersuchungen. ALBERS ET AL. (2012) nennen mehrere montagerelevante Ursachen, die zu einer Beschädigung der Dichtung führen können. Hierzu zählen Schäden auf der Gegenfläche, Mangelschmierung, Verdrillung des O-Rings und Verschleiß der Dichtung oder der

## 2.3 Handlungsbedarf

---

Gegenauflfläche. TIETZE (2003) fasst die Beschädigungsursachen und Schadensbilder unter dem Oberbegriff *Montagefehler* zusammen. Auch hier werden scharfe Kanten und zu steile Einführfasen als Beschädigungsrisiko genannt. Ein großes Gefährdungspotenzial gegenüber Abscherungen wird beim Gleiten des bereits verpressten O-Rings über Bohrungen aufgeführt.

Aufgrund der uneinheitlichen Benennung in der Fachliteratur werden hier vier Beschädigungsformen für den weiteren Verlauf dieser Arbeit definiert. Die *Ab-scherung* von Teilen des O-Rings oder des ganzen O-Rings ist die Folge mechanischer Überbelastung aufgrund einer Verspannung der Dichtung zwischen der Nut und der Bohrung. Die Beschädigung erfolgt umlaufend zum O-Ring. Befördert wird diese Beschädigungsform durch scharfe Kanten. Das abgeschorene Stück des O-Rings kann sich vollständig vom Grundkörper lösen oder teilweise mit ihm verbunden bleiben.

Das *Aufschlitzen* des O-Rings hat keine Ablösung von Material vom Dichtkörper zur Folge. Die Beschädigungsrichtung kann umlaufend oder entlang des Querschnitts erfolgen. Das Beschädigungsbild ist geprägt durch einen geradlinigen Beginn der Beschädigung, verursacht durch eine scharfe Kante als Beschädigungsursache (TIETZE 2003).

*Abrieb* wird definiert als „(...) unerwünschte Veränderung der Oberfläche von Kunststoffen durch Lostrennen kleiner Teilchen infolge mechanischer Beanspruchung (...)“ (DIN 53754 1977). Abrieb ist eine Begleiterscheinung der Reibung und daher bei berührenden Fügeverfahren nicht vermeidbar. Die Menge der losgetrennten Partikel kann je nach Beanspruchung stark variieren und auf zwei Weisen Leckage verursachen. Lokal kann Abrieb dazu führen, dass die Flächenpressung zur Aufbringung der statischen Dichtwirkung nicht mehr ausreicht. Gleichzeitig kann die Änderung des Pressungsprofils dynamische Leckagen hervorrufen (ALBERS ET AL. 2012).

*Spiralfehler* werden bei Relativbewegungen durch eine ungleichmäßige Verpressung des O-Rings entlang des Schnurdurchmessers verursacht. Während ein Teil des O-Rings gleitet, beginnt der andere Teil zu rollen. Durch diese ungleichmäßige Bewegung verdreht sich die O-Ring-Schnur und es kann zu spiralförmigen Einrissen kommen (TIETZE 2003). Abbildung 18 fasst die genannten Beschädigungsformen zusammen.

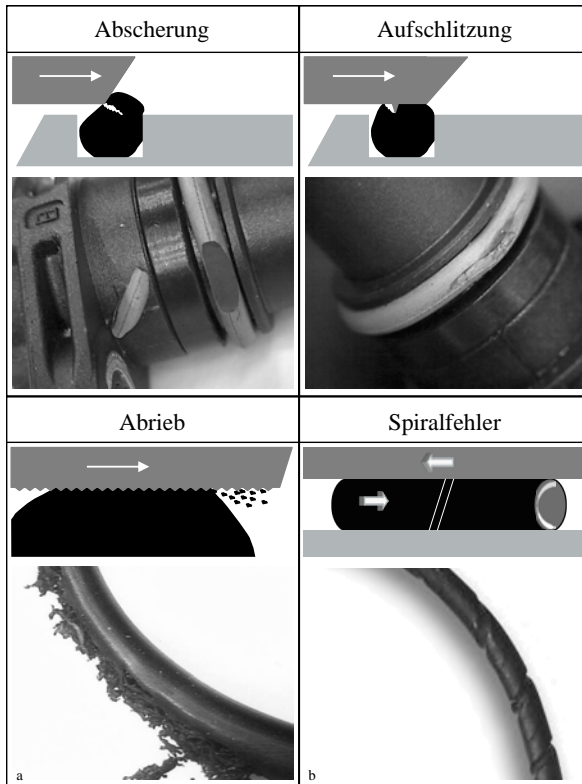


Abbildung 18: Beschädigungsformen eines O-Rings. Bilder oben: eigene Darstellung; a: RICHTER (2002); b: PARKER (2007)

Auf Prozessebene steht der Werker im Fokus der Schadensanalyse. Viele Beschädigungsformen treten erst in Kombination mit manuellen Prozessfehlern auf. Ausgehend vom viskoelastischen Materialverhalten von Elastomeren ist eine zentrierte Positionierung des Kolbens zur Bohrung und eine langsame, gleichmäßige Fügebewegung vorzusehen, um dem Material Zeit zu geben, sich der umliegenden Geometrie anzupassen. Durch die Verpressung des Schnurdurchmessers an der Einführfase sind hohe Verformungskräfte erforderlich, die in Form der Fügekraft aufzubringen sind. Um die Anstrengung für den Werker zu reduzieren, werden häufig Montagemethoden angewendet, die sich negativ auf die Montagequalität auswirken. Hierzu zählen Fügeoperationen der Kolbendichtung wie *Einschlagen*, *Kippen* oder *Drehen* (vgl. Abbildung 19). Durch Kippen oder Dre-

## 2.3 Handlungsbedarf

hen der Welle während des Fügevorgangs kann die Fügekraft partiell reduziert werden, da der Schnurdurchmesser nur teilweise verpresst wird. Gleichzeitig nimmt die lokale Flächenpressung sehr stark zu, da der Verpressungsgrad wesentlich höher ist als bei einer gleichmäßigen Querschnittsverformung der Dichtschnur. Die Gefahr einer lokalen Überschreitung der Spannungs-/Dehnungsgrenze des Dichtmaterials steigt stark an. Bei einer Drehbewegung besteht zusätzlich die Gefahr einer umlaufenden Beschädigung des O-Rings durch Partikel oder scharfe Kanten. Beim Einschlagen der Welle wird das Bauteil an der Einführfase vorpositioniert und manuell oder unter Anwendung eines Hilfsmittels (z.B. Hammer) in die Bohrung eingeschlagen. Die Dämpfungseigenschaften des viskoelastischen Materials der Dichtung bedingen eine temporäre Verhärtung bei schneller Deformation. Daraus resultieren hohe erforderliche Verformungskräfte, die wiederum das Material zusätzlich belasten. Zudem verliert der Werker die Taktilität für den Prozess. Unregelmäßigkeiten des Kraftverlaufs können nicht detektiert werden.

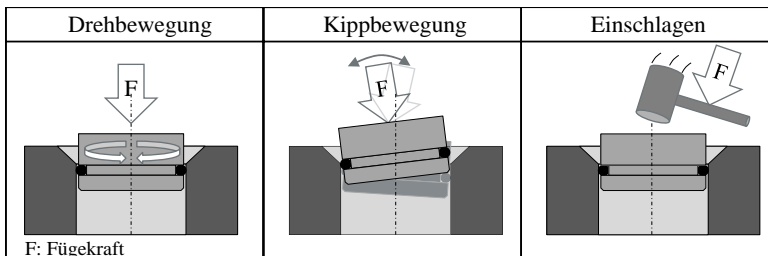


Abbildung 19: Unsichere Montageprozesse für Kolbendichtungen

### Folgen schadhafter O-Ring-Dichtungen

„Ein Schaden ist als Veränderung an einem Bauteil definiert, (...) durch die seine vorgesehene Funktion beeinträchtigt oder unmöglich gemacht wird“ (VDI 3822 2004). Durch die Beschädigung eines O-Rings wird dessen Dichtfunktion beeinträchtigt. Die Funktion, zwei Räume mit unterschiedlichen Drücken und Medien gegeneinander abzuschließen (HABERHAUER & BODENSTEIN 2011), kann nicht mehr erfüllt werden. Als Folge treten diskrete Emissionen auf, die abhängig von den Eigenschaften des Prozessstoffs oder der Prozessparameter gefährlich sein können (SIMON 1994). Leckagen haben eine direkte Auswirkung auf das abzudichtende System sowie auf die Umwelt und Umgebung, in die der Leckagestrom fließt. Treten durch Leckagen giftige Gase aus, können gesetzliche Konzentrationsobergrenzen für Arbeitsräume überschritten werden und eine Gesund-

heitsgefährdung für die Werker entstehen. SIMON (1994) leitet daraus die Forderung ab, dass Leakage so begrenzt werden muss, dass in unmittelbarer Umgebung „(...) die tolerierbare Schadstoffkonzentration in der Atemluft nicht überschritten und die untere Explosionsgrenze nicht erreicht wird“. Hohe Kosten können entstehen, wenn die Umwelt durch austretende Medien beeinträchtigt oder als Folge von Minderschmierung das abdichtende System beschädigt wird. Folgeschäden einer defekten Dichtung können zu einem Anlagenstillstand und damit zu Produktionsausfällen führen (HORVE 1996). Die Kosten der aus Reparaturen resultierenden Schäden übersteigen die Investitionen für die Dichtung meist um ein Vielfaches. Zudem können bei besonders kritischen Fällen von Dichtungsversagen Menschenleben gefährdet werden, z.B. durch den Ausfall eines Bremssystems (HABERHAUER & BODENSTEIN 2011). Ein eindringliches Beispiel für die Auswirkungen von Leakage aufgrund der Fehlfunktion eines O-Rings ist die Katastrophe der Challenger-Raumfähre von 1986. Als Folge des Versagens eines oder mehrerer O-Ringe in den Feststoffraketen, verursacht durch eine temperaturbedingte Verhärtung des Dichtungsmaterials, kam es zum unkontrollierten Austreten von Verbrennungsgasen und schließlich zum Absturz der Raumfähre (PRESIDENTIAL COMMISSION 1986). Als Folge dieses Dichtungsversagens kamen sieben Astronauten ums Leben.

Wird der Betrachtungsrahmen für Folgen von schadhafte Dichtungen auf die Montage begrenzt, ist v.a. die Wertschöpfung betroffen. Können Beschädigungen nicht verhindert werden, muss der Prüfaufwand erhöht werden, um die Produktqualität abzusichern. Dichtheits- und Funktionsprüfungen sind meist der Montage nachgeschaltet. Bei der Detektion von Leckagen ist dann eine tiefgreifende Demontage oder eine Deklaration des Produkts als Ausschuss vorzunehmen (REINHART & MILBERG 1997). Nacharbeit verursacht Zusatzkosten durch erhöhten Personal- und Materialeinsatz. Ausschuss hat Mehrkosten aufgrund einer erforderlichen Wiederbeschaffung und Entsorgung der aussortierten Teile zur Folge. Zu beachten ist zudem ein vermindertes Entdeckungspotenzial von Elastomerdichtungen bei Leckagetests in der Montage. Aufgrund des Einsatzes von viskosen Schmiermitteln und daraus resultierenden kurzzeitigen Abdichteffekten sowie des viskoelastischen Verhaltens des Elastomers besteht die Gefahr, dass beschädigte O-Ringe die Prüfprozesse undetektiert durchlaufen (REINHART & SIEBEN 2013).

# 3 Systemanalyse

## 3.1 Allgemeines

Wie den vorangehenden Abschnitten zu entnehmen ist, existieren in der Literatur nur wenige wissenschaftliche Abhandlungen über die Abläufe und das Gesamtsystem des Fügeprozesses von Kolbendichtungen. Im Rahmen des folgenden Kapitels sollen diese im Detail betrachtet und analysiert werden. Hierfür wird zunächst eine klare Systemgrenze gezogen und relevante Komponenten werden identifiziert. Mit dem Ziel, den Einfluss des Materials auf den Fügeprozess zu spezifizieren, werden die Materialeigenschaften des Dichtungswerkstoffes analysiert und Spezifika hervorgehoben, die eine besondere Relevanz für den Fügeprozess aufweisen. Ein Zusammenhang zwischen Materialeigenschaften, Elastomerreibung und deren Ursachen wird beschrieben. Auf dieser Wissensbasis können der Kraftverlauf des Fügeprozesses von Kolbendichtungen analysiert und dessen Ausprägungen auf die Material- und Reibeigenschaften von Elastomeren zurückgeführt werden.

## 3.2 Systemgrenze

Startpunkt eines Problemlösungsprozesses ist die klare Abgrenzung des zu untersuchenden Bereichs. Hierfür werden geeignete Systemgrenzen definiert. Dabei stellt das System das zu untersuchende Gebilde dar (SIEBERTZ ET AL. 2010). Die Wahl der Grenzen bestimmt dessen Komplexität. Zu weit gesteckte Grenzen können den zu betrachtenden Umfang so weit erhöhen, dass eine Problemlösung nicht mehr möglich ist. Gleichzeitig dürfen die Systemgrenzen nicht zu eng definiert werden, da bei der Analyse alle relevanten Eingangs- bzw. Einflussgrößen erfasst werden müssen (GUNDLACH 2004). Hierzu zählen z.B. einstellbare sowie nicht einstellbare Einfluss- bzw. Störfaktoren und die erwartete bzw. zu messende Ausgangsgröße des Systems (vgl. Abbildung 20).



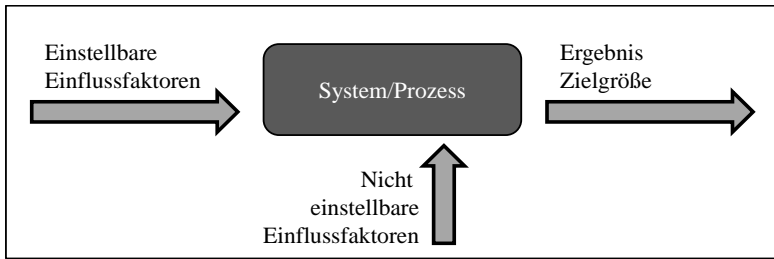


Abbildung 20: Schematische Darstellung eines Systems  
in Anlehnung an SIEBERTZ ET AL. (2010)

Das technische System einer Kolbendichtung wird durch mehrere wesentliche Komponenten definiert (vgl. Abbildung 21). Die Nabe grenzt das System durch die Oberfläche des Innendurchmessers nach außen ab. Geometrische Kennzeichen der Nabe sind die Einführfase und ein konstanter Innendurchmesser. Innerhalb der Systemgrenze tritt der O-Ring mit der Oberfläche des Nabeninnendurchmessers und der Oberfläche des Wellenaußendurchmessers in Wechselwirkung. Die Welle ist durch ihren Außendurchmesser und eine umlaufende Nut gekennzeichnet. Der O-Ring sitzt in der Nut und wird durch den Nutgrunddurchmesser geringfügig aufgedehnt. Die Abmaße der Welle und Nabe werden korrespondierend nach Passungsvorgaben ausgelegt. Alle relevanten Konstruktionsmerkmale sind in DIN 3771 (1993) festgelegt. Je nach Anwendung tritt ein Fügehilfsmittel als weitere Komponente innerhalb der Systemgrenzen auf. Der Verlauf der Systemgrenze ist in Abbildung 21 dargestellt.

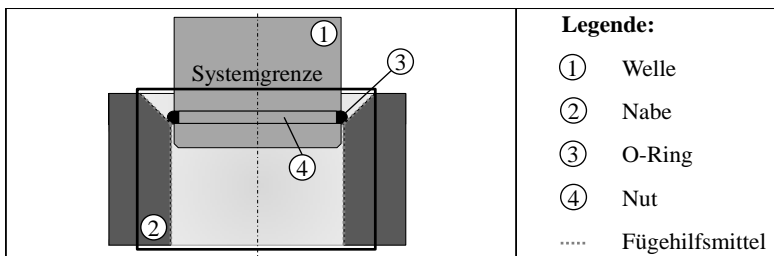


Abbildung 21: Definierte Systemgrenze der untersuchten Kolbendichtung

## 3.3 Materialeigenschaften elastomerer Dichtungswerkstoffe

In diesem Kapitel wird ein grundlegendes Verständnis für die Materialeigenschaften von Elastomeren und deren Eignung als Dichtungswerkstoff geschaffen.

Elastomere zählen zu den polymeren Werkstoffen. Die Herstellung erfolgt durch Vermischung des Grundstoffs Kautschuk mit Füll-, Verstärker- und Gummihilfsstoffen und anschließende Vulkanisation (GOHL 1991). Elastomere sind Mehrkomponentengemische, bei denen je nach Variation des Mischungsverhältnisses der einzelnen Komponenten (engl. *Compounding*) die Werkstoffeigenschaften bestimmt werden. Bei der Mischungsentwicklung ist je nach Anwendungsfall des Elastomers ein Optimum der folgenden Haupteffekte zu erzielen (DOMININGHAUS ET AL. 2008):

- Verstärkung des Elastomers durch Füllstoffe
- Chemische Beständigkeit gegenüber dem abzudichtenden Medium
- Bessere Verarbeitbarkeit im Herstellungsprozess
- Vernetzung des Kautschuks durch Vulkanisationsmittel

Während der Vulkanisation werden chemische Bindungen zwischen den Polymerketten gebildet. Die Dichte der erzielten Bindungen wird als Vernetzungsgrad oder -dichte bezeichnet. Der Vernetzungsgrad bestimmt die physikalischen Eigenschaften des Elastomers, wie z.B. Härte, Zugfestigkeit, Reißdehnung, Reibung, Setzverhalten etc. Durch die Optimierung der entsprechenden Compoundierung und damit des Vernetzungsgrads kann ein funktions- und kostenoptimaler Dichtungswerkstoff hergestellt werden (GOHL 1991, ABTS 2007, DOMININGHAUS ET AL. 2008).

DIN 7724 (1993) unterteilt Polymere anhand ihrer Eigenschaften in Elastomere, thermoplastische Elastomere, Thermoplaste und Duromere. Elastomere zeichnen sich demnach durch folgende Charakteristika aus:

- entropie-elastisches Materialverhalten im Gebrauchstemperaturbereich
- Zugverformungsrest von unter 2 %
- konstanter Schubmodul über einen weiten Temperaturbereich
- eine Glasübergangstemperatur  $T_g$

Das entropie-elastische Materialverhalten von Elastomeren ist auf die Molekülstruktur zurückzuführen. Im Ausgangszustand liegen die Molekülketten als Knäuel vor. Bei der Dehnung des Elastomers werden die Molekülketten gestreckt. Diesen höheren Ordnungszustand kann die Molekülkette ohne äußere

Krafteinwirkung jedoch nicht beibehalten und strebt erneut den ungeordneten, geknäulten Zustand an (vgl. Abbildung 22). Die Triebkraft, eine ungeordnete Struktur anzustreben, wird als Entropie bezeichnet (GOHL 1991). Im Gegensatz hierzu steht die Elastizität metallischer Werkstoffe. Metallische Atome sind in einem Gitter angeordnet und ihr Abstand ist durch ein Energieminimum definiert. Bei auftretenden äußeren Kräften wird dieser Abstand verändert und es treten Anziehungs- und Abstoßungskräfte auf. Die Energie im System wird erhöht. Sobald die äußeren Kräfte entfernt werden, bewegen sich die Atome wieder in ihre Ausgangslage zurück. Die Energie wird somit umgehend wieder abgegeben. Das Materialverhalten von metallischen Werkstoffen wird daher als energieelastisch bezeichnet (GOHL 1991, EYERER ET AL. 2007).

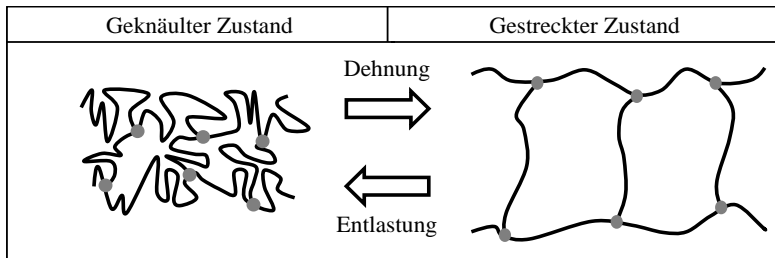


Abbildung 22: Schematische Darstellung eines Elastomermoleküls im geknäulerten und gestreckten Zustand in Anlehnung an POPOV (2010)

Der in DIN 7724 (1993) beschriebene Zugverformungsrest von Elastomeren ist auf ein nicht ideal entropie-elastisches Materialverhalten zurückzuführen. Bei jeder Deformation tritt zu geringen Anteilen auch eine plastische Verformung in Form von viskosem Fließen auf. In diesem Fall gleiten die Molekülketten aneinander ab und bilden neue Vernetzungsbrücken an spannungsärmeren Stellen. Dieser Effekt kann sowohl bei statischen als auch bei dynamischen Belastungen beobachtet werden. Elastomere haben somit die Eigenschaften eines plastisch-elastischen Festkörpers sowie einer viskosen Flüssigkeit (SCHMITT 1987, GOHL 1991).

Durch Elemente der Modellrheologie kann das Deformations- und Fließverhalten von Materialien anschaulich dargestellt werden. Extern auftretende Kräfte können so in Verbindung mit den im Körper auftretenden Spannungen gebracht werden. Einfache Elemente von Grundmodellen sind *Feder* und *Dämpfer* (FERRY 1948, GOODWIN & HUGHES 2008). Die Feder stellt einen Hookeschen Körper dar

### 3.3 Materialeigenschaften elastomerer Dichtungswerkstoffe

und repräsentiert linear-elastisches Verhalten. Es gilt das Hookesche Gesetz entsprechend Gl. (3-1).

$$\sigma_{Hooke} = E \cdot \varepsilon \quad (3-1)$$

Die Spannung ist angegeben durch  $\sigma_{Hooke}$ ,  $E$  entspricht dem Elastizitätsmodul und  $\varepsilon$  der Dehnung der Feder. Viskoses Materialverhalten wird in rheologischen Modellen durch ein Newtonsches Element (Dämpfer) repräsentiert. Ein idealer Dämpfer dehnt sich bei konstanter Belastung mit fortschreitender Zeit zunehmend aus. Bei Entlastung verweilt der Körper in gedehnter Lage. Das linear-viskose Materialverhalten lässt sich durch Gl. (3-2) beschreiben. Die auftretende Spannung  $\sigma_{Newton}$  ist dabei proportional zur Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\varepsilon}$ . Die Konstante  $\eta$  stellt die dynamische Viskosität dar.

$$\sigma_{Newton} = \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (3-2)$$

Um viskoelastisches Verhalten von Elastomeren simulieren zu können, müssen Hookesche sowie Newtonsche Elemente in einem Modell geeignet kombiniert werden (FERRY 1948, GIESEKUS 1994, GOODWIN & HUGHES 2008, GROSS ET AL. 2011). Auf zwei grundlegende rheologische Modelle zur Beschreibung von Viskoelastizität soll nachfolgend eingegangen werden.

Das *Maxwell-Modell* beschreibt eine Serienschaltung, das *Kelvin-Voigt-Modell* eine Parallelschaltung von Feder und Dämpfer (vgl. Abbildung 23).

Hooke	Newton	Kelvin-Voigt	Maxwell
elastisch	viskos	viskoelastisch	

Abbildung 23: Gängige Modelle zur Beschreibung von viskoelastischem Materialverhalten in Anlehnung an BONNET (2009)

Das Einleiten einer äußeren Belastung auf die vorgestellten Modelle verursacht eine zeitverzögerte Verformung sowie Relaxationsphänomene und Kriechvorgänge (GOHL 1991, BONNET 2009). Durch die Parallelschaltung des Feder- und

Dämpferelemente beim Kelvin-Voigt-Modell werden die Spannungen der rheologischen Körper superpositioniert (GIESEKUS 1994):

$$\sigma = \sigma_{\text{Feder}} + \sigma_{\text{Dämpfer}} \quad (3-3)$$

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon + \tau \cdot \dot{\varepsilon}) \quad (3-4)$$

Die Konstante  $\tau$  entspricht der Retardationszeit. Sie beschreibt die Zeitspanne, bis die Dehnung  $\varepsilon$  des Körpers bei konstanter Spannung einen vorgegebenen Wert erreicht hat (EHRENSTEIN 2011). Bei einer sprunghaften Belastung weist der Kelvin-Voigt-Körper ein flüssigkeitsartiges Anfangs- und ein festkörperartiges Endverhalten auf (GROSS ET AL. 2011).

Bei der Herleitung des Stoffgesetzes des Maxwell-Modells werden im Gegensatz zum Kelvin-Voigt-Modell nicht die Spannungen, sondern die Dehnungen der Einzelkörper addiert (GIESEKUS 1994). Auf beide Körper wirkt die gleiche Spannung  $\sigma$ . Ein Newtonscher Körper hängt von der Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\varepsilon}$  ab. Mit Gl. (3-5), (3-6) und (3-7) ergibt sich das Stoffgesetz für das Maxwell-Modell in Gl. (3-8).

$$\dot{\varepsilon}_{\text{Dämpfer}} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (3-5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{Feder}} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \quad (3-6)$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{\text{Dämpfer}} + \dot{\varepsilon}_{\text{Feder}} \quad (3-7)$$

$$\sigma + \bar{\tau} \cdot \dot{\sigma} = \eta \cdot \dot{\varepsilon} \quad (3-8)$$

Die Größe  $\dot{\sigma}$  stellt dabei die zeitliche Ableitung der Spannung dar. Die Konstante  $\bar{\tau}$  wird als Relaxationszeit beschrieben und bestimmt die Zeit, bei der die Spannung im Körper bei konstanter Dehnung einen vorgegebenen Wert erreicht hat (EHRENSTEIN 2011). Der Maxwell-Körper weist ein festkörperartiges Anfangs- und ein flüssigkeitsartiges Endverhalten auf (GROSS ET AL. 2011).

Viskoelastisches Verhalten wird in der Realität durch die Phänomene sowohl der Retardation als auch der Relaxation beschrieben. Die zuvor hergeleiteten Modelle sind jedoch nur in der Lage, jeweils eines der beiden Phänomene darzustellen. Singulär betrachtet eignen sie sich also nicht dafür viskoelastisches Materialverhalten genügend zu beschreiben. Um ein reales Stoffverhalten detailliert wieder-

### 3.3 Materialeigenschaften elastomerer Dichtungswerkstoffe

geben zu können, ist eine Anordnung der einzelnen Elemente in einem rheologischen Netzwerk erforderlich (GIESEKUS 1994, SEDLAN 2001). Nach SCHMITT (1987) beschreibt das *Poynting-Thomsen-Modell*, auch bekannt als *linearer Standardkörper* oder *Drei-Parameter-Festkörper*, viskoelastisches Materialverhalten von Elastomeren hinreichend genau. Bei diesem Modell handelt es sich um eine Parallelanordnung eines Hookeschen Körpers mit einem Maxwell-Element (vgl. Abbildung 24).

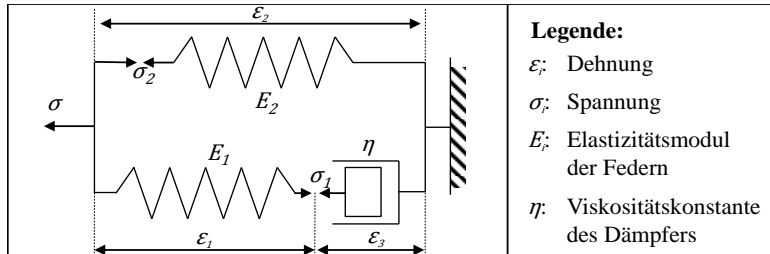


Abbildung 24: Poynting-Thomsen-Modell in Anlehnung an SCHMITT (1987)

Die Größen  $E_1$  und  $E_2$  beschreiben die Elastizitätsmoduln der Federn und  $\eta$  die Viskositätskonstante des Dämpfers. Wird ein Poynting-Thomsen-Körper mit einer Spannung  $\sigma$  belastet, so ergibt sich für die obere Feder eine Dehnung  $\varepsilon_2$ . Geometrisch setzt sich  $\varepsilon_2$  aus den Einzeldehnungen der unteren Feder  $\varepsilon_1$  und des unteren Dämpfers  $\varepsilon_3$  zusammen. Für den Poynting-Thomsen-Körper gilt nach SCHMITT (1987):

$$\sigma = E_1 \cdot \varepsilon_1 + E_2 \cdot \varepsilon_2 \quad (3-9)$$

Für den Maxwell-Ast (Abbildung 24 unten) ergibt sich:

$$E_1 \cdot \varepsilon_1 = \eta \cdot \dot{\varepsilon}_3 \quad (3-10)$$

Aus dem geometrischen Zusammenhang gilt weiterhin:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 \quad (3-11)$$

Durch Eliminierung der Einzeldehnungen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_3$  kann der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung in Abhängigkeit von der Gesamtdehnung  $\varepsilon_2$  dargestellt werden. Durch Auflösen der Gleichung (3-9) nach  $\varepsilon_1$ , einmaliges Ableiten und Einsetzen in Gleichung (3-10) folgt mit Gleichung (3-11):

$$\sigma - E_2 \cdot \varepsilon_2 = \eta \left( \dot{\varepsilon}_2 - \frac{\dot{\sigma} - E_2 \cdot \dot{\varepsilon}_2}{E_1} \right) \quad (3-12)$$

Durch Umstellung der Gleichung (3-12) kann folgender Zusammenhang hergeleitet werden (SCHMITT 1987):

$$\dot{\sigma} + \sigma \cdot \frac{E_1}{\eta} = (E_1 + E_2) \left( \dot{\varepsilon}_2 + \varepsilon_2 \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{\eta \cdot (E_1 + E_2)} \right) \quad (3-13)$$

Anhand dieser Darstellungsweise lässt sich viskoelastisches Verhalten bei aufgezogenen Bewegungen einfach nachvollziehen. Bei sehr langsamen Bewegungen können die zeitabhängigen Glieder (Dämpfer) vernachlässigt werden und die Gleichung reduziert sich zum Hookeschen Gesetz, da nur die obere Feder ( $E_2$ ) mit der Dehnung  $\varepsilon_2$  belastet und die untere Feder durch die Koppelung mit dem Dämpfer völlig entspannt wird. Im Gegensatz hierzu können bei schnell ablaufenden Bewegungen die zeitunabhängigen Glieder vernachlässigt werden. Nach einmaliger Integration resultiert wieder das Hookesche Gesetz, jedoch mit einem superpositionierten Elastizitätsmodul, vgl. (3-14).

$$\sigma = (E_1 + E_2) \cdot \varepsilon_2 \quad (3-14)$$

Daraus folgt, dass der Elastizitätsmodul und damit die erforderliche Spannung bei dynamischer Verformung höher sind als bei langsam ablaufenden Prozessen. Dieses Phänomen wird als *dynamische Verfestigung* bezeichnet und ist von essentieller Bedeutung für das Verformungsverhalten von Elastomeren (SCHMITT 1987, GROSS ET AL. 2011).

Um die Differentialgleichung zu lösen und den Zusammenhang zwischen Verformungsgeschwindigkeit und resultierendem Elastizitätsmodul bei viskosen Materialien herzuleiten, wählt LINDNER (2005) einen harmonischen Ansatz für  $\sigma_1$  und  $\varepsilon_2$ , vgl. Gleichung (3-15) und (3-16). Die Größen  $\hat{\sigma}_1$  und  $\hat{\varepsilon}_2$  beschreiben dabei die komplexe Spannung bzw. die komplexe Dehnung und  $\omega$  die Anregungsfrequenz.

$$\sigma_1 = \hat{\sigma}_1 e^{i\omega t} \quad (3-15)$$

$$\varepsilon_2 = \hat{\varepsilon}_2 e^{i\omega t} \quad (3-16)$$

Die Differentialgleichung für das Poynting-Thomsen-Modell kann nach LINDNER (2005) entsprechend Gleichung (3-17) dargestellt werden.

$$\hat{\sigma} = \left( E_2 + \frac{E_1 \cdot \omega^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} + i \frac{E_1 \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \right) \cdot \hat{\varepsilon}_2 \quad (3-17)$$

### 3.3 Materialeigenschaften elastomerer Dichtungswerkstoffe

Die Gleichung ist in einen Real- und einen Imaginärteil gegliedert und setzt die Spannung ins Verhältnis zur Verformung. Es ist ersichtlich, dass der dämpfungs-freie Zweig des Modells nicht von der Anregungsfrequenz  $\omega$  abhängt. Der Betrag der Spannung ergibt:

$$|\hat{\sigma}| = \sqrt{\text{Re}(\hat{\sigma})^2 + \text{Im}(\hat{\sigma})^2} \quad (3-18)$$

Durch die komplexe Darstellung des Zusammenhangs von Spannung und Verformung ist das viskoelastische Verhalten von Elastomeren nachvollziehbar. Wird das Materialmodell mit einer äußeren Kraft belastet, so folgt die Deformation mit einer entsprechenden Phasenverzögerung (Verlustfaktor) von:

$$\tan \delta = \frac{\text{Im}(\hat{\sigma})}{\text{Re}(\hat{\sigma})} \quad (3-19)$$

Der Winkel der Phasenverzögerung wird auch Verlustwinkel genannt. Bei ideal elastischen Körpern beträgt der Verlustwinkel  $\delta = 0^\circ$ , bei rein viskosen  $90^\circ$ . Bei viskoelastischen Materialien liegt der Verlustwinkel entsprechend zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , da nur ein Teil der mechanischen Energie reversibel ist (vgl. Abbildung 25) (ANDREAS ET AL. 2012).

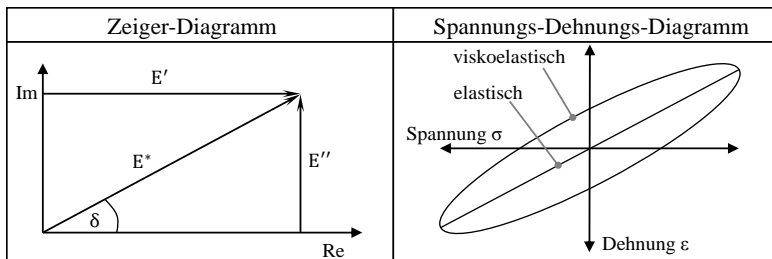


Abbildung 25: Darstellung des Verlustwinkels im Zeiger-Diagramm (links) und des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs eines viskoelastischen Körpers (rechts) in Anlehnung an ANDREAS ET AL. (2012)

Gleichung (3-17) lässt sich in der vereinfachten Form

$$\hat{\sigma} = E^* \cdot \hat{\epsilon}_2 = (E' + iE'') \cdot \hat{\epsilon}_2 \quad (3-20)$$



mit

$$E^* = E_2 + \frac{E_1 \cdot \omega^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} + i \frac{E_1 \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \quad (3-21)$$

formulieren (LINDNER 2005).

Der hier eingeführte komplexe Elastizitätsmodul  $E^*$  setzt sich aus einem imaginären und einem realen Anteil zusammen. Der Realteil wird durch den Speichermodul  $E'$  und der Imaginärteil durch den Verlustmodul  $E''$  gekennzeichnet. Der Speichermodul beschreibt die Eigenschaft des Materials, mechanische Energie zu speichern und verlustfrei wieder abzugeben. Der Verlustmodul steht für den Anteil der dissipierten Energie. In Korrelation zum Verlustwinkel charakterisiert der Speichermodul das rein elastische und der Verlustmodul das viskose Materialverhalten (ACHENBACH & FRANK 2001, LINDNER 2005, POPOV 2010, ANDREAS ET AL. 2012).

Mit steigender Anregungsfrequenz nimmt der komplexe Elastizitätsmodul zu. Dies hat zur Folge, dass der Widerstand eines Elastomerkörpers gegen Verformung mit der Verformungsgeschwindigkeit steigt. Diese Korrelation ist für die Darstellung der geschwindigkeitsabhängigen Phänomene der Elastomerreibung, auf die im nachfolgenden Kapitel im Detail eingegangen wird, besonders relevant. In Abbildung 26 ist der Zusammenhang in Abhängigkeit vom Elastizitäts- und Verlustmodul exemplarisch dargestellt.

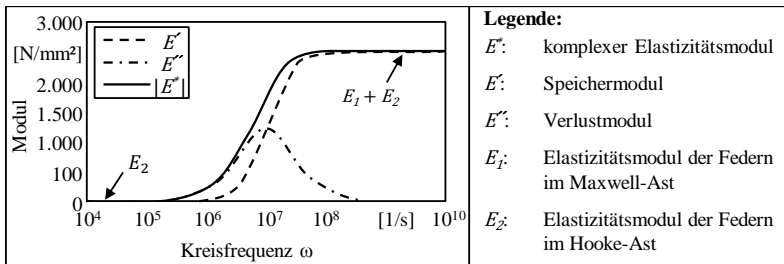


Abbildung 26: Abhängigkeit des komplexen Elastizitätsmoduls von der Anregungsfrequenz in Anlehnung an LINDNER (2005)

In Abbildung 26 wird die dynamische Verhärtung von Elastomeren mit zunehmender Anregungsfrequenz durch den steilen Anstieg des Speichermoduls und des resultierenden komplexen Elastizitätsmoduls ersichtlich. Dieser Frequenzbereich wird *Glasübergang* genannt und zeichnet sich durch ein Maximum des

### 3.4 Modelle der Elastomerreibung

---

Verlustmodul aus. Bei niedrigeren Frequenzen weist der Verlustmodul einen höheren Betrag auf als der Speichermodul. Dies ist auf den längeren Zeitraum zurückzuführen, der dem Material zur Verfügung steht, um auf äußere Kräfte mit einer Strukturänderung (viskoses Fließen) zu reagieren. Mit steigender Frequenz reduziert sich dieser Zeitraum und der Verlustmodul fällt ab. Parallel steigt der Speichermodul bis zu einem Plateau stark an. Das Material verhärtet sich und weist, bei ausreichend hoher Frequenz, Eigenschaften eines starrer Körpers mit rein elastischem Materialverhalten auf (KETTLER 2007).

Neben der Anregungsgeschwindigkeit (Zeitabhängigkeit) ist das Materialverhalten von Elastomeren ebenso von der Temperaturabhängigkeit geprägt (SCHMITT 1987). Es existiert eine sogenannte Zeit-Temperatur-Äquivalenz. Die anhand des frequenzabhängigen, komplexen E-Moduls dargestellte dynamische Verhärtung von Elastomeren wird auf molekularer Ebene darauf zurückgeführt, dass den Molekülketten mit zunehmender Anregungsfrequenz nicht ausreichend Zeit zur Verfügung steht, um in eine neue Gleichgewichtslage zu gelangen. Bei höheren Temperaturen befinden sich die Moleküle in einem Zustand höherer Beweglichkeit. Die Moleküle können einer aufgezwungenen Bewegung somit schneller folgen als bei niedrigeren Temperaturen. Quantitativ wird diese Relation abhängig von der Polymerart durch die sog. *William-Landel-Ferry-Shift-Transformation* (WLF-Shift-Funktion) beschrieben (ACHENBACH & FRANK 2001). Der Materialzustand eines Elastomers kann anhand dieser Funktion eindeutig durch die herrschende Temperatur und die Anregungsfrequenz beschrieben werden. Die Relevanz dieser Materialeigenschaft ist für den weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht tragend, da im Bereich industrieller Anwendungen annähernd konstante Bedingungen vorliegen. Daher wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen, z.B. WILLIAMS ET AL. (1955).

## 3.4 Modelle der Elastomerreibung

### 3.4.1 Trockene Reibung

Das Reibungsverhalten von Feststoffen wird im Allgemeinen durch die Gesetze von Amonton und Coulomb beschrieben. Ohne Relativbewegung ist die Reibungskraft  $F_{Reibung}$  demnach nur von der Normalkraft  $F_{Normal}$  und dem statischen Reibungskoeffizienten  $\mu_{statisch}$  abhängig.

$$F_{Reibung} = \mu_{statisch} \cdot F_{Normal} \quad (3-22)$$

Bei Überschreitung der statischen Reibungskraft setzt sich der Körper in Bewegung und dynamische Reibungskräfte ( $\mu_{dynamisch}$ ) wirken entgegen der Bewegungsrichtung. In der Regel wird angenommen, dass  $\mu_{statisch} > \mu_{dynamisch}$  und dass  $\mu_{dynamisch}$  über einen großen Geschwindigkeitsbereich konstant ist (LORENZ 2012). Elastomere unterscheiden sich in ihrem Reibungsverhalten jedoch deutlich von den sog. Feststoffen wie Metall (MOORE 1972, POPOV 2010). Im Gegensatz zu dem von Amonton als konstant angenommenen Reibungskoeffizient kann eine Abhängigkeit des Reibungsverhaltens von Elastomeren von der Geschwindigkeit, Temperatur und dem Druck nachgewiesen werden (SCHALLAMACH 1958, GROSCH 1963). Somit können die klassischen Reibungsgesetze nicht ohne Erweiterung auf die Elastomerreibung angewendet werden (CHERNYAK & LEONOV 1986).

MOORE (1972) sowie MOORE & GEYER (1974) unterteilen die Hauptkomponenten der Elastomerreibung in einen Hysterese- und einen Adhäsionsanteil (vgl. Abbildung 27). Der Zusammenhang ist in Gl. (3-23) formuliert.

$$F_{Reibung} = F_{Hyst} + F_{Adh} \quad (3-23)$$

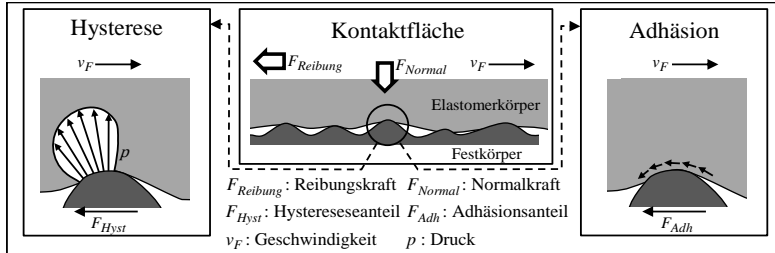


Abbildung 27: Anteile der Elastomerreibung in Anlehnung an MOORE (1972)

Der Adhäsionsanteil ( $F_{Adh}$ ) der resultierenden Reibungskraft ( $F_{Reibung}$ ) ist auf molekulare Bindungen der Kontaktpartner an der Kontaktfläche, die Hysterese-komponente ( $F_{Hyst}$ ) auf Energiedissipation während des Verformungsprozesses zurückzuführen.

Beide Reibungskomponenten hängen bei einer makroskopischen Betrachtung vom komplexen E-Modul des Elastomers ab und weisen somit ein frequenzabhängiges Reibungsverhalten auf (MOORE 1972). GROSCH (1963) zeigt, dass der Reibungskoeffizient von Gummi in gleicher Weise von der Frequenz abhängt

### 3.4 Modelle der Elastomerreibung

---

wie der komplexe E-Modul. Die contribuierenden Komponenten der Gesamtreibung werden nachfolgend detailliert dargestellt.

Über den jeweiligen, durch Adhäsion oder Hysterese verursachten Beitrag der reibungsinduzierten Energieverluste existieren in der Fachliteratur differierende Modelle. MOORE (1972) und PERSSON (2001) beschreiben den prädominanten Einfluss der Adhäsionskomponente bei trockener Reibung eines Elastomers auf einer harten, glatten Oberfläche. GROSCH (1963) führt Adhäsion an der Kontaktfläche der sich berührenden Körper sogar als einzige Reibungskomponente auf. MOFIDI ET AL. (2008) beweisen jedoch, dass selbst auf augenscheinlich glatten Oberflächen sowohl Adhäsion als auch durch Mikrorauheiten hervorgerufene Hystereseverluste zur Gesamtreibung beitragen. PERSSON (2001) nimmt zudem an, dass Adhäsion nur bei Oberflächen, die nicht verunreinigt sind, eine bedeutende Rolle spielt. Eine eindeutige Trennung zwischen hysterese- und adhäsionsverursachten Reibungsverlusten ist jedoch nicht möglich, da beide Komponenten über den komplexen E-Modul miteinander verknüpft sind.

Nach MOORE (1972), CHERNYAK & LEONOV (1986) sowie LORENZ (2012) resultieren Reibungsverluste aufgrund von Adhäsion durch das Erzeugen und Trennen molekularer Bindungen. Kommt es zu einem Kontakt zwischen einem Elastomer und einer harten Oberfläche, so binden sich Polymerketten aufgrund von Van-der-Waals-Kräften an Atome des Kontaktpartners. Bei einer auftretenden Relativbewegung zwischen dem Elastomer und der Reiboberfläche werden die Polymerketten zunächst gestreckt und Energie in den Ketten gespeichert. Steigt die Dehnung und damit die Belastung weiter an, reißen die Polymerketten vom Kontaktpartner ab und ziehen sich in einen ungeordneten Zustand niedriger Energie zurück. Bei diesem Relaxationsprozess wird Energie dissipiert (vgl. Kapitel 3.3). Daraus resultiert eine der Bewegungsrichtung entgegenwirkende Querkraft. Abbildung 28 stellt ein einfaches Kontaktmodell zwischen einem Elastomer und einer harten Oberfläche zur Verfügung. A und B bezeichnen dabei die Verknüpfungspunkte der einzelnen Polymerketten. Die Rauheit auf Molekularebene zwischen den Reibpartnern wird durch die Distanz  $\delta_R$  beschrieben.

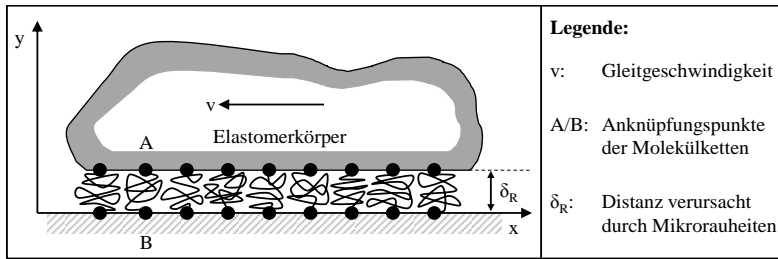


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Kontaktzone zwischen Elastomer- und festem Gegenkörper in Anlehnung an CHERNYAK & LEONOV (1986)

Aus diesem Modell der Adhäsion erschließt sich, dass mit Zunahme der Molekularbindungen, die bei auftretender Relativbewegung gedehnt werden, auch die Reibkraft steigt. Die resultierende Reibkraft  $F_{adh}$  kann demnach als Summe der einzelnen Bindungskräfte  $F_i$  der Molekularbindungen mit der Anzahl  $N_m$  entsprechend Gl. (3-24) dargestellt werden (MOORE 1972, CHERNYAK & LEONOV 1986):

$$F_{Adh} = \sum_{i=1}^{N_m} F_i \quad (3-24)$$

Die Anzahl der möglichen Molekularbindungen zwischen dem Elastomer und der Oberfläche des Kontaktpartners hängt direkt mit der wahren Kontaktfläche zusammen. Somit existiert eine direkte Relation zwischen der Reibkraft und der wahren Kontaktfläche (SCHALLAMACH 1958), die definiert wird als „(...) die Gesamtheit aller mikroskopischen Berührungsflächen, die durch Abplattung der Unebenheiten auf dem Kautschuk innerhalb der makroskopischen Kontaktfläche (...) entstehen“ (SCHALLAMACH 1955).

Nach Abreißen der Verbindung und Rückkehr in die Position des energieärmeren Zustands kommt es zu einer um eine mikroskopische Distanz verschobenen neuen Verbindung zwischen der Polymerkette und den Molekülen der Oberfläche des Reibpartners. Auf diese Weise kann der *Stick-Slip*-Prozess auf Molekularebene als Ursache für Reibungsverluste erklärt werden (MOORE 1972).

Der Anteil der Hysteresereibung wird durch die Beschaffenheit der Oberfläche, die Reibungsgeschwindigkeit und die viskoelastischen Eigenschaften des Elastomers bestimmt (MOORE 1972). Die Anregung in einer bestimmten Fre-

### 3.4 Modelle der Elastomerreibung

quenz erfolgt durch das Gleiten des Elastomers auf einer rauen, harten Oberfläche. Durch Rauheitsspitzen auf der Gleitfläche wird das Elastomer auf mikro- und makroskopischer Ebene zyklisch deformiert (BOCZKOWSKA 2012). Bei jedem Gleiten des Elastomers kommt es zu einem wiederholten Verspannen und Entspannen einiger Teilflächen in der Kontaktzone. Während der Verspannung der Volumenelemente wird Energie gespeichert. Bei der Entspannung wird diese aufgrund der viskoelastischen Materialeigenschaften und einer daraus folgenden nicht adiabatischen Deformation dissipiert (ACHENBACH & FRANK 2001) und in Wärme umgewandelt. Bei hohen Gleitgeschwindigkeiten kann diese Eigenschaft aufgrund der im vorherigen Kapitel aufgeführten Temperaturabhängigkeit zu unerwünschten Effekten bis hin zur Kohäsion führen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit stehen geringe Gleitgeschwindigkeiten ( $\leq 10$  mm/s) über geringe Wegstrecken im Fokus, so dass der geschwindigkeitsabhängige Wärmeintrag aufgrund der Hysteresereibung vernachlässigt werden kann (SCHALLAMACH 1958).

Das Prinzip der Hysteresereibung soll zunächst physikalisch an einer einzelnen Rauheitsspitze vereinfacht dargestellt werden (vgl. Abbildung 29).

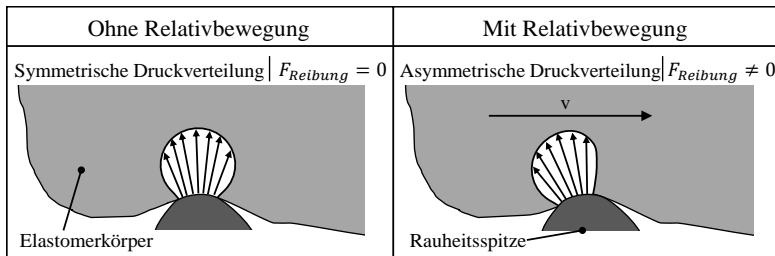


Abbildung 29: Schematisches Modell des Hystereseeanteils der Elastomerreibung in Anlehnung an MOORE & GEYER (1974)

Kommt ein Elastomerkörper mit einer harten, rauen Oberfläche in Kontakt, so verformt sich die Elastomeroberfläche im statischen Zustand entsprechend der Kontur der Oberfläche des harten Kontaktpartners. Ohne Relativbewegung resultiert dabei eine symmetrische Druckverteilung über der Rauheitsspitze. Es treten keine Reibungskräfte auf. Mit einer Relativbewegung ( $v$ ) werden eine Stauchung des Elastomerkörpers an der aufsteigenden Seite und ein erhöhtes Ablösen der Elastomeroberfläche auf der absteigenden Seite des Rauheitshügels verursacht. Dadurch verschiebt sich die Druckverteilung relativ zur Rauheitsspitze entgegen der Bewegungsrichtung nach hinten. Daraus resultiert eine Kraft, die der Relativbewegung entgegen wirkt. Der Effekt der asymmetrischen Kraftverteilung

beim Gleiten über einen Rauheitshügel ist auf die Materialeigenschaften von Elastomeren zurückzuführen (MOORE & GEYER 1974).

Die durch eine Verformung des Elastomers dissipierte Arbeit kann anhand eines Modells nach KUMMER (1966) formuliert werden. Das Modell in Abbildung 30 beschreibt ein einfaches Kelvin-Voigt-Modell, das reibungsfrei über eine sinusförmige Oberfläche gleitet.

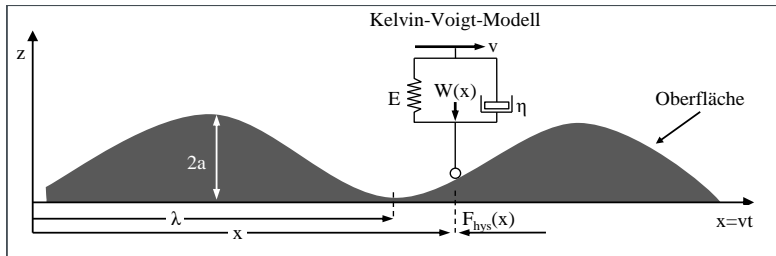


Abbildung 30: Kelvin-Voigt-Modell zur Darstellung der Hysteresereibung in Anlehnung an KUMMER (1966)

Die vertikale Position  $z$  des Kontaktpunkts wird dabei beschrieben durch:

$$z = a \cdot (1 - \cos \omega t) \quad (3-25)$$

Die Variable  $a$  stellt die halbe Höhe eines Rauheitshügels dar. Die Anregungsfrequenz  $\omega$  kann dabei auch als

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{\lambda} \quad (3-26)$$

formuliert werden.

In Gl. (3-26) beschreibt  $v$  die uniaxiale Geschwindigkeit der Relativbewegung des Kontaktpunktes. Die Variable  $\lambda$  bezeichnet die Wellenlänge. Mit der Anregungsfrequenz, dem davon zeitlich abhängigen Deformationsweg  $z$  (Deformationsgeschwindigkeit  $\dot{z}$ ) des Kelvin-Voigt-Modells und dessen Materialparametern (Elastizitätsmodul  $E$  und Viskosität  $\eta$  der Ersatzmodelle) kann die zeit- und wegabhängige Arbeit  $W$  berechnet werden:

$$W(x) = E \cdot L \cdot (z + z_0) + \eta \cdot L \cdot \dot{z} \quad (3-27)$$

### 3.4 Modelle der Elastomerreibung

---

Die Variable  $L$  beschreibt hier eine charakteristische Wegstrecke,  $z_0$  die Vorspannung des Kelvin-Voigt-Modells. Die dissipierte Energie  $E_d$  kann demnach wie folgt berechnet werden:

$$E_d = \int_0^{2\pi/\omega} W(t) \cdot \dot{z} dt \quad (3-28)$$

Mit der Eliminierung von  $z$  und dessen zeitlicher Ableitung folgt für  $E_d$ :

$$E_d = \pi \cdot a^2 \cdot \eta \cdot \omega \cdot L \quad (3-29)$$

Somit kann die auftretende Kraft der Hysteresereibung durch Division mit der sinusförmigen Wellenlänge direkt berechnet werden, vgl. Gl. (3-30). Durch Einsetzen des Verlustmoduls eines Kelvin-Voigt-Modells kann somit formell ein direkter Zusammenhang zwischen der resultierenden Kraft der Hysteresereibung und der Verlusttangente hergestellt werden, vgl. Gl. (3-31).

$$F_{Hyst} = \frac{E_d}{\lambda} \quad (3-30)$$

$$F_{Hyst} = 2 \cdot \pi^2 \cdot a^2 \cdot \left(\frac{L}{\lambda}\right) \cdot E \cdot \tan \delta \quad (3-31)$$

Die nach KUMMER (1966) und MOORE & GEYER (1974) hergeleitete Gl. (3-31) ist nur in einem eingeschränkten Geschwindigkeitsbereich gültig, d.h. nur wenn beide Reibungspartner konstant in Kontakt stehen. Sie ist daher nicht für sehr schnelle Relativbewegungen anwendbar. Bei hohen Gleitgeschwindigkeiten würde sich der Kontaktpunkt in Abbildung 30 nach dem Überschreiten der Rauheitsspitze aufgrund der Retardationseigenschaft des Dämpfers von der sinusförmigen Oberfläche ablösen. Durch weiterentwickelte Modelle kann auch dieser Effekt dargestellt werden. An dieser Stelle wird jedoch auf weiterführende Literatur verwiesen, da Gl. (3-31) den für diese Arbeit relevanten Geschwindigkeitsbereich ausreichend abdeckt (MOORE 1972).

Das hergeleitete Modell setzt eine starke Vereinfachung der Oberflächengeometrie voraus. Um die gesamte durch Gleiten eines Elastomerkörpers auf einer realen Oberfläche dissipierte Energie erfassen zu können, müssen Unebenheiten auf allen Größenskalen abgebildet werden (PERSSON 2011). Weiterentwickelte Theorien der Hysteresereibung versuchen entsprechend die Oberfläche anhand von fraktalen und selbstaffinen Oberflächen mathematisch zu beschreiben bzw. anzunähern. Siehe hierzu z.B. HEINRICH (1997), KLÜPPEL & HEINRICH (2000), PERSSON (2001) sowie MÜLLER ET AL. (2002). *Fraktale Oberflächen* zeichnen



sich durch selbstähnliche Fraktale aus und sind daher „(...) (statistisch) invariant unter isotroper Vergrößerung“ (MÜLLER ET AL. 2002). Selbstaffinität beschreibt Fraktalität im Allgemeinen und schließt zudem statistische Invarianzen unter anisotroper Vergrößerung mit ein (MÜLLER ET AL. 2002). Selbstaffine, fraktale Flächen weisen somit auf unterschiedlichen Vergrößerungsstufen die gleiche Morphologie auf (PERSSON 2001). In Abbildung 31 ist das Konzept einer fraktalen, selbstaffinen Oberfläche schematisch dargestellt.

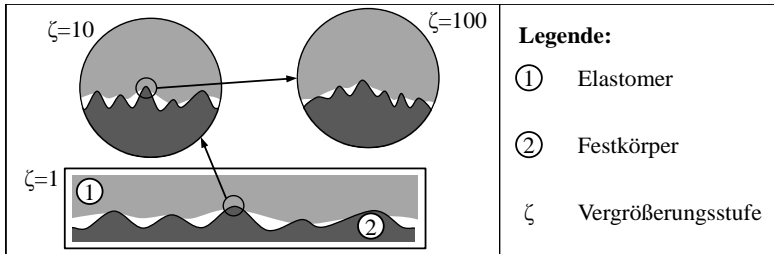


Abbildung 31: Selbstaffine, fraktale Oberfläche  
in Anlehnung an PERSSON ET AL. (2005)

Durch Zugrundelegung einer fraktalen, selbstaffinen Oberfläche und die Berücksichtigung von Unebenheiten auf unterschiedlichsten Größenskalen besteht die Möglichkeit, den Einfluss der Hysterese auf die Gesamtreibung genauer zu bestimmen. Zudem kann die Komplexität der auf die Elastomeroberfläche wirkenden Belastungen besser veranschaulicht werden. Der Elastomerkörper tritt an den Rauheitsspitzen mit dem Festkörper in Kontakt. An diesen Kontaktflächen sind die Flächenpressung und die Materialbeanspruchung am höchsten. Durch die Betrachtung der Kontaktflächen in einer höheren Vergrößerungsstufe wird deutlich, dass auch hier nur Teile der Elastomeroberfläche auf Rauheitshügeln einer geringeren Größenordnung aufliegen. Innerhalb der Fläche höchster Materialbeanspruchung aus Vergrößerungsstufe  $\zeta=1$  ist die Belastung dementsprechend nicht einheitlich. Die augenscheinlich konstante Flächenpressung verteilt sich in Vergrößerungsstufe  $\zeta=2$  erneut auf einzelne Rauheitsspitzen (PERSSON 2001). Bei einer auftretenden Relativbewegung zwischen dem Elastomer- und dem Festkörper wird die Elastomeroberfläche damit auf unterschiedlichsten Skalen beansprucht. Ein hochfrequenter Wechsel zwischen Be- und Entlastung, hervorgerufen durch die Rauheitshügel und -täler, und damit einhergehende Hystereseverluste sind die Folge. Gleichzeitig gilt es anzunehmen, dass der häufige Lastwechsel auf teilweise mikroskopischer Ebene zur Materialermüdung und Einlei-

### **3.4 Modelle der Elastomerreibung**

---

tung von Verschleißprozessen führen kann. Korrespondierend hierzu konnten z.B. GENT & PULFORD (1983) bei Versuchen zum Abrasionsverhalten von Elastomeren im Kontakt mit Festkörpern Abrasionspartikel auf unterschiedlichen Größenskalen feststellen. Die auslösenden Prozesse der in Kapitel 2.3 beschriebenen Beschädigungsmechanismen können neben den bekannten Ursachen (z.B. scharfe Kanten) somit auch auf Ursachen in unterschiedlichen Mikroebenen zurückgeführt werden.

Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Elastomeren wurden bisher fast ausschließlich unter Laborbedingungen durchgeführt (vgl. hierzu BOONSTRA & DANNENBERG (1956), SCHALLAMACH (1958), LIANG (2007), MOFIDI & PRAKASH (2011) etc.). Mit dem Ziel, Beschädigungsmechanismen während des Montageprozesses zu unterbinden, sind in weiterführenden Arbeiten anwendungsspezifische Erkenntnisse zu initiierten Prozessen der Abrasion an Elastomerdichtungen zu erarbeiten.

#### **3.4.2 Reibung unter Einsatz von Schmiermitteln**

Der Einsatz von Schmiermitteln in tribologischen Systemen hat großen Einfluss auf die resultierenden Reibungseffekte. ARVANITAKI ET AL. (1995) konnten bei Versuchen feststellen, dass der Reibungswert in geschmierter Umgebung um mindestens zwei Größenordnungen kleiner ist als bei trockener Reibung. Die Auswirkungen auf die Adhäsions- und Hysteresekomponente sowie auf die Gesamtreibung werden nachfolgend dargestellt.

Durch den Einsatz von Schmiermitteln wird der direkte Kontakt zwischen den Reibpartnern teilweise oder komplett aufgelöst. Der Adhäsionsanteil reduziert sich erheblich, da keine direkten molekularen Bindungen zwischen dem Elastomer und dem Kontaktpartner mehr hergestellt werden. Gleichzeitig trägt eine reduzierte Deformation des Elastomerkörpers zur Abnahme der Hysteresekomponente bei. Durch die Einlagerungen des Schmiermittels in den Rauheitstätern der Oberfläche kann das Elastomer nicht mehr vollständig in diese eindringen (vgl. Abbildung 32). Eine Glättung der Oberflächenunebenheiten ist die Folge.

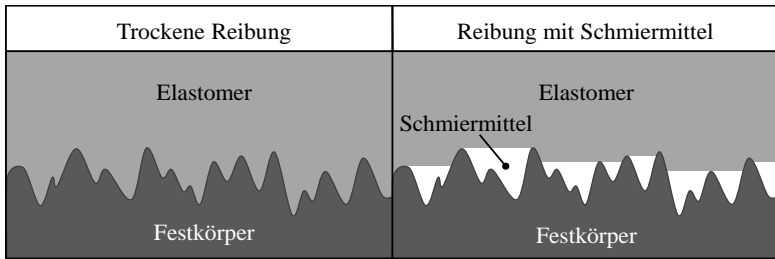


Abbildung 32: Glättung der Rauheitsspitzen durch Einbettung von Schmiermittel in Anlehnung an PERSSON ET AL. (2005)

Neben der Reduktion der im trockenen Zustand dominanten Reibungsanteile treten durch den Einsatz von viskosen Schmiermitteln weitere tribologische Effekte auf. Durch die Relativbewegung der Reibpartner kann sich ein Schmier-spalt zwischen den Kontaktpartnern ausbilden. Die Höhe und Geometrie des Spalts ist von mehreren Faktoren wie der Relativgeschwindigkeit, der Oberflächenbeschaffenheit, der Viskosität des Schmiermittels etc. abhängig. Je nach Ausprägung des Schmier-spalts können verschiedene Schmierungs- und daraus resultierende Reibungszustände differenziert werden. In Abbildung 33 ist dieser Zusammenhang durch die *Stribeck-Kurve* dargestellt.

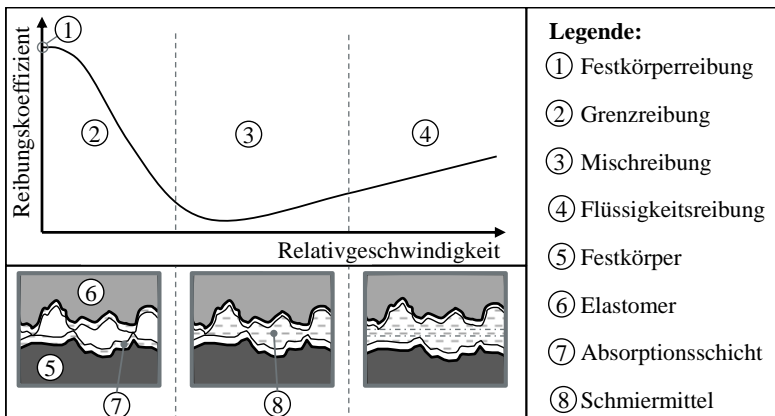


Abbildung 33: Darstellung der Reibungs-/Schmierungszustände anhand der Stribeck-Kurve in Anlehnung an ANTONSSON & GROTE (2008)

### 3.4 Modelle der Elastomerreibung

---

Die Reibungs-/Schmierzustände können entsprechend nachfolgender Definitionen unterschieden werden (ANTONSSON & GROTE 2008, CZICHOS & HABIG 2010):

- *Festkörper-/Grenzreibung*: Bei der *Festkörperreibung* treten harte Kontaktpartner in direkten Kontakt. Bilden sich auf den Oberflächen der Kontaktpartner Absorptionsschichten aus Schmierstoffmolekülen, handelt es sich um *Grenzreibung*. Die Aufnahme der Kontaktkräfte erfolgt hierbei durch die kontaktierenden Rauheitshügel. Die Relativbewegung wird jedoch innerhalb der absorbierten Schmierstoffmoleküle umgesetzt. Hydrodynamische Effekte können aufgrund der geringen Relativgeschwindigkeit und der geringen Menge an vorhandenem Schmiermittel in der Kontaktzone vernachlässigt werden.
- *Mischreibung*: Hierbei handelt es sich um einen Reibungszustand, bei dem Effekte aus den Phasen der *Grenz-* und *Flüssigkeitsreibung* auftreten. Belastungen werden teilweise vom elasto-hydrodynamisch erzeugten Flüssigkeitsfilm, aber auch von den Rauheitshügeln der Kontaktpartner aufgenommen.
- *Flüssigkeitsreibung*: Die Kontaktkörper werden vollständig durch den Schmiermittelfilm getrennt. Auftretende Reibungskräfte werden ausschließlich durch interne Reibungseffekte des Schmierfilms verursacht. Eine Besonderheit der Flüssigkeitsreibung von elastomeren Dichtkörpern ist der Zustand der elasto-hydrodynamischen Schmierung (engl. elasto-hydrodynamic lubrication; EHL). EHL tritt auf, wenn der Kontaktdruck zweier Körper im geschmierten Zustand zur elastischen Deformation mindestens eines Kontaktpartners, jedoch nicht zu einer Viskositätsänderung des Schmiermittels führt (VICENTE ET AL. 2006). Die Geometrie des entstehenden Schmierpals zwischen Elastomerkörper und harter Gegenfläche wird durch die am Dichtspalt wirkende Normalkraft, die Viskosität des Schmiermittels, die Relativgeschwindigkeit und insbesondere auch von den Elastizitätsmoduln der Kontaktpartner bestimmt (ANTONSSON & GROTE 2008). Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten geringen Fügegeschwindigkeiten spielt elasto-hydrodynamisches Reibungsverhalten eine untergeordnete Rolle. An dieser Stelle wird daher auf weiterführende Fachliteratur verwiesen, wie z.B. KARASZKIEWICZ (1987), KREIL (2008), NIKAS (2010) etc.

Im Fokus der Untersuchungen steht das Verhalten der Elastomerdichtungen im Regime der Mischreibung. Abbildung 34 zeigt die Verteilung des Schmiermittels in der Nabe nach Montage einer Kolbendichtung.

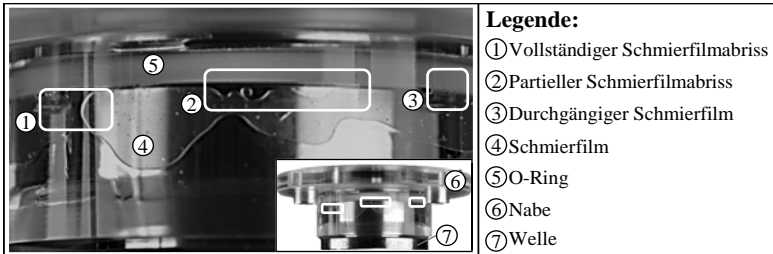


Abbildung 34: Schmiermittelverteilung an der Kontaktfläche einer O-Ring-Dichtung

Das viskose Schmiermittel wurde vor der Montage gleichmäßig auf den O-Ring aufgetragen. Während des Fügevorgangs kommt es zu Abrissen des Schmierfilms sowie zu Unregelmäßigkeiten bei der Schmiermittelverteilung auf der Bohrungs- und O-Ring-Oberfläche. Eine vollständige Trennung der Kontaktpartner ist so nicht möglich. Kontakte zwischen den Rauheitshügeln an den Oberflächen des Elastomerdichtrings und der Nabe sind die Folge. Durch den deutlich höheren Elastizitätsmodul des Nabenmaterials und den unmittelbaren Kontakt bei auftretender Relativbewegung kann es, analog zur trockenen Reibung, zu Materialabtrennprozessen an der Oberfläche des Elastomerdichtrings kommen. Resultierende Beschädigungsmechanismen des tribologischen Systems *Kolbendichtung* wurden bereits in Kapitel 2.3 ausführlich beschrieben.

### 3.5 Detailanalyse der Fügephasen

Während des Fügeprozesses von Kolbendichtungen erfährt der Elastomerdichtring (O-Ring) eine konstruktiv bedingte Verformung. Durch die Relativbewegung der Welle zur Nabe treten Reibungseffekte in unterschiedlicher Ausprägung zwischen dem O-Ring und den Bauteiloberflächen auf. Wird die erforderliche Kraft über den Weg entlang der Fügebewegung aufgezeichnet, entsteht ein charakteristischer Kraftverlauf. In Abbildung 35 ist der Fügekraftverlauf des Montagevorgangs einer Kolbendichtung schematisch dargestellt. Anhand der in den vorherigen Kapiteln dargestellten Materialeigenschaften von Elastomeren und

### 3.5 Detailanalyse der Fügephasen

---

des daraus resultierenden Reibungsverhaltens können die einzelnen Ausprägungen der Fügekurve nachvollzogen werden.

Der Verlauf in Abbildung 35 weist mehrere prägnante Merkmale auf. Zu Beginn der Messung verläuft die Kurve auf Nullniveau. Darauf folgt ein starker Kraftanstieg bis hin zu einem lokalen Maximum. Dem anschließenden Abfall schließt sich ein annähernd konstanter Verlauf auf mittlerem Kraftniveau an. Die Verlaufskurve endet mit einem beinahe senkrechten Anstieg, hervorgerufen durch den Kontakt zwischen Welle und Bohrung an der Zielposition.

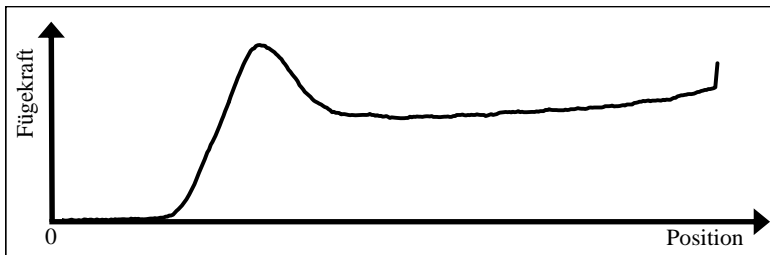


Abbildung 35: Schematischer Kraftverlauf des Fügevorgangs einer Kolbendichtung

Entsprechend der Reihenfolge der auftretenden Merkmale kann der Fügeprozess, analog dem Vorgehen in REINHART & SIEBEN (2013), in konsekutive Phasen aufgeteilt werden. Eine Analyse der in den singulären Phasen auftretenden Phänomene ist so detailliert durchführbar. Abbildung 36 zeigt die Abgrenzungen der einzelnen Fügephasen und die jeweils zugehörige relative Position des Kolbens zur Bohrung.

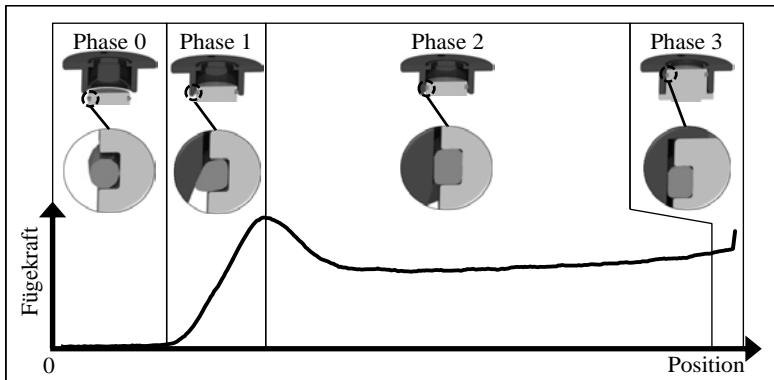


Abbildung 36: Phasen des Fügekraftverlaufs  
in Anlehnung an REINHART & SIEBEN (2013)

*Phase 0* beschreibt den Verlauf der Fügekraft vor dem Erstkontakt des O-Rings mit der Bohrungsoberfläche bzw. Einführfase. Der O-Ring sitzt in der Nut der Welle und ist in Kontakt mit dem Nutgrund. Hierbei wird eine Auslegung der Dichtverbindung entsprechend DIN ISO 3601 (2010) zugrunde gelegt. Der Nutgrunddurchmesser ist größer dimensioniert als der Innendurchmesser des O-Rings. Der Dichtring wird somit konstant aufgedehnt. Dies hat eine geringfügige Reduzierung des Schnurdurchmessers zur Folge. Die Aufdehnung des O-Rings verursacht aufgrund des elastischen Materialverhaltens eine Anpressung des O-Ring-Innendurchmessers an den Nutgrund. Die resultierenden statischen Reibungskräfte bewirken, dass der O-Ring ohne Einwirkung aufgezwungener äußerer Kräfte die Position in der Nut beibehält. Die Nut ist nach DIN ISO 3601 (2010) breiter dimensioniert als der Schnurdurchmesser des O-Rings, um dem nahezu inkompressiblen Elastomerring Raum zur Verfügung zu stellen, in dem er sich bei aufgezwungener Verformung deformieren kann.

Die Lage des O-Rings in der Nut wird während der O-Ring-Montage bestimmt. Die bisher betrachteten Material- und Reibeigenschaften von Elastomeren haben in dieser Phase keinen Einfluss auf den Fügekraftverlauf.

*Phase 1* beginnt mit dem Erstkontakt zwischen O-Ring und Einführfase. Abhängig von der Position des O-Rings in der Nut wird dieser zunächst bis zur hinteren Nutwand verschoben. Hierzu sind die Reibungskräfte zwischen dem Innendurchmesser des O-Rings und dem Nutgrunddurchmesser zu überwinden. Die

### 3.5 Detailanalyse der Fügephasen

aufzuwendende Fügekraft ist jedoch minimal im Verhältnis zu den weiteren auftretenden Kräften im Verlauf des Fügeprozesses.

Durch die Fortführung der Fügebewegung wird der O-Ring zunehmend an die Einführfase gepresst. Daraus resultieren eine Verformung des O-Ring-Querschnitts sowie eine Relativbewegung zwischen O-Ring-Oberfläche und der Einführfase. Der starke Anstieg der erforderlichen Fügekraft in Phase 1 resultiert aus einer Überlagerung von Deformations- und Reibungsverlusten. Durch die zunehmende Deformation des O-Rings aufgrund der sich verjüngenden Einführfase kommt das nicht ideal entropie-elastische Verformungsverhalten von Elastomeren zum Tragen. Geringfügige Fließvorgänge des Materials bedingen Dissipationsverluste, die durch eine zunehmende Fügekraft auszugleichen sind. Die Elastizität des Elastomers verursacht eine Flächenpressung an der Kontaktstelle, die durch eine äquivalente Normalkraft dargestellt werden kann. Ein Anteil dieser Normalkraft wirkt entgegen der Fügerichtung. In Abbildung 37 wird dies anhand eines Kräfteparallelogramms verdeutlicht. Die auf die Einführfase lotrecht wirkende Normalkraft ( $F_N$ ) kann in einen Bestandteil entgegen ( $F_{Nz}$ ) der und einen senkrecht ( $F_{Nx}$ ) zur Fügerichtung zerlegt werden.

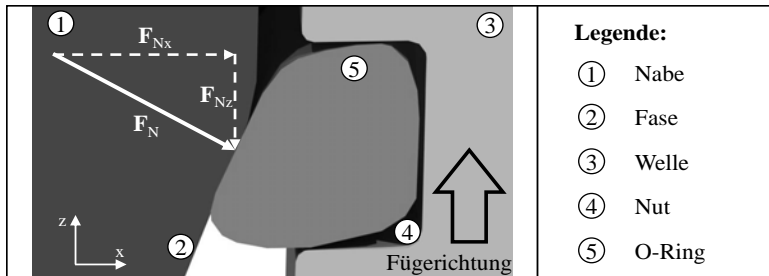


Abbildung 37: Kräfteparallelogramm der auf den O-Ring wirkenden Normalkraft

Eine weitere Ursache für das Kraftmaximum in Phase 1 sind die zu überwindenden Reibungsverluste. Entsprechend Kapitel 3.4 kontribuieren Hysterese- und Adhäsionsanteile zur Gesamtreibung. Hystereseverluste, verursacht von der Deformation des Elastomerrings durch die Fasengeometrie, wurden bereits betrachtet. Zur Gesamtreibung tragen weiterhin Hystereseverluste, hervorgerufen durch Mikrounebenheiten an der Fasenoberfläche, bei. Nach DIN ISO 3601 (2010) wird für Fasen eine Oberflächengüte mit einem Mittenrauwert  $R_a = 1,6 \mu\text{m}$  oder einer mittleren Rautiefe  $R_z = 6,3 \mu\text{m}$



gefordert. Dem Anschein nach stellen diese Rauheitskennwerte eine glatte Oberfläche dar.

Abbildung 38 zeigt das gemessene Oberflächenprofil einer Metalloberfläche mit einem Mittenrauwert  $R_a = 1,59 \mu\text{m}$  und einer mittleren Rautiefe  $R_z = 6,26 \mu\text{m}$ . Die Rauheitskennwerte dieser Messprobe liegen knapp unter den in DIN ISO 3601 (2010) geforderten Werten. Dennoch sind die mikroskopischen Rauheitshügel auf der Oberfläche durch das Tastschnittverfahren klar ersichtlich. Diese Mikrounebenheiten führen ebenfalls zu Deformationen an der Oberfläche des O-Rings und verursachen Energiedissipationen, die eine Erhöhung der Fügekraft bedingen. Mit zunehmender Verpressung des O-Ring-Querschnitts durch die Einführfase nimmt die durch die Elastizität des Materials bedingte Flächenpressung zu. Als Folge dringen die Rauheitshügel der Fasenoberfläche tiefer in die Oberfläche des O-Rings ein. Der Betrag der Energiedissipation nimmt zu. Am Übergang der Fase zum konstanten Bohrungsdurchmesser erreichen die Hystereseanteile auf Makro- und Mikroebene ihr Maximum.

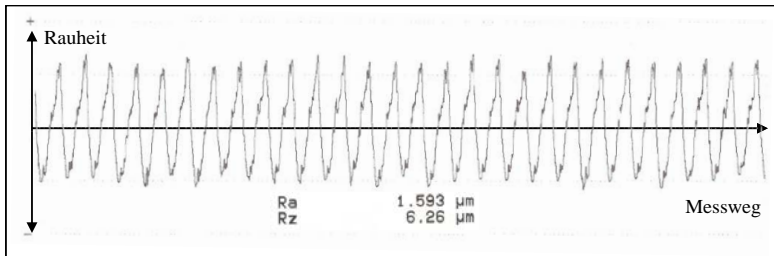


Abbildung 38: Durch Tastschnittverfahren erzeugtes Messprotokoll einer technischen Oberfläche

Analog nimmt der Betrag der Adhäsionsverluste mit ansteigender Verformung des O-Ring-Querschnitts zu. Entsprechend Gl. (3-24) ist der Adhäsionsanteil der Reibung abhängig von der Summe an Molekularbindungen. Der Anteil der möglichen Bindungen nimmt mit der *wahren Kontaktfläche* der Reibpartner zu. Die wahre Kontaktfläche ist abhängig von der Druckverteilung und steigt mit dem Kontaktdruck (SCHALLAMACH 1955, SCHALLAMACH 1958). Dieser für Elastomere allgemeingültige Zusammenhang zwischen wahrer Kontaktfläche und Flächenpressung wird durch Untersuchungen von OKAMURA ET AL. (2002) für O-Ringe bestätigt. Anhand optischer Messungen kann eine Zunahme der scheinbaren und wahren Kontaktfläche bei steigendem Kontaktdruck für O-Ringe nachgewiesen werden. Abbildung 39 zeigt eine binarisierte Abbildung der wahren

### 3.5 Detailanalyse der Fügephasen

---

Kontaktfläche mit zunehmendem Verpressungsgrad eines O-Rings. Die Berührungsflächen sind schwarz dargestellt.

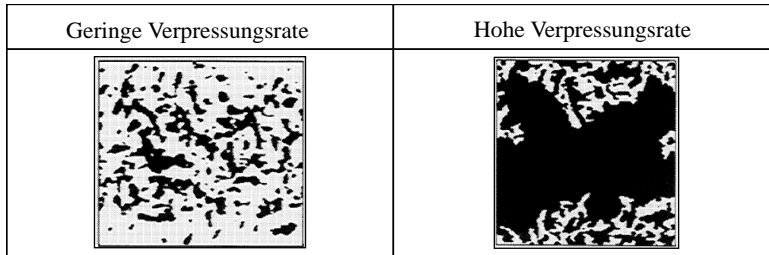


Abbildung 39: *Binärisierte Abbildung der wahren Kontaktfläche eines O-Rings bei unterschiedlichen Verpressungsraten (engl. compression rate) in Anlehnung an OKAMURA ET AL. (2002)*

Durch Gleiten des O-Rings an der Einführfase der Bohrung und die resultierende zunehmende Verformung erhöht sich der Kontaktdruck an der Berührungsfläche stetig. Daraus erfolgt, wie zuvor dargestellt, eine Zunahme der wahren Kontaktfläche und der Anzahl an Molekularverbindungen. Durch den stetigen Gleitvorgang des O-Rings reißen diese kontinuierlich neugebildeten Verbindungen und Energie wird dissipiert. Die Summe der dissipierten Energie steigt entsprechend mit zunehmender Verpressung des O-Rings. Das Maximum des Adhäsionsanteils an der Gesamtreibung ist damit bei Übergang der Einführfase zum konstanten Durchmesser der Bohrung erreicht.

*Phase 2* wird durch die stetige Geometrie des Nabeninnendurchmessers charakterisiert. Der O-Ring ist vollständig verpresst. Durch die parallel zur Fügeichtung verlaufenden Bohrungsflächen entfallen die auf die Fügekraft wirkenden Normalkraftanteile. Daraus resultiert eine unmittelbare Reduzierung der erforderlichen Fügekraft, sobald der O-Ring die Einführfase vollständig durchfahren hat. *Phase 2* wird durch Energiedissipationen aufgrund von Adhäsions- und Hystereseeffekten auf der Mikroebene dominiert. Bei einer gleichbleibenden Fügegeschwindigkeit und einem zur Bohrungsachse koaxial verlaufenden Fügeweg stellt sich ein nahezu konstanter Kraftverlauf ein.

Abgeschlossen wird der Fügeprozess in *Phase 3* durch den Kontakt der Welle mit der Bohrung an der Zielposition und einen dadurch verursachten nahezu senkrechten Anstieg der Fügekraft.

Die Ausprägung der einzelnen in Phase 1 und 2 zur erforderlichen Fügekraft kontribuierenden Widerstände der Normal- oder Reibungskraft sind von unterschiedlichsten Faktoren abhängig. Entsprechend kann der Verlauf der Fügekraftkurve variieren. In Abbildung 40 wird diese Abhängigkeit am Beispiel des Normalkraftanteils in Zusammenhang mit dem Fasenwinkel verdeutlicht. Mit zunehmendem Fasenwinkel ( $\alpha_1 < \alpha_2$ ) kann anhand des Kräfteparallelogramms ein ebenfalls zunehmender, von der Fügekraft zu überwindender Normalkraftanteil ( $F_{Nz1} < F_{Nz2}$ ) festgestellt werden.

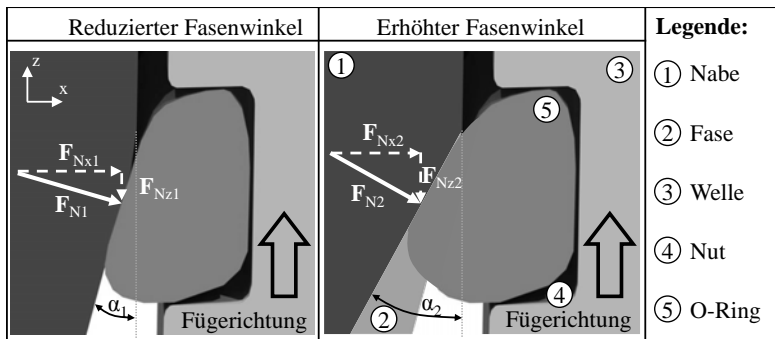


Abbildung 40: Veränderung des Kräfteparallelogramms der Normalkraft  $F_N$  in Abhängigkeit vom Fasenwinkel  $\alpha_i$

Der Einfluss der Fügegeschwindigkeit und von Fügehilfsmitteln auf die resultierende Fügekraft wird in REINHART & SIEBEN (2013) beschrieben. Empirisch kann dargelegt werden, dass eine Erhöhung der Fügegeschwindigkeit eine Zunahme der Fügekraft zur Folge hat. Eine theoretische Plausibilisierung dieses Effekts erfolgt anhand des frequenzabhängigen komplexen Elastizitätsmoduls von Elastomeren. Eine erhöhte Relativgeschwindigkeit zwischen O-Ring- und Bohrungs-Oberfläche führt zu einer höheren Anregungsfrequenz des Elastomers durch die Mikrounebenheiten auf der Bohrungs Oberfläche. Durch die Kopplung der Anregungsfrequenz mit dem Hysterese Koeffizienten bzw. dem Verlustmodul nehmen die Dämpfungsverluste mit zunehmender Fügegeschwindigkeit zu. Die Abhängigkeit der Hysteresereibung von der Anregungsfrequenz kann auch anhand Gl. (3-29) und (3-30) nachvollzogen werden. In REINHART & SIEBEN (2013) wird zudem eine mindernde Wirkung von Fügehilfsmitteln auf die Fügekraft beschrieben. Abhängig von der Viskosität des Schmierstoffs wird der direkte Kontakt zwischen O-Ring- und Bohrungs-Oberfläche aufgehoben. Molekularbindungen sind nicht mehr möglich. Der Adhäsionsanteil an der Reibung nimmt

### 3.5 Detailanalyse der Fügephasen

ab. Gleichzeitig füllt das Fügemitte die Rauheitstäler auf der harten Oberfläche aus und nivelliert dabei auftretende Rauheitshügel. Die Deformationsverluste und damit der Hystereseanteil an der Gesamtreibung nehmen ab. Im Rahmen der dargestellten Versuche verringert sich die Fügekraft mit zunehmender Viskosität des Fügehilfsmittels (REINHART & SIEBEN 2013).

Die Merkmalsausprägungen der Verlaufskurve werden neben der Fügegeschwindigkeit und den Schmiermitteln auch durch eine Vielzahl weiterer Einflussfaktoren bestimmt. Qualitativ kann der Verlauf der Fügekraft unter Berücksichtigung der einwirkenden Hauptkomponenten (Normalkraft, Hysterese- und Adhäsionsverluste) entsprechend Abbildung 41 dargestellt werden.

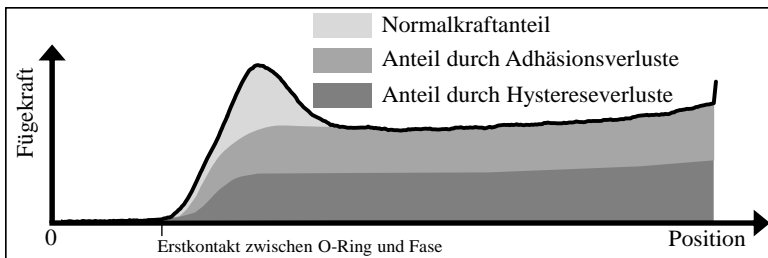


Abbildung 41: *Qualitative Darstellung der contribuierenden Komponenten der erforderlichen Fügekraft*

# 4 Prozessüberwachungskonzept

## 4.1 Allgemeines

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Fügeprozess bereits im Detail untersucht und contribuierende Komponenten der Fügekraft wurden ermittelt. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden im folgenden Abschnitt relevante Prozesskennwerte identifiziert und auf ihre Tauglichkeit als Überwachungsgröße geprüft. Nach der Bewertung und Auswahl erfolgt die Definition und Ermittlung des Soll-Zustands dieser Prozesskennwerte, um einen Abgleich mit dem Ist-Zustand zu ermöglichen. Die Differenz zwischen dem idealisierten Soll- und dem stochastisch beeinflussten Ist-Zustand dient im weiteren Verlauf als Beurteilungsgröße für Abweichungen an Produkt oder Prozess und damit auch für die Beschädigungsgefahr des O-Rings.

## 4.2 Anforderungen an Prozesskennwerte

Als Ziel der Prozessüberwachung von Fertigungsprozessen definieren WECK & BRECHER (2006) die Gewährleistung der vorgegebenen Produktqualität sowie das Verhindern von Prozessstörungen. Im Rahmen der Überwachung werden Prozesskennwerte (Ist-Zustand) mit einem vorgegebenen Soll-Zustand verglichen (Zustandsvergleich). Die Überprüfung erfolgt anhand einer Grenzwertanalyse. Hierbei werden definierte maximale und minimale Werte oder Toleranzbänder zur Beurteilung eines Zustands herangezogen. Bei einer Überschreitung der definierten Ober- und Untergrenzen des erfassten Prozesskennwerts lassen sich Rückschlüsse auf Unsicherheiten im Prozess bzw. Fehler ziehen. Die nachgelagerte Interpretation der detektierten Abweichungen erfolgt in der Diagnosephase (WECK & BRECHER 2006). Der Ist-Zustand eines Prozesses wird durch dessen Prozesskennwerte bestimmt. Entsprechend der Definition einer Prozessüberwachung nach WECK & BRECHER (2006) lassen sich folgende Anforderungen an zu überwachende Kennwerte ableiten (vgl. Abbildung 42):

- Messbarkeit im Prozess
- Aussagefähigkeit über den Prozesszustand
- Verfügbarkeit des Soll-Zustands
- Verfügbarkeit von Toleranzbändern

### 4.3 Auswahl der Prozesskennwerte

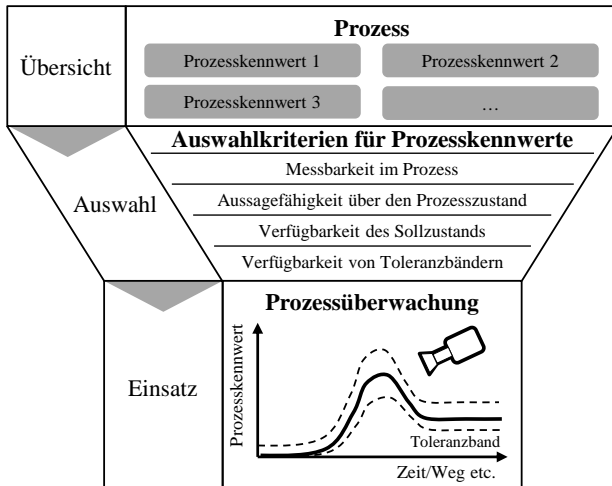


Abbildung 42: Auswahlkriterien für Prozesskennwerte

### 4.3 Auswahl der Prozesskennwerte

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, ist zur Prozessüberwachung der Abgleich eines Ist- mit einem Soll-Zustand erforderlich. Zur Überwachung und Beurteilung des Fügeprozesses von Kolbendichtungen ist ein adäquater Prozesskennwert auszuwählen, der die definierten Anforderungen erfüllt.

Bereits in Kapitel 3.5 wird die Abhängigkeit der Fügekraft von diversen Einflussparametern beschrieben. Durch eine kontinuierliche Messung entlang des Fügewegs entsteht ein charakteristischer, dem wirkenden Beanspruchungskollektiv korrespondierender Verlauf. Das Beanspruchungskollektiv umfasst dabei alle Kraftkomponenten, die während der Fügeoperation auf den O-Ring wirken (Anteile der Verformung, Reibung etc.).

Die zuvor definierten Anforderungen an Prozesskennwerte sind für die Fügekraft zu prüfen. Durch eine einfache in die Handhabungsvorrichtung integrierte Sensorik kann der Kraftwert zu jeder Zeit und entsprechend auch an jeder Position des Fügevorgangs erfasst werden. Durch die direkte Kopplung der Fügekraft an eine Vielzahl relevanter Einflussfaktoren ist eine Beschreibung des aktuellen Prozesszustands sehr gut möglich. Änderungen an Prozess (z.B. Werker vergisst das vorgesehene Fügehilfsmittel) oder Produkt (z.B. O-Ring mit zu geringer Härte

montiert) wirken sich direkt auf die Fügekraft aus und sind auf diese Weise mittelbar detektierbar. Die Verfügbarkeit eines dem Soll-Zustand entsprechenden Fügekraftverlaufs sowie korrespondierender Toleranzbänder kann durch verschiedene Herangehensweisen sichergestellt werden. Die Fügekraft erfüllt somit alle Auswahlkriterien, die an zu überwachende Prozesskennwerte gestellt werden (vgl. Abbildung 43). Weitere potenzielle Prozesskennwerte, wie z.B. die Fügegeschwindigkeit, resultieren direkt aus der Fügekraft und stellen damit nur eine mittelbare Messgröße dar.

Auswahlkriterien Prozesskennwert	Fügekraft
Messbarkeit im Prozess	einfach messbar ✓
Aussagefähigkeit über Prozesszustand	hohe Aussagefähigkeit ✓
Verfügbarkeit Sollzustand	durch unterschiedliche ✓
Verfügbarkeit Toleranzbänder	Verfahren ermittelbar ✓

Abbildung 43: Fügekraft als Prozesskennwert

#### 4.4 Definition und Ermittlung des Soll-Zustands

Prozesskennwerte unterliegen der Beeinflussung diverser Parameter. Die qualitative und quantitative Ausprägung eines Prozesskennwerts ist charakteristisch für eine oder mehrere Parameterkonstellationen. Der Soll-Zustand eines Prozesses kann demnach durch eine Konstellation von Soll-Parametern definiert werden. Für den hier betrachteten Fügevorgang von Kolbendichtungen ist der Soll-Zustand des Prozesskennwerts durch einen von Soll-Parametern (z.B. Konstruktion, Material etc.) abhängigen Fügekraftverlauf vorgegeben. Der Anwender definiert die erforderlichen Soll-Parameter entsprechend der gewünschten Zielsetzung der Prozessüberwachung. Ziel dieser Arbeit ist die Verbesserung der Qualität des Montageprozesses und die Reduzierung des Beschädigungsrisikos von Kolbendichtungen während der Montage. Basierend auf der Annahme, dass jede Abweichung vom vorgegebenen Fügekraftverlauf ein potenzielles Beschädigungsrisiko darstellt, wird der Soll-Zustand definiert als Fügekraftverlauf, der sich unter kontrollierten Bedingungen ergibt, wenn alle beeinflussbaren Parameter exakt den definierten Vorgaben entsprechen. Dies gilt sowohl für Konstruktions- als auch für Prozessparameter. Der Ist-Zustand dagegen ist charakterisiert durch stochastisch und periodisch auftretende Störgrößen (vgl. Abbildung 44).

## 4.5 Modellierung des Soll-Zustands

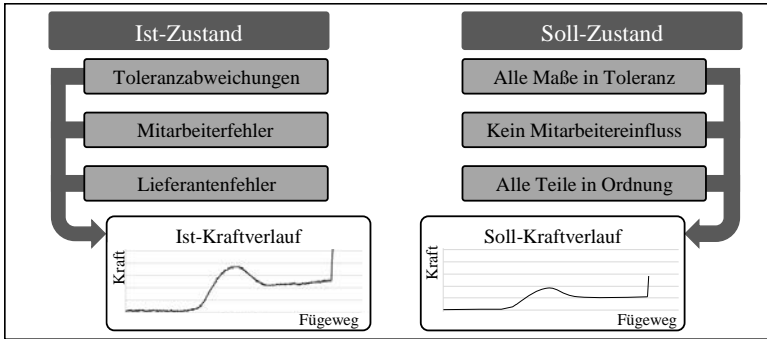


Abbildung 44: Abgleich zwischen Soll- und Ist-Zustand des Prozesskennwerts

Die Ermittlung des Soll-Zustands für einen bestimmten Prozess mit variierenden Parameterkonstellationen stellt eine Herausforderung dar. Nach WECK & BRECHER (2006) sind Vorgaben für den Soll-Zustand schwierig zu ermitteln und erst über Lernvorgänge am laufenden Prozess zu bestimmen. Für jede gewünschte Parameterkonstellation verursacht diese Vorgehensweise (z.B. *vollfaktorielle* Versuchsplanung) einen hohen Materialeinsatz durch eine hohe Anzahl an Prozesswiederholungen. Vor dem Hintergrund, im Rahmen dieser Arbeit ein Überwachungskonzept für eine hohe Varianz an Kolbendichtungen zu entwickeln, stellt dieses Verfahren aufgrund der zu erwartenden Kosten- und Zeitintensität keine Alternative dar.

Über Methoden der *statistischen* Versuchsplanung kann mit vergleichsweise geringem Aufwand eine große Anzahl an Parametervariationen abgedeckt werden. Beliebige Soll-Zustände innerhalb des definierten Parameterraums sind durch den Einsatz von Prognosemodellen berechenbar. Basierend auf dem überschaubaren Einmalaufwand und der einfachen Anwendung wird diese Methode im Rahmen dieser Arbeit weiterverfolgt. Das Vorgehen der Modellbildung ist in Kapitel 5 detailliert beschrieben.

## 4.5 Modellierung des Soll-Zustands

Bei der Erstellung der Prognosemodelle (sog. Modellierung) zur Ermittlung des Soll-Verlaufs der Kraftkurve ist zu beachten, dass Modelle nicht originalgetreu gestaltet werden können (BANDOW & HOLZMÜLLER 2009). Wesentlicher Bestandteil der Modellierung ist die Abstraktion des zu modellierenden Objekts.



Unter Abstraktion wird hier ein Verfahren verstanden, das zur Reduzierung der Komplexität eines Problems führt. Zur Abstraktion können zwei Vorgehen angewendet werden. Unter Reduktion wird der Verzicht auf unwichtige Details verstanden. Idealisierung wird als Vereinfachung realer Gegebenheiten definiert. Ein höheres Systemverständnis kann so erzielt und der Datenerhebungsaufwand reduziert werden (VDI 3633 1996).

Im Rahmen der Modellierung wird der kontinuierliche Fügekraftverlauf entsprechend reduziert und zerlegt. Der Verlauf wird in einzelne Stützpunkte aufgeteilt, die in definierten Abständen über den gesamten Fügeweg positioniert werden (vgl. Abbildung 45). Dieses Vorgehen ermöglicht eine diskrete Bestimmung des Soll-Zustands an definierten Stützpunkten. Für jeden dieser Stützpunkte ist ein eigenes Prognosemodell zu bilden. Die Fügekraft kann so für die einzelnen Stützpunkte in Abhängigkeit von relevanten Parametern berechnet werden.

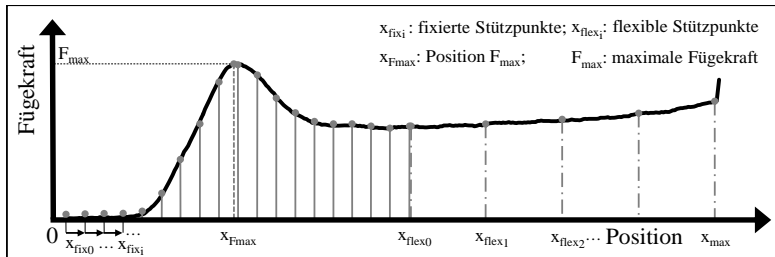


Abbildung 45: Aufteilung der fixierten und flexiblen Stützpunkte entlang der Fügekurve

Die Anzahl und Positionierung der Stützpunkte bestimmt die Abbildungsschärfe des kontinuierlichen Kraftverlaufs. Der Aufwand der Modellerstellung steigt dabei proportional mit der Anzahl der Stützpunkte. Ein Kompromiss aus Aufwand und Nutzen zusätzlicher Stützpunkte muss dabei gefunden werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der grundlegende Verlauf der Fügekurve darzustellen ist. Da der Fügeweg je nach Parametrierung variabel ist, bietet sich eine Kombination aus fixierten und flexiblen Stützpunkten an. Fixierte Stützpunkte werden über den vom Fügeweg unabhängigen Verlauf der Kurve verteilt ( $x_{fix}$ ). Der erste fixierte Stützpunkt liegt dabei vor dem konstruktiv bedingten Punkt des ersten Kontakts zwischen O-Ring und Einführfase. Flexible Stützpunkte ( $x_{flex_i}$ ) werden über den vom Fügeweg abhängigen Verlauf der Fügekurve nach definierten Vorgaben und abhängig vom maximalen Fügeweg  $x_{max}$  verteilt. Als wichtiger Indikator für die Beurteilung des Fügeprozesses dient die maximal auftretende

## 4.6 Vergleich von Soll- und Ist-Zustand

---

Fügekraft  $F_{max}$ . Da diese nicht zwingend an einem fixierten oder flexiblen Stützpunkt auftritt, wird hierfür ein zusätzlicher variabler Stützpunkt eingeführt. Da die Position  $x_{Fmax}$  der maximalen Kraft ebenfalls von externen Faktoren abhängt, ist ein weiteres Modell zur Positionsbestimmung zu entwickeln. In Abbildung 45 ist die Aufteilung der einzelnen Stützpunkte schematisch dargestellt.

### 4.6 Vergleich von Soll- und Ist-Zustand

Im Gegensatz zur aufwendigen Ermittlung des Soll-Zustands wird der Ist-Zustand durch die kontinuierlich gemessene Verlaufskurve der Fügekraft beschrieben. Zur Beurteilung des Fügeprozesses müssen die tatsächlich gemessenen mit den prognostizierten Werten an den jeweiligen Stützstellen verglichen werden. Das Ergebnis des sog. Zustandsvergleichs (Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert) wird Symptom genannt und dient als Bewertungsgröße für den Prozesszustand (WECK & BRECHER 2006). Der Zustandsvergleich wird für alle definierten Stützpunkte durchgeführt.

Für die resultierenden Abweichungen sind Toleranzgrenzen zu definieren, die eine Klassifizierung des Fügevorgangs hinsichtlich der Beschädigungsgefahr zulassen. Als Toleranzbänder werden sog. Konfidenzintervalle herangezogen.

Experimentell ermittelte Messwerte schließen immer eine Streuung mit ein, die auch bei der Erstellung der Prognosemodelle einfließt. Ein Konfidenzintervall ergibt sich aus der Standardabweichung der Versuchsergebnisse und schließt mit einer zuvor festgelegten Sicherheitswahrscheinlichkeit den wahren Mittelwert mit ein. Für jede Punktschätzung der einzelnen Prognosemodelle kann ein korrespondierendes Konfidenzintervall berechnet werden.

Auf diese Weise werden die prognostizierten Soll-Werte mit Konfidenzintervallen unter Berücksichtigung aller stochastisch auftretenden Störgrößen angegeben. Als Grenzwerte der Klassifizierung werden üblicherweise 95 %-Konfidenzintervallgrenzen definiert (KLEPPMANN 2001, SCHEFFLER 1986). Liegt der Ist-Wert innerhalb des 95 %-Konfidenzintervalls des prognostizierten Soll-Werts, werden die Abweichungen als *akzeptabel* eingestuft. Überschreitet die ermittelte Differenz der Werte die Konfidenzgrenze, ist der Fügevorgang als *kritisch* bzw. *beschädigungsgefährdet* einzustufen. Abbildung 46 zeigt die entlang des Fügewegs festgelegten Stützpunkte mit den jeweiligen anhand des Prognosemodells berechneten Soll-Werten. Das zugehörige Konfidenzintervall wird durch einen vertikalen Strich aufgespannt. Die Breite des Intervalls variiert trotz einheitlicher

Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % von Stützpunkt zu Stützpunkt, da es für jedes Prognosemodell unabhängig berechnet wird.

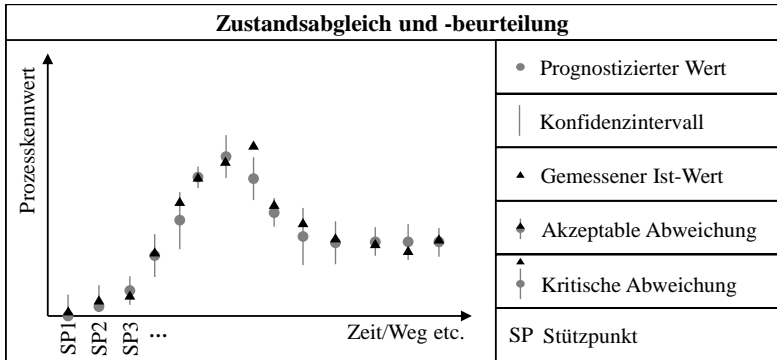


Abbildung 46: Zustandsabgleich und Beurteilung zwischen Soll- und Ist-Wert des Prozesskennwerts am Beispiel der Fügekurve

# 5 Entwicklung eines empirischen Prognosemodells

## 5.1 Allgemeines

„Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. (...) Es wird genutzt, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung mittels direkter Operationen am Original nicht möglich oder zu aufwendig wäre“ (VDI 3633 1996). Wird das Modell dazu verwendet, bestimmte Ereignisse vorherzusagen, wird es *Prognosemodell* genannt. Mathematisch erstellte Gleichungen, die den Zusammenhang einer Eingangs- mit einer Zielgröße wiedergeben und auf der Grundlage von Versuchsergebnissen erstellt werden, heißen *empirische Modelle*. Die Abhängigkeiten werden dabei experimentell durch statistische Versuchsplanungsmethoden ermittelt (BANDOW & HOLZMÜLLER 2009). In den nachfolgenden Kapiteln wird die Modellierung eines empirischen Prognosemodells unter Anwendung von Instrumenten der statistischen Versuchsplanung am Beispiel des in Kapitel 4 vorgestellten Prozessüberwachungskonzepts detailliert beschrieben.

Verbesserungen an komplexen Prozessen oder Produkten können nicht alleine durch Datenanalyse oder theoretische Herleitungen erzielt werden. Aufgrund vorherrschender komplexer Zusammenhänge des zu analysierenden Prozesses sind gezielte Versuche erforderlich, um dessen Einflussgrößen zu quantifizieren (KLEPPMANN 2001). Für die Untersuchung mehrerer Einflussgrößen ist die Methodologie der *statistischen Versuchsplanung* (engl. *Design of Experiments, DoE*) prädestiniert (SIEBERTZ ET AL. 2010).

MONTGOMERY (2001) versteht die statistische Versuchsplanung als gezielten Planungsprozess von Experimenten mit dem Ziel, geeignete, mit statistischen Methoden analysierbare Daten zu sammeln, auf deren Basis adäquate und objektive Erkenntnisse gewonnen werden können. Ein Experiment wird hierbei als Versuch oder Versuchsserie definiert, in der bewusste Veränderungen an den Eingangsgrößen eines Prozesses oder Systems durchgeführt werden mit der Absicht, Ursachen für Änderungen an der Zielgröße beobachten und identifizieren zu können (MONTGOMERY 2001). Nach WEMBER (2005) ist das Ziel statistischer Versuchsplanung, mit möglichst wenigen Versuchen eine systematische Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Zielgrößen durchzuführen.

ren. Dies geschieht nach SCHEFFLER (1986) durch Festlegen der Untersuchungs- und Auswertungsstrategie auf Basis mathematisch-statistischer Prinzipien.

Ein wesentlicher Vorteil der statistischen Versuchsplanung liegt im erheblich reduzierten Versuchsaufwand im Vergleich zu konventionellen Methoden, wie z.B. *One-Factor-at-a-Time* (OFAT), bei der je Versuchsdurchführung nur jeweils ein Parameter variiert wird. Statistische Auswertemethoden ermöglichen präzise Aussagen über Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen (Antwortfunktion). Aufgrund der Präzision der resultierenden Erkenntnisse ist eine mathematische Darstellung dieser Zusammenhänge als Modell über Regressionsverfahren möglich. Weitere Vorteile sind die hohe Aussagekraft und die schematische Dokumentation der Ergebnisse sowie Transparenz bzgl. des Zeit- und Kostenaufwands (SORAVIA & ORTH 2000, GUNDLACH 2004).

### 5.2 Methodik des Vorgehens

Der Prozess der statistischen Versuchsplanung kann in verschiedene Phasen der Planung, Durchführung und Nachbereitung unterteilt werden (SORAVIA & ORTH 2000). Aufgrund der hohen Komplexität des zu analysierenden Systems und des zu erwartenden Versuchsumfangs ist die Anwendung einer ganzheitlichen Systematik zur Durchführung zielführend. HOLST (1995), KLEPPMANN (2001) und SIEBERTZ ET AL. (2010) geben grundlegende Modelle zur Systematisierung der Vorgehensweise statistischer Versuchsplanung an. SCHMITT & PFEIFER (2010) definieren die vier Hauptschritte der statistischen Versuchsplanung als *Systemanalyse*, *Versuchsstrategie*, *Versuchsdurchführung* und *Versuchsauswertung* (vgl. Abbildung 47). In der ersten Phase wird im Rahmen der *Systemanalyse* eine klare Zieldefinition formuliert und Erkenntnisse zu potenziellen Produkt- und Prozesskennwerten gesammelt. Anschließend können Einflussgrößen und mögliche Wechselwirkungen definiert werden. Im zweiten Hauptschritt wird die *Versuchsstrategie* festgelegt. Hierzu zählen die Auswahl des Versuchsplans, die Festlegung der Faktorstufen und die Anzahl der Versuchswiederholungen. Im Anschluss erfolgt die *Versuchsdurchführung* inkl. Dokumentation der Versuchsergebnisse, deren Auswertung im letzten Hauptschritt durchgeführt wird. Effekte und Wechselwirkungen können anhand ihrer statistischen Signifikanz dargestellt werden. Die Modellierung der Prognosemodelle durch das Verfahren der Regressionsanalyse nimmt einen exponierten Teil des Vorgehens ein und ist ebenfalls Teil der *Versuchsauswertung*.

## 5.3 Systemanalyse im Rahmen der statistischen Versuchsplanung

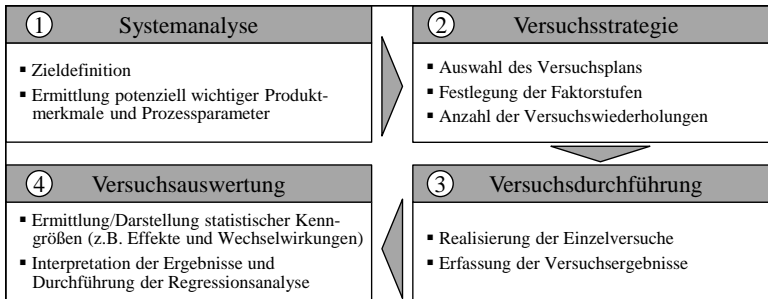


Abbildung 47: Systematisierte Vorgehensweise der statistischen Versuchsplanung in Anlehnung an SCHMITT & PFEIFER (2010)

## 5.3 Systemanalyse im Rahmen der statistischen Versuchsplanung

Die Systemanalyse wird mit dem Ziel durchgeführt, systematisch alle möglichen Zielgrößen und Faktoren zu erfassen (SORAVIA & ORTH 2000, GUNDLACH 2004). Um den Raum des zu untersuchenden Systems zu definieren, wurde in Kapitel 3 bereits eine Systemgrenze definiert. Innerhalb der Grenzen befinden sich alle Funktionen und Bauteile, die im Rahmen des Vorgehens analysiert und optimiert werden sollen (LINDEMANN 2009). Ziel der Systemanalyse ist die Bestimmung aller für den Prozess relevanten Ziel-, Einfluss- und Störgrößen (vgl. Abbildung 48).

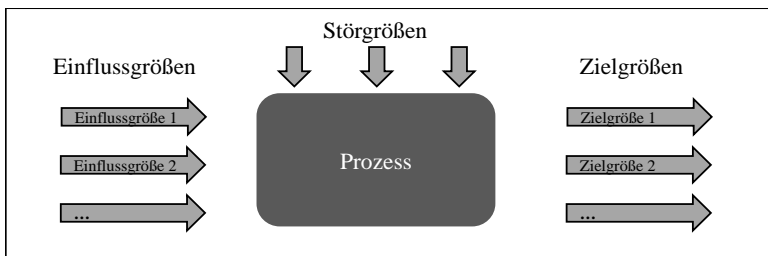


Abbildung 48: Darstellung der Einfluss-, Stör- und Zielgrößen eines Prozesses in Anlehnung an PETERSEN (1991)

Nach der Definition der Systemgrenzen werden mögliche Zielgrößen (engl. response variables) untersucht. Zielgrößen sind definiert als quantitative oder

qualitative Größen, die das Ergebnis eines Versuchs charakterisieren. Zielgrößen können als Messgrößen auftreten und einzelne oder aggregierte Merkmalswerte sein (SCHEFFLER 1986, HOFFMAN 2011).

Bereits im Rahmen der Erstellung des Prozessüberwachungskonzepts in Kapitel 4 wird die Fügekraft als prozessbestimmender Kennwert identifiziert. Darauf basierend ist es erforderlich, diese als Zielgröße des Gesamtsystems zu bestimmen.

Während des Montagevorgangs sind O-Ringe aufgrund hoher auftretender Verformungskräfte durch die Verpressung des Schnurdurchmessers besonders beschädigungsgefährdet (TIETZE 2003). Um eventuell auftretende Beschädigungen an den O-Ringen dokumentieren und bei Bedarf auswerten zu können, wird als weitere Zielgröße der Beschädigungsgrad der montierten O-Ringe aufgenommen. Durch diesen Kennwert werden die Art und das Ausmaß der Beschädigung des O-Rings nach dem beendeten Montageprozess beschrieben.

Auf Basis der Zielgrößen können nun auf den Prozess wirkende Einflüsse ermittelt werden. Nach KLEPPMANN (2001) sind Einflussgrößen als Parameter definiert, die die Versuchsergebnisse (Zielgrößen) möglicherweise beeinflussen. Sie sind die Stellschrauben des Prozesses, an denen Veränderungen aktiv vorgenommen werden können (Steuergrößen). Störgrößen sind Einflussgrößen, die unbeabsichtigt wirken und nicht aktiv kontrolliert werden können (WEMBER 2005).

Um alle Einflussgrößen erfassen zu können, ist der Einsatz von Analysemethoden zielführend. Bekannte Methoden hierfür sind FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse), Ishikawa, Ursache-Wirkungs-Diagramm etc. Hinsichtlich der betrachteten Problemstellung (Leckage aufgrund einer beschädigten O-Ring-Dichtung) wird die Methode der Fehlerbaumanalyse (engl. Fault-Tree-Analysis, FTA) angewendet. Nach DIN 25424 (1981) ist der Zweck einer Fehlerbaumanalyse die Ermittlung aller logischen Verknüpfungen von Komponenten- und Teilsystemausfällen, die zu einem unerwünschten Ereignis (engl. top event) führen. Diese können in einem grafischen Modell (Fehlerbaum) als parallele und sequenzielle Kombinationen dargestellt werden (HAASL ET AL. 1981). Die Visualisierung der Zusammenhänge trägt wesentlich zum Verständnis des Gesamtsystems bei. Die einzelnen Komponenten- bzw. Teilausfälle werden durch boolesche Algebra (*und*, *oder* etc.) miteinander verknüpft. In Tabelle 1 sind alle Elemente dargestellt, die bei der hier durchgeführten FTA eingesetzt werden.

### 5.3 Systemanalyse im Rahmen der statistischen Versuchsplanung

Tabelle 1: Elemente der Fehlerbaumanalyse nach DIN 25424 (1981) und HAASL ET AL. (1981)





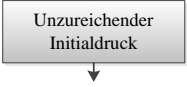
Darstellung	Bezeichnung nach DIN 25424 (1981)	Beschreibung nach HAASL ET AL. (1981)
	Unerwünschtes Ereignis (engl. top event)	Oberste Instanz des Fehlerbaums und untersuchtes Ereignis
	ODER-Verknüpfung	Mindestens eine der verknüpften Ursachen muss vorliegen
	Standardeingang	Basis-Ereignis, das nicht weiter untersucht wird
	Nicht weiter spezifiziert (n.w.s.)	Ast des Fehlerbaums wird nicht weiter analysiert (außerhalb der Systemgrenzen)
	Zwischenereignis	Fehler, der auftritt, wenn eines oder mehrere der verknüpften vorangehenden Glieder ausfallen

Abbildung 49 zeigt das Ergebnis der Fehlerbaumanalyse des hier betrachteten Untersuchungsgegenstands. An der Spitze des Fehlerbaums steht das Ereignis *Leckage an O-Ring-Dichtstelle*.



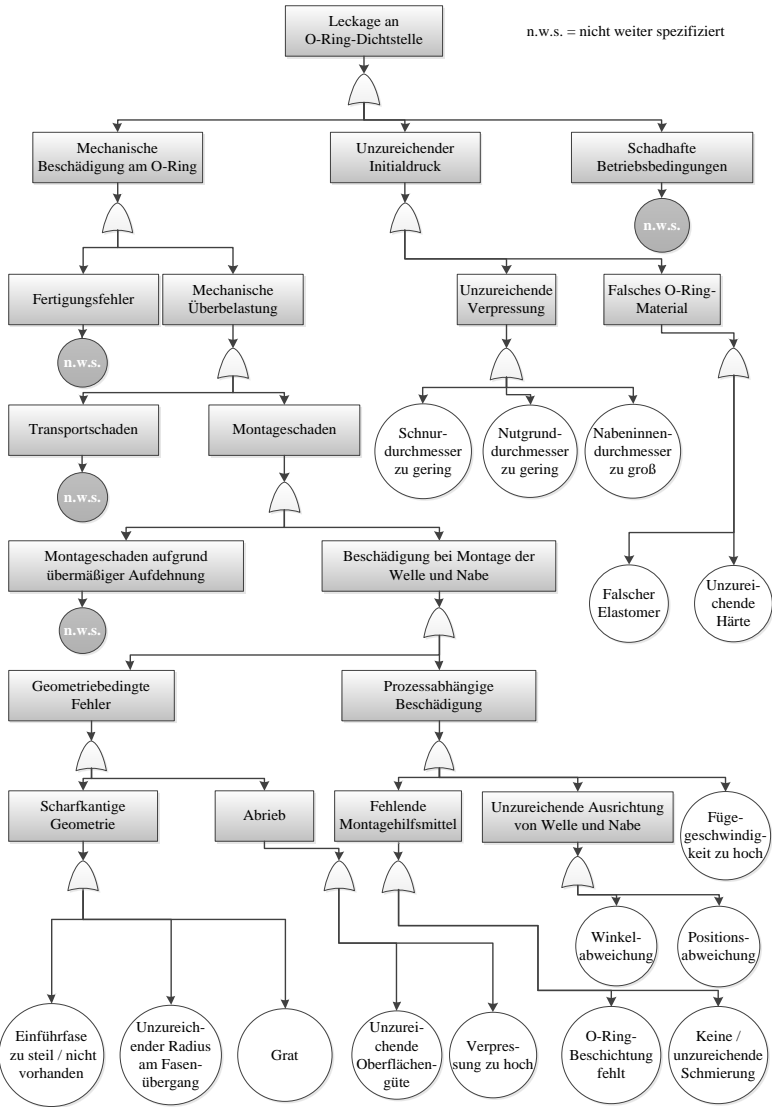


Abbildung 49: Fehlerbaumanalyse einer O-Ring-Dichtverbindung in Anlehnung an SIEBEN & REINHART (2014)

### 5.3 Systemanalyse im Rahmen der statistischen Versuchsplanung

---

Das *Unerwünschte Ereignis* kann durch die Zwischenereignisse *Mechanische Beschädigung am O-Ring*, *Unzureichender Initialdruck* und *Schadhafte Betriebsbedingungen* hervorgerufen werden. Betriebsbedingungen, wie z.B. der Betriebsdruck oder die Temperatur des abdichtenden Mediums, sind nicht Teil dieser Analyse. Das letztgenannte Zwischenereignis wird daher *nicht weiter spezifiziert (n.w.s.)*. Eine *Mechanische Beschädigung am O-Ring* kann die Folge eines *Fertigungsfehlers* oder *mechanischer Überbelastung* sein. Die Fehlerquelle Fertigungsprozess liegt außerhalb der betrachteten Systemgrenzen und wird daher nicht weiter analysiert. Mechanische Überbelastungen können während der Montage (*Montageschaden*) oder beim Transport (*Transportschaden - n.w.s.*) auftreten. Als Ursache eines Montageschadens nennt SAE AIR1707 (2003) sowohl übermäßige Aufdehnung des O-Rings bei dessen Montage auf das Bauteil (*Montageschaden aufgrund übermäßiger Dehnung*) als auch *Beschädigung bei Montage der Welle und Nabe*. Dieses Zwischenereignis lässt sich innerhalb des unerwünschten Ereignisses *Geometriebedingte Fehler* weiter unterteilen in die Fehlerereignisse *Scharfkantige Geometrie* mit den Standardeingängen *Einführfasse zu steil oder nicht vorhanden*, *Unzureichender Radius am Fasenübergang* und *Grat* sowie der möglichen Beschädigungsart *Abrieb* mit den Standardeingängen *Unzureichende Oberflächengüte* und *Verpressung zu hoch*.

Neben diesen unmittelbaren können auch mittelbare, prozessabhängige Ursachen zu einer Beschädigung der Dichtung bei der Montage führen. Dem Zwischenereignis *Prozessabhängige Beschädigung* ist direkt der Standardeingang *Fügeschwindigkeit zu hoch* zugeordnet. Die Fügeschwindigkeit hat aufgrund der von der Anregungsfrequenz abhängigen Materialkennwerte des Elastomers (siehe Kapitel 3.4) großen Einfluss auf den Prozess. Werden für den Fügevorgang keine Hilfsmittel (*Fehlende Montagehilfsmittel*) wie Schmiermittel (*Keine oder unzureichende Schmierung*) oder reibungsminimierende Beschichtungen an den O-Ringen (*O-Ring-Beschichtung fehlt*) verwendet, ist die Beschädigungsgefahr bei der Montage sehr hoch (TIETZE 2003). Das letzte Zwischenereignis des Fehlerbaums beschreibt die Axialität der Fügepartner zueinander (*Unzureichende Ausrichtung von Welle oder Nabe*). Wird die Welle nicht konzentrisch (*Positionsabweichung*) oder mit einer *Winkelabweichung* montiert, resultiert eine einseitig erhöhte Belastung des O-Rings beim Fügevorgang, so dass die Beschädigungsgefahr aufgrund der lokalen Spannungsüberhöhung stark zunimmt.

Als letztes unmittelbares Zwischenereignis kann ein *Unzureichender Initialdruck* zu Leckage an der Dichtstelle führen (vgl. Kapitel 2.1). Der Initialdruck resultiert sowohl aus der aufgezwungenen Verpressung des O-Ring-Schnurdurchmessers

durch den Innendurchmesser der Nabe als auch aus den Materialkennwerten des O-Rings. Mit der Härte des O-Rings nimmt die Flächenpressung an der Dichtstelle zu. Diese steigt zudem progressiv mit zunehmender Querschnittsverformung an (TIETZE 2003). Ist die Querschnittsverformung nicht ausreichend (*Unzureichende Verpressung*), um den erforderlichen Initialdruck zu erreichen, liegt die Ursache in einem *zu geringen Schnurdurchmesser* des O-Rings, einem *zu geringen Durchmesser des Nutgrunds* oder einem *zu großen Innendurchmesser der Nabe*. Ein *zu weicher O-Ring (Unzureichende Härte)* oder ein O-Ring aus *falschem Material* kann zudem einen unzureichenden Initialdruck verursachen. Mit den dargestellten Ergebnissen der Fehlerbaumanalyse können im nächsten Schritt relevante Faktoren für den aufzustellenden Versuchsplan abgeleitet werden.

### 5.4 Versuchsstrategie

Nach Zusammenfassung der Daten in der Phase der Systemanalyse erfolgt in der Selektions-/Festlegungsphase die Ermittlung der tatsächlich relevanten Größen für den zu planenden Versuch (GUNDLACH 2004). Die Selektion wird auf Basis von gezielten Systembeobachtungen und Screening-Versuchen (engl. *screening* für Aussieben) durchgeführt. Nach Auswahl der relevanten Faktoren, erforderlichen Faktorstufen und Versuchswiederholungen wird ein passender Versuchsplan ausgewählt.

#### 5.4.1 Faktorenauswahl

Um den Einfluss von Faktorgrößenvariationen auf den Verlauf der Fügekraft zu ermitteln, wird ein Vorversuch (*Extrema-Untersuchung*) durchgeführt. Bei sieben Fügevorgängen wird der Kraftverlauf unter kontinuierlicher Variation der Parameterkonstellation gemessen. Der erste Fügeversuch dient als Referenz. Alle geometrischen Parameter an Welle und Nabe sind hierfür nach DIN ISO 3601 (2010) ausgelegt. Bei den sechs nachfolgenden Versuchen werden die Einflussgrößen *Oberflächenrauigkeit*, *Fasenwinkel*, *Verpressung*, *Fasenrundung* und *Fügeschwindigkeit* variiert. Die gemessenen Fügekurven sind in Abbildung 50 abgebildet. Die zuvor definierten Phasen (vgl. Abbildung 36) des charakteristischen Kraftverlaufs einer Fügeoperation sind bei den einzelnen Kurven ersichtlich. Der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Zielgrößen wird durch die von den Parameterkonstellationen abhängigen und variierenden Verlaufsausprägungen deutlich.

## 5.4 Versuchsstrategie

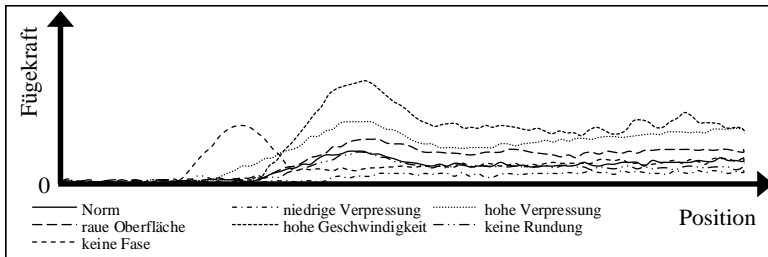
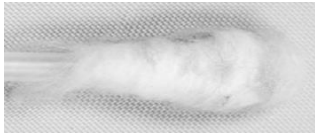




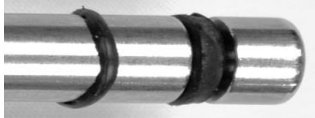


Abbildung 50: Auswirkung von Einflussgrößen auf den Fügekraftverlauf

Über die kontinuierliche Erfassung des Kraftverlaufs können definierte Variationen der Eingangsgrößen direkt in Kontext zu betragsmäßigen Änderungen der Fügekraft gestellt werden. Gemessen wird die aufgewendete Fügekraft in Newton (N).

Zur Beurteilung des Zusammenhangs zwischen Faktorkonstellation und Beschädigungsprägung wird der *Beschädigungsgrad* des O-Rings nach Montage mit in den Versuchsplan aufgenommen. Die Untersuchung des O-Rings erfolgt nach Demontage des Fügeverbands. Anhand von Vorversuchen hat sich eine Einteilung des *Beschädigungsgrads* in 7 Stufen bewährt. Die einzelnen Stufen sind in Tabelle 2 charakterisiert.

Tabelle 2: *Detailierung der auftretenden Beschädigungsstufen*

Stufe	Beschreibung	Darstellung	Beschädigungsform
0	Keine Beschädigung		keine
1	Leichter Abrieb und Partikelbildung		Abrieb
2	Starker Abrieb und Partikelbildung		Abrieb
3	Kleiner Einriss (<5 mm) keine abgelösten Teile		Aufschlitzen
4	Großer Einriss (> 5 mm) kleinere Abscherungen (<2 mm)		Abscheren Aufschlitzen
5	Große Abscherungen (>2 mm)		Abscheren
6	Abscherungen am ganzen Umfang		Abscheren

## 5.4 Versuchsstrategie

Zur Selektion der Einflussgrößen wird ein sog. Screening durchgeführt. Screening-Versuchspläne sind dann sinnvoll, wenn von Interesse ist, welche Größen tatsächlich Einfluss auf die Zielgröße haben. Da bei faktoriellen Versuchsplänen die Anzahl der Versuche (N) mit der Anzahl der Faktoren (k) und der Anzahl der Faktorstufen sehr schnell ansteigt, werden in dieser Phase ausschließlich fraktionell faktorielle Versuchspläne auf maximal zwei Stufen durchgeführt. Der Versuchsaufwand kann so auf ein akzeptables Niveau bei ausreichendem Informationsgehalt reduziert werden (KLEPPMANN 2001).

Anhand der Screening-Versuche erfolgt die Verifizierung oder Falsifizierung der Signifikanz einzelner Einflussgrößen. Einflussgrößen, die in den Versuchsplan übernommen werden, heißen Faktoren (KLEPPMANN 2001). Die Erkenntnisse der Screening-Versuche sind hilfreich bei der Festlegung der erforderlichen Faktorstufen. Versuchspläne erster Ordnung (Versuche auf zwei Stufen) liefern Geraden oder Ebenen als Näherung der tatsächlichen Verhältnisse zwischen den Faktorstufen. Ist ein lineares Modell als Näherung jedoch nicht ausreichend, werden ein quadratisches Modell und ein Versuchsplan zweiter Ordnung erforderlich. Lineare Näherungen sind unzulässig, wenn eine stark gekrümmte Antwortfunktion erwartet wird (SCHEFFLER 1986). Die Auswirkung der Polynomauswahl auf die Antwortfläche ist in Abbildung 51 schematisch aufgezeichnet.

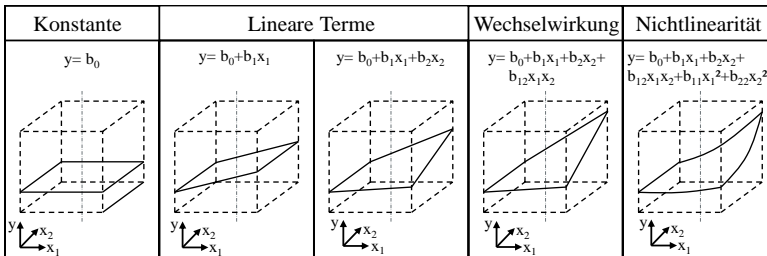


Abbildung 51: Veränderung der Antwortfläche bei Erweiterung des Polynoms in Anlehnung an SCHEFFLER (1986)

Potenzielle Einflussfaktoren wurden in den vorangegangenen Kapiteln analysiert. In Tabelle 3 wird dargestellt, welche Einflussgrößen als Faktoren in den Versuchsplan übernommen werden, welche Faktorstufen erforderlich sind und ob es sich um einen qualitativen (kategorialen) oder quantitativen Faktor handelt.

Tabelle 3: Übersicht der Faktoren

Nr.	Faktoren	Benennung	Faktorstufen			Einheit	Faktorart
			Nominale Stufe				
			-1	0	1		
	Konstruktion		Stufenwerte				
1	Verpressung	K-C	15	20	25	[%]	quantitativ
2	Fasenwinkel	K- $\alpha$	25	20	15	[°]	quantitativ
3	Fasentrundung	K-R	3	2	1	[mm]	quantitativ
4	Oberfläche	K-Ra	0,3	1,6	3,2	[ $\mu$ m]	quantitativ
	O-Ring						
5	Innendurchmesser	O-d1	4,42	28,24	56,82	[mm]	quantitativ
6	Schnurdurchmesser	O-d2	1,78	2,62	3,53	[mm]	quantitativ
7	Material	O-M	FKM		EPDM	[-]	kategorial
8	Beschichtung	O-B	keine	PTFE	Silik CVD	[-]	kategorial
9	Härte	O-H	60	70	80	[Shore A]	quantitativ
	Prozess						
10	Fügeschwindigkeit	P-v	1	5	10	[mm/s]	quantitativ
11	Positionsabweichung	P-p	-0,1	0	0,2	[mm]	quantitativ
12	Winkelabweichung	P-w	0	0,5	1	[°]	quantitativ
13	Fügeweg	P-x	4	7	10	[mm]	quantitativ
	Fügehilfsmittel						
14	Viskosität	F-v	4000	180	62	[mm <sup>2</sup> /s]	quantitativ
15	Auftragsort	F-A	Bohrung		O-Ring	[-]	kategorial

Die Faktoren aus Tabelle 3 werden thematisch in die Gruppen *Konstruktion*, *O-Ring*, *Prozess* und *Fügehilfsmittel* gegliedert. Die Auswahl der Faktorstufen erfolgt in Anlehnung an industriell gängige Maße.

Der Faktor *Verpressung* ist definiert als relative Querschnittsverformung des O-Rings in eingebautem Zustand (TIETZE 2003). Der *Fasenwinkel* beschreibt die Ausprägung der Einführschräge der Bohrung. Nach DIN 3771 (1993) dient die Einführschräge der Vermeidung von Beschädigungen bei der Montage. Die *Fasentrundung* charakterisiert den Übergang der Fase zum konstanten Innendurchmesser der Nabe und wird als Radius angegeben (Abbildung 52). Die Ausführungsgüte der *Oberfläche* der Nabe wird durch den arithmetischen Mittenrauwert  $R_a$  angegeben. Der Faktor  $R_a$  beschreibt den arithmetischen Mittelwert der absoluten Ordinatenwerte eines Rauheitsprofils (DIN EN 10049 2005).

## 5.4 Versuchsstrategie

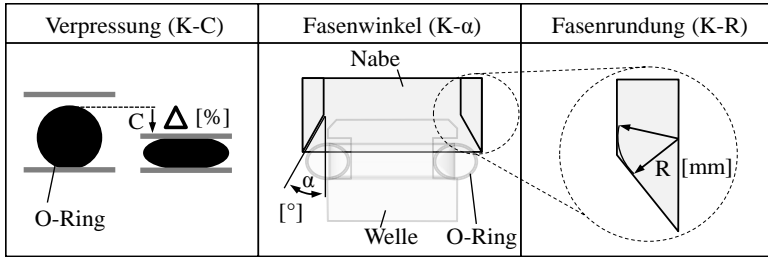


Abbildung 52: Faktoren der Kategorie Konstruktion

Die Kategorie *O-Ring* fasst alle Faktoren zusammen, die einen O-Ring charakterisieren. Hierzu zählen der *Innendurchmesser*, der *Schnurdurchmesser* (vgl. Abbildung 53), die *Härte*, das *Material* bzw. das *Elastomer* sowie die *Beschichtungsart*. Die Faktoren *Material* und *Beschichtung* wirken sich als kategoriale Einflussgrößen besonders auf die Auswahl des passenden Versuchsplans aus. Mit den Elastomeren FKM (Fluor-Kautschuk) und EPDM (Ethen-Propen-Dien-Kautschuk) werden zwei der gängigsten Dichtungswerkstoffe von O-Ringen berücksichtigt. Um den Einfluss der Beschichtungsart auf die Zielgröße untersuchen zu können, werden drei Beschichtungstypen (PTFE, Silikon und CVD-Beschichtung) in den Versuchsplan aufgenommen. Bei dem Beschichtungstypen *PTFE* handelt es sich um einen wasserbasierten Gleitlack auf Basis von Polyurethan mit Anteilen an PTFE (Polytetrafluorethylen) als funktionalem Füllstoff. Der Beschichtungstyp *Silikon* beschreibt einen auf dem Elastomer thermisch ausgehärteten Silikonfilm. Als *CVD*-Beschichtung wird eine durch plasmaunterstützte, chemische Gasphasenabscheidung (engl. Plasma enhanced Chemical Vapour Deposition) aufgetragene Hexamethyldisiloxan-Schicht bezeichnet (MENZ ET AL. 2005).

Als Prozessgrößen werden die *Fügeschwindigkeit*, der *Fügeweg* sowie die *Winkel-* und *Positionsabweichung* der Welle mit in den Versuchsplan übernommen. Die *Fügeschwindigkeit* bezeichnet die konstante Geschwindigkeit, mit der die Kolbendichtung gefügt wird. Die *Winkelabweichung* beschreibt den Versatz des Fügewegs zur Symmetrieachse der Nabe. Die *Positionsabweichung* stellt die Abweichung der Koaxialität der Symmetrieachsen von Welle und Nabe dar. Der *Fügeweg* wird als Wegstrecke definiert, die die Welle zurücklegt, nachdem die zweite Nutflanke in die Bohrung eintaucht. Die Prozessfaktoren sind in Abbildung 53 dargestellt.



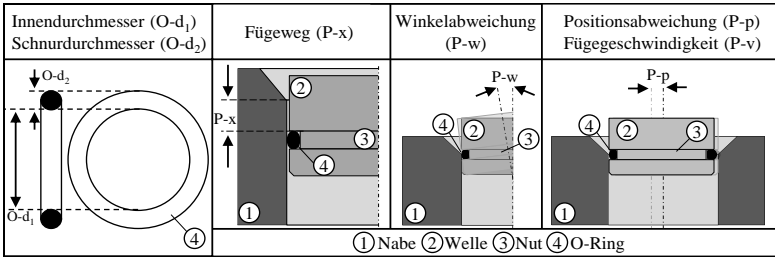


Abbildung 53: Faktoren der Kategorien O-Ring und Prozess

Um den Einfluss von Montagehilfsmitteln im Versuchsplan zu berücksichtigen, werden verschiedene *Fügemittel* in Abhängigkeit ihrer *Viskosität* untersucht. Die angegebenen Viskositäten entsprechen Glykol (62 mm<sup>2</sup>/s), Motorenöl (180 mm<sup>2</sup>/s) und Getriebeöl (4.000 mm<sup>2</sup>/s). Als *Auftragsort* stehen der bereits in der Nut montierte O-Ring und der Innendurchmesser der Bohrung als Faktorstufen zur Verfügung.

Die *Temperatur* wird aus technischen Gründen nicht als Faktor in den Versuchsplan übernommen. Vorversuche haben gezeigt, dass eine Beeinflussung der Temperatur des O-Rings nicht umsetzbar ist. Nach der Erwärmung oder Kühlung nimmt der O-Ring in kürzester Zeit wieder Raumtemperatur an, so dass der Einfluss auf den Montageprozess nicht festgestellt werden kann. Um jedoch mögliche Störeinflüsse durch die Umgebungstemperatur berücksichtigen zu können, wird die Umgebungstemperatur für jede Versuchsdurchführung dokumentiert.

### 5.4.2 Aufstellung des Versuchsplans

Zwischen den Faktoren und der Zielgrößen besteht ein funktionaler Zusammenhang, der mit mathematisch-statistischen Methoden quantitativ ausgedrückt werden kann. Das so generierte statistische Modell spiegelt die Zusammenhänge der Einfluss- und Zielgrößen je nach Qualität der Anpassung in einem zuvor definierten Gebiet wider (SCHEFFLER 1986). Die Modellierung erfolgt über die durch den Versuchsplan erzielten Informationen. Damit hängt die Wahl des Versuchsplans direkt mit dem gewünschten Modell zusammen (SCHEFFLER 1986). Für das Modell wird eine ausreichend exakte Abbildung der realen Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen gefordert. Daher kommt der Auswahl eine große Bedeutung zu.

## 5.4 Versuchsstrategie

---

Die Annahme von linearen Abhängigkeiten (Versuchsplan 1. Ordnung) ist für die gegebenen Zusammenhänge nicht ausreichend. Durch Ergebnisse der Systemanalyse sind nichtlineare Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen zu erwarten (z.B. Auswirkung der Verpressung auf die Fügekraft). Nichtlinearitäten können durch Modelle höherer Ordnung beschrieben werden. Auf Basis der Erkenntnisse aus Vorversuchen wird ein quadratischer Modellansatz zugrunde gelegt, vgl. hierzu REINHART & SIEBEN (2013). Gleichung (5-1) zeigt beispielhaft ein Polynom eines quadratischen Modells für zwei Einflussfaktoren A und B und der Zielgröße  $y$  nach SORAVIA & ORTH (2000).

$$y = \beta_0 + \beta_A x_A + \beta_B x_B + \beta_{AB} x_A x_B + \beta_{AA} x_A^2 + \beta_{BB} x_B^2 + \varepsilon \quad (5-1)$$

Das Polynom wird durch die Konstante  $\beta_0$ , die linearen Terme  $\beta_A x_A$  und  $\beta_B x_B$ , die quadratischen Terme  $\beta_{AA} x_A^2$  und  $\beta_{BB} x_B^2$  sowie den Wechselwirkungsanteil  $\beta_{AB} x_A x_B$  beschrieben. Der Fehleranteil ist mit  $\varepsilon$  angegeben. Die Variable  $x$  repräsentiert die Stufeneinstellungen der Faktoren A ( $x_A$ ) und B ( $x_B$ ). Für die Berücksichtigung von 15 Faktoren ( $k = 15$ ) ist das Polynom um die entsprechenden Terme zu erweitern. Verallgemeinert kann ein quadratisches Polynom entsprechend Gl. (5-2) dargestellt werden.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (5-2)$$

Zur Bestimmung nichtlinearer Abhängigkeiten zwischen Faktor und Zielgröße sind komplexe Versuchspläne mit mindestens drei verschiedenen Faktorstufen erforderlich (BANDOW & HOLZMÜLLER 2009). Auf Basis dieser Forderung, der hohen Faktorenanzahl und der Untersuchung kategorialer Faktoren auf mehr als zwei Stufen wird zur Realisierung der Versuche ein *D-optimaler* Versuchsplan gewählt (PETERSEN 1991). Weitere Versuchspläne 2. Ordnung (z.B. vollständige  $3^k$ -Faktoren-Versuchspläne, zentral zusammengesetzte Versuchspläne, Box-Behnken-Versuchspläne) sind nicht in der Lage, kategoriale Faktoren auf mehr als zwei Stufen abzubilden bzw. bedingen eine zu hohe Anzahl an Versuchspunkten bei 15 Einflussfaktoren.

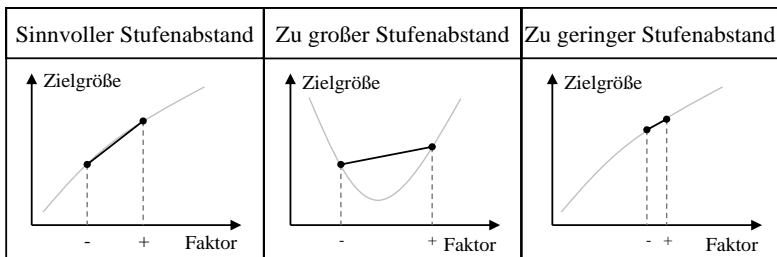
D-optimale Versuchspläne zählen zu den sog. optimalen Versuchsplänen. Ziel dieser Versuchsplanart ist die Bestimmung der optimalen Versuchsanzahl und die Auswahl der optimalen Versuchspunkte. D-Optimalität wird benötigt, wenn das Ziel der Untersuchung ist, die Bestimmung von Modellkoeffizienten mit größtmöglicher Präzision durchzuführen (SCHEFFLER 1986). Mathematisch gese-

hen ist ein D-optimaler Versuchsplan ein statistischer Versuchsplan, der die Determinante der Versuchsmatrix maximiert oder gleichbedeutend die Determinante der Inversen minimiert (GUNDLACH 2004).

Die Vorteile von D-optimalen Versuchsplänen werden wie folgt zusammengefasst (PETERSEN 1991, GUNDLACH 2004, WEMBER 2005):

- Einschränkung des Versuchsraums möglich, falls bestimmte Versuchspunkte nicht realisierbar sind
- Freie Auswahl der Versuchsanzahl (über definiertem Minimum)
- Gute Tauglichkeit für Modelle höherer Ordnung
- Keine Äquidistanz der Faktorstufenabstände erforderlich
- Freie Wahl der Lage der Versuchspunkte
- Inklusion vorausgegangener Versuche möglich
- Nachträgliche Streichung von Versuchspunkten möglich

Bei der Erstellung des Versuchsplans sind die Faktorstufen der einzelnen Faktoren zu berücksichtigen. Mit zwei Faktorstufen können ausschließlich lineare Zusammenhänge beschrieben werden. Aufgrund der erwarteten nichtlinearen Abhängigkeiten der Faktoren sind mindestens 3 Stufen je Faktor einzuplanen. Neben der Anzahl ist auch der Stufenabstand sinnvoll zu wählen. Abbildung 54 zeigt die Auswirkungen von zu großen oder zu kleinen Stufenabständen.



*Abbildung 54: Sinnvolle Wahl des Stufenabstands  
in Anlehnung an PETERSEN (1991)*

Zur Auswahl der Faktorstufen werden jeweils zwei Versuchspunkte in den oberen und unteren Grenzbereich des zu untersuchenden Versuchsraums gelegt. Die dritte Stufe wird unter Berücksichtigung technischer Gegebenheiten in der Mitte fixiert. Als Beispiel wird der Faktor *Schnurdurchmesser* des O-Rings herangezogen. Die untere Faktorstufe des Durchmessers wird mit 1,78 mm und die obere

## 5.4 Versuchsstrategie

Faktorstufe mit 3,53 mm definiert. Mathematisch ergibt sich die Mittelstufe der beiden Stufen zu:

$$\frac{1,78 \text{ mm} + 3,53 \text{ mm}}{2} = 2,66 \text{ mm} \quad (5-3)$$

Da jedoch der Einsatz von normgerechten O-Ringen geplant ist, wird die mittlere Faktorstufe entsprechend DIN ISO 3601 (2012) auf 2,62 mm festgesetzt.

Zur Verallgemeinerung der Verfahrensweise in der Versuchsplanung und -auswertung werden die natürlichen Werte der Faktorstufen transformiert (SCHEFFLER 1986). Auf diese Weise wird die Stufenhöhe normiert (dimensionslos) und die Interpretation der Ergebnisse vereinfacht. Speziell für die grafische Auswertung ist dieses Vorgehen vorteilhaft, da so mehrere Einflussgrößen in einer Grafik trotz unterschiedlicher physikalischer Einheiten vergleichend dargestellt werden können (SIEBERTZ ET AL. 2010). Abbildung 55 zeigt exemplarisch die Auswirkung einer Stufenvariation der Faktoren *Härte* in der Einheit *ShoreA* und O-Ring-*Schnurdurchmesser* in der Einheit *mm* in einer Grafik mit transformierten Stufen.

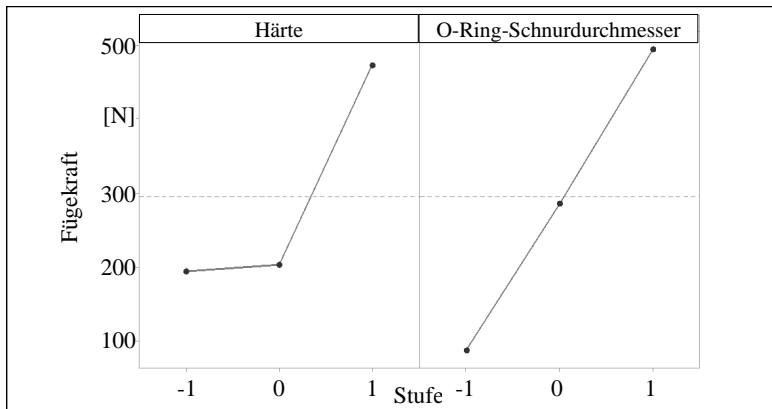


Abbildung 55: Darstellung von Faktoren unterschiedlicher physikalischer Einheiten in einer Grafik durch Transformation

Nach SORAVIA & ORTH (2000) erfolgt die Transformation der Faktorstufen entsprechend der Gleichung:

$$x_{transformiert} = \frac{2(x - x_{Zentrum})}{x_{oben} - x_{unten}} \quad (5-4)$$

Der Term  $x_{transformiert}$  beschreibt dabei die transformierte Faktorstufe,  $x$  den tatsächlichen Faktorwert,  $x_{oben}$  die obere und  $x_{unten}$  entsprechend die untere Faktorstufe. Mit der Gleichung

$$x_{Zentrum} = \frac{x_{oben} + x_{unten}}{2} \quad (5-5)$$

und Gl. (5-4) wird die obere Faktorstufe ( $x_{oben}$ ) auf den Wert „+1“, die untere Faktorstufe ( $x_{unten}$ ) auf „-1“ und die mittlere Faktorstufe ( $x_{mittel}$ ) auf „0“ transformiert (SORAVIA & ORTH 2000).

Die lineare Transformation der Faktorstufen wird am Beispiel des quantitativen Faktors *Verpressung* dargestellt. Die untere Stufe beträgt 15 % Verpressung ( $x_{unten}$ ), die mittlere 20 % ( $x_{mittel}$ ) und die obere 25 % ( $x_{oben}$ ). Für die Stufen ergeben sich entsprechend mit

$$x_{Zentrum} = \frac{25\% + 15\%}{2} = 20\% \quad (5-6)$$

und

$$x_{transformiert} = \frac{2(x - 20\%)}{25\% - 15\%} \quad (5-7)$$

die dimensionslosen Größen:

$$x_{transformiert}(15\%) = -1 \quad (5-8)$$

$$x_{transformiert}(20\%) = 0 \quad (5-9)$$

$$x_{transformiert}(25\%) = 1 \quad (5-10)$$

Nach der Auswahl der Faktoren und Faktorstufen erfolgt die Bestimmung der erforderlichen Mehrfachrealisierungen. Anhand einer wiederholten Durchführung einzelner Versuchspunkte kann die Streuung der Messwerte bestimmt werden. Nach GUNDLACH (2004) muss die Anzahl der Versuche ( $N$ ) größer sein als die Anzahl der zu bestimmenden Koeffizienten ( $K$ ). Eine optimale Anzahl der Versuche ( $N_{opt}$ ) kann nach PETERSEN (1991) mit dem Ansatz

$$N_{opt} > 1,5 \times K \quad (5-11)$$

## 5.4 Versuchsstrategie

---

berechnet werden. Die Anzahl der erforderlichen Koeffizienten ( $K$ ) für einen quadratischen Modellansatz wird anhand der Faktorenanzahl ( $k$ ) entsprechend Gl. (5-12) bestimmt (PETERSEN 1991).

$$K = \frac{(k + 1)(k + 2)}{2} \quad (5-12)$$

Nach der Aufstellung in Tabelle 3 werden 15 Faktoren für den Versuchsplan berücksichtigt ( $k = 15$ ). Daraus ergibt sich für die Anzahl der erforderlichen Koeffizienten:

$$K = \frac{(15 + 1)(15 + 2)}{2} = 136 \quad (5-13)$$

Mit der Ungleichung (5-11) berechnet sich die optimale Anzahl der Versuchspunkte zu:

$$N_{opt} > 204 \quad (5-14)$$

Die Anzahl der Versuchspunkte wird für den Versuchsplan auf

$$N = 212 \quad (5-15)$$

festgesetzt. Auf diese Weise wird mit 8 Zusatzversuchen eine ausreichende Sicherheit bei der Planung berücksichtigt. Eine nachträgliche Streichung von Versuchen aufgrund von technischen Einschränkungen o.ä. ist so möglich. Die Versuchsanzahl  $N_{opt}$  darf dabei nicht unterschritten werden.

Die Anzahl der Realisierungen ( $c$ ) einzelner Versuchspunkte dient zur Bestimmung der Streuung der Messwerte. Bei kleinen Versuchsstreuungen ist eine Einfachausführung des Messpunkts ausreichend. Ohne Mehrfachrealisierungen ist jedoch eine Auswertung der Homoskedastizität, d.h. eine Überprüfung der Unabhängigkeit der Standardabweichung von der Zielgröße, über den Versuchsraum nicht möglich. Entsprechend SCHEFFLER (1986) wird bei einer zu erwartenden größeren Versuchsstreuung jeder Versuchspunkt  $N$  doppelt ausgeführt ( $c=2$ ). Somit ergibt sich für den Versuchsplan eine Versuchsanzahl von 424 Einzelversuchen.

### 5.5 Versuchsdurchführung

Ziel der Versuchsdurchführung ist die Umsetzung der Einzelpunkte des in der Planungsphase erstellten Versuchsplans. Zur Durchführung ist ein entsprechendes technisches System (Versuchsstand) erforderlich (Kapitel 5.5.1). Um eine hohe Präzision der Einzelversuche umsetzen zu können, ist ein einheitlicher Versuchsablauf einzuhalten (Kapitel 5.5.2). KLEPPMANN (2001) definiert folgende Anforderungen an die Versuchsdurchführung:

- Vermeidung systematischer Fehler durch Überprüfung der Messgeräte vor Beginn der Versuche
- Sicherstellung konstanter Umgebungsbedingungen
- Reduzierung der personenbedingten Einflüsse
- Dokumentation aller Besonderheiten/Abweichungen vom Plan während der Versuche

Die Funktionalität wird durch entsprechende Kalibrierung der Messgeräte sichergestellt. Die Durchführung der Versuche auf einem Versuchsfeld ermöglicht die Einhaltung konstanter Umgebungsbedingungen. Schwankungen der Umgebungstemperatur werden mit jedem Versuch dokumentiert. Personenbezogene Einflüsse werden minimiert, indem alle Versuche anhand eines standardisierten Ablaufplans durchgeführt werden. Alle Besonderheiten, die während der Versuche auftreten, werden für jeden Einzelversuch dokumentiert.

#### 5.5.1 Versuchsstand

Die Komponenten des Versuchsstands lassen sich in die Kategorien *Versuchseinrichtung* und *Versuchsteile* einordnen. Die *Versuchseinrichtung* beschreibt alle Komponenten, die benötigt werden, um die Fügebewegung auszuführen, prozessbedingte Faktoren einzustellen sowie die Zielgröße zu erfassen. *Versuchsteile* werden hier als Komponenten definiert, die die Einstellung konstruktiver Faktoren sowie Faktoren der Kategorie O-Ring ermöglichen und im weiteren Verlauf zu variieren sind.

Zu den Versuchsteilen zählen O-Ringe, Wellen und Naben. Die O-Ringe entsprechen den Vorgaben des Versuchsplans.

## 5.5 Versuchsdurchführung

---

Durch die Unterscheidungsmerkmale

- Material
- Schnurdurchmesser
- Innendurchmesser
- Beschichtung
- Härte

und die definierten Versuchspunkte werden insgesamt 157 verschiedene O-Ring-Typen für die Versuchsdurchführung benötigt. Für die Realisierung der konstruktiven Faktorkonstellationen stehen 186 verschiedene Naben und 27 Wellen, gefertigt aus legiertem Vergütungsstahl, entsprechend den erforderlichen Versuchspunkten zur Verfügung. In Abbildung 56 sind beispielhaft Naben und Wellen mit drei verschiedenen Durchmessern dargestellt. Um den Einfluss von Fertigungsfehlern der Bauteile auf das Versuchsergebnis zu minimieren, werden alle Teile vor Beginn der Versuche vermessen und dokumentiert.

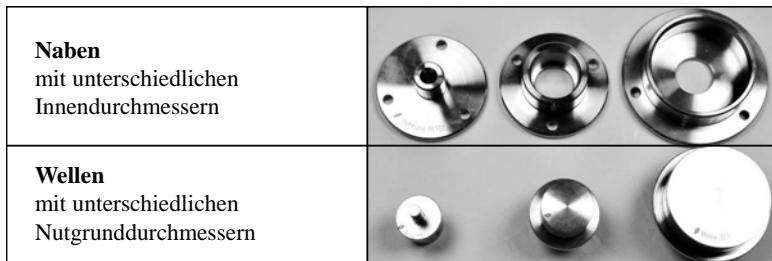


Abbildung 56: Exemplarische Darstellung der Versuchsteile

Die in Abbildung 57 dargestellte Versuchseinrichtung besteht aus folgenden Komponenten:

- Elektromechanische Spindel inkl. Kraftmesssystem (2)
- Flexible Einstellvorrichtung (1/3)
- Messrechner (8)

Die elektromechanische Spindel (2) führt die Fügebewegung aus. Die Messung der Fügekraft erfolgt über Dehnmessstreifen (DMS) und die Wegmessung über einen Resolver im AC-Motor (4) des Antriebs. Über einen Leistungsverstärker werden die Messdaten an den Messrechner (8) weitergegeben.



Die Fügespindel ist an einer flexiblen Einstellvorrichtung fixiert. Die Einstellvorrichtung ermöglicht eine exakte radiale (3) und axiale (1) Positionierung der Wellen und Naben zueinander. Über diese Einstellmöglichkeiten erfolgt die Justierung der Faktoren *Winkel-* und *Positionsabweichung*. Eine radiale Abweichung wird durch eine Rotation der Fügespindel relativ zur Nabe realisiert. Der Drehpunkt der Spindel liegt dabei im Mittelpunkt der Nabe. Die Fügespindel ist hierfür auf einem feinjustierbaren Drehteller montiert.

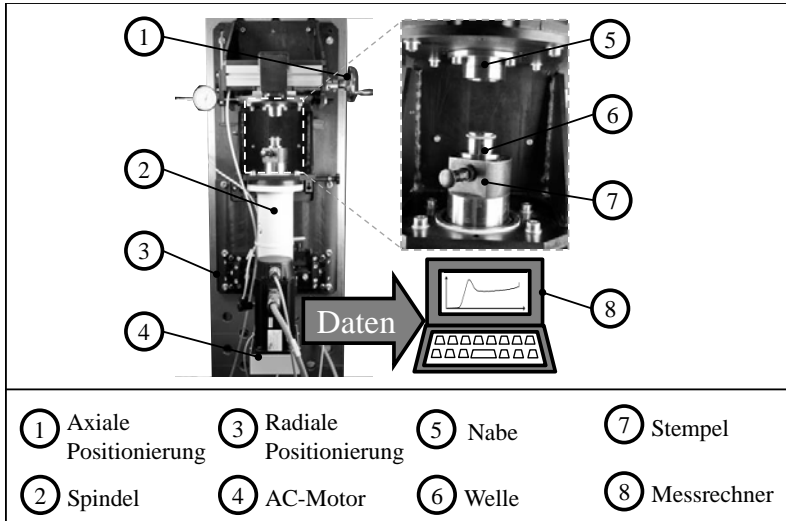


Abbildung 57: Versuchsaufbau (Aufbau und Komponenten)

Die Positionsabweichung wird über die Fixierplatte der Nabe umgesetzt. Die Fixierplatte ist über eine Gewindestange mit der Grundplatte des Versuchsaufbaus verbunden und kann so relativ zur Welle axial ausgelenkt werden. Die Fixierung in der entsprechenden axialen oder radialen Endposition erfolgt durch Verschraubung, um ungewollte Bewegungen der Komponenten während des Fügevorgangs zu verhindern. Die Wellen (6) werden für den Fügeversuch auf dem Stempel (7) der Fügespindel montiert, die Naben (5) entsprechend auf der flexiblen Einstellvorrichtung. Alle Wellen und Naben sind eindeutig mit einem drei- (Wellen) oder sechsstelligen (Naben) Code beschriftet. Der Code dient der Identifikation der Einzelteile. Gleichzeitig können über die Ziffern die Stufen der konstruktiven Faktoreinstellungen abgelesen werden (vgl. Abbildung 58). Die anfallenden Messdaten werden direkt durch den Messrechner ausgelesen und

## 5.5 Versuchsdurchführung

---

automatisch in einer Datenbank gesichert. In der Datenbank werden für jeden Einzelversuch eine eindeutige Versuchsnummer, die gemessenen Kraftwerte je Stützpunkt über den Fügweg und die Umgebungstemperatur zur späteren Auswertung gespeichert.

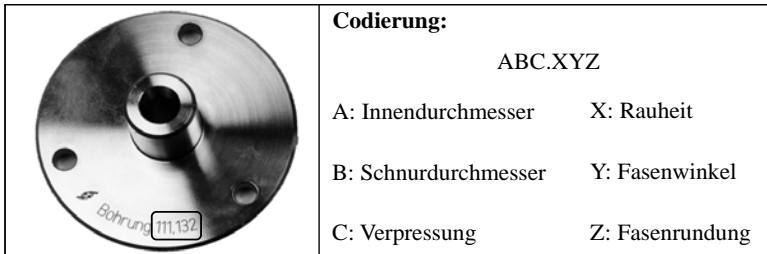


Abbildung 58: Codierung der Komponenten zur Bauteilidentifizierung am Beispiel einer Nabe

### 5.5.2 Versuchsablauf

Um eine hohe Vergleichbarkeit der Versuche zu erzielen und Fehlerquellen zu minimieren, wird der Versuchsablauf standardisiert. Das Vorgehen ist im Ablaufdiagramm in Abbildung 59 dargestellt.

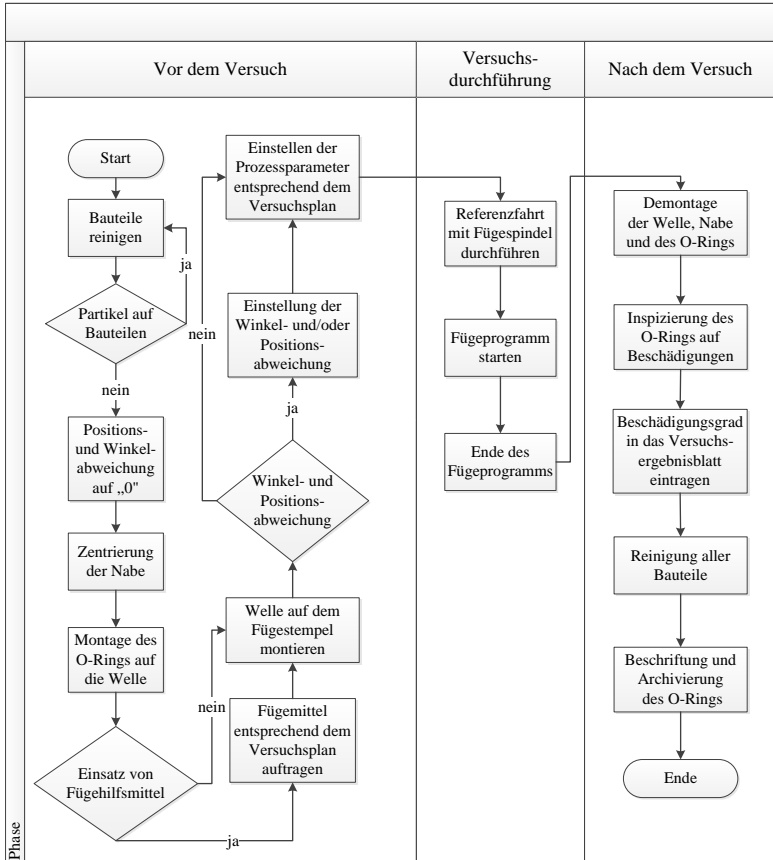


Abbildung 59: Ablaufdiagramm der Versuchsdurchführung

## 5.6 Versuchsauswertung

Das anhand der Versuche generierte Datenvolumen dient der Erstellung des Prognosemodells unter Zuhilfenahme statistischer Auswerte- und Analysemethoden (Regressionsanalyse). Zur Auswertung der Daten wird ein Softwaretool eingesetzt. Anhand des erstellten Modells erfolgt eine Einfluss- und Effektanalyse der einzelnen Faktoren. Die Regressionsanalyse wird mit der Verifizierung des Modells abgeschlossen. Eine Validierung erfolgt durch zusätzliche Bestätigungsversuche. Die Regressionsanalyse wird für alle Stützstellen durchgeführt und

jeweils einzelne Modelle entwickelt. Das Vorgehen der Regressionsanalyse wird in diesem Kapitel exemplarisch für den Stützpunkt der maximal gemessenen Kraft  $F_{max}$  dargestellt.

### 5.6.1 Regressionsanalyse und Modellerstellung

Stochastisch beeinflusste Abhängigkeiten zwischen Faktoren und einer Zielgröße werden anhand der Regressionsanalyse untersucht und durch ein Regressionspolynom mathematisch formuliert (SCHEFFLER 1986). Zur Aufstellung des Regressionspolynoms ist der Grad des Polynoms, das es zu entwickeln gilt, festzulegen. In Kapitel 5.4.2 wurde bereits zur Aufstellung des Versuchsplans ein Polynom zweiten Grads auf Grundlage der erwarteten nichtlinearen Zusammenhänge der Einflussgrößen definiert. Das korrespondierende Regressionsmodell nimmt eine ähnliche Form an:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j \quad (5-16)$$

Im Vergleich zum beobachteten Wert  $y$  bezeichnet der Term  $\hat{y}$  den Regressionswert (Modellschätzer). Im Rahmen der Regressionsanalyse werden die realen Koeffizienten  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  durch die Regressionskoeffizienten  $b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$  angenähert. Die Terme  $x_i$  und  $x_j$  werden Regressionsvariablen und  $b_0$  Regressionskonstante genannt. Während des Regressionsprozesses erfolgt eine Anpassung des Modells an den zugrunde gelegten Datensatz. Dabei werden eine Schätzung der Regressionskoeffizienten und die Formulierung des angepassten Regressionsmodells durchgeführt (MYERS 1990).

#### Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Zur Abschätzung der Regressionskoeffizienten wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (engl. *least squares method*) eingesetzt. Für unterschiedliche Parametereinstellungen  $x_i$  werden verschiedene Beobachtungswerte  $y_i$  generiert und die korrespondierenden Regressionskoeffizienten  $b_i$ , die die Versuchsstreuung bereits mit einschließen, berechnet. Dabei wird die Differenz zwischen dem wahren Datenpunkt und dem vorhergesagten Wert des Regressionsmodells (Residuum  $\varepsilon$ ) minimiert (vgl. Abbildung 60).

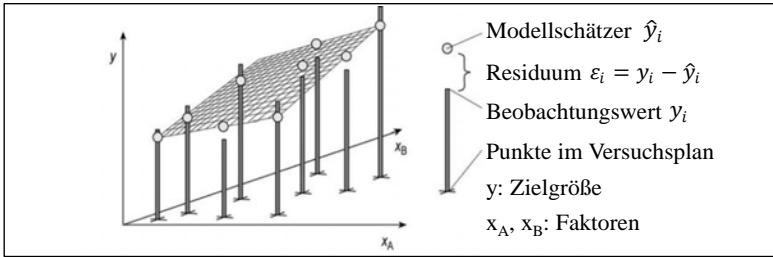


Abbildung 60: Prinzipdarstellung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in Anlehnung an SORAVIA & ORTH (2000)

Für die Gesamtheit aller Versuchsergebnisse  $y_i$  muss Gl. (5-17) erfüllt sein (SCHEFFLER 1986):

$$\sum \varepsilon_i^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \text{Minimum} \quad (5-17)$$

Auf Basis dieser Bedingung können die einzelnen Regressionskoeffizienten berechnet werden. Zur detaillierten mathematischen Vorgehensweise wird auf weiterführende Fachliteratur verwiesen, wie z.B. MYERS (1990), KLEPPMANN (2001), MONTGOMERY (2001) und WEMBER (2005).

### Test auf Normalverteilung und Transformation der Versuchsdaten

Voraussetzung für eine statistische Auswertung von Daten und Anwendung der Regressionsanalyse ist die Verteilung der Daten (gemessene Werte  $y_i$ ) annähernd einer Normalverteilung. Dementsprechend werden die Beobachtungen einem Test auf Normalverteilung unterzogen. Hierfür wird der Kolmogorov-Smirnov-Test angewendet. Anhand dieses (Hypothesen-)Tests kann bestimmt werden, wie gut eine Stichprobe einer bestimmten Verteilung folgt. Folgende Hypothesen werden für den Test postuliert:

Nullhypothese  $H_0$ : Die Daten folgen einer bestimmten Verteilung

Alternativhypothese  $H_1$ : Die Daten folgen keiner bestimmten Verteilung

Die Ablehnung der Nullhypothese erfolgt, wenn der ermittelte  $p$ -Wert niedriger ist als das zuvor festgelegte Signifikanzniveau  $\alpha_s$ . Die Verteilung der betrachteten Stichprobe weist dann eine signifikante Abweichung von der vorgegebenen Verteilung auf. Der  $p$ -Wert wird über die Stichprobe bestimmt und beschreibt die

## 5.6 Versuchsauswertung

Wahrscheinlichkeit, eine solche Stichprobe zu erhalten, wenn die Nullhypothese wahr ist (ECKSTEIN 2010).

Die Überprüfung der Daten erfolgt auf Normalverteilung. Das Signifikanzniveau für den Kolmogorov-Smirnov-Test wird auf  $\alpha_s = 5\%$  ( $\alpha_s = 0,05$ ) gesetzt. Neben der mathematischen Überprüfung ist ein überschlägiger Test auf Normalverteilung auch visuell über ein Wahrscheinlichkeitsnetz möglich. Abbildung 61 zeigt das Testergebnis und das Wahrscheinlichkeitsnetz der Messwerte von  $F_{max}$ .

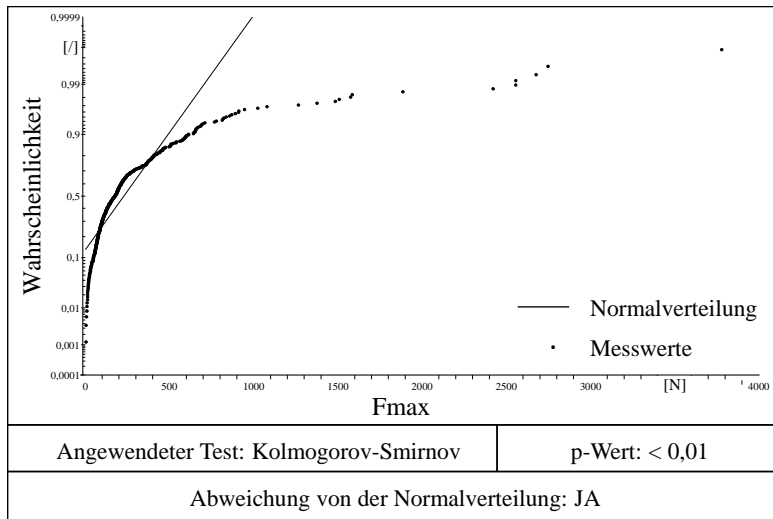


Abbildung 61: Wahrscheinlichkeitsnetz zum Test auf Normalverteilung für die Messwerte von  $F_{max}$

Mit dem ermittelten p-Wert  $< 0,01$  ( $\text{p-Wert} < \alpha_s$ ) wird die Nullhypothese  $H_0$  verworfen. Die Messwerte  $y_i$  folgen dementsprechend nicht der zugrunde gelegten Normalverteilung.

Wird die Bedingung der Normalverteilung der Zielgröße nicht erfüllt, besteht die Möglichkeit der Transformation der Werte  $y_i$ . Eine Transformation der Messwerte bedeutet, dass anstatt der tatsächlich gemessenen Werte durch einfache mathematische Umrechnungen ermittelte Größen für die weiterführenden Analysen verwendet werden (KLEPPMANN 2001). Je nach zugrundeliegender Verteilung stehen verschiedene Transformationen zur Verfügung, um diese der Normalverteilung anzupassen. Folgen die Messwerte z.B. einer Poisson-Verteilung,

können die Analyseergebnisse optimiert werden, indem mit der Zielgröße eine Wurzeltransformation durchgeführt wird. Zur Auswahl einer geeigneten Transformation dient eine Methode nach BOX & COX (1964). Diese nutzt die Transformationsfunktion

$$y_{\text{transformiert}} = y^{\lambda_T} \quad (5-18)$$

und optimiert den Transformationsparameter  $\lambda$  unter Anwendung des Algorithmus in Gl. (5-19) (WAPPIS & JUNG 2013).

$$y^{(\lambda_T)} = \begin{cases} \frac{y^{\lambda_T} - 1}{\lambda_T} & (\lambda_T \neq 0) \\ \log y & (\lambda_T = 0) \end{cases} \quad (5-19)$$

Die Zielgröße  $y$  wird nacheinander entsprechend Gl. (5-19) mit durchlaufendem Exponenten  $\lambda_T$  transformiert und berechnet. Folgende Transformationen sind je nach Ausgangslage möglich (GUNDLACH 2004, OSBORNE 2010):

- $\lambda_T = 1$ : keine Transformation erforderlich
- $\lambda_T = 0,5$ : Wurzeltransformation
- $\lambda_T = 0$ : logarithmische Transformation
- $\lambda_T = -0,5$ : inverse Wurzeltransformation
- $\lambda_T = -1$ : inverse Transformation

Zur grafischen Darstellung der unterschiedlichen Transformationsergebnisse wird in Abhängigkeit von der durchgeführten Transformation die jeweilige Quadratsumme der Residuen ermittelt (Ordinate). Das Ergebnis der Daten wird im Box-Cox-Plot über der entsprechenden Potenz (engl. *Power*) der Transformation (Abszisse) aufgetragen. Abbildung 62 zeigt das Ergebnis der Box-Cox-Transformation für die Beobachtungen von  $F_{max}$ . Die Angaben neben den aufgetragenen Punkten entsprechen der jeweilig empfohlenen Transformation. Eine Transformation wird dann empfohlen, wenn der Punkt für  $\lambda_T = 1$  (keine Transformation wird durchgeführt) über und die beste Transformation unterhalb der im *Box-Cox-Plot* eingezeichneten Grenzlinie liegt (WEMBER 2005).

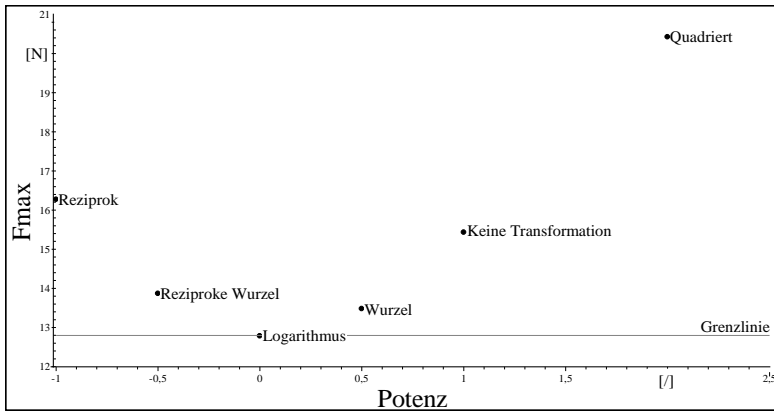


Abbildung 62: Box-Cox-Plot für die Messwerte von  $F_{max}$

Die Auswertung in Abbildung 62 zeigt den Punkt *Logarithmus* mit einem leichten Versatz unter der Grenzzlinie. Die beste Näherung der Zielgröße an die Normalverteilung wird dementsprechend mit einer logarithmischen Transformation erreicht. Für die Zielgröße  $F_{max}$  gilt damit:

$$y_{i \text{ transformiert } F_{max}} = y_{i T F_{max}} = \ln y_{i F_{max}} \quad (5-20)$$

Die Funktion der sog. Box-Cox-Transformation ist begrenzt, da die zu transformierenden Daten ausschließlich positive oder negative Werte annehmen dürfen. Werden, wie in diesem Anwendungsfall, vorrangig positive Werte gemessen, ist beim Auftreten negativer Werte eine Addition einer Konstante zur Verschiebung der Zielgröße erforderlich (WEMBER 2005). Bei dem hier analysierten Werten von  $F_{max}$  liegen keine Messwerte im negativen Bereich vor. Eine Verschiebung der Werte ist für diesen Datensatz nicht erforderlich.

Abbildung 63 zeigt die Verteilung der transformierten Daten  $y_{i T F_{max}}$ . Der im Rahmen des Kolmogorov-Smirnov-Tests ermittelte p-Wert ist nach der Transformation größer als 0,25 und liegt damit deutlich über dem Signifikanzniveau  $\alpha$ . Die Nullhypothese  $H_0$  (die untersuchten Werte folgen der Normalverteilung) kann somit als wahr angenommen werden. Die Voraussetzungen zur Durchführung einer Regressionsanalyse für  $F_{max}$  sind damit erfüllt. Analog dem dargestellten Vorgehen für  $F_{max}$  erfolgt die Anpassung der weiteren Datensätze an die Normalverteilung.



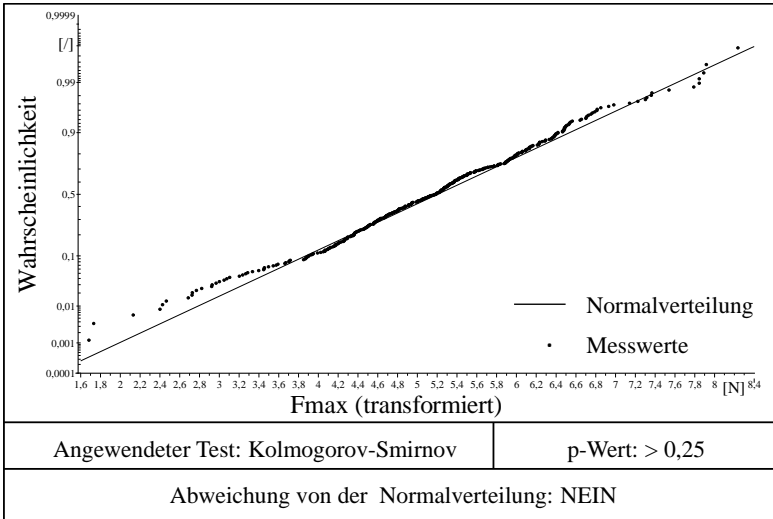


Abbildung 63: Verteilung der Messwerte von  $F_{max}$  nach durchgeführter Transformation

Durch die Transformation der Messwerte folgen die Daten nun annähernd einer Normalverteilung. Durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate werden die Regressionskoeffizienten für die einzelnen Modelle angenähert. Die Berechnung der Terme erfolgt anhand der zugrunde gelegten Daten und der Berücksichtigung von quadratischen Termen sowie einfachen Wechselwirkungen.

### Schrittweise Regression

Das vollständige Regressionspolynom beinhaltet viele Terme, die keinen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße haben. Eine Reduzierung um die unwichtigen Terme ist erforderlich. Das Vorgehen der Bereinigung eines Modells von nicht-signifikanten Termen wird *schrittweise Regression* genannt. Hierbei werden konsekutiv Koeffizienten aus dem Modell entfernt, deren Irrtumswahrscheinlichkeit einen zuvor definierten, akzeptablen Wert übersteigt. Das Ziel ist die Reduzierung des Modells auf ausschließlich signifikante Terme (WEMBER 2005).

Das Vorgehen der schrittweisen Regression wird nachfolgend am Beispiel des Modells  $\hat{y}_{F_{max}}$  dargestellt. Nach der Berechnung aller Koeffizienten beinhaltet das vollständige Modell 112 Einzeltermine bei einem adjustierten Bestimmtheitsmaß  $R_{adj}^2 = 0,958$  und einer Prognosegenauigkeit  $s_R = 0,215$ . Eine Beschrei-

## 5.6 Versuchsauswertung

bung der hier verwendeten Modellgütemaße  $R_{adj}^2$  und  $s_R$  erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

Mit dem Ziel einer möglichst hohen Modellgüte bei einer akzeptablen Anzahl an Modelltermen werden für die schrittweise Regression zwei Signifikanzgrenzen ( $SG_{in}$  und  $SG_{out}$ ) festgelegt.  $SG_{in}$  beschreibt dabei die Irrtumswahrscheinlichkeit, die vom Koeffizienten unterschritten werden muss, um im Modell berücksichtigt zu werden. Bei Überschreitung der Signifikanzgrenze  $SG_{out}$  hingegen wird der entsprechende Regressionskoeffizient aus dem Modell entfernt. Für die schrittweise Regression des Modells  $\hat{y}_{F_{max}}$  wird  $SG_{in} = 0,01$  und  $SG_{out} = 0,05$  definiert. Dies besagt, dass eine einprozentige Wahrscheinlichkeit besteht, dass nichtsignifikante Terme irrtümlich im Modell verbleiben. Mit den definierten Grenzen kann die Anzahl der Regressionskoeffizienten um 62 auf 50 gesenkt werden. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß sowie die Prognosegenauigkeit des Modells werden dabei, trotz der erheblichen Reduzierung an Koeffizienten, nur minimal beeinträchtigt (vgl. Abbildung 64) (WEMBER 2005).

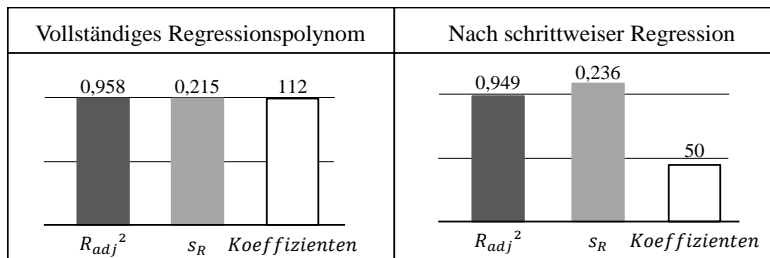


Abbildung 64: Schrittweise Regression der Zielgröße  $\hat{y}_{F_{max}}$

### Ausreißeranalyse

Ausreißer sind definiert als Punkte, die offensichtlich von der Mehrzahl der Ergebnisse abweichen. Sie können durch Fehler beim Versuch, Ablesefehler oder andere Irregularitäten verursacht werden. Werden Ausreißer nicht als solche erkannt, besteht die Gefahr, dass sie im weiteren Verlauf der Analyse die Ergebnisse verfälschen (KLEPPMANN 2001). Um bestehende Ausreißer zu detektieren, werden die Residuen, vgl. Gl. (5-21), in einem Streudiagramm über der Versuchsreihenfolge aufgetragen. Ausreißer können identifiziert werden, da sie im Vergleich zu anderen Messungen aus derselben Stichprobe ein Vielfaches des Abstandes zur Null-Linie aufweisen. Die Residuen in Abbildung 65 streuen wei-

testgehend homogen um den Wert Null. Ausreißer sind somit weder optisch noch analytisch zu erkennen.

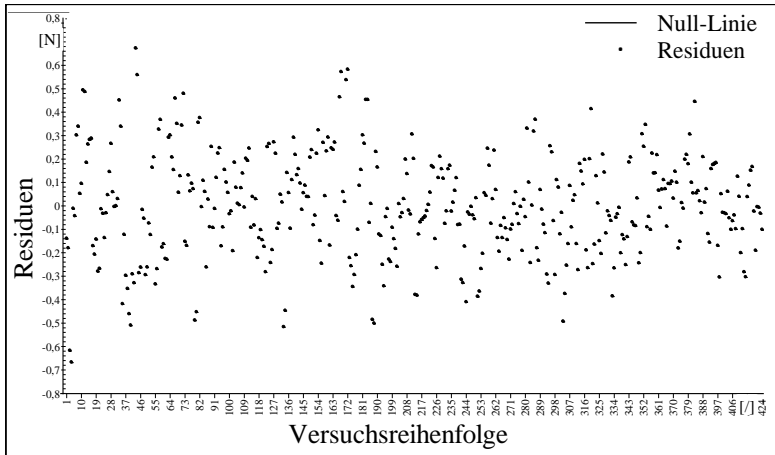


Abbildung 65: Grafische Ermittlung von Ausreißern

### Residuenanalyse

Die Regressionsanalyse ist formal an Bedingungen geknüpft (WEMBER 2005). Diese Regressionsvoraussetzungen lauten (MONTGOMERY 2001, SIEBERTZ ET AL. 2010, KUB 2012):

- Bedingung A: Die Residuen sind unabhängig voneinander  
(keine Autokorrelation)
- Bedingung B: Die Residuen sind annähernd normalverteilt
- Bedingung C: Die Residuen haben die gleiche Varianz  
(Homoskedastizität)
- Bedingung D: Der Erwartungswert der Residuen ist Null

Die Überprüfung der Bedingungen erfolgt anhand einer Residuenanalyse. Residuen bezeichnen die Abweichung der Messwerte von den berechneten Modellwerten, vgl. Gl. (5-21).

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5-21)$$

Zur Überprüfung der *Bedingung A* werden die Residuen der Einzelwerte auf einen Trend hin überprüft. Hierfür werden die Reihenfolge der Einzelversuche

## 5.6 Versuchsauswertung

auf der Abszissenachse und die Residuen auf der Ordinatenachse aufgetragen (GUNDLACH 2004). Abbildung 65 zeigt die Darstellung der Residuen gegen die Versuchsreihenfolge für den Modellschätzer  $\hat{y}_{F_{max}}$ . Die Punkte verteilen sich über alle Versuche hinweg gleichmäßig um die Nulllinie. Ein Trend kann nicht erkannt werden. Bedingung A ist somit erfüllt.

Zur Prüfung der Normalverteilung der Residuen wird erneut der Kolmogorov-Smirnov-Test eingesetzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 66 in Form eines Wahrscheinlichkeitsdiagramms dargestellt. Die Beurteilung, ob die Werte der Normalverteilung folgen, geschieht über die Ausgleichsgerade. Entspricht die Verteilung der Residuen einer Normalverteilung, müssen die Residuen annähernd auf der Ausgleichsgeraden liegen (GUNDLACH 2004). Für die Residuen des Modellschätzers  $\hat{y}_{F_{max}}$  liegt dieser Fall vor. *Bedingung B* (Normalverteilung der Residuen) ist somit erfüllt.

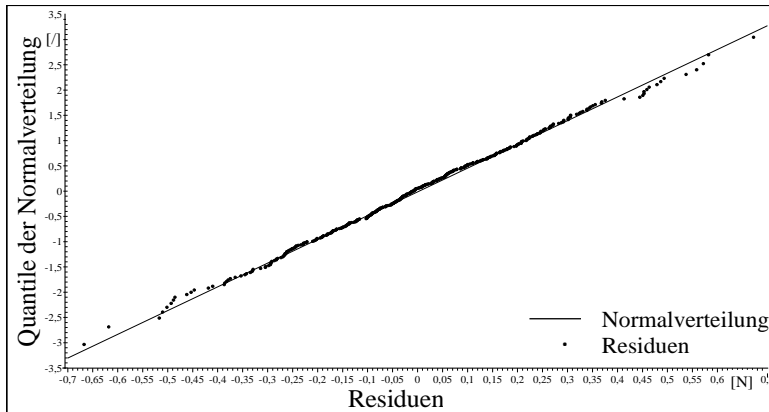


Abbildung 66: Wahrscheinlichkeitsdiagramm der Residuen von  $\hat{y}_{F_{max}}$

Voraussetzung für eine statistische Analyse ist eine konstante Varianz sowie die Unabhängigkeit der Standardabweichung von der Zielgröße  $y$  (Homoskedastizität). In manchen Fällen nimmt die Standardabweichung mit zunehmendem  $y$ -Wert zu, z.B. als fester Prozentsatz des Mittelwerts. Eine Überprüfung erfolgt durch Auftragen der Residuen gegenüber den berechneten Modellwerten  $\hat{y}_i$  (Modellschätzer) in einem Streudiagramm. *Bedingung C* der Regressionsvoraussetzungen ist erfüllt, wenn die Residuen ein waagerechtes Band oder eine Punktwolke darstellen. Heteroskedastizität äußert sich im Streudiagramm

durch die Anordnung der Residuen in Trichterform, exemplarisch dargestellt in Abbildung 67 (KLEPPMANN 2001).

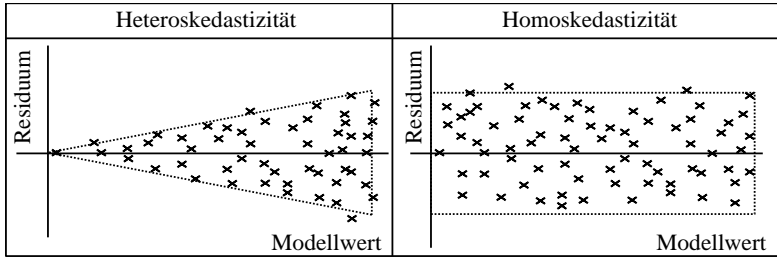


Abbildung 67: Schematische Darstellung von Hetero- und Homoskedastizität

Abbildung 68 zeigt das Streudiagramm der Residuen gegenüber den berechneten Modellschätzern für  $\hat{y}_{Fmax}$ . Die Residuen liegen in einem waagerechten Band. Eine Abhängigkeit der Residuen von der Zielgröße ist nicht erkennbar. Bedingung C ist somit erfüllt.

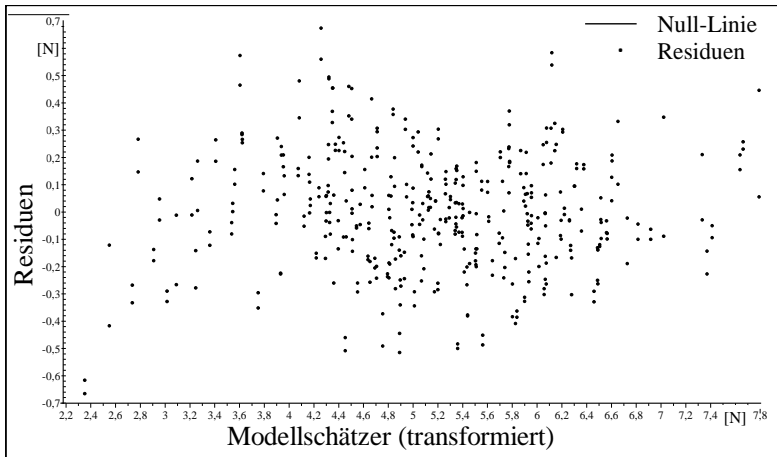


Abbildung 68: Streudiagramm der Residuen über Modellschätzer für  $\hat{y}_{Fmax}$

Ziel der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ist die Minimierung der Abweichungen zwischen den Modell- und Messwerten an den korrespondierenden Versuchspunkten. Anhand *Bedingung D* wird geprüft, ob sich die Abweichungen

## 5.6 Versuchsauswertung

---

zwischen geschätzten und beobachteten Werten ausgleichen. Bedingung D ist erfüllt, wenn der Erwartungswert die Bedingung

$$E(\varepsilon_i) = 0 \quad (5-22)$$

erfüllt (KUB 2012).

Der Erwartungswert wird durch Mittelwertbildung über alle Residuen  $\varepsilon_i$  berechnet. Das Ergebnis für das Regressionsmodell von  $F_{max}$  ergibt

$$E_{F_{max}} = 4,72e^{-12} \text{ N} \quad (5-23)$$

und erfüllt aufgrund einer ausreichenden Annäherung an Null die **Bedingung D**.

### Güte des Modells

Nach der Beweisführung zur Gültigkeit der Regressionsbedingungen ist ein Einsatz des Modells möglich. Um die Modellergebnisse richtig interpretieren zu können, ist es jedoch von großer Bedeutung, die Güte des Modells zu kennen. Zur Beurteilung stehen mehrere statistische Gütemaße zur Verfügung.

Weit verbreitet ist die Anwendung des *Bestimmtheitsmaßes*  $R^2$ . Das Bestimmtheitsmaß ist interpretierbar als „Anteil an der Ausgangsstreuung von  $y$ , der durch die Regression erklärt wird“ (WEMBER 2005). Zur Berechnung wird die Abweichung des beobachteten Werts  $y_i$  (•) vom Mittelwert  $\bar{y}$  aufgeteilt. Ein Anteil der Abweichung wird durch die Regression ( $y_i - \hat{y}_i$ ), der andere Anteil durch die Abweichung des Mittelwerts von der Regressionsgeraden ( $\hat{y}_i - \bar{y}$ ) beschrieben. Die einzelnen Komponenten der Abweichung sind in Abbildung 69 exemplarisch an einem einfachen Regressionspolynom  $\hat{y}_i = b_0 + b_1x_1$  dargestellt und in Gl. (5-24) formuliert (KLEPPMANN 2001).

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5-24)$$

Die Berechnung von  $R^2$  erfolgt über die Summe der quadratischen Abweichungen. Unter Anwendung der mathematischen Formulierung aus Gl. (5-24) wird das Bestimmtheitsmaß definiert als (MYERS 1990):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (5-25)$$

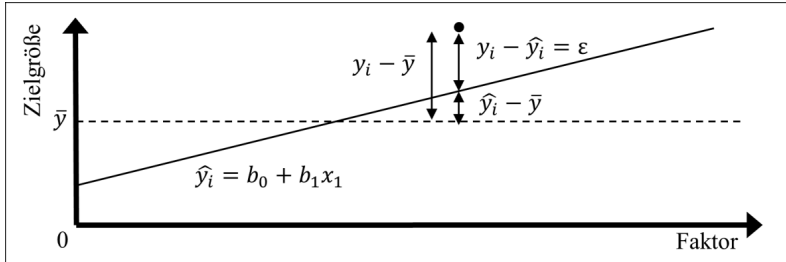


Abbildung 69: Abweichungen eines Beobachtungswerts  
in Anlehnung an JANSSEN & LAATZ (2013)

Das Bestimmtheitsmaß kann dementsprechend nur Werte zwischen

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (5-26)$$

annehmen. Je besser die Anpassung des Modells an die Daten erfolgt, desto kleinere Werte nehmen die Residuen an und das Bestimmtheitsmaß nähert sich der oberen Grenze 1. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R_{adj}^2$  (auch korrigiertes Bestimmtheitsmaß) ist eine Weiterentwicklung von  $R^2$ , die die Freiheitsgrade (FG) bzw. die Anzahl der einfließenden Faktoren mit berücksichtigt. Der Kennwert  $R_{adj}^2$  ist vor allem bei komplexen Versuchsreihen mit einer Vielzahl an Einflussparametern hilfreich, da jeder zusätzliche Faktor das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  erhöht. Ohne Berücksichtigung der Freiheitsgrade kann daher durch Hinzunahme weiterer, auch nichtsignifikanter Terme ein unzulässig hoher Wert erreicht werden. Daher wird v.a. bei Regressionsmodellen häufig das adjustierte Bestimmtheitsmaß eingesetzt (MONTGOMERY 2001). Die Berechnung des adjustierten Bestimmtheitsmaßes erfolgt nach Gl. (5-27). Der Freiheitsgrad (FG) bezeichnet den um die Anzahl der zu schätzenden Parameter reduzierten Stichprobenumfang ( $n$ ) (WEMBER 2005).

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{FG} (1 - R^2) \quad (5-27)$$

In Tabelle 4 erfolgt die Aufstellung der Einzelterme sowie des Ergebnisses der Berechnung für  $\hat{y}_{F_{max}}$ . Aus den Zahlenwerten wird ersichtlich, dass die Ausgangsstreuung durch die Regression sehr gut wiedergegeben wird.

## 5.6 Versuchsauswertung

Tabelle 4: Berechnung des adjustierten Bestimmtheitsmaßes für  $\hat{y}_{F_{max}}$

Bestimmtheitsmaß	Stichproben- umfang	Freiheitsgrad	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß
$R^2 = 0,958$	$n = 424$	$FG = 351$	$R_{adj}^2 = 0,949$

Ein weiteres Maß zur Bestimmung der Modellgüte ist die Standardabweichung der Regression  $s_R$ . Hierfür wird mit Gl. (5-28) die Standardabweichung der Residuen ermittelt. Bei einer ausreichend guten Annäherung der Regressionskoeffizienten durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate ist ein geringer  $s_R$ -Wert die Folge. Bei einer idealen Anpassung beträgt  $s_R = 0$ , da alle Residuen  $\varepsilon = 0$  sind. Das Gütemaß  $s_R$  kann auch als Prognosegenauigkeit verstanden werden, da die Standardabweichung der Residuen dem mittleren Prognosefehler entspricht (WEMBER 2005).

$$s_R = \sqrt{\frac{1}{FG} \sum_{i=1}^n \varepsilon^2} \quad (5-28)$$

Für das Regressionsmodell  $\hat{y}_{F_{max}}$  beträgt  $s_{R_{F_{max}}} = 0,236 N$ . Für eine absolute Bewertung des Modells ist dieses Gütemaß nicht geeignet. Da der Wert jedoch mit abnehmenden Residuen, also zunehmender Annäherung der Modellwerte an den beobachteten Wert, gegen den Wert 0 tendiert, spricht der berechnete Wert für eine gute Annäherung und damit auch für eine gute Prognosegenauigkeit.

### Rücktransformation der Zielgröße

Die berechneten Modellschätzer werden in der gleichen Einheit angegeben wie die Beobachtungen, auf deren Basis die Regressionsanalyse durchgeführt wurde. Durch die logarithmische Transformation aus Gl. (5-20) sind diese Werte jedoch nicht direkt mit den Beobachtungen vergleichbar. Um bei Anwendung des Modells Schätzwerte zu erhalten, die mit realen Beobachtungen in Relation zu setzen sind, müssen die Werte rücktransformiert und eine ggf. aufaddierte Konstante muss subtrahiert werden. Die Rechenschritte können an den berechneten Einzelwerten des Modellschätzers durchgeführt oder direkt in das Modell integriert werden. Die Rücktransformation der Logarithmusfunktion für das Modell  $\hat{y}_{F_{max}}$  erfolgt durch den Einsatz der Umkehrfunktion  $e^x$  in Gl. (5-29). Für die Umrechnung des Modellschätzers  $\hat{y}_{F_{max}}$  ergibt sich mit den Beziehungen aus Gl. (5-20) und (5-29) die Gl. (5-30).



$$e^{\ln y} = y \quad (5-29)$$

$$\hat{y}_{iF_{max}} = e^{\hat{y}_{iF_{max}}^{\text{transformiert}}} = e^{\ln(\hat{y}_{iF_{max}})} \quad (5-30)$$

Die Modellfunktion  $\hat{y}$  nimmt damit die Form in Gleichung (5-31) an. Die Konstante  $k_0$  repräsentiert dabei den Wert, der auf die Messwerte addiert wurde, um die Box-Cox-Transformation durchzuführen zu können (alle Werte müssen positiv sein). Für  $\hat{y}_{F_{max}}$  beträgt  $k_0 = 0$ .

$$\hat{y} = e^{(b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j)} - k_0 \quad (5-31)$$

### 5.6.2 Effektanalyse

Ziel einer Regressionsanalyse ist die mathematische Formulierung der Abhängigkeit einer Zielgröße von einem oder mehreren Faktoren. Der Einfluss, den ein Faktor ausübt, äußert sich durch eine vorzeichenbehaftete Änderung der Zielgröße. Der Änderungsbetrag wird Effekt genannt (SCHEFFLER 1986). Ist die Ursache der Änderung auf einen einzelnen Faktor zurückzuführen, handelt es sich um einen *Haupteffekt*. Wird der Effekt durch eine kombinierte Einflussnahme mehrerer Faktoren auf die Zielgröße verursacht, wird dies als *Wechselwirkung* bezeichnet. In Abhängigkeit von der Anzahl der am Effekt beteiligten Faktoren spricht man von 2-Faktor-Wechselwirkungseffekten bei zwei beteiligten Faktoren oder 3-Faktor-Wechselwirkungseffekten bei drei beteiligten Faktoren usw. Aufgrund der hohen Anzahl der in dieser Arbeit berücksichtigten Faktoren werden in den entwickelten Modellen ausschließlich Haupteffekte und 2-Faktor-Wechselwirkungseffekte betrachtet (SCHEFFLER 1986, PETERSEN 1991).

Zur Darstellung der Haupteffekte wird ein sog. *Adjusted-Response-Graph* (ARG) eingesetzt. Dabei werden die eindimensionalen Effekte der jeweiligen Faktoren der Modellgleichung als Gerade (linearer Effekt) oder Kurve (nichtlinearer Effekt) dargestellt. Die jeweiligen Residuen sind als Punkte eingetragen. Auf der Ordinate wird die um alle weiteren Effekte bereinigte Zielgröße aufgetragen (WEMBER 2005).

Der Einfluss einzelner Faktoren auf die Zielgröße  $\hat{y}_{F_{max}}$  wird je Kategorie dargestellt und das Ergebnis interpretiert. Abbildung 70 zeigt den ARG für die Faktoren der Kategorie *Konstruktion* (*Fasenrundung*, *Fasenwinkel*, *Oberfläche* und *Verpressung*) auf jeweils drei Stufen.

## 5.6 Versuchsauswertung

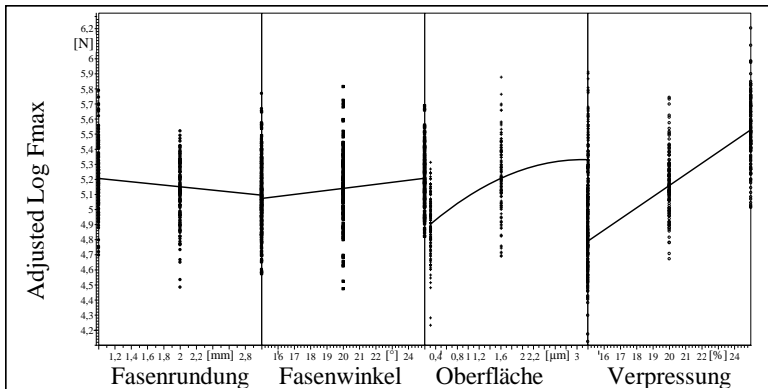


Abbildung 70: ARG für Faktoren der Kategorie Konstruktion

Der lineare Verlauf der Effektlinie des Faktors *Fasenrundung* beschreibt eine Zunahme der erforderlichen Fügekraft bei Reduzierung der Fasenrundung. Je größer der Radius beim Übergang der Einführfase zum konstanten Innendurchmesser der Nabe ist, desto harmonischer kann sich das Elastomer an die Geometrie anpassen und muss nicht über eine scharfe Kante gleiten.

Ebenfalls anhand der Materialeigenschaften des Elastomers kann die Zunahme der Fügekraft mit dem *Fasenwinkel* begründet werden. Mit steigendem Fasenwinkel bleibt dem O-Ring weniger Zeit, sich zu verformen, d.h. der Verformungsprozess muss in einer kürzeren Wegstrecke ablaufen, was aufgrund der frequenzabhängigen Festigkeit des Elastomers zu höheren erforderlichen Verformungskräften führt. Weiterhin erfolgt ein mit zunehmendem Fasenwinkel steigender Normalkraftanteil, der entgegen der Fügebewegung wirkt (vgl. Abbildung 40).

Analog hierzu lässt sich die Kraftzunahme bei raueren *Oberflächen* erklären. Die steigende Ausprägung von Rauheitstälern und -hügeln verursacht eine zunehmende Deformation der O-Ring-Oberfläche und damit eine größere Menge an dissipierter Energie. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten linearen Effekten verursacht eine Verschlechterung der Oberflächenqualität einen degressiven Kraftzuwachs.

Einen deutlichen Effekt zeigen die unterschiedlichen Stufen der *Verpressung* des O-Rings. Die Effektstärke ist durch die Steigung des linearen Verlaufs ersicht-

lich. Mit zunehmender Querschnittsverjüngung des O-Ring-Durchmessers wird mehr Energie dissipiert und höhere Verformungskräfte sind erforderlich.

Der Adjusted Response Graph in Abbildung 71 visualisiert die Haupteffekte der Faktoren *Beschichtung*, *Härte*, *Material*, *Innen-* und *Schnurdurchmesser* der Kategorie *O-Ring*.

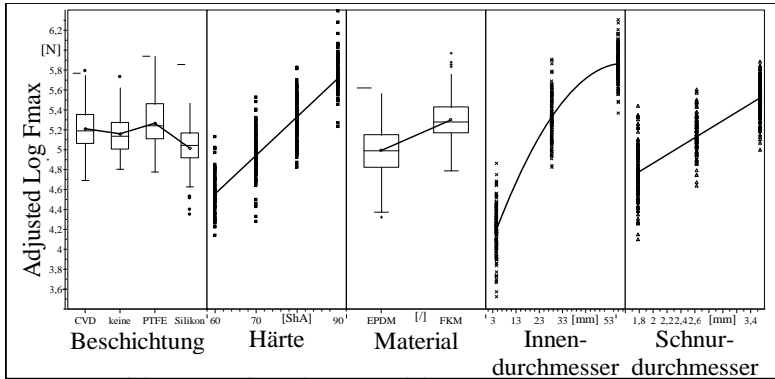


Abbildung 71: ARG für Faktoren der Kategorie *O-Ring*

Beschichtungen werden in der Regel eingesetzt, um die Gleitreibung bei der Montage von O-Ringen zu reduzieren. Das Ergebnis der Versuche zeigt jedoch, dass der gewünschte Effekt für die hier betrachteten Anwendungsfälle ausschließlich für den Beschichtungstyp *Silikon* in Relation zu einem unbeschichteten O-Ring erzielt werden kann. Da die maximale Kraft  $F_{max}$  relativ am Anfang der Kontaktphase zwischen O-Ring und Bohrung auftritt, liegt die Vermutung nahe, dass der gewünschte Effekt der Reduzierung der Fügekraft durch die Beschichtung erst nach einigen Millimetern Fügeweg erzielt wird. Abbildung 72 zeigt den Haupteffekt der verschiedenen Beschichtungen an unterschiedlichen Stützpunkten der Fügephase. Auch hier ist, außer bei *Silikon*, keine Änderung der Effektstärke zu erkennen, so dass der Einsatz dieser Beschichtungstypen vor dem Hintergrund erhöhter Einzelteilkosten kritisch zu hinterfragen ist.

## 5.6 Versuchsauswertung

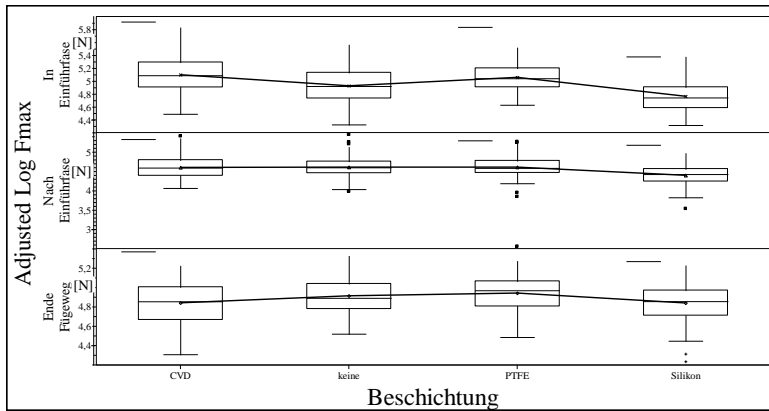
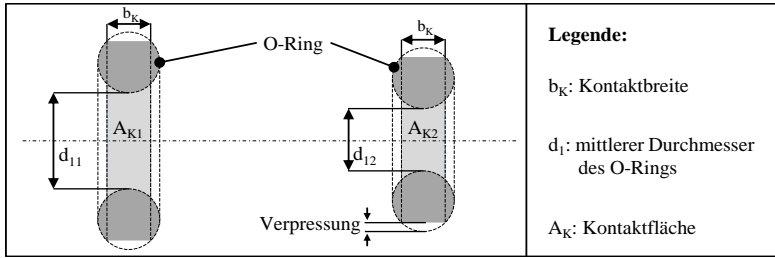


Abbildung 72: ARG für den Faktor *Beschichtung* an verschiedenen Positionen des Fügewegs

In Abbildung 71 wird ersichtlich, dass der Faktor *Härte* einen deutlichen Effekt erzielt. Mit zunehmender Härte des O-Rings steigt auch der Elastizitätsmodul des Elastomers an (KUNZ & STUDER 2006) und damit die erforderlichen Verformungskräfte. Daraus resultiert eine höhere Dissipationsenergie bei Verformung des Schnurquerschnitts und somit eine Erhöhung der erforderlichen Fügekraft.

Der kategoriale Faktor *Material* weist ebenfalls einen Effekt auf. Entsprechend dem ARG hat der Einsatz des Elastomers EPDM eine geringere Fügekraft als FKM zur Folge. Dies kann auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Elastomertypen zurückgeführt werden. Der Werkstoff EPDM ist ein schwefelvernetzter, unpolarer Kautschuk. Der polare Kautschuk FKM hingegen wird peroxidisch vernetzt. Dies hat geringfügige Änderungen im Materialverhalten bei Verformung und Reibung zur Folge. Aufgrund der Polarität des Fluorkautschuks kommt es zudem vermehrt zu intermolekularen Wechselwirkungen mit dem metallischen Kontaktpartner (Dipolkkräfte) (HABENICHT 2009). Entsprechend der vorgestellten Adhäsionstheorien resultiert aus einer Zunahme der Molekularbindungen an den Kontaktflächen ebenso eine Erhöhung der Reibungskräfte.

Der Effekt eines zunehmenden O-Ring-*Innendurchmessers* lässt sich auf den geometrischen Zusammenhang zwischen Innendurchmesser und Kontaktfläche zurückführen. In Abbildung 73 ist die Relation vereinfacht dargestellt.



*Abbildung 73: Zusammenhang zwischen Innendurchmesser und Kontaktfläche eines O-Rings*

Bei gleichbleibender Verpressung und Kontaktbreite  $b_K$  und mit dem Verhältnis der Innendurchmesser der O-Ringe  $d_{11} > d_{12}$  folgt mit Gl. (5-32) und (5-33) für die Kontaktflächen der O-Ringe der Zusammenhang  $A_{K1} > A_{K2}$ .

$$A_{K1} = b_K \cdot d_{11} \cdot \pi \quad (5-32)$$

$$A_{K2} = b_K \cdot d_{12} \cdot \pi \quad (5-33)$$

Eine Zunahme der Kontaktfläche resultiert in einer größeren Anzahl an Molekularbindungen zwischen den Kontaktpartnern und somit in einem Anstieg der Adhäsionskraft (vgl. Abschnitt 3.4).

Der gleiche Effekt wird bei einer Zunahme des O-Ring-Schnurdurchmessers erzielt. Bei einer gleichbleibenden Verpressung vergrößert sich die Kontaktfläche mit zunehmendem O-Ring-Schnurdurchmesser. Dies hat einen linearen Anstieg der erforderlichen Fügekraft zur Folge.

Die Effekte der Faktoren *Axialabweichung*, *Fügeschwindigkeit*, *Fügeweg* und *Winkelabweichung* der Kategorie *Prozess* sind in Abbildung 74 dargestellt. Der Faktor *Axialabweichung* zeigt im ARG einen exponentiellen, jedoch asymmetrischen Verlauf der Fügekraft. Die Asymmetrie ist auf eine ungleichmäßige Verteilung der Faktorstufen zurückzuführen. Der Verlauf weist eine starke Erhöhung der Fügekraft bei einer Auslenkung der Welle um -0,1 mm, eine Reduzierung bei Rücknahme der Axialabweichung und eine weitere Abnahme hin zu einer starken Auslenkung um 0,2 mm auf. Die Ausprägung dieses Effektes zeigt, dass der kraftmindernde Effekt aufgrund einer partiellen Verpressung des O-Rings erst bei größeren axialen Abweichungen eintritt.

## 5.6 Versuchsauswertung

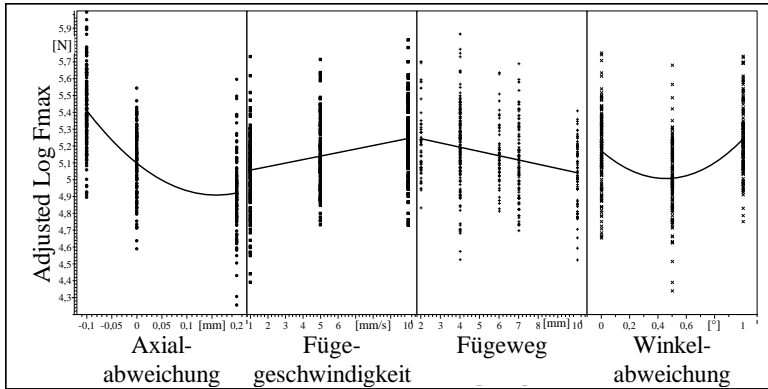


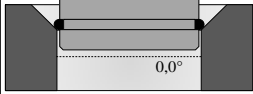
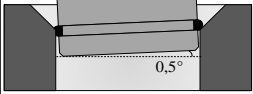
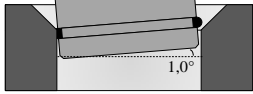
Abbildung 74: ARG für Faktoren der Kategorie Prozess

Die frequenzabhängige Zunahme des komplexen E-Moduls mit steigender Reibungsgeschwindigkeit wurde bereits ausführlich beschrieben (vgl. Kapitel 3.4). Der Zusammenhang spiegelt sich auch im Effekt des Faktors *Fügegeschwindigkeit* wider.

Durch den Faktor *Fügweg* wird ebenfalls ein geringfügiger Effekt hervorgerufen. Mit zunehmendem Fügweg weist der Faktor eine reduzierende Wirkung auf die Fügekraft auf. Daher ist anzunehmen, dass das Abbremsverhalten der Füge spindle die Ausprägung der maximalen Fügekraft geringfügig beeinflusst.

Der Effekt des Faktors *Winkelabweichung* zeigt einen nahezu parabolischen Verlauf mit einer progressiveren Entwicklung von der mittleren auf die höchste Stufe. Der Abfall der Fügekraft bei einer mittleren Winkelabweichung von  $0,5^\circ$  ist auf eine nur anteilhafte Verpressung des O-Rings durch die Schräglage der Welle zurückzuführen (vgl. Abbildung 75). Bei einem achsparallelen, mittigen Einpressvorgang taucht die Welle mit O-Ring vollumfänglich in die Einführfase ein. Der O-Ring wird bei konstanter Fugebewegung gleichzeitig in vollem Umfang verpresst, was zu hohen Verformungs- und Reibungskräften führt. Bei einer leichten Schräglage der Fügeachsen taucht zunächst ein Teil des O-Rings in die Einführfase ab. Eine partielle Verpressung des O-Rings mit geringeren erforderlichen Fügekräften ist die Folge. Wird die Schräglage von  $0,5^\circ$  auf  $1^\circ$  erhöht, steigt die erforderliche Fügekraft jedoch erneut an. Die Ursache liegt in der zunehmenden und einseitigen Verpressung des O-Rings. Durch die starke Schräglage der Welle wird der O-Ring lokal erheblich deformiert. Aufgrund der Nutgeometrie kann das verpresste Material jedoch nur geringfügig ausweichen. Ist

die Nutbreite voll ausgefüllt, steigt die lokale Flächenpressung aufgrund hoher resultierender Rückstellkräfte stark an. Eine Zunahme der Reibungskräfte sowie der entgegen der Fügeerichtung wirkenden Normalkräfte ist die Folge. Die Reaktionskräfte übersteigen die Kraftreduzierung infolge der oben dargestellten partiellen Verformung des O-Rings und resultieren in einer erneuten Fügekraftzunahme.

Keine Winkelabweichung	Geringe Winkelabweichung	Hohe Winkelabweichung
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vollumfängliche Querschnittsverformung</li> <li>▪ Einheitliche lokale Kompression</li> <li>▪ Partielle Nutausfüllung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Partielle Querschnittsverformung</li> <li>▪ Lokal leicht erhöhte Kompression</li> <li>▪ Partielle Nutausfüllung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Partielle Querschnittsverformung</li> <li>▪ Lokal stark erhöhte Kompression</li> <li>▪ Nut vollständig ausgefüllt</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">0,0°</p>	 <p style="text-align: center;">0,5°</p>	 <p style="text-align: center;">1,0°</p>

*Abbildung 75: Einfluss der Winkelabweichung auf die Querschnittsverformung des O-Rings*

Der letzte ARG in Abbildung 76 zeigt die Faktorenkategorie *Fügehilfsmittel*. Fügehilfsmittel werden eingesetzt, um den Fügeprozess zu erleichtern, und haben das Ziel, die Fügekraft zu reduzieren. Unabhängig von der Viskosität der Fügehilfsmittel ist eine geringfügige Reduzierung der Fügekraft durch *Auftragung des Fügehilfsmittels* direkt in die Bohrung zu erkennen. Durch Benetzung der Bohrungsoberfläche ist eine kontinuierliche Schmierfilmdicke entlang des Fügewegs sichergestellt. Bei Auftragung auf den O-Ring kann es ab dem Erstkontakt zwischen O-Ring und Einführfase zu Verdrängungseffekten des Fügehilfsmittels (engl. *squeeze-out*) in der Kontaktzone kommen (MOFIDI ET AL. 2008).

Die rechte Grafik zeigt einen negativ-progressiven Einfluss der *Viskosität* auf die Fügekraft. Es wird deutlich, dass der Einsatz eines mittelviskosen Motoröls anstatt eines niedrigviskosen Glykols nicht zu einer deutlichen Reduzierung der Fügekraft führt. Erst durch den Einsatz des hochviskosen Getriebeöls kann der gewünschte Effekt erzielt werden. Das *honigartige* Getriebeöl haftet wesentlich besser an den Oberflächen und verhindert so ein Abreißen des Schmierfilms. Im Vergleich zu niedrigviskosen Fügehilfsmitteln kann so eine kontinuierliche Trennung der Kontaktflächen realisiert werden.

## 5.6 Versuchsauswertung

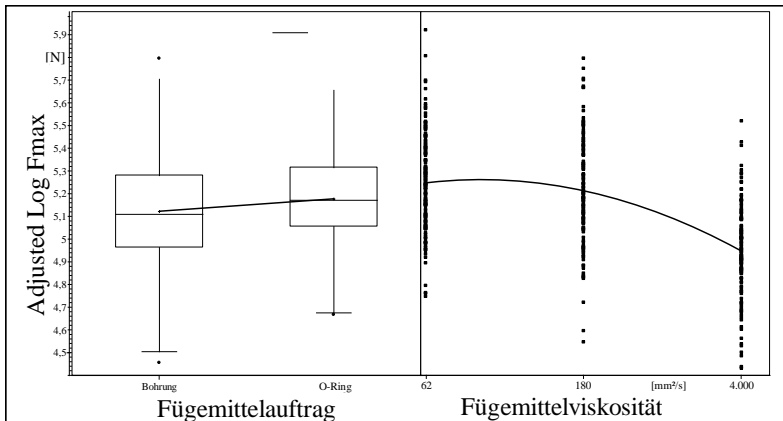


Abbildung 76: ARG für Faktoren der Kategorie Fugemittel

Die hier betrachteten Faktoren verursachen neben den dargestellten Haupteffekten durch Interaktion weitere 30 signifikante Wechselwirkungseffekte, auf die hier nicht im Detail eingegangen wird. Dennoch ist es erforderlich, Wechselwirkungen ausreichend Beachtung zu schenken. Die Interaktion einzelner Faktoren kann einen starken Effekt auf die Zielgröße haben. Je nach Ausprägung der Wechselwirkung ist eine Überlagerung mit den dargestellten Haupteffekten möglich. Eine Vorzeichenänderung des resultierenden Effekts kann im Vergleich zur singulären Betrachtung des Haupteffekts die Folge sein.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse ist mit der Effektanalyse abgeschlossen. Um die Anwendbarkeit sicherzustellen, sind die erzielten Ergebnisse im nächsten Schritt zu verifizieren und validieren.



## 6 Verifizierung und Validierung des Prognosemodells

### 6.1 Allgemeines

Für die Abgrenzung der Begriffe *Validierung* und *Verifizierung* werden die Definitionen nach DIN EN ISO 9000 (2005) herangezogen. Verifizierung ist demnach eine „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises (...), dass festgelegte Anforderungen (...) erfüllt worden sind“ (DIN EN ISO 9000 2005). Appliziert auf die hier durchgeführte Regressionsanalyse entspricht die Verifizierung der Überprüfung der Regressionsvoraussetzungen sowie dem statistisch gesicherten Vorgehen bei der Modellerstellung.

Validierung wird beschrieben als „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises (...), dass die Anforderungen (...) für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind“ (DIN EN ISO 9000 2005). Die Validierung des Prognosemodells erfolgt demnach anhand von Bestätigungsversuchen für den vorgesehenen Einsatzzweck.

### 6.2 Modellverifizierung

Die Verifizierung kann als abschließender Teil der Modellbildung bzw. der Regressionsanalyse betrachtet werden. Dabei wird der formale Nachweis über Konsistenz und Korrektheit des Modells erbracht (BANDOW & HOLZMÜLLER 2009).

Im Rahmen der Regressionsanalyse wurden Regressionsvoraussetzungen als Anforderung definiert (vgl. Bedingung A bis D in Kapitel 5.6.1). Die einzelnen Voraussetzungen konnten formal durch anerkannte Methoden der Residuenanalyse geprüft und bestätigt werden. Darüber hinaus wurde durch statistische Auswertung und Berechnung der zugrundeliegenden Daten die Güte des Modells nachgewiesen ( $R^2$ ,  $R_{adj}^2$ ,  $s_R$  etc.).

Auf Basis der durch den Einsatz anerkannter Methoden statistisch abgesicherten und konsistenten Vorgehensweise sowie der erzielten Ergebnisse kann das Regressionsmodell  $\hat{y}_{F_{max}}$  als verifiziert angenommen werden. Analog zum Vorgehen für  $\hat{y}_{F_{max}}$  ist die Verifizierung der Modelle für alle Stützpunkte erforderlich und wird im Rahmen der Modellbildung erbracht.

### 6.3 Modellvalidierung

Nach abgeschlossener Modellbildung ist das erzeugte Modell vor einer zweckorientierten Anwendung zu validieren (BANDOW & HOLZMÜLLER 2009). Die allgemeine Definition der Validierung nach DIN EN ISO 9000 (2005) wird für den Fall der Modellbildung durch VDI 3633 (1996) anwendungsspezifisch verfasst:

„Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und System. Es ist sicherzustellen, daß das Modell das Verhalten des realen Systems im Hinblick auf die Untersuchungsziele genau genug und fehlerfrei widerspiegelt“.

Es wird gleichzeitig darauf hingewiesen, dass eine vollständige Übereinstimmung zwischen den Modelldaten und dem abgebildeten System nicht möglich ist. Dies ist auf Ungenauigkeiten bei der Systemdatenerfassung und eine Abstraktion beim Modellaufbau zurückzuführen (VDI 3633 1996).

Die Überprüfung der Anforderungen und der erforderlichen Übereinstimmung von Modell und System (engl. *operational validity*) erfolgt anhand von Bestätigungsversuchen. Um ein ausreichendes Vertrauensniveau in die Validität des Modells erhalten zu können, sind mehrere Bestätigungsversuche durchzuführen (SARGENT 2010). Von besonderem Interesse ist das Modellverhalten bei Parametereinstellungen, die frei im Versuchsraum liegen und an die das Regressionsmodell nicht explizit angepasst wurde. Das Vorgehen zur Auswahl der Parametereinstellung für Validierungsversuche ist in Abbildung 77 schematisch dargestellt.

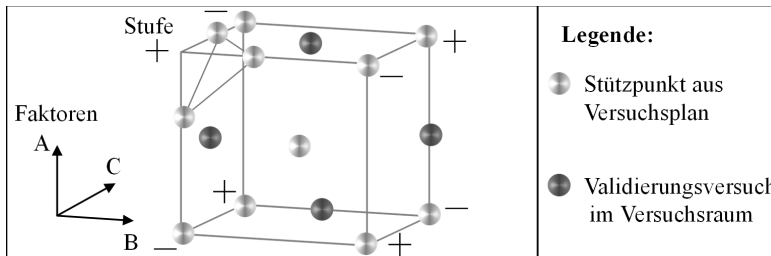


Abbildung 77: Schematische Darstellung eines Versuchsraums mit Stützpunkten und Validierungsversuchen in Anlehnung an GUNDLACH (2004)

Vor Durchführung der Bestätigungsversuche sind Validierungskriterien festzulegen. Dafür wird das in Kapitel 4.6 zum Soll-Ist-Abgleich definierte Toleranzband herangezogen. Die durchgeführten Validierungsversuche finden wie die Ver-

suchsplanpunkte unter kontrollierten Bedingungen statt. Die gemessenen Werte der Validierungsversuche entsprechen damit dem definierten Soll-Zustand der Fügekraftkurve (vgl. Kapitel 4.4). Stochastisch auftretende Störgrößen werden in den Prognosemodellen durch die Angabe von Konfidenzintervallen berücksichtigt. Das Validierungskriterium kann als erfüllt angesehen werden, wenn die Messwerte der Bestätigungsversuche innerhalb der berechneten Konfidenzintervalle der Einzelmodelle liegen (vgl. Abbildung 46).

### 6.3.1 Umfang der Validierungsversuche

Entsprechend der Forderung von SARGENT (2010) werden mehrere Bestätigungsversuche zur Validierung der Modelle geplant. Die Parameter der Validierungsversuche werden anwendungsspezifisch definiert. Als Vorlage der Parametrierung werden typische Bauteile aus dem Bereich der Aggregatmontage herangezogen (z.B. Kühlwasserrohr, Ölvorlaufleitung etc.). Alle Validierungsversuche werden innerhalb der Versuchsraumgrenzen positioniert, da eine Extrapolation über den im Versuchsplan definierten Versuchsraum hinweg nicht zulässig ist. Die Parameter der Validierungsversuche sind in Tabelle 5 dargestellt. Werte, die im Rahmen der Regressionsanalyse noch nicht herangezogen wurden, sind **fett** geschrieben.

Tabelle 5: *Parameter der Validierungsversuche*

Nr.	Faktoren	Benennung	Einheit	Validierungsversuche		
				Bauteilbezeichnung und Faktoreinstellungen		
	Konstruktion			Kolben- dichtung 1	Kolben- dichtung 2	Kolben- dichtung 3
1	Verpressung	K-C	[%]	<b>16,92</b>	<b>22,66</b>	<b>21,60</b>
2	Fasenwinkel	K- $\alpha$	[°]	<b>20,09</b>	<b>20,11</b>	<b>23,76</b>
3	Fasenrundung	K-R	[mm]	<b>2,08</b>	<b>1,41</b>	<b>1,45</b>
4	Oberfläche	K-Rz	[ $\mu$ m]	<b>1,40</b>	<b>3,16</b>	<b>1,59</b>
	O-Ring					
5	Innendurchmesser	O-d1	[mm]	<b>12</b>	<b>14,5</b>	<b>17</b>
6	Schnurdurchmesser	O-d2	[mm]	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
7	Material	O-M	[-]	FKM	FKM	EDPM
8	Beschichtung	O-B	[-]	keine	keine	PTFE
9	Härte	O-H	[Shore A]	70	70	60
	Prozess					
10	Fügeschwindigkeit	P-v	[mm/s]	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>2</b>
11	Positionabweichung	P-p	[mm]	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,1</b>
12	Winkelabweichung	P-w	[°]	<b>0,3</b>	<b>0</b>	<b>0,8</b>
13	Fügeweg	P-x	[mm]	<b>4,3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
	Fügehilfsmittel					
14	Viskosität	F-v	[mm <sup>2</sup> /s]	4000	62	4000
15	Auftragsort	F-A	[-]	O-Ring	O-Ring	Bohrung

### 6.3 Modellvalidierung

Die Faktoren der Gruppe *Konstruktion* und *O-Ring* sowie der Faktor *Fügeweg* sind durch die Konstruktionsvorgaben definiert. Die Werte der Gruppe *Prozess* und *Fügehilfsmittel* werden frei bestimmt. Jede Parameterkombination wird zehnfach wiederholt. Die Versuche werden am beschriebenen Versuchsstand durchgeführt. Auf diese Weise werden identische Versuchsbedingungen geschaffen und der Einfluss von externen Störgrößen wird minimiert.

#### 6.3.2 Ergebnis der Validierung

Das Ergebnis der Bestätigungsversuche kann anhand der in Abbildung 46 gezeigten Darstellungsweise visualisiert werden. Für die in der Validierung eingesetzten Kolbendichtungen wird die prognostizierte Fügekraft an den jeweiligen Stützstellen des Fügewegs als Punktwert (●) aufgezeichnet. Die oberen und unteren Konfidenzintervalle des Modellschätzers sind als Strich (—) abgebildet. Die jeweils zehn Messwerte der Bestätigungsversuche werden ebenfalls als Einzelpunkte (□) im Diagramm dargestellt. Liegen die Messwerte der Bestätigungsversuche innerhalb der Konfidenzgrenzen, gilt das Modell entsprechend dem Validierungskriterium als ausreichend genau. Aus Gründen der besseren Darstellbarkeit sind die einzelnen Diagramme auf unterschiedlichen Skalen der Fügekraft aufgetragen. Der Fügeweg ist bei allen Darstellungen identisch skaliert. In Abbildung 78 ist das Ergebnis der Bestätigungsversuche für die Kolbendichtung 1 entsprechend der Parameter aus Tabelle 5 dargestellt.

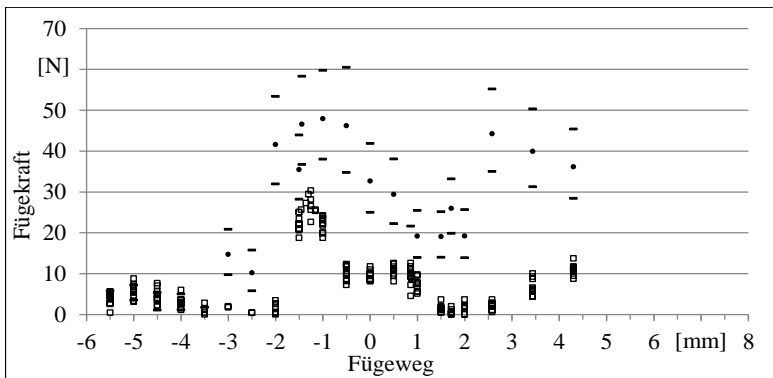


Abbildung 78: Abgleich der Modell- und Messwerte für Kolbendichtung 1

Bis zum Stützpunkt an Position -4,5 mm des Verlaufsdiagramms zeigen die Ergebnisse eine hohe Übereinstimmung. Im weiteren Verlauf kommt es zu deutlichen Abweichungen zwischen Messung und Prognose. Die Modellwerte weisen an allen Stützpunkten nach -4,5 mm einen höheren Betrag auf als die Messwerte. Auffällig ist ein Sprung der Prognosewerte im Bereich 2,5 mm bis 4,3 mm.

In Abbildung 79 ist das Ergebnis der Validierungsversuche der Kolbendichtung 2 dargestellt. Der Verlauf zeigt eine Übereinstimmung der Werte im vorderen Bereich des Fügewegs wie bei den Ergebnissen von Kolbendichtung 1. Im Bereich -3,0 mm bis 0,8 mm treten starke Abweichungen der Modell- und Messwerte auf. Im hinteren Bereich nimmt die Übereinstimmung erneut zu. Viele der Messwerte liegen innerhalb der errechneten Konfidenzintervalle. Auch hier ergeben die Modelle tendenziell höhere Werte als die Messungen.

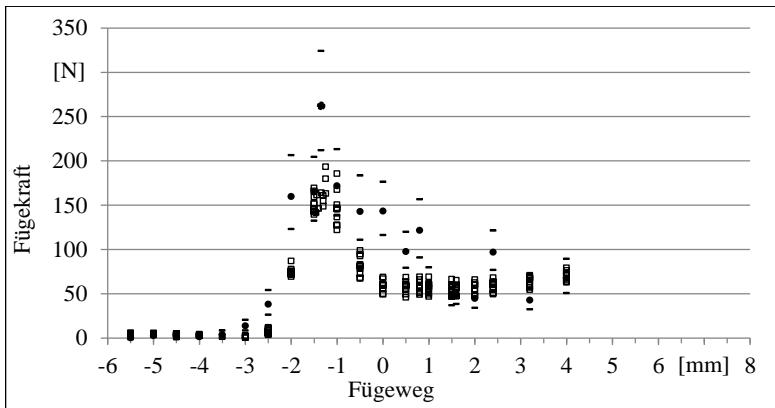


Abbildung 79: Abgleich der Modell- und Messwerte für Kolbendichtung 2

Die Ergebnisse der Validierung der Kolbendichtung 3 in Abbildung 80 weisen ähnliche Resultate auf wie bei Kolbendichtung 1. Die Modellschätzer liegen ab der Position -1,0 mm durchgängig höher als die tatsächlichen Messwerte. Im Bereich -1,5 mm bis -5,5 mm, v.a. am Stützpunkt -2,5 mm, kann eine hohe Übereinstimmung der Prognose und Messung festgestellt werden. Auffällig zeigen sich in diesem Verlauf die Modellschätzer an Punkt 0,8 mm und 4,0 mm durch eine stark überhöht Schätzung (Sprung). Ein unstetiger Verlauf der einzelnen Prognosewerte ist bei allen drei Validierungsversuchen ersichtlich.

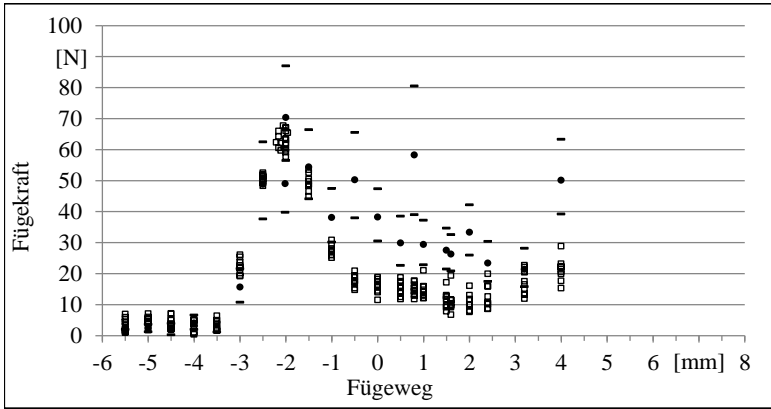


Abbildung 80: Abgleich der Modell- und Messwerte für Kolbendichtung 3

Bei den Bestätigungsversuchen zeigt sich an einigen Punkten eine gute Übereinstimmung zwischen Prognose- und Messwert. Die Ursache der auftretenden Differenzen an den übrigen Stützpunkten ist zu untersuchen. Die ermittelten Beträge der Residuen zwischen prognostizierten und gemessenen Werten sind ein Indikator für eine unzureichende Anpassung des Regressionsmodells an die zugrundeliegenden Daten. Zur statistischen Prüfung einer solchen Modellschwäche steht der *Lack-of-Fit* (LoF)-Test zur Verfügung. Anhand des LoF-Tests kann überprüft werden, ob mit dem erstellten Modell systematische Varianzen vernachlässigt werden (SORAVIA & ORTH 2000).

Zur Durchführung des Tests ist eine Varianzanalyse der Daten erforderlich. Die gesamte Varianz  $SS_{Tot}$  wird durch die quadratische Differenz der Einzelmessungen  $y_i$  vom Mittelwert aller Messungen  $\bar{y}$  beschrieben (SIEBERTZ ET AL. 2010).

$$SS_{Tot} = \sum_{i=1}^{n_r} (y_i - \bar{y})^2 \quad (6-1)$$

Die Gesamtvarianz kann weiter in die Anteile  $SS_{Reg}$  und  $SS_{Res}$  aufgeteilt werden.  $SS_{Reg}$  beschreibt dabei die Varianz, die durch das Regressionsmodell erklärt werden kann.  $SS_{Res}$  stellt den durch das Modell nicht erklärbaren Umfang dar und beschreibt damit die Residuen. Die Berechnungsweisen von  $SS_{Reg}$  und  $SS_{Res}$  sind in Gl. (6-2) und (6-3) dargestellt (SORAVIA & ORTH 2000).

$$SS_{Reg} = \sum_{i=1}^{n_r} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6-2)$$

$$SS_{Res} = \sum_{i=1}^{n_r} (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6-3)$$

Die durch  $SS_{Res}$  repräsentierte Restvariabilität resultiert wiederum aus den Einzelvarianzen  $SS_{p.e.}$  und  $SS_{LoF}$ . Liegen Mehrfachbeobachtungen mit identischer Parametrisierung vor, kann der reine Fehler (engl. *pure error*) ermittelt werden (WEMBER 2005). Der reine Fehler beschreibt den durch Messfehler verursachten Anteil der Varianz  $SS_{p.e.}$  und ist in Gl. (6-4) mathematisch formuliert. Die Variable  $r$  beschreibt die Anzahl an wiederholt durchgeführten Versuchen und  $r_j$  den jeweiligen Wiederholversuch (GUNDLACH 2004).

$$SS_{p.e.} = \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^{r_j} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (6-4)$$

Der Anteil  $SS_{LoF}$  beschreibt die Quadratsummen aller nicht erfassten systematischen Abweichungen. Im Rahmen des LoF-Tests wird die Varianz, verursacht durch den reinen Fehler, mit der Varianz des LoF-Anteils unter gleichzeitiger Betrachtung der Freiheitsgrade verglichen. Überschreitet der Quotient einen kritischen Wert, gilt der Mangel an Anpassung als signifikant.

Der LoF-Test für das hier entwickelte Prognosemodell erfolgt durch das eingesetzte Softwaretool und wird im Rahmen der Modell-ANOVA (ANalysis Of VAriance)-Tabelle ausgegeben. Abbildung 81 zeigt die berechneten Daten für das Modell des Stützpunkts  $F_{max}$ .

7:6	<sup>1</sup> Source	<sup>2</sup> df	<sup>3</sup> Sum of Squares	<sup>4</sup> Mean Square	<sup>5</sup> F-Value	<sup>6</sup> Significance
1	Total	423	466,4207	●	●	●
2	Regression	72	446,8487	6,2062	111,30	0,0000
3	Linear	17	88,6608	5,2153	93,53	0,0000
4	Non-linear	55	44,3396	0,8062	14,46	0,0000
5	Residual	351	19,5720	0,0558	●	●
6	Lack of Fit	139	18,3578	0,1321	23,06	0,0000
7	Pure Error	212	1,2141	0,0057	●	●

Abbildung 81: Screenshot der Modell-ANOVA-Tabelle für das Modell  $F_{max}$

## 6.4 Diskussion der Validierungsergebnisse

---

Die Berechnung des Signifikanzwerts aus der Spalte *Significance* erfolgt über statistische Tests. Mit der ermittelten Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,00 % wird dem Modell  $\hat{y}_{F_{max}}$  ein signifikanter Anpassungsfehler (LoF) nachgewiesen (vgl. Abbildung 81: Zeile 6, Spalte 6). Alle Modelle der weiteren Stützpunkte weisen ein identisches Ergebnis auf.

## 6.4 Diskussion der Validierungsergebnisse

Auf Basis der Validierungsergebnisse ist eine Analyse der Ursachen der signifikanten Modellschwäche erforderlich. Allgemein tritt der Effekt eines LoF auf, wenn der zugrunde gelegte Modellansatz nicht in der Lage ist, die realen Zusammenhänge ausreichend zu beschreiben, oder Einflussfaktoren auf das System Einfluss nehmen, die bei der Modellbildung nicht berücksichtigt wurden (WEMBER 2005).

### 6.4.1 Transienz des Verschleißverhaltens

Die Ursache einer signifikanten Modellschwäche (LoF) liegt in der Regel in der fehlenden Berücksichtigung eines oder mehrerer einflussreicher Faktoren. Relevante Faktoren, die nicht im Modell berücksichtigt werden, verursachen einen Effekt, der keinem Bestandteil der Modellgleichung zugeordnet werden kann. Das heißt, der Anteil der Varianz ( $SS_{LoF}$ ), der nicht durch das Modell erklärt werden kann, nimmt zu.

Im Rahmen des hier betrachteten Systems wurden mit 15 Faktoren alle zum Zeitpunkt der Versuchsplanerstellung bekannten und verifizierten Einflüsse berücksichtigt. Nicht in das Modell einfließende Faktoren (z.B. Umgebungstemperatur) wurden über den Zeitraum der Versuche auf einem konstanten Level gehalten und überwacht. Die Verfahren zum Auftrag von Fügehilfsmittel, zur Montage des O-Rings und zur Einstellung der Axial-/Winkelabweichung wurden standardisiert und für alle Versuche identisch ausgeführt. Über alle Versuche hinweg wurde das Fügehilfsmittel aus einer Charge eingesetzt. Die Einstellung der Prozessfaktoren und Abweichungen beim Fügehilfsmittel können daher als Varianzquelle ausgeschlossen werden. Um ungewollte Einflüsse beim Einsatz der angefertigten Wellen und Bohrungen zu minimieren, wurde jedes Bauteil entsprechend den Anforderungen vermessen und kontrolliert.



Dies lässt auf zusätzliche während des Fügevorgangs auftretende oder auch durch den Fügevorgang bedingte Effekte schließen. Zur Detektion der Varianzquelle sind daher auffällige Vorkommnisse während des Fügevorgangs zu untersuchen. Dabei wird ersichtlich, dass bei 94 O-Ringen der 424 durchgeführten Einzelversuche Verschleißerscheinungen der Stufe 1 bis 5 aufgetreten sind (vgl. Tabelle 2). Das häufigste Verschleißbild zeigt sich bei 89 Versuchen mit einem leichten bis starken Abrieb und Partikelbildung (Beschädigungsstufe 1 und 2) am Elastomerkörper. Fünf O-Ringe wurden auf den Stufen 3 bis 5 beschädigt.

### **Zusammenhang zwischen Fügekraft und Beschädigungsart**

Die Problematik von Verschleißprozessen bei Elastomeren liegt in der Komplexität der verursachenden Vorgänge, die bis heute noch nicht hinreichend verstanden werden (POPOV 2010). Schon in frühen Forschungsarbeiten konnte das Phänomen beobachtet werden, dass unter identischen Versuchsbedingungen unterschiedliche Verschleißraten zu beobachten sind. BOONSTRA & DANNENBERG (1956) führen diese Beobachtungen auf eine enorme Anzahl an möglichen Einflüssen zurück, unter denen Verschleiß bei gummiartigen Materialien auftreten kann. Nach BRISCOE & SINHA (2002) stellt das Verschleißverhalten von Polymeren vor allem unter dem Einsatz von Schmiermitteln eine besonders komplexe Situation dar, die durch bestehende theoretische Modelle nicht beschrieben werden kann.

Entsprechend den in einschlägiger Fachliteratur publizierten Erkenntnissen lässt sich auch im Rahmen der hier untersuchten Experimente kein klarer Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Fügekraft und Beschädigungsgrad herstellen. Abbildung 82 zeigt die Verteilung der maximal aufgewendeten Fügekraft je Beschädigungsstufe. Eine leicht steigende Tendenz der Fügekraft mit zunehmendem Beschädigungsgrad ist ersichtlich. Dennoch zeigen die Versuche ohne Verschleißerscheinungen ähnliche Kraftwerte wie die Mehrzahl der Versuche mit Beschädigungsstufen 1 und 2. Auch die nur zweifach auftretende Beschädigungsstufe 3 (leichte Abscherung) weist eine geringere Maximalkraft auf als eine große Anzahl an Versuchen ohne Beschädigung. Ein konkreter Zusammenhang zwischen maximaler Fügekraft und Beschädigungsgrad kann daher nicht hergestellt werden, da offensichtlich weitere Faktoren zur Beschädigungseinleitung beitragen.

## 6.4 Diskussion der Validierungsergebnisse

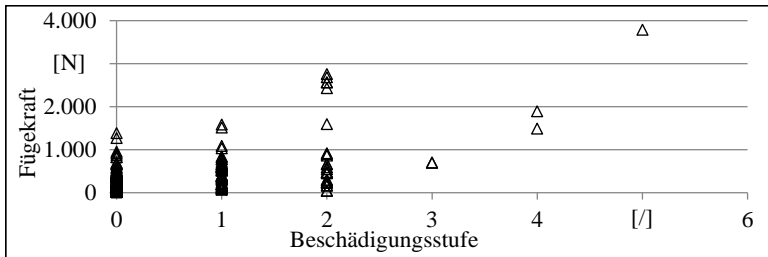


Abbildung 82: Darstellung der Beschädigungsstufen in Abhängigkeit von der maximalen Fügekraft

Nach UETZ & WIEDEMAYER (1985) werden die Verschleißmechanismen von der Rauheit des Gegenstoffs und dem Elastizitätsmodul des Polymers sowie vom molekularen Aufbau der Kontaktpartner bestimmt. Mit sinkendem Elastizitätsmodul steigt der Verschleiß durch Rissbildung und -ausbreitung. Ebenfalls abhängig von der Elastizität des Elastomers ist die Ausbildung von Abrasionsmustern, die u.a. von der Polarität und damit von den Wechselwirkungen mit dem Gegenstoff geprägt werden. Weiterhin können Abhängigkeiten von Füll- und Verstärkungsstoffen entsprechend der Compoundierung des Elastomers sowie von Zwischenstoffen nachgewiesen werden (UETZ & WIEDEMAYER 1985).

Zur Realisierung der hohen Varianz an eingesetzten O-Ringen ist eine Vielzahl unterschiedlicher Chargen herzustellen. Dies erfordert eine individuelle Compoundierung der Elastomere. Folglich können geringfügige Unterschiede im Herstellungsprozess zu einer Divergenz von oberflächlich identischen Materialparametern (z.B. Polarität, Reißdehnung) führen. Im Rahmen der Regressionsanalyse führt dies zu einer Zunahme des Betrags der unerklärten Varianz  $SS_{LoF}$ .

Die lose Partikelbildung der häufig beobachteten Beschädigungsstufen 1 und 2 deutet auf abrasiven Verschleiß hin. Nach DEBLER (2005) entspricht Abrasion dem typischen Verschleißbild bei einem harten und einem weicheren Kontaktpartner. Rauheitserhebungen des härteren Materials dringen in den Gegenkörper ein und lösen dort durch mikroskopische Zerspanungs-, Furchungs-, Pflüge- und Brechvorgänge Partikel ab (DEBLER 2005). Vor allem Elastomerdichtungen sind anfällig für diese Art des Verschleißes, verursacht durch Gleitvorgänge auf rauen Oberflächen (MOFIDI & PRAKASH 2011). Dies wird durch die erzielten Versuchsergebnisse bestätigt. Von 94 dokumentierten Beschädigungen traten bei 59 Versuchen Beschädigungen auf, bei denen der Faktor Oberflächengüte auf die schlechteste Stufe ( $R_z = 1,25 \mu\text{m}$ ) gesetzt wurde.

Der durch die Verschleißmechanismen auftretende Effekt auf die Fügekraft wird durch das bestehende Regressionspolynom nicht beschrieben. Dieser nicht beschriebene Effekt kann sich ebenfalls negativ auf den Betrag von  $SS_{LoF}$  auswirken und trägt damit zur Signifikanz des LoF-Tests bei. Um ein grundsätzliches Verständnis für die Beschädigungsvorgänge an O-Ringen während der Montage zu erlangen, ist zunächst eine Ursachenanalyse durchzuführen.

### Ursachen für Beschädigungseinleitung

Die Ursachen der beobachteten Beschädigungen können weitestgehend anhand der bekannten Verschleißmechanismen nachvollzogen werden. Das Zusammenspiel der Versuchsparameter und einer tatsächlich auftretenden Beschädigung bleibt dabei jedoch unbestimmt. Eine theoretisch erforderliche Zunahme der Fügekraft, zum Ausgleich der durch Abrasion dissipierten Energie, kann nicht eindeutig nachgewiesen und entsprechend im Regressionsmodell berücksichtigt werden. Auch eine Verschleißvorhersage v.a. unter Einsatz von Schmierstoffen ist aktuell mit theoretischen Modellen nicht in ausreichender Präzision durchführbar (BRISCOE & SINHA 2002). Diese Problematik zeigt sich z.B. in Abbildung 83. Dargestellt sind die Fügekraftverläufe eines Versuchs mit identischer Parametrisierung. Zu erwarten wäre hier ein identischer Fügekraftverlauf bzw. ein identisches Verschleißbild. Ein O-Ring weist jedoch eine deutlich erhöhte Fügekraft und eine höhere Beschädigungsstufe auf. Das Verschleißbild ist von Abscherungen und Einrissen des O-Rings geprägt. Beim ersten Versuchsdurchgang konnten ausschließlich Partikelbildung und Abrieb detektiert werden. Das Ergebnis dieses Versuchs zeigt, dass weitere bisher nicht bekannte Faktoren zu einer Beschädigungseinleitung am O-Ring führen können.

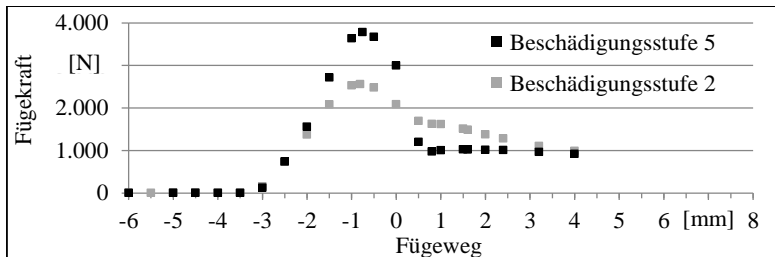


Abbildung 83: Auswirkung der Beschädigungsart auf den Fügekraftverlauf

Die nachfolgende Dokumentation des Beschädigungsvorgangs eines O-Rings zeigt zudem, wie variabel der Einfluss einer Beschädigungsart auf den Verlauf

## 6.4 Diskussion der Validierungsergebnisse

der Fügekurve sein kann. Um die Vorgänge während der Fügeoperation besser nachvollziehen zu können, wurde ein Bohrungsteil aus Acrylglas gefertigt. Der Versuch wurde dreimal unter identischen Versuchsbedingungen und Prozessparametern durchgeführt. Dabei wurde für jede Versuchsdurchführung ein neuer O-Ring eingesetzt und das Bohrungsteil vor jeder Durchführung intensiv gereinigt. Ungewollte Einflüsse durch Abrieb auf beiden Kontaktflächen, Vorschädigung des Elastomers etc. können so vermieden werden.

Die erste Durchführung des Versuchs verursachte größere Abscherungen am O-Ring (Beschädigungsstufe 5). Beim zweiten Versuch konnte keine Beschädigung und kein Abrieb festgestellt werden. Bei der dritten und letzten Durchführung des Versuchs wies der O-Ring erneut kleinere Abscherungen auf (Beschädigungsstufe 4). Abbildung 84 zeigt die Fügekraftverläufe der Einzelversuche. Die Verläufe variieren stark nach Beschädigungsart. Die Messwerte von Versuch 2 zeigen einen normalen Verlauf ohne Auftreten von Beschädigungen. Versuch 1 weist eine stark überhöhte maximale Fügekraft auf. Die Position der maximalen Fügekraft ist dabei stark verschoben. Versuch 3 zeigt ein ähnliches Kraftniveau wie Versuch 2. Jedoch ist ein zweites, ebenfalls verschobenes Kraftmaximum zu erkennen.

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wird deutlich, wie transient der Kraftverlauf bei identischer Parametrierung des Fügevorgangs sein kann. Dieses Phänomen spiegelt sich in der hohen unerklärten Varianz des Prognosemodells wider.

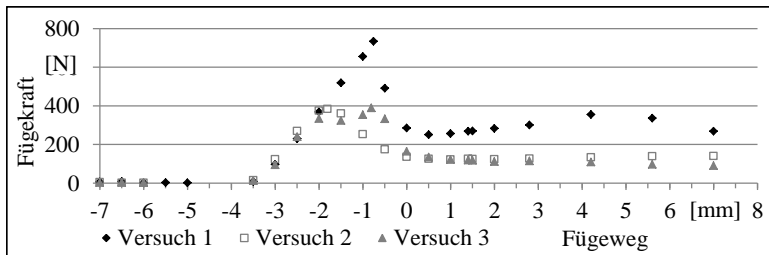


Abbildung 84: Versuchsergebnis bei identischer Parametrierung unter Einsatz einer Bohrungskomponente aus Acrylglas

Ähnliche stochastische Effekte sind bei näherer Betrachtung des Beschädigungsvorgangs einzelner O-Ringe detektierbar. Die Einführfase der Bohrung verursacht eine Deformation des O-Rings. Hat das Elastomer nicht ausreichend Zeit,

entlang der Fase in die neue, aufgezwungene Position zu fließen, wird der O-Ring an dieser Stelle abgeschnoren. Der Beschädigungsvorgang ist in Abbildung 85 als Bilderserie dargestellt. An drei Positionen des Bildausschnitts (weiße Umrandung) ist eine unförmige Deformation des O-Rings zu erkennen. An der Position 1 und 3 verursachen die durch Deformation induzierten Spannungen eine deutliche Beschädigung des O-Rings. An Position 2 fließt der O-Ring in die ursprüngliche Lage zurück. Die Ursachen, die aufgrund der Deformation an Position 1 und 3 zu einer Beschädigung führen und an Position 2 nicht, können hier nicht bestimmt werden und sind in weiterführenden Arbeiten zu ermitteln.

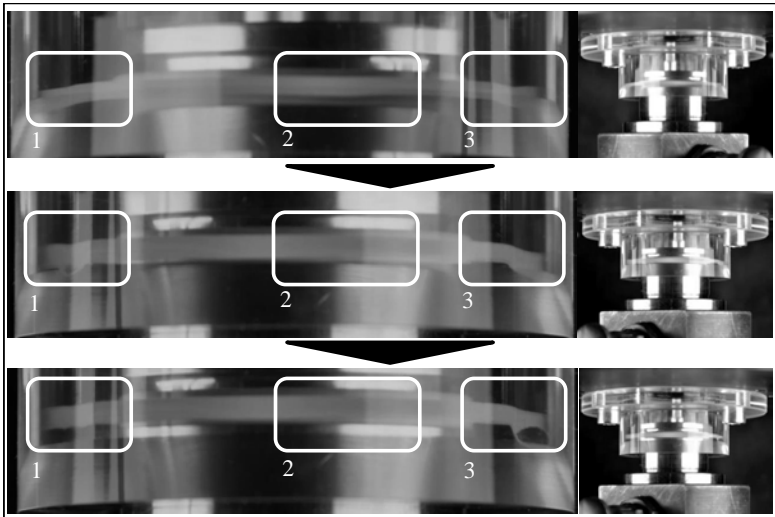


Abbildung 85: *Bilderfolge der Deformation und Beschädigung eines O-Rings an der Einführfase*

### 6.4.2 Modellansatz

Bei der Erstellung des Versuchsplans wurde aufgrund physikalischer Vorüberlegungen und Vorversuchen ein Modell zweiter Ordnung zugrunde gelegt (vgl. Kapitel 5.4.2). Am Beispiel der Fügegeschwindigkeit wurde ein polynomischer Verlauf der Fügekraft in Abhängigkeit der Fügegeschwindigkeit nachgewiesen (vergleiche hierzu REINHART & SIEBEN 2013). Hierfür wurde unter Variation der Fügegeschwindigkeit an zwei Messpunkten MP1 und MP2 (in Phase 1 und 2) die Fügekraft erfasst. Die durch REINHART & SIEBEN (2013) ermittelten Verlaufs-

## 6.4 Diskussion der Validierungsergebnisse

kurven aus Abbildung 86 lassen den Rückschluss auf ein Polynom zweiten Grads zu. Der gewählte Modellansatz ist in der Lage, die vorausgesetzten einfachen physikalischen Zusammenhänge ausreichend genau zu beschreiben. Die auftretenden Beschädigungsmechanismen führen jedoch zu einer Abschwächung der Adäquatheit im betrachteten Versuchsraum.

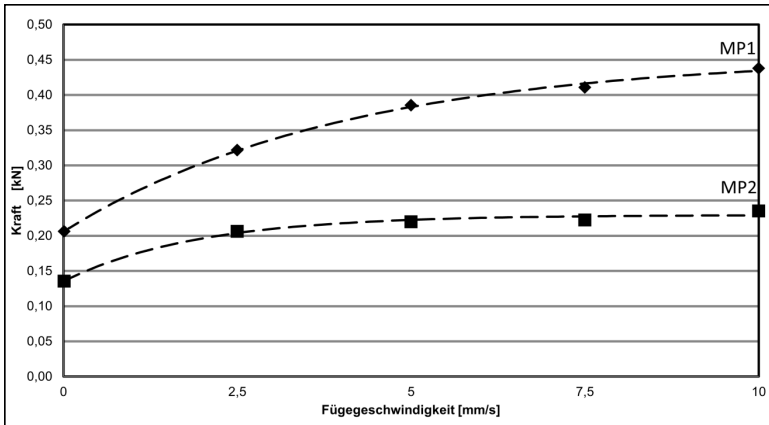


Abbildung 86: Polynomische Verlaufskurven der Fügekraft in Abhängigkeit von der Fügeschwindigkeit (REINHART & SIEBEN 2013)

Der Versuchsraum wurde bewusst weit gewählt, um eine breiten Einsatz des Prognosemodells zu ermöglichen. Daraus ergibt sich die Gefahr, dass innerhalb des Versuchsraums Effekte auftreten, die nicht durch ein Polynom zweiten Grads beschrieben werden können. Die beobachteten Verschleißprozesse von Elastomeren stellen hier v.a. eine besondere Herausforderung dar. Ein exponentieller Modellansatz kann deren komplexe Auswirkungen auf den Kraftverlauf vermutlich nicht hinreichend genau beschreiben.

Die Problematik eines unzureichenden Modellansatzes ist in Abbildung 87 dargestellt. Der unzulässig vereinfachte Verlauf der Zielgröße verursacht im Bereich der Faktorstufe -1 bis 0 eine zu niedrige und im Bereich der Faktorstufe 0 bis 1 ein zu hohe Prognose der Zielgröße. Die Differenzen zwischen tatsächlichem Wert und Modellschätzer sind grau hinterlegt. An den durchgeführten Versuchspunkten weist die Modellschätzung aufgrund der Anpassung des Regressionspolynoms durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten auf.

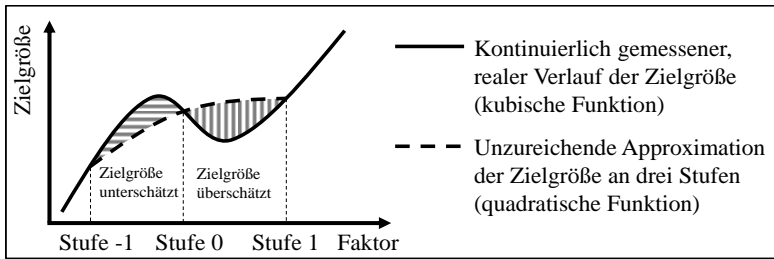


Abbildung 87: Fehlerhafte Annahme des Modellansatzes bei großem Versuchsraum und weiten Faktorstufen

Neben dem Ansatz der Polynommodelle zeigt sich auch Handlungsbedarf bei der Anordnung der Einzelmodelle an den jeweiligen Stützpunkten zueinander. Durch die modellspezifischen Prognoseungenauigkeiten nimmt der Verlauf der Gesamtkurve einen unstetigen Verlauf an. Da keine mathematische oder geometrische Kopplung zwischen den Einzelmodellen existiert, können die Prognosewerte konsekutiver Stützpunkte, abhängig von der erzielten Modellgenauigkeit, abwechselnd zu- und abnehmen. Dies ist v.a. bei den Validierungsergebnissen in Abbildung 78 ersichtlich.

### 6.4.3 Einschränkung der Modellfunktion

Die Ergebnisse aus der Validierungsphase bedingen eine Neubewertung der Einsatzfähigkeit der Prognosemodelle für den geplanten Einsatzzweck. Die Anwendung zur Ermittlung des Soll-Zustands einer Kraftverlaufskurve entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4 erfordert eine Reduzierung der unerklärten Varianz der Modellschätzer. Dies ist ohne weiterführende Untersuchungen jedoch nicht möglich. Die Prognosemodelle können dennoch für unterschiedlichste Einsatzzwecke herangezogen werden, bei denen keine entsprechend hohe Genauigkeit der Modellschätzungen erforderlich ist. Diese Anwendungsgebiete werden nachfolgend herausgestellt.

Die in Abbildung 81 dargestellte ANOVA-Tabelle zeigt neben einem signifikanten LoF-Test auch weitere wichtige Ergebnisse. Das Regressionsmodell (Zeile *Regression*) inkl. aller linearer (Zeile *Linear*) und quadratischer Terme (Zeile *Non-linear*) sind ebenfalls hoch signifikant. Daraus folgt, dass keine unbedeutenden Terme im Modell aufgenommen wurden. Alle Modellkomponenten haben eine Auswirkung auf die Zielgröße. Die hohe Signifikanz der Einzelmodelle und

## **6.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

---

der berücksichtigten Modellkomponenten spiegeln sich im prognostizierten Verlauf der Fügekraft wider. Die Modelldaten zeigen eine Annäherung an den wahren Verlauf der Messdaten. Die vom Modell beschriebenen Effekte und Wechselwirkungen entsprechen den aus physikalischen Gesetzen theoretisch hergeleiteten Erwartungen (vgl. Kapitel 5.6.2). Den Faktorkombinationen entsprechend folgt einer Zunahme bzw. einer Abnahme des Mittelwerts der Messgrößen auch eine Zu- bzw. Abnahme des Modellschätzers. Eine qualitative Abschätzung der Entwicklung der Fügekraft bei Variation der Faktoreinstellungen kann so durchgeführt werden.

## **6.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Validierungsversuche weisen darauf hin, dass durch diverse Verschleißmechanismen noch nicht ausreichend bekannte Phänomene während des Fügeprozesses Einfluss auf den Verlauf der Fügekraft nehmen. Um anhand des Prognosemodells neben qualitativen auch quantitative Aussagen treffen zu können, werden nachfolgend Optimierungsmaßnahmen erläutert, die zu einer höheren Präzision der Prognose führen können.

Der weit aufgespannte Versuchsraum weist ein hohes Potenzial an Beschädigungsmöglichkeiten für die eingesetzten O-Ringe auf. Beschädigungen werden durch bestimmte Parametereinstellungen begünstigt (z.B. geringe Oberflächengüte). Die Verschleißmechanismen der Elastomerdichtringe führen zu einem transienten Systemverhalten, das durch einfache mathematische Modelle kaum oder gar nicht beschrieben werden kann.

Um instationäre Effekte während des Fügevorgangs auszuschließen, ist eine Reduzierung des Versuchsraums zielführend. Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit sind die Parameterkonstellationen so zu wählen, dass Beschädigungen weitestgehend ausgeschlossen werden können. Eine anwendungsspezifische Auswahl der Faktoren kann deren Anzahl deutlich reduzieren. Die Oberflächengüte der Reibpartner oder der Fasenwinkel der Einführfase können so z.B. auf einem idealen Niveau fixiert werden.

Der hier eingesetzte Modellansatz zweiten Grads konnte das transient auftretende Verschleißverhalten nicht ausreichend beschreiben. Eine deutliche Reduzierung der im Versuchsplan zu betrachtenden Faktoren würde den Einsatz eines Modellansatzes höherer Ordnung ermöglichen. Durch die Zugrundelegung eines Polynoms dritten Grads können deutlich komplexere Effekte modelliert werden



(vgl. Abbildung 87). Eine Berücksichtigung von geringfügigen Verschleißvorgängen ist so möglicherweise realisierbar. Eine deutliche Reduzierung des Faktorraums und die Einführung weiterer Stufen, bei Beibehaltung des Modellansatzes zweiten Grads, könnten ebenfalls zu deutlichen Optimierungen führen. Eine Minimierung des ursprünglich geplanten weiten Anwendungsbereichs des Prognosemodells ist jedoch die Folge.

Ein weiterer Ansatz zur Prognose des Fügekraftverlaufs ist die Modellierung geometrischer Merkmale der Verlaufskurve unter Anwendung der hier eingesetzten Methoden. Dieses Vorgehen hat v.a. den Vorteil, dass Inhomogenität aufgrund eines fehlenden mathematischen Kontexts benachbarter Stützpunkte keinen Einfluss mehr auf die Prognosequalität des Gesamtverlaufs hat.

# 7 Zielgrößenoptimierung durch Modellanwendung

## 7.1 Allgemeines

Aufgrund eines stetig wachsenden Kosten- und Zeitdrucks (verkürzte Anlaufphasen, Reduzierung der Durchlaufzeiten etc.) in der Produktion ist es von besonderem Interesse, Produktionsprozesse zu optimieren und Fehlerursachen zu minimieren. Ziel dabei ist die Untersuchung des Systemverhaltens in Abhängigkeit mehrerer Variablen. Die statistische Versuchsplanung ist hierfür sehr gut geeignet, da mit den erstellten Prognosemodellen bereits Beschreibungsfunktionen für die relevanten und zu optimierenden Zielgrößen vorliegen (SIEBERTZ ET AL. 2010).

Die Fügekraft stellt eine unmittelbare Messgröße für das auf den O-Ring wirkende Beanspruchungskollektiv dar (vgl. Kapitel 3.5 und 4.3). Mit steigender Beanspruchung des O-Rings nimmt auch die Fügekraft zu. Aufgrund des geringen Elastizitätsmoduls des Elastomerrings bedingt eine Zunahme der Fügekraft eine erhöhte Beschädigungsgefahr. Zur Reduzierung einer möglichen Beschädigungswahrscheinlichkeit sind Parametereinstellungen zu suchen, die eine Reduzierung der maximalen Fügekraft ( $F_{max}$ ) zur Folge haben. Die Ermittlung der optimalen Parameterkonstellation erfolgt auf Basis der erstellten Regressionsmodelle.

Zuvor wurde bereits gezeigt, dass die entwickelten Modelle für qualitative Aussagen herangezogen werden können. Dies ermöglicht Anwendungsbereiche im Produktentwicklungsprozess bis hin zur Prozessoptimierung in der Montage. Eine montagegerechte Produktgestaltung setzt die Erfüllung spezifischer Erfordernisse hinsichtlich der Handhabung und des Fügens von Bauteilen zu Baugruppen und Produkten voraus (LOTTER 2005). Für den Konstrukteur bietet die Anwendung des Prognosemodells nach Erfüllung aller technischen Voraussetzungen, wie Dichtheit, Lebensdauer etc., die Möglichkeit, die Konstruktion einer Kolbendichtung auf ein minimales Montagerisiko durch eine Reduzierung der erforderlichen Fügekraft zu optimieren. Analog kann der Fertigungsplaner auf Basis der ihm vorliegenden Konstruktionsdaten einen optimalen Einstellbereich für die relevanten Prozessgrößen finden. Das Vorgehen wird nachfolgend anhand eines Beispiels vorgestellt und die erzielten Ergebnisse der Optimierung werden diskutiert.

## 7.2 Berechnungsbeispiel einer Zielgrößenoptimierung

Bei der Konstruktion einer Baugruppe steht die Erfüllung der technischen Funktion im Vordergrund. Eine Kolbendichtung ist demnach so zu konstruieren, dass eine räumliche Trennung zweier fluidführender Räume unter Betriebsdruck sichergestellt ist. Hierfür sind einige Konstruktionsparameter entscheidend, die im Rahmen der Suche nach idealen Faktoreinstellungen zur Optimierung der Zielgröße nicht variiert werden können. Die Verpressung, die Geometrie, das Material sowie die Härte des O-Rings werden entsprechend aus den Konstruktionsvorgaben übernommen. Um eine lokale Überbeanspruchung des O-Rings zu vermeiden und einen weitestgehend gleichmäßigen Fügevorgang zu erreichen, werden sowohl eine Axial- als auch eine Winkelabweichung ausgeschlossen. Die Stufen aller weiteren Faktoren sind variabel. Die Daten des Referenzbauteils (Saugstutzen) sowie die vorgenommenen Einstellungen für die Zielgrößenoptimierung sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Anhand von zehn Wiederholversuchen konnte für das Referenzbauteil ein Mittelwert der maximalen Fügekraft von  $\bar{y}_{F_{max}} = 244,7 \text{ N}$  ermittelt werden.

Tabelle 6: Übersicht der Faktorstufen des Referenzbauteils und zu berücksichtigender Faktoren der Zielgrößenoptimierung

Konstruktion	Benennung im Versuchsplan	Faktorstufen Referenzbauteil	Einstellungen für Optimierung	Einheit
Verpressung	K-C	23,3	23,3	[%]
Fasenwinkel	K- $\alpha$	20,0	variabel	[°]
Fasenrundung	K-R	2,5	variabel	[mm]
Oberfläche	K-Ra	0,3	variabel	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>O-Ring</b>				
Innendurchmesser	O-d1	26,0	26,0	[mm]
Schnurdurchmesser	O-d2	2,5	2,5	[mm]
Material	O-M	FKM	FKM	[-]
Beschichtung	O-B	keine	variabel	[-]
Härte	O-H	70	70	[Shore A]
<b>Prozess</b>				
Fügeschwindigkeit	P-v	5,0	variabel	[mm/s]
Positionsabweichung	P-p	0,0	0,0	[mm]
Winkelabweichung	P-w	0,0	0,0	[°]
Fügeweg	P-x	6,8	6,8	[mm]
<b>Fügehilfsmittel</b>				
Viskosität	F-v	180	variabel	[mm <sup>2</sup> /s]
Auftragsort	F-A	Bohrung	variabel	[-]

Das Ergebnis der Optimierung ist in Tabelle 7 dargestellt. Auf Basis der fixierten Parameter und der ermittelten optimalen Einstellung der variablen Faktoren kann die Zielgröße  $F_{max}$  auf 51,48 N (Konfidenzgrenzen: 42,38 N; 62,53 N) reduziert

## 7.2 Berechnungsbeispiel einer Zielgrößenoptimierung

werden. Gegenüber der gemittelten gemessenen maximalen Fügekraft  $\bar{y}_{F_{max}} = 244,7 \text{ N}$  entspricht dies unter Berücksichtigung des *Lack-of-Fit* einer Reduzierung um ca. 78 %. Die kalkulierten Faktoreinstellungen können anhand der Ergebnisse aus Kapitel 5.6.2 plausibilisiert werden.

Tabelle 7: Zusammenfassung des Optimierungsergebnisses

1 Variable	2 Optimal	3 Minimum	4 Initial	5 Maximum	6 Type
Fügeschwindigkeit	1	1	1	10	•
Axialabweichung	0	0	0	0	•
Winkelabweichung	0	0	0	0	•
Fügeweg	6,8	6,8	6,8	6,8	•
Fügemittelviskosität	4000	62	4000	4000	•
Fügemittelauftrag	ORing	•	•	•	•
O-Ring DM	26	26	26	26	•
Schnurstärke	2,5	2,5	2,5	2,5	•
Härte	70	70	70	70	•
Material	FKM	•	•	•	•
Beschichtung	Silikon	•	•	•	•
Verpressung	23,3	23,3	23,3	23,3	•
Fasenwinkel	15	15	15	25	•
Fasenrundung	1	1	1	3	•
Rauheit Ra	0,3	0,3	0,3	3,2	•
Fmax	51,479503	•	•	•	Minimize

In Abbildung 88 sind die Optimierungsergebnisse in einem *Responses-vs.-Predictors-Graph* (Zielgröße über Faktoren) visualisiert. Im Vergleich zur Effektanalyse, die anhand eines *Adjusted-Response-Graph* durchgeführt wurde, ist hier zu beachten, dass die gegenseitigen Wechselwirkungen der Faktoren in das Ergebnis und die Darstellungen mit einfließen. Der Effekt einzelner Faktoren kann so deutlich von denen des *Adjusted-Response-Graph* abweichen. Die optimalen Faktorstufen für den berechneten Fall sind jeweils durch eine vertikal gestrichelte Linie markiert. Von den drei Verläufen je Graph stellt die mittlere den prognostizierten Wert dar. Die jeweiligen Prognosewerte werden durch obere und untere Konfidenzintervalle eingehüllt (obere und untere Linien).

Entsprechend des Optimierungsergebnisses führt ein geringer Fasenwinkel zu einer reduzierten Fügekraft. Dieses Ergebnis korrespondiert mit der Effektanalyse aus Kapitel 5.6.2. Dementgegen verursacht eine Fasenrundung mit geringem Radius (unter Einbezug der Wechselwirkungen) einen minimalen Beitrag zur Fügekraft. Ein prädominanter Einfluss kann durch die Oberflächengüte beobachtet werden. Entsprechend den bekannten contribuierenden Reibungskomponenten führt eine scheinbar glatte Oberfläche zu stark reduzierten Hystereseverlusten und damit zu einer minimierten Fügekraft. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 5.6.2 zeigt sich für die hier betrachtete Faktorkombination ein Vorteil durch den Einsatz einer Silikonbeschichtung. In Relation zu den übrigen Be-

schichtungsvarianten und v.a. zu einem unbeschichteten O-Ring führt Silikon zu einer erheblichen Reduzierung der erforderlichen Fügekraft.

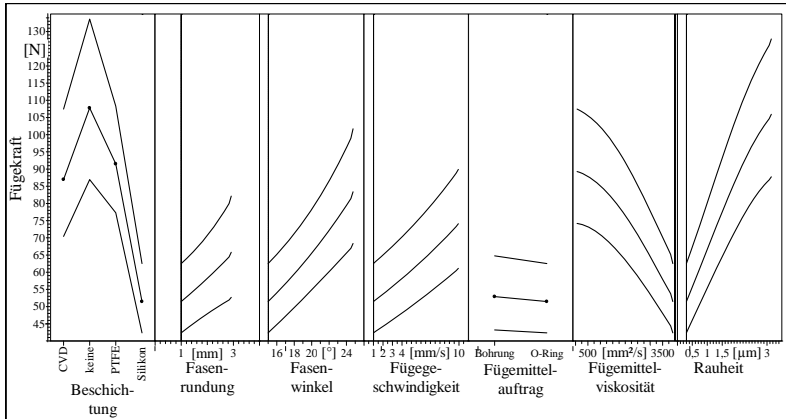


Abbildung 88: Ergebnis der Zielgrößenoptimierung (Response-vs.-Predictors Graph)

Eine ähnlich deutliche Auswirkung ist bei dem Faktor Fügegeschwindigkeit ersichtlich. Hier entspricht das Ergebnis dem zu erwartenden Resultat der Effektanalyse. Bei geringen Fügegeschwindigkeiten bilden sich nur geringfügige Reibungseffekte aus und führen so zu einer reduzierten Fügekraft. Bei dem Auftragsort des Fügemitteleviskosität führen die Wechselwirkungen erneut zu einem Wechsel der Effektrichtung. Der O-Ring ist hier der Bohrung als Benetzungsort vorzuziehen. Mit der ermittelten Viskosität von 4.000 mm<sup>2</sup>/s entspricht das Optimierungsergebnis wieder dem erwarteten Zielwert.

Basierend auf der reziproken Beeinflussung der Faktoren ist eine Berechnung der Faktoreinstellungen für jede erforderliche Faktorenkombination erforderlich. Jede Faktorenkombination weist ein individuelles Optimum auf. Anhand der hier entwickelten Regressionsgleichungen ist der Anwender befähigt, den optimalen Betriebspunkt für beliebige Kombinationen innerhalb des Gültigkeitsbereichs der Modelle zu berechnen.

# 8 Schlussbetrachtung

## 8.1 Technische und wirtschaftliche Bewertung

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen, neben einem Erkenntnisgewinn zum reibungsinduzierten Fügekraftverlauf von Kolbendichtungen und der Erstellung eines Prognosemodells zur Prädiktion der erforderlichen Fügekraft, vor allem zur Erhöhung der Montagequalität und Reduzierung von Fehlerquellen in der industriellen Montage von Kolbendichtungen beitragen. Eine Realisierung der Optimierungseffekte durch den Einsatz des hier vorgestellten Prozessüberwachungskonzepts erfordert jedoch eine Umstellung der aktuellen Montagesituation fertiger Unternehmen. Nach aktuellem Stand der Technik wird der Montageprozess von Kolbendichtungen vorherrschend als manueller Fügevorgang ausgeführt. Um die Umsetzung eines Prozessüberwachungssystems zu ermöglichen, ist der Einsatz von automatisierten Manipulatoren zur Handhabung und zum Fügen von Kolbendichtungen erforderlich (vgl. Abbildung 89).

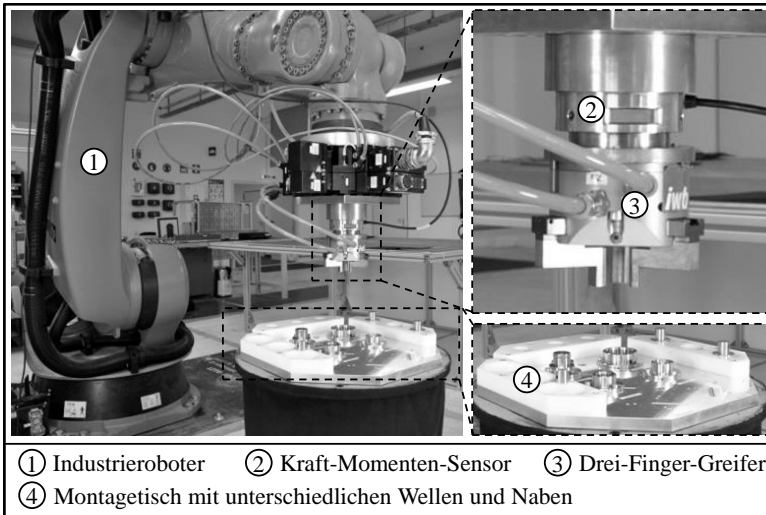


Abbildung 89: Prototypische Montagezelle zur Automatisierung der Kolbendichtungsmontage

Abbildung 89 zeigt eine prototypische Montagezelle, die die volle Funktionalität des Prozessüberwachungskonzepts als potenzielle Großserienlösung darstellt. Zur Realisierung der Montagezelle werden unter Einbezug von wirtschaftlichen und unternehmerischen Faktoren serielle Technologien eingesetzt. Als Manipulator und zur Aufbringung der erforderlichen Fügekraft wird ein sechsachsiger Industrieroboter (1) integriert. Auf dem Montagetisch (4) sind unterschiedliche Naben zur Erprobung fixiert. An der Zentralhand des Roboters ist ein pneumatisch angesteuerter Mehrfingergreifer (3) befestigt. Zwischen dem Greifer und der Zentralhand ist ein Kraft-Momenten-Sensor (KMS) (2) montiert. Der KMS misst die auftretenden Kräfte und Momente während des Montagevorgangs und kommuniziert parallel mit der Zentralsteuerung. Auf der Zentralsteuerung ist das Prognosemodell implementiert (vgl. Abbildung 90).

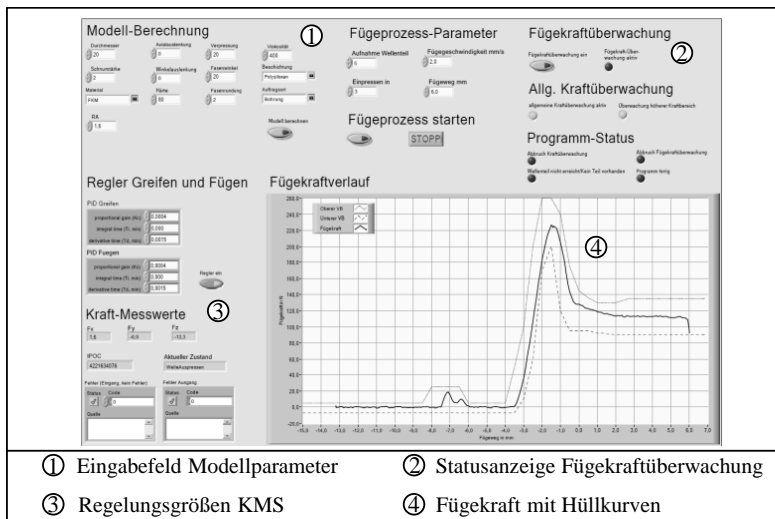


Abbildung 90: Interface der Zentralsteuerung

Die Prognose erfolgt anhand der durch den Anwender am Interface eingegebenen Parameter. Aufgrund der übersichtlichen mathematischen Form der Modelle (z.B. im Vergleich zu Finite-Elemente-Simulationen) ist ein einfacher Industrierechner bzw. „primitive Hardware“ (WEMBER 2005) zur Durchführung der Rechenoperationen ausreichend. Auf der Zentralsteuerung läuft ein permanenter Abgleich der gemessenen Fügekraft mit den prognostizierten Konfidenzintervallen. Wird eine der Konfidenzgrenzen über- oder unterschritten, wird die Füge-

## **8.1 Technische und wirtschaftliche Bewertung**

---

operation abgebrochen, eine Warnung ausgegeben und damit eine potenzielle Beschädigungsgefahr gemindert.

Der prototypische Aufbau der Montagezelle zeigt, wie durch eine intelligente Anordnung und den Einsatz serieller Montagemittel die volle Funktionalität einer Prozessüberwachung durch Einsatz eines Prognosemodells realisiert werden kann. Wirtschaftlich betrachtet, kann unter Aufwendung geringer Investitionen ein hoher Zuwachs an Montagequalität erzielt werden. Durch die Bündelung mehrerer Montageoperationen an der roboterbasierten Montagezelle können in der Großserienmontage zusätzliche Optimierungseffekte erzielt werden.

Eine singularär monetäre Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist bei Maßnahmen zur Erhöhung der Prozess- und damit der Produktqualität nicht immer zielführend. Auswirkungen mangelhafter Qualität sind sehr weitgreifend und finanzielle Effekte machen sich erst mit zeitlichem Versatz bemerkbar. Dies zeigt eine Studie der TARP (1986) (SCHMITT & PFEIFER 2010). Die Mehrzahl aller Kunden, die mit der Qualität eines Produktes unzufrieden sind, wird dieses fortan meiden. Weiterhin wird ein unzufriedener Kunde seinen Unmut über die mangelnde Qualität an bis zu 20 Personen in seinem Umkreis sowie durch soziale Netzwerke kommunizieren. Da zudem nur 4 % der betroffenen Kunden den Mangel an die Herstellerfirma rückmelden, ist der kurzfristige Einsatz von Gegenmaßnahmen meist nicht möglich.

Neben einem erheblichen Imageverlust entstehen sehr hohe Kosten, wenn ein Mangel erst nach Auslieferung des Produkts an den Kunden erkannt wird. Anhand der empirischen Zehnerregel kann gezeigt werden, dass die Kosten zur Fehlerbeseitigung mit fortschreitenden Phasen des Produktentstehungsprozesses jeweils um den Faktor zehn zunehmen (vgl. Abbildung 91). Wird ein Mangel noch während der Produktherstellung erkannt, können Folgekosten dementsprechend erheblich reduziert werden.



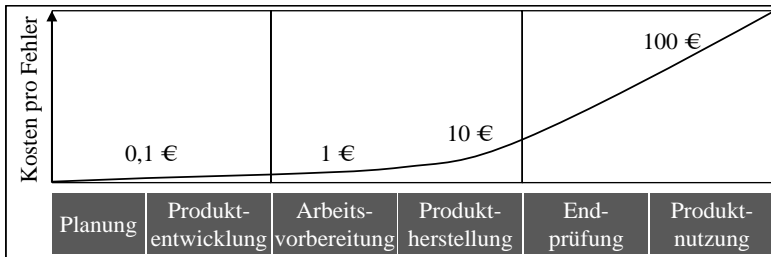


Abbildung 91: Empirische Zehnerregel in Anlehnung an  
SCHMITT & PFEIFER (2010)

„Bei der Montage von Dichtungen ist höchste Prozeßqualität und Überwachung des Montageprozesses gefragt. Mangelnde Montageprozeßqualität führt im schlechtesten Fall zu Produktausfällen und hohen Folgekosten“ (REINHART & MILBERG 1997). Mit dem Einsatz des hier entwickelten Prozessüberwachungssystems kann das Beschädigungsrisiko von O-Ring-Dichtungen in der Montage minimiert werden. Durch potenzielle Dichtungsausfälle verursachte direkte und indirekte Folgekosten können damit reduziert werden. Die erforderlichen Investitionen können durch den Einsatz von standardisierten Komponenten minimiert und durch die beschriebenen Vorteile plausibilisiert werden.

## 8.2 Zusammenfassung

Triebfeder der deutschen Industrie ist die Innovationskraft und das Qualitätsbewusstsein der hier ansässigen Unternehmen. Die Qualität deutscher Produkte ist vor allem auf die hohe Qualität der Herstellungsprozesse zurückzuführen. Neue Produkte, die unter Einsatz fortschrittlicher Technologie zur Marktreife gebracht werden, erfordern hochwertige und innovative Fertigungs- und Montageprozesse.

Getrieben durch die zunehmende weltweite Vernetzung, unter anderem durch neue Medien, können bereits geringste qualitative Defizite eines Produkts desaströse Auswirkungen auf das Image des Herstellers und damit auf dessen Unternehmenserfolg haben. Diesen Herausforderungen können sich v.a. deutsche Unternehmen, deren Produkte häufig im sogenannten Premiumsegment angesiedelt sind, nur durch langfristige Qualitätsoffensiven und die Einführung einer Null-Fehler-Strategie entgegenstellen. Dabei sind gerade Norm- und Kleinstteile zu beachten, die erst dann in den Fokus rücken, wenn deren Funktion versagt und dadurch hohe Folgekosten verursacht werden.

## 8.2 Zusammenfassung

---

O-Ringen als meist verbauter Dichtung kommt hier auch aufgrund der Vielzahl an Anwendungszwecken eine besondere Bedeutung zu. Während im Produktentstehungsprozess bereits bei der Konzept- und Konstruktionsphase von Kolbendichtungen durch unterschiedliche Methoden (z.B. Finite-Elemente-Simulationen etc.) versucht wird, die Lebensdauer von O-Ringen zu optimieren und die Konstruktion perfekt an den Anwendungszweck anzupassen, sind bisher kaum Anstrengungen unternommen worden, Fehlerursachen während des Montageprozesses zu identifizieren und Prozessoptimierungen umzusetzen. Es existieren daher kaum Erkenntnisse zu den während des Fügevorgangs einer Kolbendichtung auftretenden Interaktionen zwischen O-Ring-Dichtung und Nabe sowie den resultierenden Verschleißmechanismen. Mögliche montagebedingte Fehler können daher nicht frühzeitig detektiert werden. Eine Fehlererkennung in nachgelagerten Dichtprüfungen hat hohe Kosten durch einen erforderlichen Rückbau oder durch eine Deklaration der Komponenten als Ausschuss zur Folge. Aufgrund diffiziler Detektionsbedingungen von Dichtungsbeschädigungen, bedingt durch das viskoelastische Materialverhalten von Elastomeren, ist die Gefahr eines Funktionsausfalls nach Auslieferung des Produkts und der damit zusammenhängenden negativen Konsequenzen groß.

Um Risiken bei der Montage von Kolbendichtungen minimieren zu können, ist ein grundlegendes Verständnis für den Prozess und die beeinflussenden Faktoren erforderlich. Der Prozess muss verstanden und beherrschbar gemacht werden, um qualitätsbeeinflussende Faktoren zu optimieren und um Fehler zu detektieren, bevor sie entstehen. Gewonnene Erkenntnisse können dann zur weiterführenden Optimierung des Produkts und der eingesetzten Prozesse verwendet werden.

Darauf basierend entstand diese Arbeit mit dem übergeordneten Ziel, einen Beitrag zur Qualitätsoptimierung des Montageprozesses von Kolbendichtungen zu leisten. Hierfür wurden mehrere mathematisch unabhängige Prognosemodelle zur Vorhersage der Fügekraft von Kolbendichtungen entwickelt. Auf Basis der Prädiktion der Fügekraft wurde ein Überwachungskonzept zum iterativen Abgleich des Soll- und Ist-Zustands konzipiert mit dem Ziel, Fehlerquellen zu detektieren und Beschädigungsrisiken an der Dichtung zu minimieren. Parallel dazu kann unter Anwendung der Prognosemodelle eine montagegerechte Optimierung zukünftiger oder bestehender Konstruktionen und Prozesse durchgeführt werden.

Im ersten Teil der Arbeit erfolgte eine detaillierte Systemanalyse unter Betrachtung relevanter Komponenten und Prozessphasen. Die Fügekraft wurde dabei als

systembeschreibender Prozessfaktor identifiziert. Der charakteristische Verlauf der Fügekraft entlang des Montagewegs erlaubt Rückschlüsse auf das Systemverhalten und auf prädominante Einflussgrößen. Der idealtypische Verlauf wurde in konsekutive Phasen aufgeteilt. Phasenspezifisch konnten durch Adhäsions- und Hystereseverluste induzierte Reibungsanteile identifiziert werden.

Basierend auf den Erkenntnissen der Systemanalyse wurde ein Konzept zur Überwachung des Fügeprozesses während der Montage entwickelt. Die Fügekraft als charakteristische Prozessgröße für vorherrschende Einflüsse wurde dafür als Überwachungsgröße bestimmt. Ein quantitativer Abgleich der unter kontrollierten Bedingungen ermittelten Soll-Fügekraft mit der unter inkonsistenten Produktionsbedingungen vorherrschenden Ist-Fügekraft wird als Bewertungskriterium für das Beschädigungsrisiko des O-Rings herangezogen.

Die Ermittlung der Ist-Fügekraft ist durch eine einfache prozessintegrierte Messung möglich. Die Erlangung der Soll-Fügekraft unter kontrollierten Bedingungen erforderte ein methodisches Vorgehen. Unter Anwendung von Werkzeugen der statistischen Versuchsplanung wurden anhand einer System- sowie Fehlerbaumanalyse und Screening-Versuchen relevante Faktoren für den aufzustellenden Versuchsplan bestimmt. Mit dem Ziel einer weitläufigen Anwendbarkeit des Prozessüberwachungskonzepts wurden breite Faktorstufen gewählt. Auf Basis der Ergebnisse der durchgeführten Versuche konnte eine Regressionsanalyse durchgeführt werden. Anhand einer Effektanalyse wurden signifikante Faktoren identifiziert und deren Einfluss auf die Zielgröße quantifiziert.

Als Ergebnis der Regressionsanalyse stehen Prognosemodelle an multiplen Stützpunkten über den gesamten Fügekraftverlauf zur Verfügung. Anhand der entwickelten Polynome ist eine Berechnung beliebiger Faktorenkombinationen innerhalb des untersuchten Versuchsraums möglich.

Die für jede Prognose oder Simulation erforderliche Verifizierung und Validierung wurden im Anschluss an die Modellerstellung durchgeführt. Anhand der Verifizierung, die zum formalen Nachweis der Konsistenz der Modelle dient, konnte eine methodisch korrekte Vorgehensweise bei der Modellerstellung belegt werden. Zudem zeigten statistische Testverfahren eine hohe Güte der Modelle. Im Rahmen der Validierung wurde bei Bestätigungsversuchen anhand eines Abgleichs zwischen Modellschätzern und gemessenen Werten jedoch ein signifikanter *Lack-of-Fit* festgestellt, der die Präzision der Prognosen einschränkt. Neben dem Modellansatz und der Größe des Faktorenraums wurde die Anpassungsschwäche auf wiederholt auftretende Verschleißerscheinungen an den O-Ringen

### 8.3 Ausblick

---

zurückgeführt. Durch die transient aufgetretenen Beschädigungsmechanismen an den Elastomerkörpern flossen Effekte in das Modell mit ein, die durch die berücksichtigten Faktoren nicht abgebildet werden konnten. Die Modellfunktion wurde auf Basis dieser Ergebnisse auf qualitative Aussagen beschränkt.

Durch die qualitative Aussagekraft der Prognosemodelle konnte eine exemplarische Zielgrößenoptimierung durchgeführt werden. Auf Basis definierter Rahmenbedingungen und der Regressionsgleichungen wurden Faktoreinstellungen gefunden, denen eine Maximierung oder Minimierung der Zielgröße folgte. Das Vorgehen der Zielgrößenoptimierung wurde exemplarisch dargestellt. Die gefundenen Faktoreinstellungen führten unter Beibehaltung der technischen Anforderungen an die Dichtverbindung zu einer starken Abnahme der Fügekraft. Das Vorgehen erlaubte eine Reduzierung des Belastungskollektivs auf den O-Ring mit dem Ziel, eine Abnahme des Beschädigungsrisikos zu realisieren.

Im Rahmen der technischen Betrachtung konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Überwachungskonzept mit einfachen technischen Mittel in industriellen Montagelinien unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Rahmenbedingungen einsetzbar ist. Voraussetzung hierfür ist die Anpassung der Prognosemodelle entsprechend der erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen.

### 8.3 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Grundstein zur Prozessoptimierung und -überwachung der Montage von Kolbendichtungen gelegt. Gleichzeitig wurde durch die umfangreichen Versuchsserien deutlich, an welchen Stellen sich Anknüpfungspunkte für nachfolgende Arbeiten bieten.

Für einen seriellen Einsatz des Überwachungskonzepts ist die Präzision der Prognose zu erhöhen. Die möglichen Ursachen für die Anpassungsschwäche des Modells und mögliche Lösungswege wurden in Kapitel 6.4 ausführlich diskutiert. In nachfolgenden Arbeiten ist demnach durch Umsetzung der aufgezeigten Erkenntnisse eine Erhöhung der Präzision realisierbar. Eine Reduzierung des Versuchsraums durch eine geringere Anzahl betrachteter Faktoren und kleinerer Stufen sowie die Anwendung eines Polynoms höheren Grads ist die Basis für eine erhöhte Prognosepräzision zukünftiger Modelle. Weiterhin besteht die Möglichkeit, den Verlauf der Kurve über geometrische Merkmale abzubilden.

Das Verschleißverhalten der O-Ringe wurde zudem als mögliche Ursache einer Instabilität identifiziert. Aktuell existieren keine veröffentlichten Erkenntnisse zum Beitrag der Beschädigungsmechanismen zur Fügekraft bei der Montage von Kolbendichtungen. Untersuchungen zu den Ursachen der Verschleißmechanismen können einen großen Beitrag zur Erhöhung der Prozessqualität leisten. Mit der detaillierten Kenntnis von Verschleißindikatoren ist die Entwicklung eines Prognosemodells zur Vorhersage der Beschädigungswahrscheinlichkeit möglich.

Zusammenfassend sollten zukünftige Arbeiten einen Beitrag zum tieferen Verständnis des auf den O-Ring wirkenden Beanspruchungskollektivs und der daraus resultierenden Verschleißmechanismen leisten. Bei ausreichender Kenntnis der Einfluss- und Reaktionsgrößen kann ein entsprechend den Erkenntnissen modifiziertes Prognosemodell erstellt werden. Die hier vorliegende Arbeit kann dafür als Vorlage zum methodischen Vorgehen herangezogen werden.



## 9 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ABTS 2007

Abts, G.: Einführung in die Kautschuktechnologie. München: Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-40940-8.

ACHENBACH & FRANK 2001

Achenbach, M.; Frank, E.: Reibung von Elastomeren. Tribologie + Schmierungs-technik 48 (2001) 4, S. 43-47.

ALBERS ET AL. 2012

Albers, A.; Sauer, B.; Steinhilper, W.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben. 7. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2012. ISBN: 978-3-642-24303-5.

ANDREAS ET AL. 2012

Andreas, E.; Fastl, H.; Kerber, S.; Hobelsberger, J.; Jebasinski, R.; Klerk, D. de; Moosmayr, T.; Saemann, E.: Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. 2 Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2012. ISBN: 978-3-8348-1443-2.

ANTONSSON & GROTE 2008

Antonsson, E. K.; Grote, K.-H.: Springer Handbook of Mechanical Engineering. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-30738-9.

ARVANITAKI ET AL. 1995

Arvanitaki, A.; Briscoe, B.; Adams, M.; Johnson, S.: The Friction and Lubrication of Elastomers. In: Dowson, D. et al. (Hrsg.): Tribology Series. Amsterdam: Elsevier 1995, S. 503-511. ISBN: 978-0-444-82263-5.

BANDOW & HOLZMÜLLER 2009

Bandow, G.; Holzmüller, H. H.: Das ist gar kein Modell! Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in der Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-834-98484-5.

BARTSCH 2004

Bartsch, H.: Menschliche Zuverlässigkeit in Flug-Arbeitssystemen. In: Grandt, M. (Hrsg.): Verlässlichkeit der Mensch-Maschine-Interaktion. Warnemünde, 12. und 13. Oktober 2004. Bonn: DGLR 2004, S. 147-157.

BAUER & JONGEBLOED 1997

Bauer, F.; Jongbloed, H.: Untersuchung der Leckage an statischen Dichtungen mit Hilfe der FEA. Ölhydraulik und Pneumatik 41 (1997) 7, S. 542-547.

BOCZKOWSKA 2012

Boczkowska, A. (Hrsg.): Advanced Elastomers: Technology, Properties and Applications. Rijeka: InTech 2012. ISBN: 978-953-51-0739-2.

### BONNET 2009

Bonnet, M.: Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung: Verstehen und zuverlässig auswählen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009. ISBN: 978-3-8348-9303-1.

### BOONSTRA & DANNENBERG 1956

Boonstra, B.; Dannenberg, E. M.: Abrasion and Friction of Rubberlike Materials. Rubber Chemistry and Technology 29 (1956) 3, S. 774-780.

### BOX & COX 1964

Box, G.; Cox, D.: An Analysis of Transformations. Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological) 26 (1964) 2, S. 211-252.

### BRISCOE & SINHA 2002

Briscoe, B.; Sinha, S.: Wear of polymers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 216 (2002) 1, S. 401-413.

### CHERNYAK & LEONOV 1986

Chernyak, Y.; Leonov, A.: On the theory of the adhesive friction of elastomers. Wear 108 (1986) 2, S. 105-138.

### CZICHOS & HABIG 2010

Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN 978-3-8348-9660-5.

### DEBLER 2005

Debler, C.: Bestimmung und Vorhersage des Verschleißes für die Auslegung von Dichtungen. Diss. Universität Hannover (2005).

<<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh05/493802134.pdf>> 12.10.2014.

### DIN 53754 1977

DIN 53754: Prüfung von Kunststoffen: Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren. Berlin: Beuth 1977.

### DIN 25424 1981

DIN 25424: Fehlerbaumanalyse, Teil 1: Methode und Bildzeichen. Berlin: Beuth 1981.

### DIN 7724 1993

DIN 7724: Polymere Werkstoffe: Gruppierung polymerer Werkstoffe aufgrund ihres mechanischen Verhaltens. Berlin: Beuth 1993.

### DIN 3771 1993

DIN 3771: O-Ringe: Berechnungsverfahren und Maße der Einbauräume. Berlin: Beuth 1993.

### DIN EN 1005 2002

DIN EN 1005: Sicherheit von Maschinen: Menschliche Körperliche Leistung, Teil 3: Empfohlene Kraftgrenzen bei Maschinenbetätigung. Berlin: Beuth 2002.

### DIN 8593 2003

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 0: Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 2003.



DIN EN 10049 2005

DIN EN 10049: Messung des arithmetischen Mittenrauwertes Ra und der Spitzenzahl R<sub>Pc</sub> an metallischen Flacherzeugnissen. Berlin: Beuth 2005.

DIN EN 13555 2005

DIN EN 13555: Flansche und ihre Verbindungen: Dichtungskennwerte und Prüfverfahren für die Anwendung der Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtungen. Berlin: Beuth 2005.

DIN EN ISO 9000 2005

DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme: Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2005.

DIN ISO 3601 2010

DIN ISO 3601: Fluidtechnik: O-Ringe, Teil 2: Einbauräume für allgemeine Anwendungen. Berlin: Beuth 2010.

DIN ISO 3601 2012

DIN ISO 3601 (Entwurf): Fluidtechnik: O-Ringe, Teil 1: Innendurchmesser, Schnurstärken, Toleranzen und Bezeichnung. Berlin: Beuth 2012.

DOMININGHAUS ET AL. 2008

Dominghaus, H.; Elsner, P.; Eyerer, P.; Hirth, T. (Hrsg.): Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen. 7. Aufl. Berlin: Springer 2008.

ISBN: 978-3-540-72401-8.

ECKSTEIN 2010

Eckstein, P. P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler: Eine realdatenbasierte Einführung mit SPSS. 2. aktualisierte und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Gabler 2010. ISBN: 978-3-834-92345-5.

EHRENSTEIN 2011

Ehrenstein, G. W.: Polymer Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendungen. 3. Aufl. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42967-3.

EYERER ET AL. 2007

Eyerer, P.; Elsner, P.; Hirth, T.: Handbuch Polymer Engineering. 1. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3-540-72402-5.

FELDMANN ET AL. 2004

Feldmann, K.; Gergs, H.; Slama, S.; Wirth, U. (Hrsg.): Montage strategisch ausrichten – Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-540-40304-3.

FERRY 1948

Ferry, J.: Viscoelastic properties of polymer solutions. Journal of Research of the National Bureau of Standards 41 (1948) 1, S. 53-62.

GAWLINSKI 2007

Gawlinski, M.: Friction and wear of elastomeric seals. Archives of Civil and Mechanical Engineering 7 (2007) 4, S. 57-68.

GENT & PULFORD 1983

Gent, A. N.; Pulford, C. T. R.: Mechanisms of rubber abrasion. *Journal of Applied Polymer Science* 28 (1983) 3, S. 943-960.

GIESEKUS 1994

Giesekus, H.: *Phänomenologische Rheologie: Eine Einführung*. Berlin: Springer 1994. ISBN: 3-540-57513-8.

GOHL 1991

Gohl, W.: *Elastomere Dicht- und Konstruktionswerkstoffe*. 4. Aufl. Ehningen: Expert 1991. ISBN: 3-816-90723-7.

GOODWIN & HUGHES 2008

Goodwin, J. W.; Hughes, R. W.: *Rheology for chemists: An introduction*. 2. Aufl. Cambridge, UK: RSC Pub. 2008. ISBN: 978-0-85404-839-7.

GRAF 1961

Graf, O.: *Arbeitsablauf und Arbeitsrhythmus*. In: Lehmann, G. (Hrsg.): *Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin*. Berlin: Urban & Schwarzenberg 1961, S. 789-824.

GROSCH 1963

Grosch, K.: The relation between the friction and visco-elastic properties of Rubber. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* 274 (1963) 1356, S. 21-39.

GROSS ET AL. 2011

Gross, D.; Hauger, W.; Wriggers, P.: *Technische Mechanik* 4. 8. Aufl. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-16828-4.

GUNDLACH 2004

Gundlach, C.: *Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung*. Diss. Universität Kassel (2004). Kassel: university press 2004. ISBN: 978-3-89958-068-6.

HAASL ET AL. 1981

Haasl, D.; Roberts, N.; Vesely, W.; Goldberg, F.: *Fault Tree Handbook*. Washington D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission 1981.

HABENICHT 2009

Habenicht, G.: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-85266-7.

HABERHAUER & BODENSTEIN 2011

Haberhauer, H.; Bodenstein, F. (Hrsg.): *Maschinenelemente*. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-14289-5.

HEINRICH 1997

Heinrich, G.: Hysteresis Friction of Sliding Rubbers on Rough and Fractal Surfaces. *Rubber Chemistry and Technology* 70 (1997) 1, S. 1-14.

HOFFMAN 2011

Hoffman, M.: Entwicklung und Validierung eines Bewertungsmodells für Projekte der statistischen Versuchsplanung. Diss. TU Berlin (2011).

HOLST 1995

Holst, G.: Systematisierung der Planungsphase der statistischen Versuchsmethodik für die industrielle Anwendung. Diss. RWTH Aachen (1995). Aachen: Shaker 1995. ISBN: 3-826-50919-6. (Berichte aus der Fertigungstechnik).

HORVE 1996

Horve, L. A.: Shaft seals for dynamic applications. New York: M. Dekker 1996. ISBN: 0-8247-9716-7.

HUMMEL & MALORNY 2008

Hummel, T.; Malorny, C.: Total Quality Management: Tipps für die Einführung. 4. Aufl. München: Hanser 2008. ISBN: 978-3-446-41609-3.

JANSSEN & LAATZ 2013

Janssen, J.; Laatz, W.: Statistische Datenanalyse mit SPSS: Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul exakte Tests. 8. Aufl. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-32507-6.

KARASZKIEWICZ 1987

Karaszkiwicz, A.: Hydrodynamics of rubber seals for reciprocating motion, lubricating film thickness, and outleakage of O-seals. Industrial & Engineering Chemistry Research 26 (1987) 11, S. 2180-2185.

KETTLER 2007

Kettler, E.: Rheologie komplexer Flüssigkeiten. Diss. RWTH Aachen (2007). <[http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2007/1876/pdf/Kettler\\_Edda.pdf](http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2007/1876/pdf/Kettler_Edda.pdf)> - 18.12.2014.

KLEPPMANN 2001

Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. 2. Aufl. München: Hanser 2001. ISBN: 3-446-21615-4.

KLETTI & SCHUMACHER 2011

Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion: Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-13845-4.

KLÜPPEL & HEINRICH 2000

Klüppel, M.; Heinrich, G.: Rubber Friction on Self-Affine Road Tracks. Rubber Chemistry and Technology 73 (2000) 4, S. 578-606.

KOCKELMANN 1996

Kockelmann, H.: Leckageraten von Dichtungen für Flanschverbindungen: Einflußgrößen, Anforderungen, meßtechnische Erfassung und leckageratenbezogene Dichtungskennwerte. Chemie Ingenieur Technik 68 (1996) 3, S. 219-227.

KONOLD & REGER 2003

Konold, P.; Reger, H.: Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. Wiesbaden: Vieweg 2003. ISBN: 978-3-528-13843-1.

KOWADA ET AL. 2008

Kowada, Y.; Sato, H.; Hosoi, H.: Leakage Reduction on Seal Parts of HFC134a MAC Compressors. SAE Technical Paper 2008-01-0830 (2008).

KREIL 2008

Kreil, O.: Einfluss der Oberflächenstruktur auf Druckverteilung und Schmierfilmdicke im EHD-Kontakt. Diss. TU München (2008).

KUHL 2014

Kuhl, M.: Prozessüberwachung. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch ressourcenorientierte Produktion. München: Hanser 2014, S. 707-716.

ISBN: 978-3-446-43008-2.

KUMMER 1966

Kummer, H. W.: Unified Theory of Rubber and Tire Friction. Diss. Pennsylvania State University (1966).

KUNZ & STUDER 2006

Kunz, J.; Studer, M.: Druck-Elastizitätsmodul über Shore-A-Härte ermitteln. Kunststoffe (2006) 6, S. 92-94.

KUB 2012

Kuß, A.: Marktforschung: Grundlagen der Datenerhebung und Datenanalyse. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler 2012. ISBN: 978-3-8349-3853-4.

LIANG 2007

Liang, H.: Investigating the Mechanism of Elastomer Abrasion. Diss. Queen Mary University of London (2007).

<<http://www.sems.qmul.ac.uk/research/honours/doc.php?id=246> > - 18.12.2014.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-642-01422-2.

LINDNER 2005

Lindner, M.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Gummireibung an Profilklotzchen und Dichtungen. Diss. Universität Hannover (2005).

<<http://d-nb.info/980525535/34>> 19.10.2014.

LINS & BRITZKE 2010

Lins, F.; Britzke, B.: Standardisierung und Ergonomie. In: Schütte, M. (Hrsg.): Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau. Wolfsburg: 23. und 24. September 2010. Dortmund: GfA-Press 2010, S. 29-42.

ISBN: 978-3-936804-09-6.

LINß 2011

Linß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. 3. Aufl. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42809-6.

LÖHR 1977

Löhr, H.-G.: Eine Planungsmethode für automatische Montagesysteme. Diss. Universität Stuttgart (1977). Mainz: Krausskopf 1977. ISBN: 3-7830-0120-X.

LORENZ 2012

Lorenz, B.: Contact Mechanics and Friction of Elastic Solids on Hard Rough Substrates. Diss. RWTH Aachen (2012). < <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2012/4034/pdf/4034.pdf> > -18.12.2014.

LOTTER 2005

Lotter, B.: Montage in der industriellen Produktion: Optimierte Abläufe, rationelle Automatisierung. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-21413-5.

MATEK ET AL. 2011

Matek, W.; Muhs, D.; Roloff, H.: Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung. 20. Aufl. Braunschweig: Vieweg 2011. ISBN: 978-3-8348-8279-0.

MENZ ET AL. 2005

Menz, W.; Mohr, J.; Paul, O.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. 3. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH 2005. ISBN: 978-3-527-30536-0.

MOFIDI & PRAKASH 2011

Mofidi, M.; Prakash, B.: The Influence of Lubrication on Two-body Abrasive Wear of Sealing Elastomers Under Reciprocating Sliding Conditions. Journal of Elastomers and Plastics 43 (2011) 1, S. 19-31.

MOFIDI ET AL. 2008

Mofidi, M.; Prakash, B.; Persson, B. N.; Albohr, O.: Rubber friction on (apparently) smooth lubricated surfaces. Journal of Physics: Condensed Matter 20 (2008) 8, S. 85223-85230.

MONTGOMERY 2001

Montgomery, D. C.: Design and analysis of experiments. 5. Aufl. New York: John Wiley & Sons 2001. ISBN: 0-471-31649-0.

MOORE & GEYER 1974

Moore, D.; Geyer, W.: A Review of Hysteresis Theories of Elastomers. Wear 30 (1974) 1, S. 1-34.

MOORE 1972

Moore, D. F.: The friction and lubrication of elastomers. 1. Aufl. Oxford: Pergamon Press 1972. ISBN: 0-080-16749-7.

MÜLLER ET AL. 2002

Müller, A.; Schramm, J.; Klüppel, M.: Ein neues Modell der Hysteresereibung von Elastomeren auf fraktalen Oberflächen. KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe 55 (2002) 9, S. 432-436.

MYERS 1990

Myers, R. H.: Classical and modern regression with applications. 2. Aufl. Boston: PWS-KENT 1990. ISBN: 0-534-92178-7.

NIKAS 2010

Nikas, G. K.: Eighty years of research on hydraulic reciprocating seals: review of tribological studies and related topics since the 1930s. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 224 (2010) 1, S. 1-23.

OKAMURA ET AL. 2002

Okamura, T.; Ohtsuka, M.; Ohta, T.; Ono, S.; Nakamura, K.: Micro Surface Roughness of O-rings and Sealing Mechanism. SAE Technical Paper 2002-01-0662 (2002).

OSBORNE 2010

Osborne, J.: Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. Practical Assessment, Research & Evaluation 15 (2010) 12, S. 1-7.

PARKER 2007

Parker: O-Ring Handbuch. Pleidelsheim: 2007.

PERSSON 2001

Persson, B. N.: Theory of rubber friction and contact mechanics. Journal of Chemical Physics 115 (2001) 8, S. 3840-3861.

PERSSON 2011

Persson, B. N.: Rubber Friction and Tire Dynamics. Journal of Physics: Condensed Matter 23 (2011) 1; 15003 (14 Seiten).

PERSSON ET AL. 2005

Persson, B. N.; Albohr, O.; Tartaglino, U.; Volokitin, A. I.; Tosatti, E.: On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion. Journal of Physics: Condensed Matter 17 (2005) 1, S. R1-R62.

PETERSEN 1991

Petersen, H.: Grundlagen der statistischen Versuchsplanung (Band 2). Landsberg/Lech: Ecomed 1991. ISBN: 3-609-65340-X.

POPOV 2010

Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-13302-2.

PRESIDENTIAL COMMISSION 1986

Presidential Commission (Hrsg.): Report of the presidential commission on the space shuttle challenger accident. Washington D.C.: U.S. Government Printing office 1986.

REINHART & SCHNEIDER 1996

Reinhart, G.; Schneider, B.: Montage. In: Kern, W. et al. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1996, S. 1236-1247. ISBN: 3-7910-8044-X.

REINHART & MILBERG 1997

Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Alternative Dichtungssysteme: Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag. München: Utz 1997. ISBN: 3-931327-26-4. (Seminarberichte *iwb* 26).

REINHART & SIEBEN 2011

Reinhart, G.; Sieben, C.: Qualitätsoptimierung durch Montageautomatisierung. wt Werkstatttechnik online 101 (2011) 9, S. 580-584.

REINHART & SIEBEN 2013

Reinhart, G.; Sieben, C.: Qualitätsoptimierung durch Prozessbeherrschung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 4, S. 197-202.

RICHTER 2002

Richter, B.: Schäden an O-Ringen, Ausfallursachen und Abhilfemaßnahmen. <[http://www.o-ring-prueflabor.de/download/Schaeden\\_an\\_O\\_Ringen.pdf](http://www.o-ring-prueflabor.de/download/Schaeden_an_O_Ringen.pdf)> - 01.10.2014.

RICHTER 2010

Richter, B.: Versagensursachen bei O-Ringen. Dichtungstechnik 13 (2010) 1, S. 23-27.

SAE AIR1707 2003

SAE AIR1707: Patterns of O-Ring Failures. Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE International 2003.

SARGENT 2010

Sargent, R.: Verification and Validation of Simulation Models. In: Johansson, B. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Baltimore, 05. bis 08. Dezember 2010, S. 166-183.

SCHALLAMACH 1955

Schallamach, A.: Zur Physik der Kautschukreibung. Kolloid-Zeitschrift 141 (1955) 3, S. 165-173.

SCHALLAMACH 1958

Schallamach, A.: Friction and Abrasion of Rubber. Wear 1 (1958) 5, S. 384-417.

SCHEFFLER 1986

Scheffler, E.: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung. 2. Aufl. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1986. ISBN: 3-342-00099-6.

SCHLICK ET AL. 2010

Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. 3. Aufl. Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-540-78333-6.

SCHMITT & PFEIFER 2010

Schmitt, R.; Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken. 4. Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-41277-4.

SCHMITT 1987

Schmitt, W.: Kunststoffe und Elastomere in der Dichtungstechnik. Stuttgart: Kohlhammer 1987. ISBN: 3-17-008838-6.

SEDLAN 2001

Sedlan, K.: Viskoelastisches Materialverhalten von Elastomerwerkstoffen: Experimentelle Untersuchung und Modellbildung. Diss. Universität Gesamthochschule Kassel (2000). Kassel: Univ.-Bibliothek Kassel 2001. ISBN: 3-89792-050-6.

### SIEBEN 2011

Sieben, C.: Entwicklung neuer Automatisierungskonzepte für die Aggregatmontage. 3. Aachener Montagetagung. Aachen, 16. und 17. März 2011, o. S.

### SIEBEN & REINHART 2014

Sieben, C.; Reinhart, G.: Development of a force-path prediction model for the assembly process of o-ring type seals. *Procedia CIRP* 23 (2014), S. 223-228.

### SIEBERTZ ET AL. 2010

Siebertz, K.; Bebber, D. van; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung*. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-05492-1.

### SIMON 1994

Simon, E.: Der Begriff der hochwertigen Dichtung für lösbare Rohrleitungsverbindungen. *Chemie Ingenieur Technik* 66 (1994) 7, S. 929-937.

### SORAVIA & ORTH 2000

Soravia, S.; Orth, A.: Design of Experiments. In: Wiley-VCH (Hrsg.): *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH 2000, S. 165-202. ISBN: 3-52730-673-0.

### STEINBERG ET AL. 2014

Steinberg, U.; Liebers, F.; Klußmann, A.: *Manuelle Arbeit ohne Schaden*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2014. ISBN: 978-3-88261-009-3.

### TARP 1986

TARP: *Consumer Complaint Handling in America: Summary of Findings and Recommendations*. Washington D.C.: White House Office of Customer Affairs 1986.

### TIETZE 1999

Tietze, W. (Hrsg.): *Untersuchung und Anwendung von Dichtelementen*. Essen: Vulkan 1999. ISBN: 3-8027-2191-8.

### TIETZE 2003

Tietze, W.: *Handbuch Dichtungspraxis*. 3. Aufl. Essen: Vulkan 2003. ISBN: 3-8027-3301-0.

### TIETZE 2005

Tietze, W. (Hrsg.): *Taschenbuch Dichtungstechnik*. Essen: Vulkan 2005. ISBN: 3-8027-2735-5.

### TRÄGER 2008

Träger, T.: Fehlerquelle Mensch. *MQ Management & Qualität* (2008) 9, S. 31-33.

### UETZ & WIEDEMAYER 1985

Uetz, H.; Wiedemeyer, J.: *Tribologie der Polymere: Grundlagen und Anwendung in der Technik: Reibung, Verschleiß, Schmierung*. München: Hanser 1985. ISBN: 3-4461-4050-6.



VICENTE ET AL. 2006

Vicente, J. de; Stokes, J. R.; Spikes, H. A.: Rolling and sliding friction in compliant, lubricated contact. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 220 (2006) 2, S. 55-63.

VDI 2860 1990

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen: Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth 1990.

VDI 3633 1996

VDI 3633 (Entwurf): Simulation von Logistik-, Material- und Produktionssystemen, Blatt 1: Begriffsdefinitionen. Berlin: Beuth 1996.

VDI 4006 2002

VDI 4006: Menschliche Zuverlässigkeit, Blatt 1: Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung. Berlin: Beuth 2002.

VDI 4006 2003

VDI 4006: Menschliche Zuverlässigkeit, Blatt 2: Methoden zur quantitativen Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit. Berlin: Beuth 2003.

VDI 3822 2004

VDI 3822: Schadensanalyse, Blatt 1: Grundlagen, Begriffe, Definitionen, Ablauf einer Schadensanalyse. Berlin: Beuth 2003.

VINARCIK 2009

Vinarcik, E. J.: Investigation of Fuel System Component O-Ring Interface Design & Assembly. Warrendale, Pennsylvania, SAE Technical Paper 2009-01-1180 (2009).

WAPPIS & JUNG 2013

Wappis, J.; Jung, B.: Null-Fehler-Management: Umsetzung von Six Sigma. 4. Aufl. München: Hanser 2013. ISBN: 978-3-446-43594-0.

WARNECKE ET AL. 1975

Warnecke, H. J.; Löhr, H.-G.; Kiener, W.: Montagetechnik: Schwerpunkt der Rationalisierung. Mainz: Krausskopf 1975. ISBN: 3-7830-0098-X.

WECK & BRECHER 2006

Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. 6. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-32506-2.

WEIB 1999

Weiß, H.: Der O-Ring im Spannungsfeld zwischen Massendichtung und Präzisionsteil. In: Tietze, W. (Hrsg.): Untersuchung und Anwendung von Dichtelementen. Essen: Vulkan 1999, S. 147-162. ISBN: 978-3-8027-2191-5.

WEMBER 2005

Wember, T.: Technische Statistik und statistische Versuchsplanung. 8. Aufl. Datteln: Eigenverlag des Verfassers 2005.

### WESTKÄMPER 1999

Westkämper, E.: Qualitätsmanagement in der Produktion. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management „Betriebshütte“. Berlin: Springer 1999, S. 13-1 - 13-72. ISBN: 3-540-59360-8.

### WIENDAHL 2004

Wiendahl, H.-P.: Variantenbeherrschung in der Montage: Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Berlin: Springer 2004. ISBN: 978-3-540-14042-9.

### WIENDAHL ET AL. 2014

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2. Aufl.

München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43702-9

### WILLIAMS ET AL. 1955

Williams, M.; Landel, R.; Ferry, J.: The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. Journal of the American Chemical Society 77 (1955) 14, S. 3701-3707.

### WISBACHER 1992

Wisbacher, J.: Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen. Diss. TU München (1991). Berlin: Springer 1992. ISBN: 3-540-55512-9. (*iwb* Forschungsberichte 49).

## 10 Anhang

### 10.1 Tabellarische Dokumentation der Modellkennwerte

Stützpunkt	$\lambda_T$	$R^2$	$R^2_{adj}$	$s_R$	FG
-7	0	0,129	0,102	0,066	410
-6,5	-1	0,174	0,147	0,010	410
-6,0	-1	0,411	0,366	0,012	393
-5,5	-1	0,773	0,729	0,010	349
-5,0	-1	0,828	0,794	0,010	352
-4,5	-0,5	0,878	0,848	0,024	337
-4,0	-0,5	0,882	0,858	0,028	351
-3,5	0	0,950	0,938	0,286	339
-3,0	0	0,960	0,951	0,295	348
-2,5	0	0,954	0,945	0,324	354
-2,0	0	0,951	0,942	0,279	357
-1,5	0	0,946	0,937	0,242	362
-1,0	0	0,937	0,927	0,264	366
-0,5	0	0,935	0,923	0,273	356
0	0	0,925	0,915	0,283	373
0,5	0	0,938	0,927	0,259	364
1,0	0	0,941	0,932	0,268	367
1,5	0	0,940	0,931	0,279	366
2,0	0	0,933	0,923	0,300	367
B1	0,5	0,912	0,898	1,738	361
B2	0	0,950	0,942	0,244	361
B3	0	0,962	0,953	0,213	338
B4	0	0,967	0,958	0,208	337
B5	0	0,964	0,955	0,230	345
$F_{max}$	0,5	0,958	0,949	0,236	351
Position $F_{max}$	0,5	0,936	0,928	0,558	376

## **10.2 Eingesetzte Software**

<b>Software</b>	<b>Nutzung</b>
camLine Cornerstone 5.3.0.2	Software zur Datenanalyse (camLine GmbH)
Microsoft® Office Excel® 2010	Tabellenkalkulation (Microsoft Cooperation)
Microsoft® Office Visio® 2010	Visualisierungsprogramm (Microsoft Cooperation)
NI LabVIEW	Grafisches Programmiersystem (National Instruments)

## 11 Studienarbeiten

Der Autor der vorliegenden Dissertation hat in den Jahren 2010 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten betreut. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Student	Studienarbeit
Brunnbauer, Andreas	<i>Empirische Analyse von Beschädigungsmechanismen bei der Montage von Bauteilen mit O-Ring-Dichtungen (Bachelorarbeit, HS Augsburg), eingeflossen in Abschnitt 5.3 und in Abschnitt 5.4</i>
Busch, Daniel	<i>Bewertung von Einsatzkonzepten industrieller Computertomographie (CT) für die Aggregatmontage (Bachelorarbeit, HS Ingolstadt)</i>
Fink, Tobias	<i>Konzeptentwicklung und Umsetzung einer sensorgestützten Roboterzelle für sensible Montageprozesse (Bachelorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg), eingeflossen in Abschnitt 5.4, in Abschnitt 5.5 und in Abschnitt 8.1</i>
Gebel, Igor	<i>Innovative Automatisierungskonzepte für die Aggregatmontage bei qualitätsbestimmenden Montageprozessen (Diplomarbeit, RWTH Aachen), eingeflossen in Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.3</i>
Munzert, Nils	<i>Der O-Ring als Normbauteil im Fahrzeugaggregat (Bachelorarbeit, HS Hannover), eingeflossen in Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.2</i>
Müller, Maximilian	<i>Multifaktorielle Quantifizierung von Einflüssen auf die Prozessqualität der Montage von Bauteilen mit außenliegenden O-Ring-Dichtungen (Diplomarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg), eingeflossen in Abschnitt 5.4.1 und Abschnitt 5.5.1</i>
Weindl, Stefan	<i>Qualitative Bestimmung idealisierter Montagebedingungen für Bauteile mit O-Ring-Dichtungen (Bachelorarbeit, HS Augsburg), eingeflossen in Abschnitt 5.4.1</i>



# Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**  
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlussseminar**  
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**  
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**  
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien  
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge  
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen  
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement  
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche  
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder  
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement  
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen  
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?  
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau  
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlang im Mittelstand  
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation  
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten  
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt  
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik  
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau  
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben  
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwv Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen  
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!  
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«  
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6



- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen  
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen  
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren  
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung  
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen  
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung  
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette  
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen  
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

## Forschungsberichte IWB Band 1–121

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen.

- 1 Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel  
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 Fuchsberger, A.: Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen  
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 Maier, C.: Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrieroboter  
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 Summer, H.: Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen  
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 Simon, W.: Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen  
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 Büchs, S.: Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung  
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 Hunzinger, J.: Schneiderorientierte Oberflächen  
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 Pilland, U.: Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen  
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung  
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 Reithofer, N.: Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen  
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse  
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 Reinhart, G.: Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungszäse  
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 Bürstner, H.: Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion  
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 Riese, K.: Klipsmontage mit Industrierobotern  
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 Lutz, P.: Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung  
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 Klippel, C.: Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems  
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 Rascher, R.: Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung  
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 Heusler, H.-J.: Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 Kirchknopf, P.: Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen  
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 Sauerer, Ch.: Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen  
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 Karstedt, K.: Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung  
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 Peiker, St.: Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems  
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 Schugmann, R.: Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage  
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 Wrba, P.: Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 Eibelhäuser, P.: Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung  
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 Prasch, J.: Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie  
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 Teich, K.: **Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**  
1990 - 52 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfang, W.: **Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**  
1990 - 59 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.: **Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**  
1990 - 93 Abb. - 190 Seiten - ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.: **Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**  
1991 - 75 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.: **Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**  
1991 - 58 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuzcek, H.: **Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**  
1992 - 125 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.: **Planungsstrategien zur stömungstechnischen Optimierung von Reiraum-Fertigungsgeräten**  
1991 - 60 Abb. - 166 Seiten - ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.: **3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**  
1991 - 66 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.: **Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**  
1991 - 85 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.: **Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**  
1991 - 68 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.: **Dynamisches Verhalten von Kreissägen**  
1991 - 109 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.: **Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**  
1991 - 86 Abb. - 201 Seiten - ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.: **3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**  
1991 - 74 Abb. - 126 Seiten - ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.: **Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**  
1992 - 108 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.: **Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**  
1992 - 94 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hoßmann, J.: **Methodik zur Planung der automatisierten Montage von nicht formstabilen Bauteilen**  
1992 - 73 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-5520-0
- 44 Petry, M.: **Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkaskens für robotergeführte Klebprozesse**  
1992 - 106 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.: **Integrierte Diagnose in Produktionszellen**  
1992 - 87 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.: **Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**  
1992 - 70 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.: **Prozßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**  
1992 - 84 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schrüfer, N.: **Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**  
1992 - 103 Abb. - 161 Seiten - ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.: **Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**  
1992 - 77 Abb. - 176 Seiten - ISBN 3-540-55512-9
- 50 Garnich, F.: **Laserbearbeitung mit Robotern**  
1992 - 110 Abb. - 184 Seiten - ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.: **Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**  
1992 - 89 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-44441-2
- 52 Glaas, W.: **Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**  
1992 - 67 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.: **Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**  
1992 - 60 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.: **Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**  
1992 - 75 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.: **Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**  
1992 - 67 Abb. - 135 Seiten - ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bomm, H.: **Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**  
1992 - 87 Abb. - 195 Seiten - ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.: **Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**  
1992 - 74 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.: **Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**  
1993 - 67 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.: **Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**  
1993 - 72 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56307-5
- 60 Strohmayr, R.: **Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeeinrichtungen**  
1993 - 80 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-56652-X
- 61 Glas, J.: **Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware**  
1993 - 80 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3.540-56890-5
- 62 Stetter, R.: **Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboterensatzes**  
1994 - 91 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56889-1
- 63 Dirndorfer, A.: **Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**  
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57031-4
- 64 Wiedemann, M.: **Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen**  
1993 - 81 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-57177-9
- 65 Woenckhaus, Ch.: **Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung**  
1994 - 81 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-57284-8
- 66 Kummesteiner, G.: **3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme**  
1994 - 62 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-57535-9
- 67 Kugelmann, F.: **Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen**  
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57549-9
- 68 Schwarz, H.: **Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**  
1994 - 96 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-57577-4
- 69 Wiethen, U.: **Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**  
1994 - 70 Abb. - 142 Seiten - ISBN 3-540-57794-7
- 70 Seehuber, M.: **Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**  
1994 - 72 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-57896-X
- 71 Amann, W.: **Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen**  
1994 - 71 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-57924-9
- 72 Schöpf, M.: **Rechnergestütztes Projektförderungs- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**  
1997 - 63 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58052-2
- 73 Welling, A.: **Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**  
1994 - 66 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-580-0
- 74 Zetmayer, H.: **Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion**  
1994 - 62 Abb. - 143 Seiten - ISBN 3-540-58134-0

- 75 Lindl, M.: Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung  
1994 - 66 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58221-5
- 76 Zipper, B.: Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung  
1994 - 64 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58222-3
- 77 Raith, P.: Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung  
1995 - 51 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58223-1
- 78 Engel, A.: Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation  
1994 - 69 Abb. - 160 Seiten - ISBN 3-540-58258-4
- 79 Zäh, M. F.: Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen  
1995 - 95 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-58624-5
- 80 Zwanzger, N.: Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung  
1995 - 65 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-58634-2
- 81 Romanow, P.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen  
1995 - 66 Abb. - 151 Seiten - ISBN 3-540-58771-3
- 82 Kahlenberg, R.: Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen  
1995 - 71 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-58772-1
- 83 Huber, A.: Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung  
1995 - 87 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-58773-X
- 84 Birkel, G.: Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen  
1995 - 64 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-58869-8
- 85 Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement  
1995 - 77 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-58942-2
- 86 Nedeljkovic-Groha, V.: Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen  
1995 - 94 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-58953-8
- 87 Rockland, M.: Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen  
1995 - 83 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-58999-6
- 88 Linner, St.: Konzept einer integrierten Produktentwicklung  
1995 - 67 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-59016-1
- 89 Eder, Th.: Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme  
1995 - 62 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-59084-6
- 90 Deutschle, U.: Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen  
1995 - 80 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-59337-3
- 91 Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung  
1995 - 68 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-60120-1
- 92 Hechl, Chr.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte  
1995 - 73 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-60325-5
- 93 Albertz, F.: Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen  
1995 - 83 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-60608-8
- 94 Trunzer, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgensensoren  
1996 - 101 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-60961-X
- 95 Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme  
1996 - 83 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-60960-1
- 96 Trucks, V.: Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen  
1996 - 64 Abb. - 141 Seiten - ISBN 3-540-60599-8
- 97 Schäffer, G.: Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme  
1996 - 71 Abb. - 170 Seiten - ISBN 3-540-60958-X
- 98 Koch, M. R.: Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung  
1996 - 67 Abb. - 138 Seiten - ISBN 3-540-61104-5
- 99 Moctezuma de la Barrera, J. L.: Ein durchgängiges System zur Computer- und rechnergestützten Chirurgie  
1996 - 99 Abb. - 175 Seiten - ISBN 3-540-61145-2
- 100 Geuer, A.: Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung  
1996 - 84 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-61495-8
- 101 Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten  
1996 - 67 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-61678-0
- 102 Pischelstrieder, K.: Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion  
1996 - 74 Abb. - 171 Seiten - ISBN 3-540-61714-0
- 103 Köhler, R.: Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten  
1997 - 62 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-62024-9
- 104 Feldmann, Ch.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung  
1997 - 71 Abb. - 163 Seiten - ISBN 3-540-62059-1
- 105 Lehmann, H.: Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystemen  
1997 - 96 Abb. - 191 Seiten - ISBN 3-540-62202-0
- 106 Wagner, M.: Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe  
1997 - 94 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-62656-5
- 107 Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen  
1997 - 63 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-62794-4
- 108 Krönert, U.: Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung  
1997 - 53 Abb. - 127 Seiten - ISBN 3-540-63338-3
- 109 Pfersdorf, I.: Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service  
1997 - 74 Abb. - 172 Seiten - ISBN 3-540-63615-3
- 110 Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion  
1997 - 77 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-63642-0
- 111 Kaiser, J.: Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen  
1997 - 67 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-63999-3
- 112 Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung  
1997 - 85 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-64195-5
- 113 Martin, C.: Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz  
1998 - 73 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-64401-6
- 114 Löffler, Th.: Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse  
1998 - 85 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-64511-X
- 115 Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen  
1998 - 84 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-64686-8
- 116 Koehrer, J.: Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung  
1998 - 75 Abb. - 185 Seiten - ISBN 3-540-65037-7
- 117 Schuller, R. W.: Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen  
1999 - 76 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-65320-1
- 118 Debuschewitz, M.: Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung  
1999 - 104 Abb. - 169 Seiten - ISBN 3-540-65350-3

- 119 Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline- Programmierung von 3D-Laseranlagen  
1999 - 98 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-65382-1
- 120 Pfof, E.: Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen  
1999 - 69 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-65525-5
- 121 Spitznagel, J.: Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen  
1999 - 63 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-65896-3

## Forschungsberichte IWB ab Band 122

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernold Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung  
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme  
164 Seiten - ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern  
167 Seiten - ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern  
168 Seiten - ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Rolf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen  
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen  
190 Seiten - ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen  
178 Seiten - ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping  
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden  
152 Seiten - ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heltmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle  
146 Seiten - ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialfußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen  
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik  
159 Seiten - ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken  
172 Seiten - ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung  
165 Seiten - ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokusspositionierung beim Laserstrahlschweißen  
193 Seiten - ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen  
148 Seiten - ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schilffebacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken  
187 Seiten - ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprengel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung  
144 Seiten - ISBN 978-3-89675-757-9
- 142 *Andreas Gallasch*: Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion  
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 *Ralf Cuiper*: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen  
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 *Christian Schneider*: Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 *Christian Jonas*: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 *Ulrich Willnecker*: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen  
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 *Christof Lehner*: Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss  
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 *Frank Rick*: Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen  
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 *Michael Höhn*: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0

- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung  
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudarfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke  
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinenaher Abläufe  
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen  
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung  
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen  
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen  
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Führer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik  
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Raßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen  
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitinge:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterens für das Druckgießen  
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieveling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling  
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kaustems  
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Joachim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierloh:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung  
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern  
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9
- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme  
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3

- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen  
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung  
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgasfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern  
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0663-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griebisch:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsen- ten Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickerrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Müller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Würnsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsen- te Mikromontage  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlstahns  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasieren förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagmann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern  
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in unterbetrieblichen Wertschöpfungsketten  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4

- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte  
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung  
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme  
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme  
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest  
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik  
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung  
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflusintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen  
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Rad:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators  
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreißschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmelitungsschweißen von Stählen  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5
- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteilabgabestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reißschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Mouthicho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden  
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6

- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen  
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathy Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahmert:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens  
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreißschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 **Florian Karl:** Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 **Philipp Ronald Engelhardt:** System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4472-8
- 300 **Markus Graßl:** Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4476-6
- 301 **Thomas Kirchmeier:** Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess  
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4478-0
- 302 **Oliver Rösch:** Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4486-5
- 303 **Christoph Sieben:** Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität von Kolbendichtungen  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4510-7





