

Reihe 1

Konstruktions-
technik/
Maschinen-
elemente

Nr. 446

Frank Mersch, M.Sc.
Schwelm

Verfahren zur Optimierung der haptischen Wertanmutung von Produkten auf der Basis von Simulationsmodellen



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des
Lehrstuhls Konstruktion
an der Bergischen Universität Wuppertal



Verfahren zur Optimierung der haptischen Wertanmutung von Produkten auf der Basis von Simulationsmodellen

**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades
(Dr.-Ing.)**

in der
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Frank Mersch
geboren in Schwelm

Wuppertal 2018

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Gust

Korreferentin: Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl

Beisitzer: Prof. Dr.-Ing. Klaus Höfer

Tag der Disputation: 16. 04. 2018

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente

Frank Mersch, M.Sc.
Schwelm

Nr. 446

Verfahren zur Optimierung der haptischen Wertanmutung von Produkten auf der Basis von Simulationsmodellen



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des
Lehrstuhls Konstruktion
an der Bergischen Universität Wuppertal

Mersch, Frank

Verfahren zur Optimierung der haptischen Wertanmutung von Produkten auf der Basis von Simulationsmodellen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 446 . Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

144 Seiten, 94 Bilder, 11 Tabellen.

ISBN 978-3-18344601-8 ISSN 0178-949X,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

Für die Dokumentation: Produktentwicklung – Wahrgenommene Qualität – Produkthaptik – Wertanmutung – Simulation der Haptik – Optimierung der Haptik

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Verfahren, welches Produktentwicklern bereits im Entwurfsprozess die Möglichkeit bietet, die Haptik von Produkten zielgerichtet für die Kunden auszulegen. Im Gegensatz zu den bestehenden Vorgehensweisen umfasst das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren den gesamten Prozess zur simulationsbasierten Optimierung der Produkthaptik – von der Objektivierung der Produkthaptik über die direkte Kopplung dieser Wahrnehmungsobjektivierung mit Methoden aus der Simulationstechnik bis hin zum abschließenden Einsatz von Optimierungsverfahren. Die Anwendbarkeit des Verfahrens wird anhand einer Optimierung eines Handygehäuses und eines Handwerkzeugs nachgewiesen.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

D 468

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 978-3-18-344601-8

Vorwort

Während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Konstruktion der Bergischen Universität Wuppertal war ich durch die Bearbeitung verschiedener Forschungs- und Entwicklungsprojekte immer wieder mit den Herausforderungen im Rahmen der kundengerechten Produktentwicklung konfrontiert. Insbesondere die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern aus dem Bereich Wirtschaftswissenschaften, Marketing und Produktdesign ermöglichte es mir, die verschiedenen Sichtweisen auf das Thema Produktentwicklung kennenzulernen und zu studieren. Eine Frage, die besonders häufig im Konstruktionsprozess mit den verschiedenen Partnern diskutiert wurde, lautete: „Wie fühlt sich das an?“ Aus diesem Grund habe ich nach Lösungen gesucht, wie „das Gefühle“ sichtbar und quantifizierbar wird.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gust, der mit seinem Vorschlag zur Themenrichtung „Objektivierung der Produktgestaltung“ den Impuls für diese Arbeit gegeben hat. Ich danke Ihnen für Ihr Vertrauen und die Schaffung der Rahmenbedingungen, die diese Arbeit ermöglicht haben. Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl danke ich herzlich für das Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Zweitgutachtens. Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske für die Übernahme des Vorsitzes und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Höfer für den Beisitz der Prüfungskommission bedanken.

Meinen Kollegen, insbesondere meinem langjährigen Büronachbarn und Freund Dr.-Ing. Aydin Ünlü, danke ich für die vielen fachlichen Diskussionen und die hervorragende Arbeitsatmosphäre. Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich im Rahmen von Abschluss- und Projektarbeiten tatkräftig unterstützt haben. Abschließend möchte ich mich bei den wichtigsten Menschen in meinen Leben bedanken, meinen Eltern und meiner Lebensgefährtin Pia. Durch euren Rückhalt und die Freiräume, die ihr mir gegeben habt, habt ihr einen großen Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Schwelm, den 26.01.2018

gez. Frank Mersch

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	IX
Kurzfassung	XI
Abstract	XII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft	4
2.1 Die wahrgenommene Qualität	4
2.2 Mathematische Grundlagen	6
2.2.1 Kennwerte zur Beschreibung von Datensätzen	6
2.2.2 Regressionsmodelle	7
2.2.3 Varianzanalyse	8
2.3 Gütekriterien der Datenerhebung	10
2.3.1 Objektivität	10
2.3.2 Reliabilität	11
2.3.3 Validität	11
2.4 Die menschliche Wahrnehmung	12
	V

2.4.1	Grundlagen der Wahrnehmung	13
2.4.2	Die haptische Wahrnehmung	14
2.4.3	Taktile Sensorik	15
2.4.4	Propriozeptive Sensorik	17
2.5	Haptische Explorationsprozeduren	17
2.6	Griffarten und Kräfte	19
2.7	Simulationsmethoden	20
2.7.1	FEM	21
2.7.2	MKS	22
2.8	Forschung im Bereich der haptischen Wahrnehmung von Produkten	23
2.8.1	Taster und Drehsteller	24
2.8.2	Schaltgetriebe	28
2.8.3	Haptik eines Griffgestänges	28
2.8.4	KFZ-Innenräume	31
2.9	Zusammenfassung und Diskussion	34
3	Handsystem zur Erfassung der Belastungskollektive	35
3.1	Sensorische Kraftmesssysteme	37
3.2	Verwendetes System	38
4	Entwicklung eines Verfahrens zur numerischen Analyse und Optimierung der Produkthaptik	41
4.1	System analysieren	43

4.2	Nutzertest durchführen	44
4.3	Testobjekte vermessen	46
4.4	Simulation durchführen	47
4.5	Optimierungsziele ermitteln	49
4.6	Optimierung durchführen	51
5	Erprobung des Verfahrens am Beispiel eines Handygehäuses	54
5.1	System analysieren	55
5.2	Nutzertest durchführen	56
5.3	Testobjekt vermessen	63
5.4	Simulation durchführen	66
5.5	Optimierungsziele ermitteln	70
5.6	Optimierung durchführen	76
5.7	Validierung der Optimierung	79
6	Anwendungsbeispiel Gartenschere	82
6.1	Optimierung der Schneidhaptik	83
6.1.1	System analysieren	83
6.1.2	Nutzertest durchführen	83
6.1.3	Testobjekte vermessen	87
6.1.4	Simulation durchführen	89
6.1.5	Optimierungsziele ermitteln	91
6.1.6	Optimierung durchführen	91

6.2	Optimierung der Haptik im Lastfall	92
6.2.1	System analysieren	93
6.2.2	Nutzertest durchführen	93
6.2.3	Testobjekte vermessen	95
6.2.4	Simulation durchführen	97
6.2.5	Optimierungsziele ermitteln	98
6.2.6	Optimierung durchführen	99
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
A	Anhang	107
A.1	Sensoranordnung des Handschuhs	107
A.2	Verwendete Messtechnik	108
A.3	Modelldaten aus der Simulation des Handygehäuses	112
A.4	Daten der Scheren A1-A6 und B1-B6	118
A.5	Gesamtansicht des FE-Modells der Schere C5	121
	Literaturverzeichnis	122

Nomenklatur

Abkürzungen

ANOVA	Analysis of Variance
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
DOE	Design Of Experiments
EVAC	Ethylen-Vinylacetat-Copolymer
EEG	Elektroenzephalografie
FDM	Fused Deposition Modeling
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FSR	Force Sensing Resistor
KFZ	Kraftfahrzeug
LED	Light Emitting Diode
MKS	Mehrkörpersimulation
PA	Polyamid
RMS	Root Mean Square
SAO	Sequential Approximation Optimization
VR	Virtual Reality
ZNS	Zentralnervensystem

Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
d	Durchmesser	mm
DP_{DO}	Designparameter Deckeloberseite	mm
DP_{DU}	Designparameter Deckelunterseite	mm
F	Kraft	N
F_N	Normalkraft	N
F_R	Reibkraft	N
S_{DO}	Deckelstärke der Gehäuseoberseite	mm
S_{DU}	Deckelstärke der Gehäuseunterseite	mm
f	Verformung	mm
$WQ(f)$	Zusammenhang zwischen Bewertung und Verformung	—
α	Irrtumswahrscheinlichkeit	%
μ	Reibkoeffizient	—
σ	Spannung	MPa

Kurzfassung

Die Qualitätswahrnehmung des Kunden ist ein wichtiges Kriterium im Rahmen der Kaufentscheidung. Vor dem Hintergrund eines stetig wachsenden Wettbewerbs stehen Unternehmen vor der Herausforderung, Produkte so zu gestalten, dass diese vom Kunden als hochwertig empfunden werden, und gleichzeitig Entwicklungskosten einzusparen. Ein Sinneskanal, der für die Qualitätswahrnehmung verantwortlich ist, ist die Haptik.

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung eines Verfahrens, welches von Produktentwicklern zur Objektivierung der menschlichen Wahrnehmung und zur gezielten Optimierung von Produkten in der Entwurfsphase verwendet werden kann.

Im Gegensatz zu den bestehenden Vorgehensweisen beschreibt das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren den gesamten Prozess zur simulationsbasierten Optimierung der Produkthaptik – von der Objektivierung der Produkthaptik über die direkte Kopplung dieser Wahrnehmungsobjektivierung mit Methoden aus der Simulationstechnik bis hin zum abschließenden Einsatz von Optimierungsverfahren. Die Effektivität des Verfahrens wird am Beispiel eines Handygehäuses belegt. Die Sicherstellung der Anwendbarkeit auf verschiedene Produktgruppen und Anwendungsfälle wird abschließend – anhand einer anwendungsorientiert beschriebenen Optimierung eines Handwerkszeugs – nachgewiesen.

Abstract

The quality perception of the customer is an important criterion in the purchase decision. Especially in view of a continuously increasing market competition, companies are faced with the challenge of designing products, in such a way, that customers perceive them as high-quality and – at the same time – saving development costs. One sensory channel, responsible for the perception of quality, is the haptics.

The objective of this work is the development of a method for the optimization of product haptics. In an early concepts stage, the method enables product developers to objectify the human perception of products and to use it for targeted optimization.

In contrast to existing procedures, this method describes the entire process for the simulation-based optimization of product haptics. From the objectification of product haptics, the linkage of this perceptual objectification with methods from simulation technology, to the final use of optimization methods. The effectiveness of this method is demonstrated by using the example of a mobile phone case. The applicability to different product groups and use cases is finally demonstrated on the base of an application-oriented described optimization of a hand tool.

1 Einleitung

Im Falle einer Unsicherheit treffen Menschen intuitive Entscheidungen, die auf kognitive Prozesse zurückzuführen sind (nobelprize.org, 2014) – eine Erkenntnis, für die Daniel Kahneman zusammen mit Vernon L. Smith den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften des Jahres 2002 erhielt. Als Ergebnis eines solchen kognitiven Prozesses ist die wahrgenommene Qualität ein zentrales Entscheidungskriterium beim Treffen einer Kaufentscheidung (vgl. Schmitt & Pfeifer, 2015, Quattelbaum & Schmitt, 2009, und Falk et al., 2010). Somit rückt das Produkterlebnis als Entscheidungshilfe im Kaufprozess zunehmend in den Fokus der Industrie und Forschung (vgl. Bauer & Dangelmaier, 2016, und Dangelmaier & Haselberger, 2008).

Dies zeigt sich insbesondere in den Marketingstrategien von Unternehmen, die die Relevanz einer hohen wahrgenommenen Qualität hervorheben und aktiv bewerben, wie z. B. das Unternehmen Kiekert:

„Kiekert fühlt sich gut an!

Ein Fahrzeug erlebt man mit allen Sinnen. Das Öffnungs- und Schließverhalten einer Fahrzeugtür ist einer der ersten Eindrücke, die sich einem Kunden beim Fahrzeugkauf einprägen. Haptik ist auch ein Gradmesser für die Wertanmutung des Fahrzeugs.“ (Kiekert AG, 2016).

Mercedes-Benz:

„Die optionalen LED High Performance-Scheinwerfer verleihen der Limousine einen souverän fokussierten Blick und zeigen mit Doppelfackel und hochwertig modellierten Details auch bei Tag ein unverwechselbares Design.“ (Mercedes-Benz, 2017)

Vor dem Hintergrund eines solchen Werbeversprechens stehen Produktentwickler vor der Aufgabe, diese unspezifischen Forderungen, wie z. B. die „...hochwertig modellierten

Details ...“ (Mercedes-Benz, 2017), in spezifische, messbare Größen abzuleiten und diese möglichst früh in den Produktentwurf zu überführen.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Neben der Interpretation von unspezifischen Forderungen besteht im Entwicklungsprozess – insbesondere in Bezug auf die Haptik – die Herausforderung, verschiedene Konzeptideen miteinander zu vergleichen, da diese i. d. R. zur Prüfung und Urteilsbildung in Form von Prototypen „greifbar“ sein müssen.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Das zentrale Ziel ist die Entwicklung eines Verfahrens, das Produktentwicklern bereits im Entwurfsprozess die Möglichkeit bietet, die Haptik von Produkten zielgerichtet für die Kunden zu gestalten. Bereits auf der Grundlage von CAD-Daten soll es dem Anwender ermöglicht werden, ein Produkt so zu gestalten, dass es den Kunden einen hohen Qualitätseindruck vermittelt.

Da die Themenstellung neben der ingenieurwissenschaftlichen Perspektive ebenfalls Aspekte der Psychologie und der Ergonomie umfasst, liegt der Fokus auf der Verknüpfung der jeweiligen fachspezifischen Methoden innerhalb des Verfahrens. Hier ist insbesondere die Verknüpfung von objektivierten Nutzeranforderungen mit dem Einsatz von Simulationstechnik zur computergestützten Optimierung der Produkthaptik zu nennen. Es existiert derzeit kein Verfahren, das auf die Schnittstellen beider Bereiche eingeht.

Ferner fehlen im Bereich der Haptik-Simulation Erkenntnisse über die Möglichkeiten zum Einsatz der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder hybrider Lösungen, wie z. B. die Kopplung von FEM und einer Mehrkörpersimulation (MKS), wodurch das Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten zusätzlich gesteigert werden kann. Aus diesen Punkten leitet sich der im folgenden Kapitel beschriebene Aufbau der Arbeit ab.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Da es sich bei dieser Arbeit um eine Schnittmenge aus verschiedenen Bereichen der Wissenschaften handelt, werden in Kapitel 2 Grundlagen aus dem Bereich des Maschinenbaus, der Ergonomie sowie der Psychologie beschrieben. Darauf folgend wird der Stand der Forschung im Bereich der haptischen Wahrnehmung erfasst und diskutiert. Hierbei wird im Besonderen auf die Möglichkeiten zur Objektivierung der Kundenwahrnehmung eingegangen, die die Grundlage für den Aufbau des Verfahrens darstellen. Eine kurze Zusammenfassung des Forschungsstandes dient der weiteren Konkretisierung der Zielsetzung dieser Arbeit.

Da der Einsatz von Simulationstechniken die Verwendung definierter Randbedingungen und Lastkollektive erfordert, werden in Kapitel 3 Handschuhssysteme zur Kraftmessung vorgestellt. Ein solches System soll im Rahmen des Verfahrens zur Objektivierung der Interaktionen zwischen Mensch und Produkt eingesetzt werden.

In Kapitel 4 wird der Verfahrensablauf vorgestellt und beschrieben. Jeder einzelne Prozessschritt wird dabei in einem Unterkapitel aufgeführt, abgebildet und beschrieben.

Eine ausführliche Beschreibung der Anwendung des Verfahrens am Beispiel eines Handygehäuses erfolgt in Kapitel 5. Um dem Leser eine maximale Transparenz und Übersicht in der Verfahrensanwendung zu schaffen, werden die Unterkapitel ebenfalls entlang des Verfahrensablaufs angelegt. Zur abschließenden Validierung des Verfahrens werden zusätzlich eine Vermessung und ein Nutzertest mit dem optimierten Handygehäuse durchlaufen.

An dem Beispiel einer Gartenschere wird in Kapitel 6 das neue Verfahren eingesetzt und hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten geprüft. Neben der Optimierung der Schneidhaptik mit einer Mehrkörpersimulation wird an dieser Stelle auch der Einsatz eines FE-Modells beschrieben, welches zur Optimierung der Haptik im Falle einer quasistatischen Schneidlast (z. B. Schneiden von hartem Holz) eingesetzt wird.

Abschließend folgt in Kapitel 7 eine Zusammenfassung und Diskussion der erzielten Ergebnisse, aus denen weitere Forschungsfragen abgeleitet werden.

2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft

2.1 Die wahrgenommene Qualität

Die wahrgenommene Qualität beschreibt das subjektive Urteil des Kunden über die wahrgenommenen Eigenschaften eines Produktes (vgl. Quattrelbaum & Schmitt, 2009, und Schmitt & Pfeifer, 2015). In dem Prozess der Urteilsbildung werden – entsprechend Abbildung 2.1 – vom Produkt ausgehende Reize (Ist-Eigenschaften) bewusst oder unbewusst wahrgenommen und mit Erwartungen und/oder Erfahrungen (Soll-Eigenschaften) verglichen (vgl. Schmitt & Pfeifer, 2015).

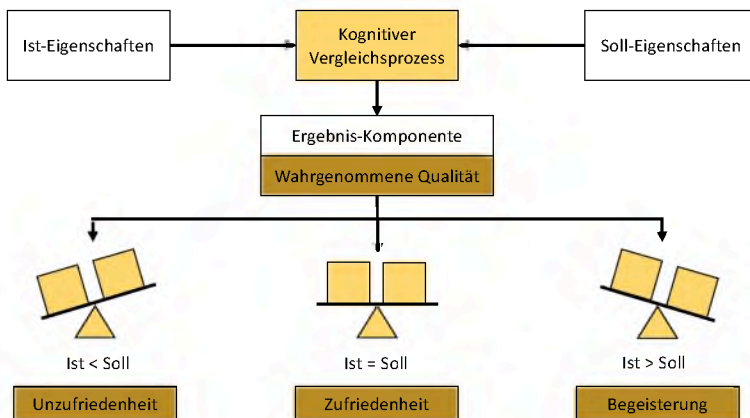


Abbildung 2.1: Entstehung des Qualitätseindrucks nach Schmitt & Betzold (2007), basierend auf Homburg (2001)

Relevante Sinneseindrücke basieren auf sogenannten Quality Cues bzw. Qualitätsdeskriptoren, die von technischen Parametern ausgehen (Falk et al., 2010, Olson & Jacoby,

1972). Quality Cues sind somit als Reize bzw. Hinweise zu verstehen, die der Nutzer als Sinneseindruck wahrnimmt und für seine Urteilsbildung verwendet. Auf dieser Grundlage beschreiben Falk et al. (2010) das Ebenenmodell zur schrittweisen Identifizierung solcher Qualitätsdeskriptoren, ausgehend vom Gesamtprodukt (siehe Abbildung 2.2). Ferner werden jedem Schritt bzw. jeder Produktebene Eigenschaften wie die Informationsart oder die Quelle zugeordnet, anhand derer mögliche Qualitätsdeskriptoren identifiziert werden können.

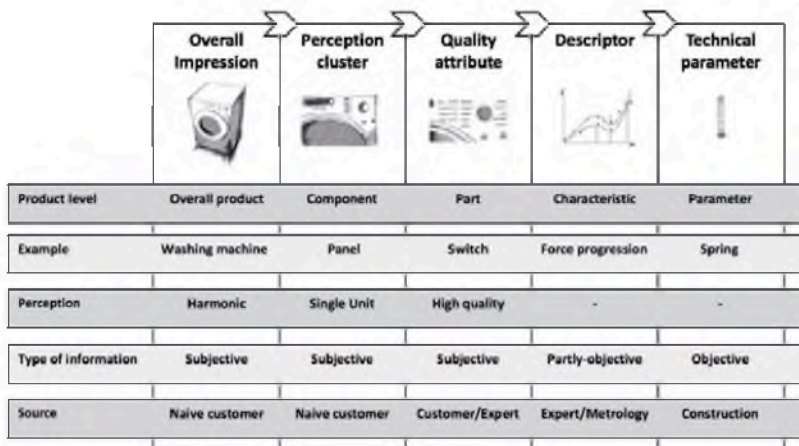


Abbildung 2.2: Ebenenmodell zur Identifizierung von Qualitätsdeskriptoren nach Falk et al. (2010)

Das allgemeine Ziel bei der Gestaltung der wahrgenommenen Qualität liegt nach Danzer (2016) in einem wertanmutenden Eindruck. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Begriffe wahrgenommene Qualität und Wertanmutung synonym verwendet.

2.2 Mathematische Grundlagen

Da im Rahmen dieser Arbeit Daten erfasst und analysiert werden, definieren die folgenden Kapitel die grundlegenden Begriffe und Verfahren aus dem Bereich der Statistik und Stochastik.

2.2.1 Kennwerte zur Beschreibung von Datensätzen

Für die Analyse und den Vergleich von Datensätzen bedarf es definierter Kennwerte, die Aufschluss über die Form der Verteilung, die Lage und die Streuung der Daten liefern. Aus diesem Grund werden im Folgenden verschiedene Größen aus Cramer & Kamps (2017) aufgeführt, die der Beschreibung von statistischen Daten dienen.

Der **arithmetische Mittelwert** (in dieser Arbeit als Mittelwert bezeichnet) ist bei einem Datensatz aus den Werten $x_1 \dots x_n$ definiert durch:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Ausgehend von der Abweichung der einzelnen Daten zum Mittelwert wird die **Varianz** gebildet:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

Ein weiteres Maß für die Streuung der Daten in Bezug zum Mittelwert ist die **Standardabweichung**:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (3)$$

Da die Standardabweichung über die gleiche Maßeinheit wie der Mittelwert verfügt, wird sie – in dieser Arbeit – der Varianz als Maß zur Beschreibung der Streuung vorgezogen. Ferner handelt es sich bei den zu betrachtenden Datensätzen ausschließlich um Stichproben. Aus diesem Grund wird die Varianz bzw. Standardabweichung über die Schätzfunktion (4) (empirische Varianz) bestimmt (vgl. Papula, 2016).

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

Die Normalverteilung stellt nach Cramer & Kamps (2017) die wichtigste Verteilung der Stochastik dar und wird durch die Dichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5)$$

mit den Parametern μ (Mittelwert) und σ (Standardabweichung) beschrieben.

2.2.2 Regressionsmodelle

Regressionsmodelle beschreiben den Zusammenhang zwischen einer (oder mehreren) erklärenden Variablen x und einer Zielvariable y . Grundlage der Regressionsmodelle ist das einfache, lineare Regressionsmodell, das durch Formel (6) beschrieben wird. Die Größe ε gibt den zufälligen Störanteil an. Die Regressionsparameter β werden i. d. R. mit der Methode der kleinsten Quadrate KQ geschätzt (siehe Formel (7)) (Fahrmeir et al., 2009). Über diese Formel wird geprüft, ob die Abweichungen von Zielvariable y_i und Regressionsgerade $\beta_0 + \beta_1 x_i$ minimal sind. Ebenso können nichtlineare Zusammenhänge beschrieben werden. Polynomische Zusammenhänge werden z. B. durch Formel (8) beschrieben.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

$$KQ(\beta_0, \beta_1) = \min_{\beta_0, \beta_1} \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (7)$$

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_l x_i^l + \dots + \varepsilon_i \quad (8)$$

mit $i = 1, \dots, n$ und $l = \text{Grad des Polynoms}$.

Die Güte des Regressionsmodells kann über das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben werden. Das Bestimmtheitsmaß wird über die Formel (9) berechnet und nimmt bei maximaler Übereinstimmung von Daten und Regressionsmodell den Wert 1 an. Umgekehrt liegt bei $R^2 = 0$ keine Übereinstimmung von Daten und Regressionsmodell vor, da in diesem Fall der prognostizierte Wert y_i gleich dem Mittelwert \bar{y} ist. Für weitergehende Informationen sei an dieser Stelle auf das Werk von Fahrmeir et al. (2009) verwiesen.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

2.2.3 Varianzanalyse

Das Ziel einer Varianzanalyse oder im Englischen „Analysis of Variance“ (ANOVA) ist die Prüfung, ob zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen ein zufälliger Zusammenhang bzw. Einfluss besteht (vgl. Huber et al., 2014). Dabei wird das zu untersuchende Merkmal als abhängige Variable und das erklärende Merkmal als unabhängige Variable oder auch Faktor bezeichnet (Bortz & Schuster, 2010). Wird beispielsweise eine Gruppe von Versuchspersonen nach ihrer empfundenen Wertanmutung von verschiedenen Produkten befragt, ist die abhängige Variable die Wertanmutung. Variablen wie z. B. das Gewicht der Produkte, die die Abweichungen in den Ausprägungen der Wertanmutung erklären können, werden als unabhängige Variablen bezeichnet. Sind beispielsweise vier Produkte Gegenstand des Versuchs, die sich ausschließlich in ihrem Gewicht voneinander unterscheiden, handelt es sich um einen 4-fach gestuften Faktor (vgl. Bortz & Schuster, 2010).

Ausgangspunkt der Varianzanalyse ist die Erstellung der Nullhypothese, die besagt, dass zwischen der abhängigen Variablen und der unabhängigen Variablen kein bzw. ein rein zufälliger Zusammenhang besteht. Zur Prüfung dieser Hypothese wird nach Backhaus et al. (2016) die Summe der Quadrate der Gesamtstreuung SS_{total} in einen erklärbaren Teil $SS_{between}$ und einen nicht erklärbaren Teil SS_{within} zerlegt (Formeln (10) und (11)).

y_{gk} = Beobachtungswert k ($k = 1, 2, \dots, K$) in Faktorstufe g ($g = 1, 2, \dots, G$)

\bar{y}_g = Gruppenmittelwert

\bar{y} = Gesamtmittelwert

$$SS_{total} = SS_{between} + SS_{within} \quad (10)$$

$$\sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K (y_{gk} - \bar{y})^2 = \sum_{g=1}^G K (\bar{y}_g - \bar{y})^2 + \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K (y_{gk} - \bar{y}_g)^2 \quad (11)$$

Mit den jeweiligen Freiheitsgraden df werden im Anschluss die erklärte Varianz $MS_{between}$ (Formel (12)) und die nicht erklärte Varianz MS_{within} (Formeln (12) und (13)) ermittelt. Das Verhältnis dieser Varianzen ergibt den empirischen F-Wert (Formel (14)).

$$MS_{between} = \frac{SS_{between}}{df_{between}} = \frac{SS_{between}}{G - 1} \quad (12)$$

$$MS_{within} = \frac{SS_{within}}{df_{within}} = \frac{SS_{within}}{G(K - 1)} \quad (13)$$

$$F_{emp} = \frac{MS_{between}}{MS_{within}} \quad (14)$$

Die abschließende Prüfung der Hypothese erfolgt über den Vergleich des berechneten empirischen F-Werts mit dem kritischen F-Wert F_{crit} . Dieser wird – abhängig von den Freiheitsgraden und einer zu definierenden Irrtumswahrscheinlichkeit α – einer Tabelle (F-Tabelle¹) entnommen. Ist der empirische F-Wert größer als der Tabellenwert, wird die Nullhypothese verworfen. Ist der empirische F-Wert kleiner oder gleich dem Tabellenwert, bleibt die Nullhypothese bestehen. Eine weitere Kennzahl zur Bewertung der Hypothese ist der p-Wert, der der minimalen Irrtumswahrscheinlichkeit entspricht, bei der der Test als signifikant gilt und die Nullhypothese verworfen wird (vgl. Bortz & Schuster, 2010, und Bickel & Doksum, 2007).

2.3 Gütekriterien der Datenerhebung

Die Erhebung von Daten erfolgt nach definierten Anforderungen. Als Anforderungsquelle werden die Hauptgütekriterien aus dem Bereich der Psychologie verwendet und vorgestellt. Nach Döring & Bortz (2016) werden drei Hauptgütekriterien – Objektivität, Reliabilität und Validität – unterschieden, die in den folgenden Kapiteln entsprechend der Definition von Moosbrugger & Kelava (2012) erläutert werden.

2.3.1 Objektivität

Die Objektivität beschreibt nach Moosbrugger & Kevala (2012) den Einfluss des Testleiters und Auswerters auf das Testergebnis. Ein Test gilt als objektiv, wenn das Ergebnis unabhängig von der auswertenden oder leitenden Person ist. Als Testleiter wird die Person bezeichnet, die den Test an den zu untersuchenden Testpersonen anwendet. Der Testauswerter ist die Person, die den Test auswertet und interpretiert. Zur genaueren Deutung dieser Definition werden in Moosbrugger & Kevala (2012) drei Ausprägungen der Objektivität beschrieben:

¹ Siehe Bortz & Schuster (2010).

Durchführungsobjektivität:

Die Durchführungsobjektivität ist gegeben, wenn das Ergebnis des Tests nicht von der Person abhängt, die den Test leitet (Moosbrugger & Kevala, 2012). Die Standardisierung der Testdurchführung trägt zur Steigerung der Durchführungsobjektivität bei.

Auswertungsobjektivität:

Die Auswertungsobjektivität beschreibt, inwieweit das Testergebnis vom Testauswerter abhängt. Daher weisen Multiple Choice Items i. d. R. eine höhere Auswertungsobjektivität auf als offene Aufgaben (Moosbrugger & Kevala, 2012). Zusätzlich kann die Auswertungsobjektivität durch eine computergestützte Auswertung erhöht werden (Döring & Bortz, 2016).

Interpretationsobjektivität:

Die Interpretationsobjektivität charakterisiert den Interpretationsspielraum bei der Deutung und Schlussfolgerung der Ergebnisse. Um eine hohe Interpretationsobjektivität zu erzielen, muss der Test so gestaltet sein, dass mehrere Testauswerter bei gleichem Testwert identisch interpretieren und schlussfolgern (Moosbrugger & Kevala, 2012).

2.3.2 Reliabilität

Die Reliabilität ist eine Aussage über die Messgenauigkeit eines Tests. Wird ein Test unter identischen Bedingungen wiederholt, sollte er zum gleichen Ergebnis führen. Nach Moosbrugger & Kelava (2012) sollte bei einem guten Test die Abweichung der Wiederholung weniger als 30 % betragen.

2.3.3 Validität

Während die Objektivität und die Reliabilität die Genauigkeit der Messung beschreiben, gibt die Validität darüber Auskunft, ob der Test das misst, was er zu messen beabsichtigt (vgl. Moosbrugger & Kevala, 2012). Nach Hartig et al. (2012) ist die Validität das zentrale Gütekriterium für einen Test.

2.4 Die menschliche Wahrnehmung

Die Wahrnehmung des Menschen ist das Ergebnis eines komplexen Prozesses, in dem Informationen über mehrere Stationen aufgenommen, abgebildet und weitergeleitet werden. Dieser Ablauf ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Birbaumer & Schmidt (2010) teilen diesen Prozess in die Bereiche der objektiven Sinnesphysiologie und der Wahrnehmungspsychologie. Die objektive Sinnesphysiologie (gelber Hintergrund) beschreibt die Eigenschaften und das Zusammenwirken der menschlichen Sinnesorgane, wobei die Wahrnehmungspsychologie die Zusammenhänge zwischen den Sinnesreizen und dem daraus resultierenden Empfinden behandelt (blauer Hintergrund) (Birbaumer & Schmidt, 2010). Die roten Pfeile kennzeichnen die Bedingungen, die zur Abbildung eines Umweltphänomens und letztlich zur Wahrnehmung erforderlich sind. Auf diese Prozesskette wird im folgenden Kapitel weiter eingegangen.

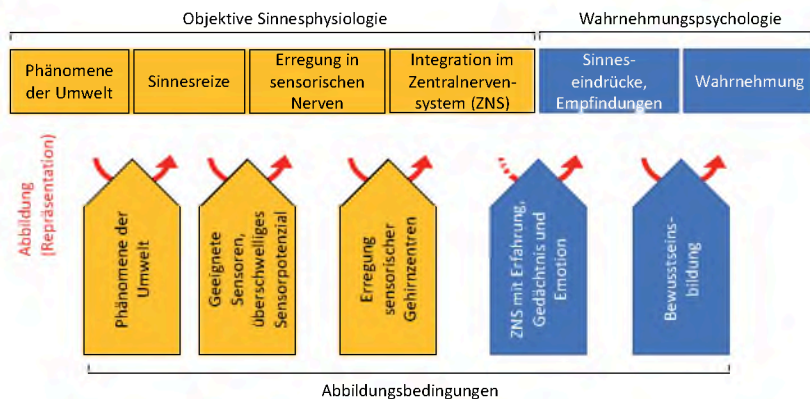


Abbildung 2.3: Der Prozess der menschlichen Wahrnehmung nach Birbaumer & Schmidt (2010)

2.4.1 Grundlagen der Wahrnehmung

Durch die Interaktion des Menschen mit seiner Umwelt nimmt er mit seinen Sinnesorganen Reize auf. Hierfür sind Sensoren bzw. Rezeptoren zuständig, die auf die Erfassung spezifischer Reize ausgelegt sind (Birbaumer & Schmidt, 2010). Die Sensoren reagieren auf einen Reiz mit einer Spannungsänderung in *Volt* (Depolarisation) und erzeugen ab einem spezifischen Schwellenwert in den Nervenfasern ein Aktionspotenzial (siehe Abbildung 2.4). Nach Kern et al. (2009) werden solche Schwellenwerte auch als „Thresholds“ bezeichnet. Liegt das Sensorpotenzial unterhalb dieser Thresholds, entstehen in den Nervenfasern keine Aktionspotenziale und der Prozess der Wahrnehmung ist unterbrochen.

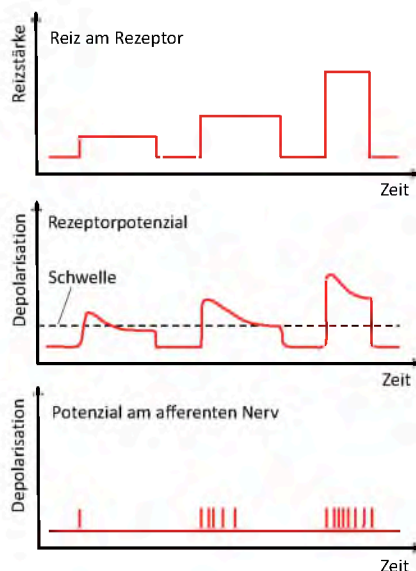


Abbildung 2.4: Reaktion eines Rezeptors auf verschieden ausgeprägte Reize nach Birbaumer & Schmidt (2010)

Die Aktionspotenziale werden durch die Erregung definierter sensorischer Zentren des Gehirns im Zentralnervensystem zu Mustern zusammengeführt und erfahrungsbasiert

Sinneseindrücken zugeordnet. Die bewusste Deutung dieser Sinneseindrücke, die ebenfalls auf Erfahrungen beruht, wird als Wahrnehmung bezeichnet (Birbaumer & Schmidt, 2010).

2.4.2 Die haptische Wahrnehmung

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Prozesse und Komponenten der haptischen Wahrnehmung beschrieben. Die Vorgänge der haptischen Wahrnehmung liefern die Grundlage für die Erstellung des Verfahrens und sind somit als Anforderungsquelle zu verstehen.

Der Begriff Haptik ist in der Norm zur Ergonomie der Mensch-System-Interaktion definiert als „sensorische und/oder motorische Aktivität, die in der Haut, in den Muskeln, Gelenken und Sehnen begründet ist“ (9241-910, 2011).

Die haptische Wahrnehmung umfasst die taktile sowie die propriozeptive Wahrnehmung (Grunwald, 2009). Synonym wird hier auch häufig der Begriff Tastsinn verwendet. Die haptische Wahrnehmung beschreibt den Vorgang des „Begreifens“ durch aktives, zielgerichtetes Ertasten, während die taktile Wahrnehmung ausschließlich durch passive Stimuli erfolgt (Grunwald, 2009). Basis für die taktile Wahrnehmung sind Rezeptoren und Nervenenden, die in der Haut liegen. Für die haptische Wahrnehmung sind zusätzlich propriozeptive Rezeptoren notwendig, da diese die Erfassung der eigenen Bewegung und Lage aller Körperteile ermöglichen (Halata & Baumann, 2008). Die Gesamtheit an Rezeptoren ist somit die menschliche Sensorik, die der Erfassung von Informationen dient. Über das Rückenmark gelangen die Informationen an den Thalamus und werden an den primären (S1) und den sekundären (S2) somatosensorischen Cortex weitergeleitet, wo sie anschließend verarbeitet werden (Hsiao & Yau, 2008, Bensmaia & Yau, 2011). Dieses komplexe System wird nach Goldstein (1997) auch als somatosensorisches System bezeichnet. Zum besseren Verständnis der Eigenschaften des somatosensorischen Systems und dessen Grenzen werden im Folgenden die einzelnen Komponenten beschrieben.

2.4.3 Taktile Sensorik

Die taktile Sensorik kann in vier Gruppen eingeteilt werden (Birbaumer & Schmidt, 2010):

- Mechanorezeptoren
- Thermorezeptoren
- Chemorezeptoren
- Nozizeptoren

Mechanorezeptoren wandeln durch eine chemische Reaktion einen mechanischen Reiz in elektrische Signale um (sog. Mechanotransduktion) (Bensmaia & Yau, 2011). Die Darstellungen b und c aus Abbildung 2.5 zeigen die Anordnung der verschiedenen Mechanorezeptoren über den Querschnitt der unbehaarten (links) und der behaarten menschlichen Haut (rechts).

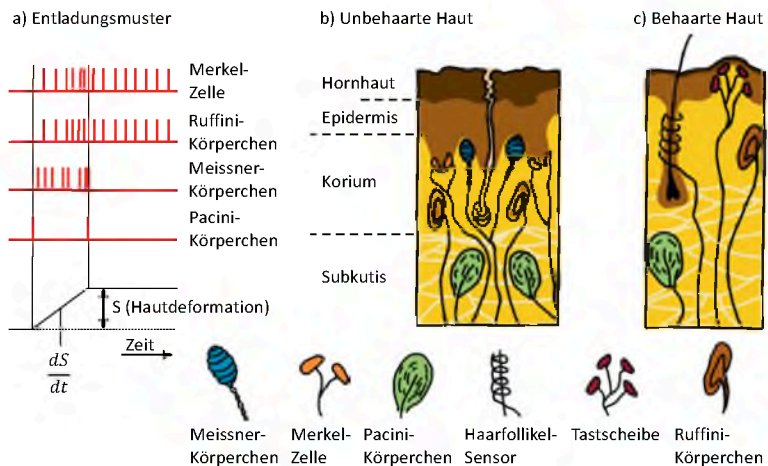


Abbildung 2.5: a) Entladungsmuster sowie Form und Lage von verschiedenen Mechanosensoren b) und c) nach Birbaumer & Schmidt (2010)

Jeder einzelne Rezeptor zeichnet sich durch ein spezifisches Aktionspotenzial in Bezug auf konstante Druckreize sowie unterschiedliche Reizarten (Reizstärke, -beschleunigung, -geschwindigkeit) aus (siehe Tabelle 2.1 und Ausschnitt a in Abbildung 2.5).

Tabelle 2.1: Eigenschaften der Mechanosensoren nach Birbaumer & Schmidt (2010)

Adaption bei konstantem Druckreiz			
	<i>Langsam</i>	<i>Mittelschnell</i>	<i>Sehr schnell</i>
<i>Unbehaarte Haut</i>	Merkel-Zelle, Ruffinikörperchen	Meissnerkörperchen	Pacinikörperchen
<i>Behaarte Haut</i>	Tastscheibe, Ruffinikörperchen	Haarfollikel-Sensor	Pacinikörperchen
	Intensitätsindikator	Geschwindigkeitsdetektor	Beschleunigungsdetektor
Klassifikation nach adäquatem Reiz			

Thermorezeptoren sind in der Lage, die Zustände „kalt“ und „warm“ zu detektieren. Nach Birbaumer & Schmidt (2010) ist davon auszugehen, dass es sich um freie Nervenverbindungen handelt, die sich dicht unter der Epidermis (Kälterezeptor) bzw. im Korium (Wärmerezeptor) befinden (Birbaumer & Schmidt, 2010). Bei einer geringen Temperatur reagieren die Kälterezeptoren mit einem hochfrequenten Aktionspotenzial. Mit steigender Temperatur nimmt die Frequenz der Kälterezeptoren ab und die Aktionspotenzialfrequenz der Wärmerezeptoren nimmt zu (Schäfer et al., 1988).

Chemorezeptoren reagieren auf chemische Reize. Sie sind ihrer Funktion nach dem Atemsystem sowie dem Geruchs- und Geschmackssinn zuzuordnen (Claus, 2009).

Nozizeptoren sind freie Nervenverbindungen, die sich in allen Organen befinden und auf schädigende, bedrohliche Reize reagieren (Birbaumer & Schmidt, 2010). Entsprechend ihrer Funktion werden sie in drei Gruppen nach Meßlinger (2014) unterteilt.

- *Mechanische hochschwellige Nozizeptoren:*

Schnelle Detektion von starken mechanischen Reizen zur Auslösung von Schutzmechanismen.

- *Polymodale Nozizeptoren:*

Detektion von lang anhaltenden, schmerzhaften Vorgängen, die sowohl auf mechanischen, thermischen oder chemischen Reizen basieren. Sie sind insbesondere für ein verzögert wahrgenommenes Schmerzgefühl verantwortlich.

- *Schlafende Nozizeptoren:*

Die Detektion findet ausschließlich in entzündetem Gewebe statt. Dann reagieren sie bereits bei schwachen Reizen.

2.4.4 Propriozeptive Sensorik

Die propriozeptive Sensorik umfasst die tiefer liegenden Rezeptoren, wie z. B. die Gelenkrezeptoren, Muskelspindeln und Golgi-Sehnenorgane, die zusätzlich zur taktilen Sensorik Information über die Bewegung und Lage von Muskeln und Körperteilen liefern (Halata & Baumann, 2008). Aus diesem Grund wird die propriozeptive Wahrnehmung auch als Tiefensensibilität bezeichnet (Birbaumer & Schmidt, 2010). Neben der Wahrnehmung von aktiven und passiven Bewegungen von Körperteilen ermöglicht die Tiefensensibilität ebenfalls die Erfassung von Widerständen, die der aktiven Bewegung entgegenwirken (Birbaumer & Schmidt, 2010). Somit ist der menschliche Körper durch das Zusammenspiel von taktiler und propriozeptiver Wahrnehmung in der Lage, Texturen, Gewicht, Elastizität, Temperatur und Geometrie von Objekten zu erfassen.

2.5 Haptische Explorationsprozeduren

Nach Lederman & Klatzky (1987) nutzt der Mensch acht verschiedene Prozeduren, um die Beschaffenheit und Funktionalität von Objekten wahrzunehmen (siehe Abbildung 2.6). Jede der Prozeduren ermöglicht die Wahrnehmung einer Objekteigenschaft, sodass i. d. R. mehrere Prozeduren miteinander kombiniert werden (Lederman & Klatzky, 1987).



Streichende Bewegung
Textur prüfen



Drücken
Härte prüfen



Berühren
Temperatur prüfen



Auf-und-ab-Bewegen
Gewicht prüfen



Umfassen
Größe prüfen



Ertasten
Form prüfen



Funktionstest
Funktion prüfen



Bauteile bewegen
Bewegungsabläufe prüfen

Abbildung 2.6: Prozeduren zur haptischen Wahrnehmung nach
Lederman & Klatzky (1987)

2.6 Griffarten und Kräfte

Um die haptische Interaktion des Nutzers mit einem Produkt vollständig zu beschreiben, bedarf es eines Überblicks über die möglichen Griff- und Kontaktarten aus dem Bereich der Ergonomie. Nach Bullinger & Solf (1979) werden 12 verschiedene Greifarten unterschieden, die sich – wie in Abbildung 2.7 dargestellt – in drei Gruppen gliedern (Bullinger & Solf, 1979).



Abbildung 2.7: Greifarten nach Bullinger & Solf (1979)

In Abhängigkeit von der Greifart haben Wakula et al. (2009) für das 15. und das 50. Perzentil (für Frauen und Männer) die maximal übertragbaren Kräfte in Newton ermittelt (siehe Abbildung 2.8). Diese Werte werden insbesondere im Bereich der Ergonomie zur Belastungsanalyse verwendet, können jedoch auch zur Abschätzung von Produktbelastungen herangezogen werden.



Abbildung 2.8: Maximale Handkräfte von Frauen und Männern in Relation zur Greifart nach Wakula et al. (2009)

2.7 Simulationsmethoden

Ein Simulationsmodell ist ein Ersatzmodell eines realen Systems, welches (unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten) diesem so genau wie möglich entspricht (Klein, 2015). Zwei Simulationsmethoden, die u. a. die Ermittlung von Bewegungen, Verformungen und Kräften an Bauteilen ermöglichen, sind die FEM und die MKS. Bei der Betrachtung von Abbildung 2.9 ist zu erkennen, dass in der frühen Phase des Produktlebenszyklus die Festlegung der Produkteigenschaften die Höhe der Kostenentstehung vorbestimmt (vgl. Nißl, 2006, und Ehrlenspiel et al., 2014). Um den Grad der Kostenentstehung (z. B. aufgrund von zu spät entdeckten Entwicklungsfehlern) zu minimieren, wird durch eine gezielte Steigerung der Entwicklungsaktivitäten im frühen Entwicklungsprozess (z. B. durch den Einsatz digitaler Modelle) versucht, möglichst viele Informationen über das Produkt zu erlangen. Dieses Prinzip wird in der Literatur als „Frontloading“ bezeichnet (Bauer & Dangelmaier, 2016).

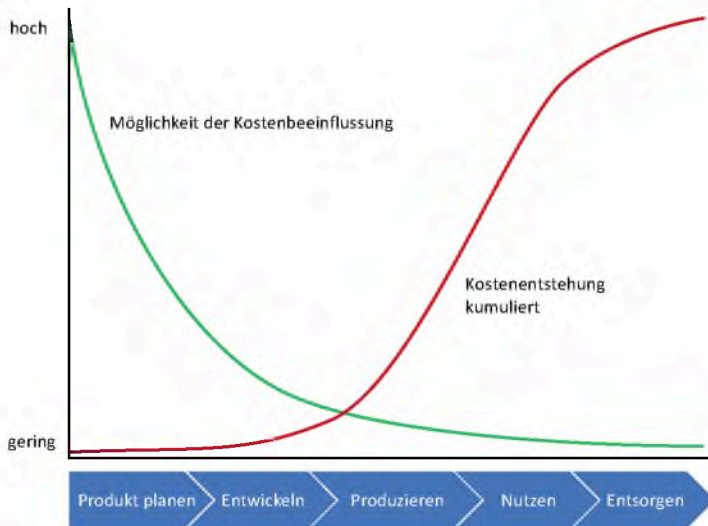


Abbildung 2.9: Der Verlauf der Kostenentstehung und Kostenbeeinflussung über den Lebenszyklus eines Produktes nach Ehrlenspiel et al. (2014)

2.7.1 FEM

Bei der Finite-Elemente-Methode wird ein reales System durch einzelne, definierte Elemente diskretisiert. Die einzelnen Elemente sind über Knotenpunkte miteinander verbunden, über die das Modell mit äußeren Kräften beaufschlagt werden kann. Über das Gleichungssystem

$$\underline{F} = \underline{d} \cdot \underline{k} \quad (15)$$

können die Verschiebungen \underline{d} der einzelnen Knotenpunkte in Abhängigkeit von der Elementensteifigkeit \underline{k} bestimmt werden. Durch die Rückrechnung und das Werkstoffgesetz werden die vorliegenden Spannungen, Dehnungen und Reaktionskräfte ermittelt (Klein,

2015). Diese Kenngrößen werden im Rahmen des Post-Processings grafisch, wie z. B. durch Farbfüllbilder, dargestellt (siehe Abbildung 2.10).

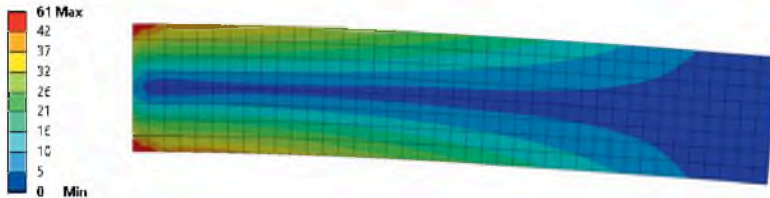


Abbildung 2.10: Vergleichsspannung in MPa nach von Mises am Beispiel eines Biegebalkens

2.7.2 MKS

Eine Mehrkörpersimulation besteht aus einer endlichen Anzahl an massebehafteten, starren Körpern und masselosen Verbindungselementen, die Einfluss auf die Bewegung der Körper nehmen (Rill & Schäfer, 2017, Klein, 2015, Woernle, 2016). Entsprechend Abbildung 2.11 können über masselose Kraftelemente (grün) Kräfte auf die Körper einwirken und somit eine Bewegung im Raum hervorrufen. Die Beschränkung in Abhängigkeit von dem jeweiligen Verbindungselement (rot) verursacht Reaktionskräfte bzw. Reaktionsmomente an den einzelnen Verbindungspunkten.

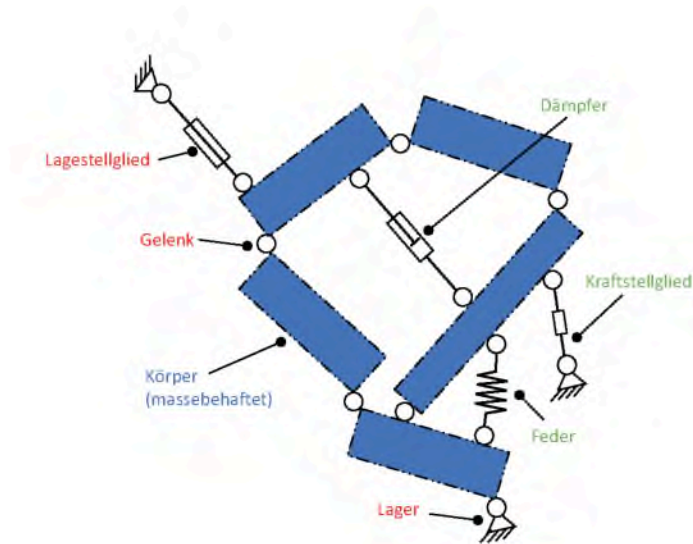


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung eines Mehrkörpersystems nach Woernle (2016)

Die Lagebeschreibung der einzelnen Körper erfolgt über einen körperfesten Punkt und eine Drehmatrix, die die Ausrichtung des Körpers in Bezug auf ein definiertes, fixes Koordinatensystem festlegt (Rill & Schäfer, 2017). Durch die Ableitung über die Zeit können die translatorische und die rotatorische Geschwindigkeit bestimmt werden.

2.8 Forschung im Bereich der haptischen Wahrnehmung von Produkten

Der Fokus der Forschung liegt insbesondere auf den Bedienelementen aus dem KFZ-Bereich. So zeigt die folgende Auflistung in Tabelle 2.2 mehrere Arbeiten, die sich a) mit der Wahrnehmung von Tastern und/oder Drehstellern und b) mit der Schaltqualität befassen.

Tabelle 2.2: Arbeiten auf dem Gebiet KFZ-Stellteile: a) Taster und Drehsteller;
b) Schaltgetriebe

	Titel	Quelle
a)	„Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und Bedienfeldern für den Kfz-Innenraum.“	(Anguelov, 2009)
	„Haptische Unterscheidbarkeit mechanischer Parameter bei rotatorischen Bedienelementen.“	(Kühner, 2014)
	„Haptik- und Akustik-Simulation von Kfz-Bedienelementen.“	(Währisch & Wall, 2012)
b)	„Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der subjektiv erlebten Schaltbetätigungsqualität von Fahrzeugen mit manuellem Schaltgetriebe.“	(Dylla, 2009)
	„Simulationsgestützte Optimierung der Schaltqualität von Handschaltgetrieben.“	(Davis et al., 2004)

Mit einem breiteren Produktfokus betrachtet Spingler (2011) die haptische sowie die optische Wahrnehmung von Komponenten aus dem KFZ-Innenraum. Der Forschungsstand dieser Arbeiten wird u. a. in den folgenden Kapiteln beschrieben.

2.8.1 Taster und Drehsteller

Anguelov (2009) weist in seiner Dissertation durch empirische Versuche den Zusammenhang zwischen technischen Parametern und der wahrgenommenen Qualität von Schaltern im Kraftfahrzeugbereich nach. Hierzu verwendet Anguelov einen Sechs-Achs-Roboterarm, der über einen Flansch mit einem Sechs-Achs-Kraft-Moment-Sensor ausgestattet ist (siehe Abbildung 2.12).

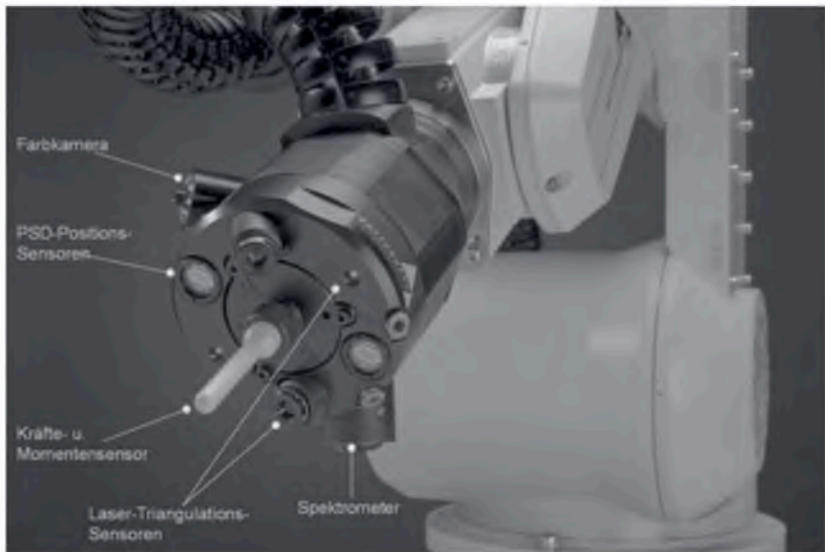


Abbildung 2.12: Roboterarm mit Multisensor-Kopf (Battenberg, 2008), entnommen aus Anguelov (2009)

Zwischen der subjektiven Bewertung von Schaltelementen (Abbildung 2.13 unten) und deren physikalisch messbaren Eigenschaften (Abbildung 2.13 oben) besteht ein quantifizierbarer Zusammenhang, der sich durch den Wertanmutungsindex I_W ausdrücken lässt (Anguelov, 2009).

$$I_W = (0,403 * F1) - (0,311 * F2) + (0,285 * F4) + (0,498 * F6) \quad (16)$$

Die Faktoren ($F1 \dots F6$) resultieren aus einer Regressionsanalyse und charakterisieren (in Form einer Funktion) die haptische Wertanmutung auf Grundlage der untersuchten Schalter. Der Wertanmutungsindex (Gleichung (16)) liefert somit einen Rückschluss auf die wahrgenommene Qualität eines Schalters bei der Interaktion. Das Ergebnis ist dabei unabhängig von der Lage bzw. dem Einbauort und der Funktion des Bedienelements (Anguelov, 2009).

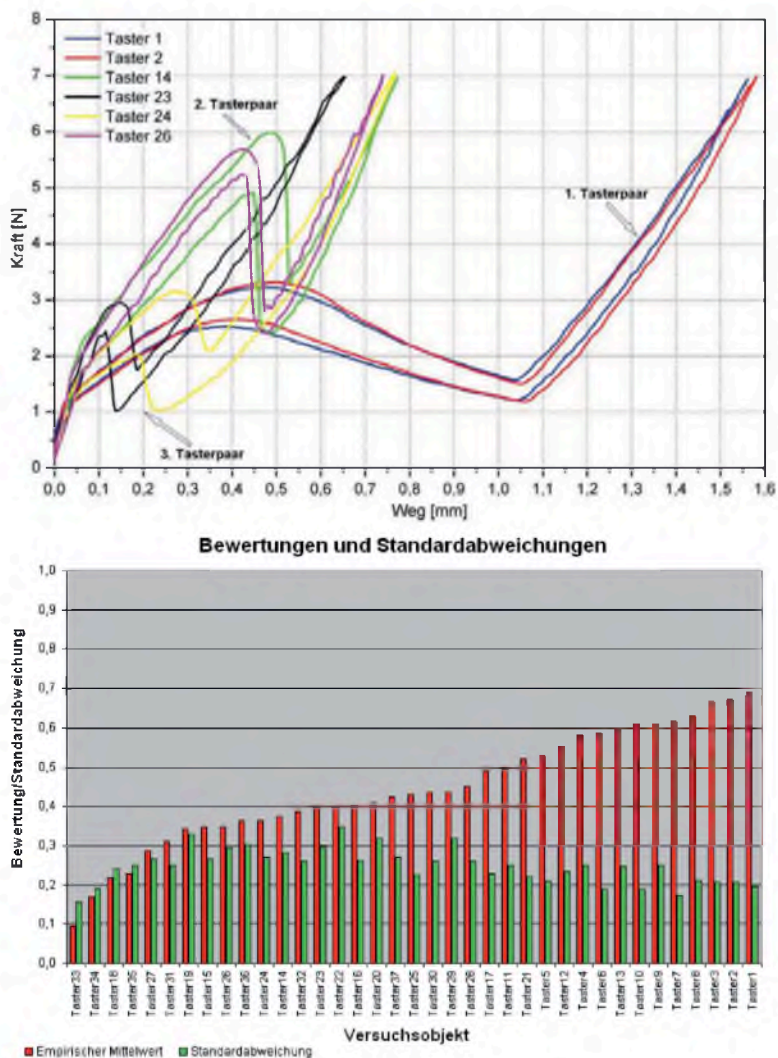


Abbildung 2.13: Kraft-Weg-Verlauf (oben) und Bewertungsergebnisse (unten) als Grundlage zur Quantifizierung der Wertanmutung (Anguelov, 2009)

Mit dem Ziel, die Wirkzusammenhänge und Wahrnehmungsgrenzen der haptischen Interaktion mit Tastern und Drehstellern zu untersuchen, entwickelt Kühner (2014) einen Haptik-Simulator (Abbildung 2.14). Dieser ermöglicht es Kühner, in seiner Arbeit auf den Einsatz von Prototypen gänzlich zu verzichten.

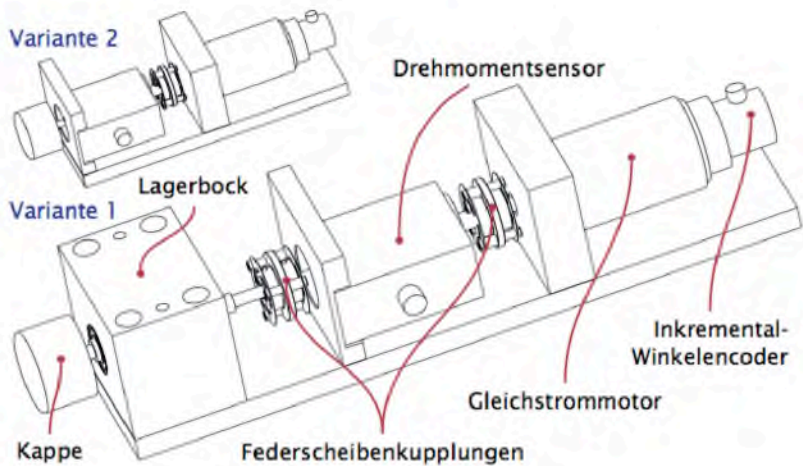


Abbildung 2.14: Aufbau eines Haptik-Simulators für Drehsteller (Kühner, 2014)

Mit dem Einsatz von MKS zur Vorhersage der Haptik und Akustik von Drehstellern befassen sich Währisch & Wall (2012). Über ein zweidimensionales Modell (siehe Abbildung 2.15 links) wird der Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf simuliert und im zweiten Schritt optimiert (Abbildung 2.15 rechts).

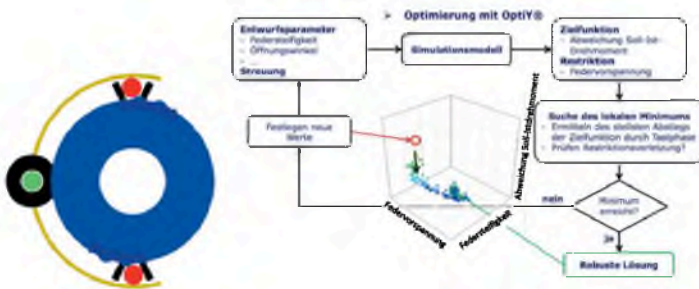


Abbildung 2.15: MKS-Modell eines Drehstellers links; Optimierungsablauf eines Drehstellers rechts; nach Währisch & Wall (2012)

2.8.2 Schaltgetriebe

Ein Vorgehen zur Kopplung des subjektiven Qualitätseindrucks der Schaltbetätigung mit objektiven Daten beschreibt Dylla (2009). Dabei ist hervorzuheben, dass ein komplexes System mit mehreren Komponenten und Bedienprozessen Gegenstand der Betrachtung ist. Zusätzlich zur Messwerterfassung an Getrieben im Gesamtfahrzeug, an Prüfständen und in Schaltsimulatoren setzt Dylla MKS zur Datenerhebung ein.

Mit dem Aufbau eines MKS-Modells von Schaltgetrieben befassen sich Davis et al. (2004). Das MKS-Modell berechnet die Schaltkraft sowie den Schaltweg über die Zeit und ist in der Lage, durch die Eingabe von Zielgrößen einen optimalen Systemzustand zu ermitteln (Davis et al., 2004).

2.8.3 Haptik eines Griffgestänges

Die Einbindung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle in eine Mehrkörpersimulation zur Analyse der Haptik eines Rollator-Gestänges wird in Gust & Mersch (2014) beschrieben. Abbildung 2.16 zeigt das zu analysierende Produktmodell sowie die Schnittstelle zum Menschen („Grip“ – „Handmodell“). Über eine Auswertung der Kontaktkraft an dieser Stelle des Griffs kann der Kraft-Weg-Verlauf, den der Mensch als Reiz über seine Sensorik

erfasst, bestimmt werden. Im Rahmen dieser Simulation wird die Auswirkung von funktionsbedingtem Spiel in den Lagerstellen auf die Haptik untersucht. Durch eine Optimierung (mit dem Ziel der Reduzierung der maximalen Verschiebung und Reaktionskraft bei der Bedienung) werden die idealen Nennmaße unter der Berücksichtigung vorgegebener Toleranzen ermittelt.

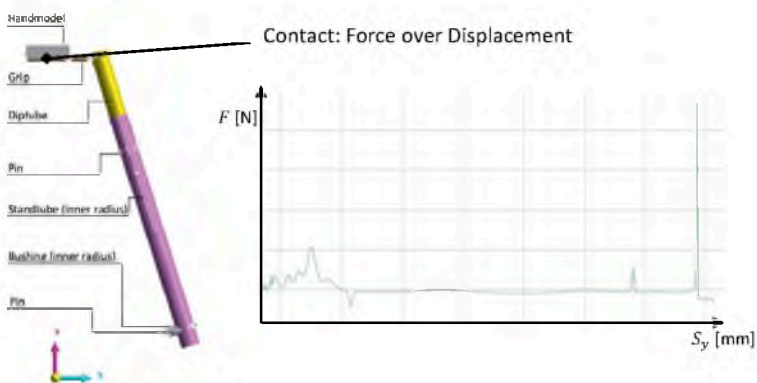


Abbildung 2.16: Mensch-Maschine-Schnittstelle in einer MKS-Simulation nach Gust & Mersch (2014)

Den Arbeitsablauf zum Aufbau und Einsatz von Simulationsmodellen zur Analyse und Optimierung der Haptik am Beispiel eines Rollators wird in Gust & Mersch (2016) beschrieben. Der Prozess ist in Abbildung 2.17 dargestellt. Vergleichbar mit der Arbeit von Gust & Mersch (2014) wird die Auswirkung von Spiel in den Lagerstellen über ein MKS-Modell berechnet und in einer numerischen Optimierung, durch die Anpassung von Toleranzen, reduziert. Die Arbeit liefert einen ersten Ansatz zur Definition von Interaktionspunkten und zur Überführung von relevanten Komponenten in ein Mehrkörpersimulationsmodell. Eine nutzerorientierte Ermittlung und Einbindung von Zielgrößen wird dabei jedoch nicht behandelt.

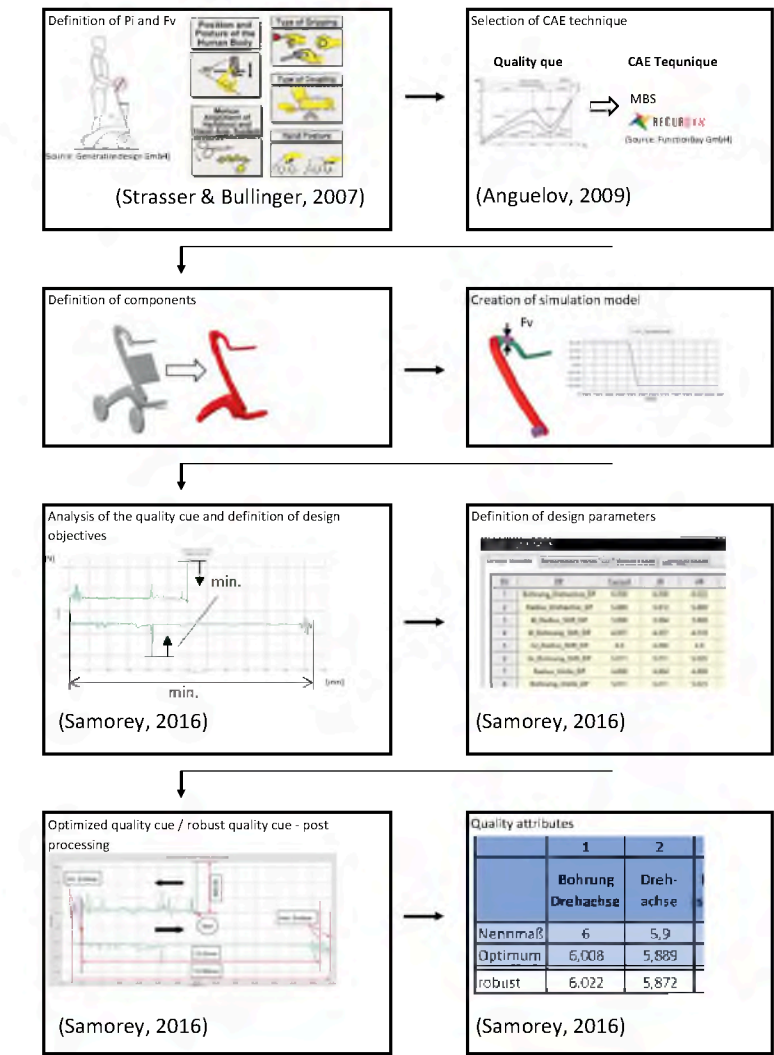


Abbildung 2.17: Vorgehen zur Analyse und Optimierung der Haptik eines Rollators nach Gust & Mersch (2016)

2.8.4 KFZ-Innenräume

Spingler (2011) prüft in seiner Arbeit die Eignung verschiedener technischer Messmittel im KFZ-Interieur-Bereich, um eine möglichst breite Datenbasis für eine Objektivierung der wahrgenommenen Qualität zu schaffen. Hierzu wird ein Roboterarm (Typ RV-6S) der Firma Mitsubishi verwendet, der mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet ist. Abbildung 2.18 gibt einen Überblick über die Eigenschaften, die mit dem Roboterarm erfasst werden können. Neben der Vermessung von haptischen Qualitätsdeskriptoren werden zusätzlich Möglichkeiten zur Erfassung optischer Qualitätsdeskriptoren betrachtet und analysiert.



Abbildung 2.18: Erfassbare Parameter der RUTH (Robotized Unit for Tactility and Haptics) nach Spingler (2011)

Wie auch Anguelov (2009) bildet Spingler (2011) anhand verschiedener Taster Regressionsmodelle, die den Einfluss der Messgrößen auf das Nutzerurteil abbilden. Neben Tastern betrachtet Spingler (2011) auch weitere Komponenten aus dem Fahrzeugbereich wie z. B. Lenkräder oder Oberflächen. Das Vorgehen zur Bildung der Wahrnehmungsfunktionen ist in Abbildung 2.19 dargestellt.

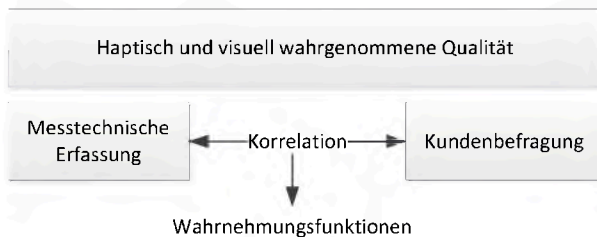


Abbildung 2.19: Vorgehen zur Objektivierung der wahrgenommenen Qualität nach Spingler (2011)

Zusätzlich analysiert Spingler (2011) die Fähigkeit der menschlichen Wahrnehmung, die Ausprägung potenzieller Qualitätsdeskriptoren zu erfassen. Die daraus hervorgehenden Regressionsmodelle werden mit Regressionsmodellen, die das subjektive Qualitätsurteil abbilden, verglichen. Hierzu nutzt Spingler die Bestimmtheitsmaße beider Modelle und trägt diese gegeneinander auf (Abbildung 2.20).

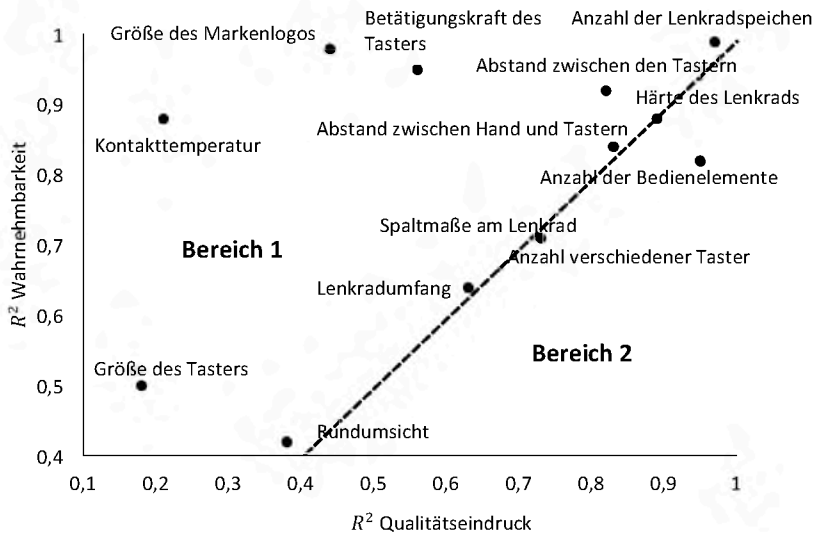


Abbildung 2.20: Relation der Bestimmtheitsmaße „Wahrnehmbarkeit“ und „Qualitätseindruck“ nach Spingler (2011)

Durch diese Form der Darstellung zeigt sich für den Bereich 1, dass die Ausprägung verschiedener Qualitätsdeskriptoren – wie z. B. die Kontakttemperatur – mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,88 deutlich wahrnehmbar ist, jedoch keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Ausprägung und Qualitätseindruck aufweist ($R^2 = 0,21$). Bereich 2 beschreibt den umgekehrten Fall. Hier ist beispielsweise die Anzahl der Bedienelemente zu nennen. Charakteristische Unterschiede werden mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,82 wahrgenommen, wobei der Qualitätseindruck ein Bestimmtheitsmaß von 0,95 aufweist. Spingler sieht den Grund für dieses Verhältnis in zusätzlichen Informationen, wie z. B. dem Design oder der Markenwahrnehmung, die einen Einfluss auf das Qualitätsurteil nehmen können (Spingler, 2011).

2.9 Zusammenfassung und Diskussion

Wie in Kapitel 2.8 dargestellt, kann die Haptik eines Produktes die Urteilsbildung des Kunden über die Wertigkeit beeinflussen. Der Stand der Forschung zeigt, dass die haptische Wahrnehmung von Qualitätsdeskriptoren mithilfe von Befragungen gemessen und über messtechnische Versuche objektiviert werden kann. Mithilfe von Parameterstudien können Anguelov (2009) und Spingler (2011) den Einfluss einzelner Konstruktionsparameter auf die haptische Wahrnehmung aufzeigen und auf Basis der durchgeführten Testreihen ein Optimum ermitteln. Durch den messtechnischen Aufwand sowie die benötigte Anzahl an Prototypen bzw. Testobjekten ist diese Herangehensweise komplex und ressourcenintensiv. Anguelov verwendete z. B. 37 verschiedene Tast- und 19 verschiedene Drehschalt-Muster für seine Versuche. Aus diesem Grund setzen z. B. Kühner (2014), Dylla (2009) und Anguelov (2009) Haptik-Simulatoren für Taster und Schaltgetriebe ein, wobei Anguelov (2009) zu dem Ergebnis kommt, dass die von ihm untersuchten Drehhaptik-Simulatoren aufgrund von begrenzten Verstellmöglichkeiten für eine valide Versuchsdurchführung nicht geeignet sind. Um den Entwicklungsprozess zu beschleunigen und Wechselwirkungen einzelner Parameter zu identifizieren, verwenden Dylla (2009) und Davis et al. (2004) Mehrkörpersimulationen zur Analyse und Optimierung der Schaltqualität. Den Einsatz einer Mehrkörpersimulation zur Vorhersage und Optimierung der Haptik von KFZ-Bedien-elementen beschreiben Währisch & Wall (2012). Dabei richten sie ihren Fokus primär auf die Analyse von Drehstellern und bilden eine Optimierungsschleife. Eine Möglichkeit zur Gewinnung der Soll- bzw. Ziel-Größen wird dabei nicht beschrieben. Jedoch – wie die Arbeit von Dylla (2009) zeigt – fallen genau in diesem Prozess Daten wie z. B. die Beschreibung der Interaktionsprozesse und die Art der Produktbelastung an. Folglich sollte diese Schnittmenge zur Erstellung des Simulationsmodells verwendet werden, um sicherzustellen, dass der Qualitätsdeskriptor optimiert wird, der vom Kunden wahrgenommen wird.

Mit Blick auf den Stand der Forschung zeigt sich zusammenfassend, dass der Einsatz von Simulationsmodellen – durch die Möglichkeit zur Analyse von Wechselwirkungen der Konstruktionsparameter – zu einer Reduzierung an Produktmustern beitragen kann. Allerdings wird kein ganzheitliches Verfahren von der Zielgrößenermittlung bis zur simulationsgestützten Optimierung der Produkthaptik beschrieben. Ferner richten sich die meisten Arbeiten an konkrete Themenstellungen aus dem KFZ-Bereich, wie z. B. Schaltgetriebe oder Drehtaster, sodass eine Übertragbarkeit auf andere Bereiche nicht sichergestellt ist.

Daher bedarf es eines durchgängigen, produktgruppenübergreifenden Verfahrens zur Optimierung der Haptik, welches von Beginn an auf den Einsatz von Simulationstechnik ausgelegt ist und abzielt.

Ein weiterer Aspekt, der für den Einsatz von Simulationstechnik relevant ist, ist die Erfassung von objektiven Belastungsdaten. Diese werden bei der Objektivierung der haptischen Wahrnehmung in Spingler (2011) und Anguelov (2009) nicht erfasst. Anguelov, (2009), bezieht sich beispielsweise auf die Regeln der Produktgestaltung nach Bullinger (1994) und auf Daten aus einem Vorversuch, berücksichtigt jedoch nicht die auftretenden Belastungen während der Nutzerbefragung. Infolgedessen können die Interaktionsvorgänge nicht objektiv betrachtet werden, was die Arbeit von Gust et al. (2016) im Falle eines handgeführten Werkzeugs aufzeigt. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit zusätzlich eine Lösung erarbeitet, die der objektiven Belastungsanalyse dient.

Zur Sicherstellung von Anwendbarkeit und Effektivität wird das Verfahren beispielhaft an einem Produkt erprobt und validiert, welches in bisherigen Forschungsarbeiten noch nicht behandelt wurde. Darüber hinaus werden – im Vergleich zur bisherigen Forschung – neben der MKS auch FEM-Berechnungen in das Verfahren integriert und eingesetzt. Für eine fundierte Diskussionsgrundlage werden zusätzlich Ergebnisse aus der Anwendung des Verfahrens vorgestellt.

3 Handsystem zur Erfassung der Belastungskollektive

Entsprechend Abbildung 3.1 entstehen beim Ertasten oder Bedienen eines Produktes Kräfte, die in Form von Vektoren beschrieben werden können. Die Bestimmung dieser Kräfte kann über eine Abschätzung mithilfe des Verfahrens von Bullinger (1994) über Tabellenwerte und über eine Messung erfolgen.

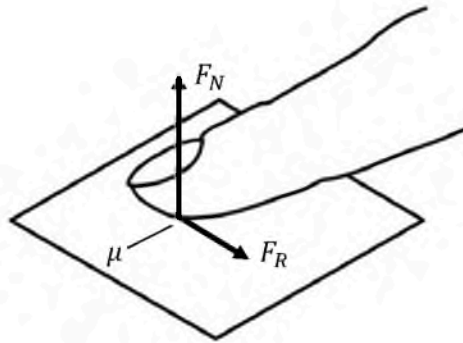


Abbildung 3.1: Kräfte zwischen Fingerbeere und Produkt, in Anlehnung an Kern et al. (2009)

Für die vollständige Beschreibung eines Vektors werden die Größe und die Richtung benötigt. Zur Bestimmung der Richtung kann ein hierarchisches Analyseverfahren nach Bulfinger (1994) verwendet werden. Hierbei wird in einem ersten Schritt die BediENAufgabe beschrieben. In einem zweiten Schritt werden Körperstellung, Bewegungsmöglichkeiten des Hand-Arm-Systems sowie die Bewegungszuordnung des Bedienteils zum Hand-Arm-System analysiert. Schritt drei definiert die Greifart und die Handhabung, sodass im vierten Schritt die Analyse der Kraftübertragung durch die Kopplungsart erfolgen kann (Bulfinger, 1994). Da es sich hierbei um ein rein beobachtendes Verfahren handelt, basieren diese Annahmen auf Schätzungen und/oder Tabellenwerten (siehe Kapitel 2.6). Um die Annahmen zu konkretisieren und eine genaue Angabe über die Größe des Vektors zu treffen, wird ein Handschuhsystem verwendet, das in der Lage ist, die Kräfte zwischen Hand und Produkt zu erfassen. Zur objektiven Belastungsermittlung soll das System die Interaktion zwischen Nutzer und Produkt bzw. Testobjekt während einer Testsituation / einer Nutzerbefragung erfassen, sodass über einen definierten Zeitraum die Handlungsszenarien objektiv bestimmt werden können. Das mit dem Handsystem erfasste Belastungskollektiv dient somit dem Aufbau zur Vermessung der Testobjekte und dem Aufbau des Simulationsmodells (Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4).

3.1 Sensorische Kraftmesssysteme

Bei der Analyse von handgeführten Produkten werden primär Handschuhsysteme eingesetzt, die mit Kraft- bzw. Drucksensoren ausgestattet sind. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft vier Sensor-Handschuhe, die eine Kraftmessung ermöglichen.



(Nikonovas et al., 2004)



(Lowe et al., 2006)



(Tekscan, 2017)



(Gust et al., 2016)

Abbildung 3.2: Verschiedene Sensorhandschuhe zur Kraftmessung

Ein Beispiel für den Einsatz solcher Kraftmesshandschuhe in der Entwicklung von Power-Tools wird in Matthiesen et al. (2016) beschrieben. Das Verhalten des Nutzers wird – wie in Abbildung 3.3 dargestellt – in die Tätigkeiten 1 bis n eingeteilt, die im folgenden Schritt auf die Haltung und schließlich auf Interaktionskräfte hin analysiert werden. Die generierten Daten dienen den Entwicklern als objektive Grundlage für die Optimierung der Produktergonomie.



Abbildung 3.3: Identifikation des Nutzerverhaltens (Matthiesen et al., 2016)

3.2 Verwendetes System

Die Anforderungen, die an den Sensorhandschuh gestellt werden, ergeben sich durch den breiten Verwendungsbereich des in dieser Arbeit zu entwickelnden Verfahrens. So soll gewährleistet sein, dass unterschiedliche Produkte (wie z. B. Handwerkzeuge, Notebookgehäuse, Staubsauger usw.) und Produktnutzungsszenarien behandelt werden können. Da der Sensorhandschuh im Rahmen von Nutzerbefragungen an mehreren Testpersonen eingesetzt werden soll, ist eine einfache und zeitsparende Handhabung erforderlich. Aus diesem Grund soll das Handschuhsystem kabellos betrieben werden und autark, ohne einen zusätzlichen Computer, bedienbar sein. Die Datenerfassung muss über einen Zeitraum von bis zu 5 Minuten erfolgen, um auch längere Interaktionsvorgänge zu erfassen. Zusätzlich muss der Zeitpunkt für jeden Messwert gespeichert werden, sodass über eine parallele Videoauswertung die einzelnen Lastkollektive zuzuordnen sind. Der in dieser Arbeit verwendete und von Odendahl (2017) entwickelte Handschuh ist in Abbildung 3.4 dargestellt.



Abbildung 3.4: Sensorhandschuh zur Bestimmung von Lastkollektiven (Odendahl, 2017)

Die Datenaufzeichnung der 21 FSR²-Sensoren – in Relation zur fortlaufenden Messzeit – erfolgt über einen Raspberry Pi 3B. Da die Sensoren 21 analoge Kanäle zur Ansteuerung benötigen, wird der Raspberry Pi um einen Analog-Digital-Wandler, bestehend aus drei Micro-Controllern, erweitert. Die Stromversorgung übernimmt ein Akkumulator, der ebenso wie alle anderen Komponenten über ein Band am Arm der Testperson befestigt werden kann (siehe Abbildung 3.6). Die Anordnung der Sensoren entspricht den Handbereichen aus der Bodymap nach Corlett & Bishop (1976) und kann dem Anhang entnommen werden. Die Bedienung des Handschuhs erfolgt ausschließlich über einen Taster, über den die Datenaufzeichnung gestartet und nach der Messung beendet wird. Die Messdaten werden auf dem Raspberry Pi gespeichert und können nach dem Beenden der Messungen ausgewertet werden. Abbildung 3.5 zeigt die einzelnen Komponenten, die für den autarken Betrieb des Handschuhs notwendig sind.

² Force Sensing Resistor.

3 Handsystem zur Erfassung der Belastungskollektive

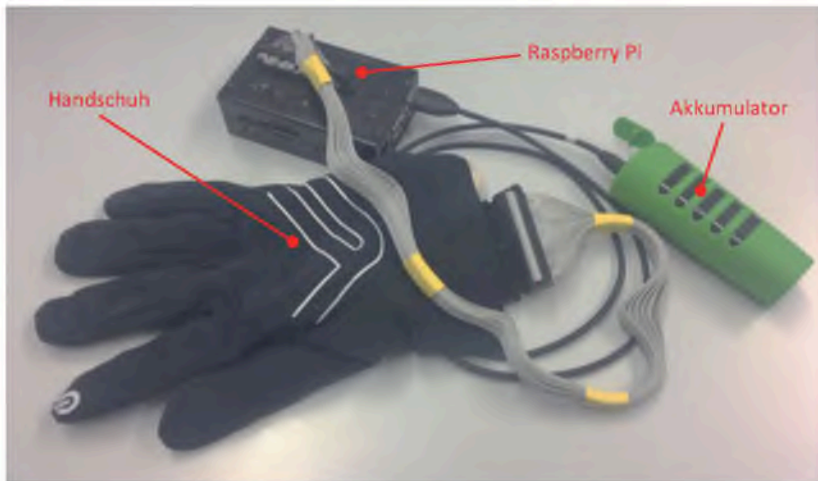


Abbildung 3.5: Komponenten des Handschuhsystems



Abbildung 3.6: Handschuh im messbereiten Zustand

4 Entwicklung eines Verfahrens zur numerischen Analyse und Optimierung der Produkthaptik

In diesem Kapitel wird die Entwicklung eines Verfahrensablaufs zur Optimierung der Haptik von beliebigen³ Produkten beschrieben. Der Ablauf stellt eine Prozessanweisung von der systematischen Objektivierung des Nutzerempfindens bis hin zur simulationsbasierten Optimierung dar. Im Anschluss daran wird in Kapitel 5 das Verfahren an einem Produktbeispiel exemplarisch durchgeführt und validiert.

Zur Gewährleistung einer allgemeinen Anwendbarkeit ist der Ablauf, der auf sechs einzelnen Prozessen basiert, entsprechend dem aktuellen Stand der Technik aufgebaut. Somit werden z. B. alle Schritte zur Modellbildung nach Meywerk (2007) berücksichtigt und durchlaufen. Zusätzlich werden mögliche Anknüpfungspunkte für Dokumente aus dem Produktentwicklungsprozess, wie z. B. die Funktionsstruktur nach 2221 (1993) herausgearbeitet. Hierdurch wird insbesondere der Anwendbarkeit in der Praxis Rechnung getragen. Ferner ist der Prozess so aufgebaut, dass Methoden aus dem Bereich der virtuellen Realität (VR) integriert werden können. Die Gesamtansicht des Workflows ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Verwendung von Daten und Dokumenten aus der Produktentwicklung wird auf der Teilprozessebene in den darauf folgenden Kapiteln erläutert.

Die zentrale Problemstellung für den Einsatz des Verfahrensablaufs ist die richtige Auswahl von konstruktiven Größen, die dem Nutzer bzw. Kunden einen qualitativ hochwertigen Eindruck vermitteln. Das Verfahren startet – bezogen auf den Entwicklungsprozess nach 2221 (1993) – in der Phase der Konzeptbildung, in der die ersten Lösungen in Form von Komponenten und deren Wechselwirkungen vorliegen. Eine weitere Möglichkeit zum

³ Zum Beispiel Werkzeuge, weiße Ware, Unterhaltungselektronik etc.

4 Entwicklung eines Verfahrens zur numerischen Analyse und Optimierung der Produkthaptik

Einsatz des Verfahrens ist z. B. eine Produktüberarbeitung im Rahmen eines Produkt-Reviews.

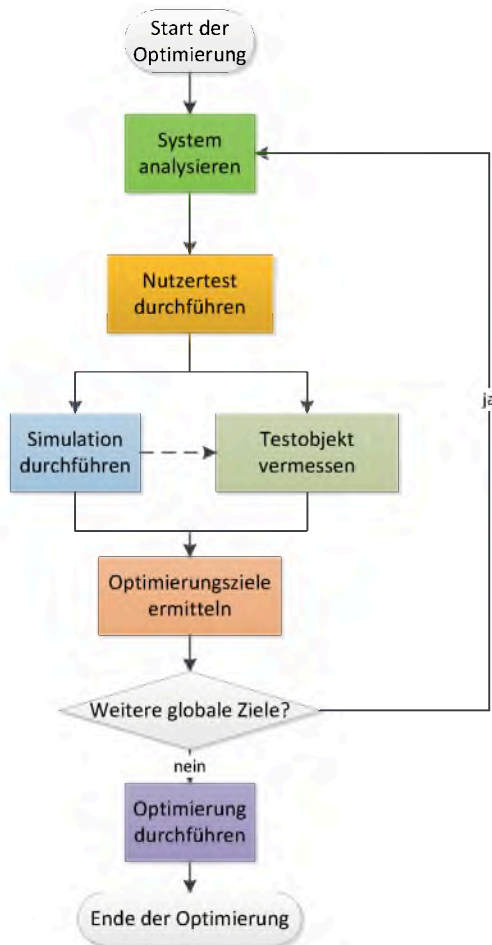


Abbildung 4.1: Gesamtübersicht des Verfahrens

4.1 System analysieren

Durch die Analyse des Systems werden die Randbedingungen und Ziele festgelegt, die durch den Optimierungsprozess erreicht werden sollen. Der Prozess startet mit der Zieldefinition, die u. a. Auskunft über das Produkt (Produktart, Neuentwicklung, bestehendes Produkt etc.) gibt. In Anlehnung an das Ebenenmodell von Falk et al. (2010) (siehe Kapitel 2.1) werden durch die Abgrenzung des Systems Baugruppen sowie Mensch-Maschine-Schnittstellen festgelegt und damit der Anwendungsbereich des Verfahrens bestimmt. Bezogen auf die Relevanz für den Nutzer werden innerhalb dieser Grenzen Komponenten ermittelt, die für eine Optimierung infrage kommen. Das sind zum einen Komponenten, mit denen der Nutzer direkt haptisch interagiert, und zum anderen Komponenten, die am Kraftfluss der Interaktion beteiligt sind. Diese werden ebenfalls mit in das zu betrachtende System aufgenommen. Als Auswahlhilfe können beispielsweise Funktionsstrukturen oder das House of Quality eingesetzt werden. Ebenso eignen sich Daten aus Nutzerbeobachtungen und vorangegangenen Ergonomie-Studien (siehe Matthiesen et al., 2016). Der Ablauf ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

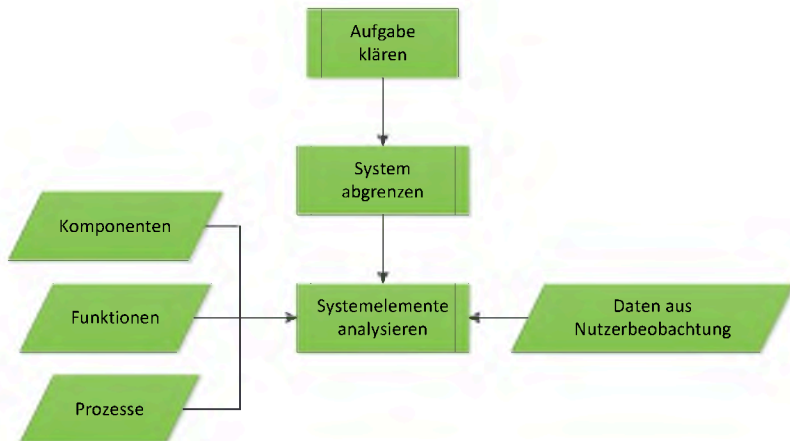


Abbildung 4.2: Ablauf der Systemanalyse

4.2 Nutzertest durchführen

Nach der Wahl der entsprechenden Komponente bzw. Baugruppe wird der zu optimierende, potenzielle Qualitätsdeskriptor definiert (z. B. Wärmeleitfähigkeit, Kraft-Weg-Verlauf etc.). Auf Basis dieser Daten werden im Anschluss Testobjekte ausgewählt und für die darauf folgende Nutzerbefragung vorbereitet (siehe Abbildung 4.4). Geeignete Muster sind sowohl Prototypen, die auf Konzeptideen basieren, als auch Produkte, die bereits auf dem Markt verfügbar sind.

Bei der Vorbereitung ist darauf zu achten, dass im Idealfall lediglich der zu untersuchende Qualitätsdeskriptor variiert. Sonst ist es möglich, dass, abhängig vom Versuchsaufbau, die Gütekriterien der Befragung nicht erfüllt sind (siehe Kapitel 2.3). Ferner ist darauf zu achten, dass die Ausprägung des Qualitätsdeskriptors der einzelnen Muster so variiert, dass ein ausreichend breites, möglichst gleichmäßig gestuftes Ausprägungsfeld untersucht wird. Wie die Arbeit von Spingler (2011) zeigt, ist das Verhältnis zwischen der Anzahl an Mustern und der Stufung des Ausprägungsfelds ein maßgeblicher Punkt für die Qualität und Aussagekraft des Regressionsmodells. Dieser Effekt wird in Abbildung 4.3 verdeutlicht. So kann z. B. die inhomogene Verteilung der Taster (blaue Punkte) über die Breite des Ausprägungsfelds (Maximalkraft) einen Einfluss auf das relativ geringe Bestimmtheitsmaß von ca. 0,56 haben (in Relation zu anderen Regressionsmodellen aus Spingler, 2011).

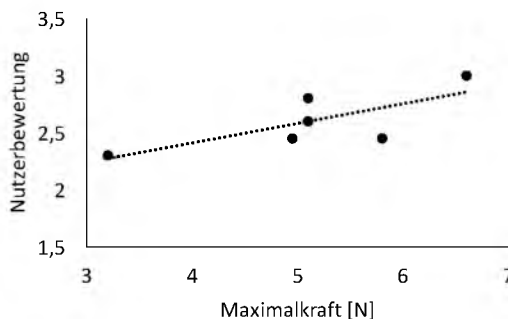


Abbildung 4.3: Regression von Nutzerbewertung zur Betätigungskraft von Tastern nach Spingler (2011)

Die Nutzergruppe repräsentiert die Stichprobe aus einer Zielpopulation, die die Gruppe der Kunden sowie die Gruppe der potenziellen Käufer beinhalten sollte. Das Ziel des Fragebogens ist die Bezifferung des wahrgenommenen Eindrucks über die jeweilige Ausprägung des Qualitätsdeskriptors. Die Ergebnisse dienen als Datenbasis für die Objektivierung der Nutzerwahrnehmung. Aufgrund der statistischen Auswertbarkeit werden die Items⁴ über eine Kardinalskala gemessen (vgl. Döring & Bortz, 2016).

Während der Nutzerbefragung wird die Handhabung der Muster durch die Testperson erfasst. Der Einsatz von Handschuhsystemen zur objektiven Messung von Lastkollektiven ist aufgrund der geringeren Streuung den subjektiven Verfahren vorzuziehen (vgl. Gust et al., 2016). Im Rahmen der Analyse der Lastkollektive können durch den Abgleich des Videomaterials und der gemessenen Daten die hauptsächlich vorliegenden Belastungen bestimmt werden. Da es durch den Handschuh zu einer Desensibilisierung der Wahrnehmung kommen kann, sollte die Handschuhmessung nur mit einer Teilmenge der Testpersonen durchgeführt werden. Die Befragungsergebnisse dieser Gruppe sind aus der Auswertung der Befragung auszuschließen.

Durch die Auswertung der Testergebnisse ist es an dieser Stelle bereits möglich, Zusammenhänge zwischen dem zu untersuchenden, potenziellen Qualitätsdeskriptor und der Qualitätswahrnehmung der Probanden zu identifizieren. Sollte dies nicht der Fall sein, gilt es, weitere potenzielle Qualitätsdeskriptoren zu identifizieren und zu prüfen.

⁴ Aufgaben eines Tests (Moosbrugger & Kevala, 2012).

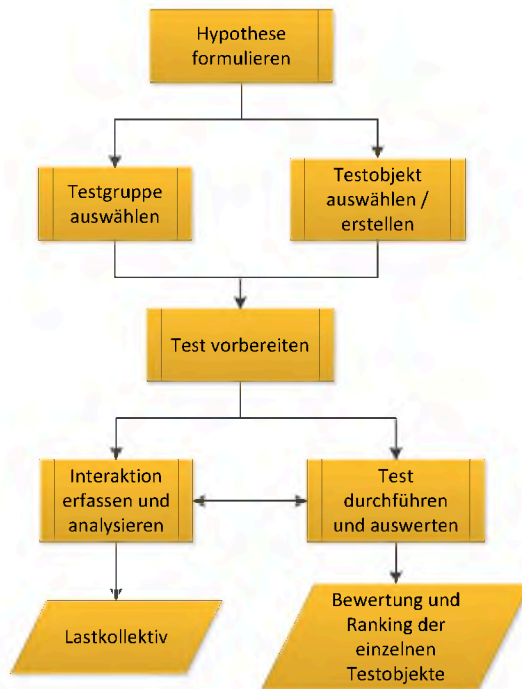


Abbildung 4.4: Ablauf zur Durchführung der Nutzertests

4.3 Testobjekte vermessen

Der Ablauf zur Vermessung der Testobjekte ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Ausgehend vom ausgewählten Qualitätsdeskriptor und dem zuvor bestimmten Lastkollektiv wird das geeignete Messverfahren ausgewählt. Der Messaufbau für die Vermessung der einzelnen Muster leitet sich ebenfalls vom Lastkollektiv ab, sodass sichergestellt ist, dass die Ausprägung des Qualitätsdeskriptors ermittelt wird, welche die Testperson bei der Befragung wahrgenommen hat.

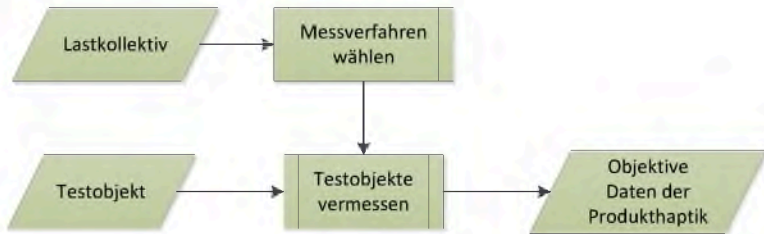


Abbildung 4.5: Ablauf der Messung

4.4 Simulation durchführen

Zu Beginn dieses Prozessschrittes muss – in Abhängigkeit von der Art der Belastung, des Qualitätsdeskriptors, der Art und Form der Komponenten und der Designparameter – das geeignete Simulationsmodell gewählt werden (Abbildung 4.6). Tabelle 4.1 bietet einen Überblick über gängige CAE-Techniken und die damit ermittelbaren, potenziellen Deskriptoren. Abhängig von der verwendeten Softwarelösung besteht zusätzlich die Möglichkeit, verschiedene Techniken miteinander zu kombinieren (vgl. z. B. FunctionBay, 2017). Durch eine solche hybride Lösung ist es möglich, neben der Berechnung des kinematischen Kraft-Weg-Verhaltens auch den Einfluss von Bauteilverformungen auf den Kraft-Weg-Verlauf zu berücksichtigen.

Tabelle 4.1: CAE-Techniken und ihre spezifischen Qualitätsdeskriptoren, aufbauend auf Gust & Mersch (2016), basierend auf Eigner (2014)

CAE - Technik	Ermittelbare Qualitätsdeskriptoren	Designparameter	Wahrnehmungskanal
MKS	Kinematik: Kraft-Weg-Verhalten, Drehmoment-Winkel-Verhalten Schwingungen	Form, Materialeigenschaften, Toleranzen	Haptik, Optik
FEM	Verformung: Kraft-Weg-Verhalten Wärmeleitung Schallpegel und Frequenz	Form, Materialeigenschaften, Toleranzen	Haptik, Optik, Akustik
CAD	Formgebung, Reflektionen, Spaltmaße, Oberflächenbeschaffenheit, Farben	Form, Materialeigenschaften, Toleranzen	Optik

Nach den – im ersten Prozessschritt – ermittelten Interaktionspunkten und Kräften müssen Komponenten bestimmt werden, die einen Einfluss auf die Haptik am Interaktionspunkt haben. Hierbei ist es hilfreich, anhand der Systemstruktur den Kraftfluss zu betrachten. Weiterer Input für den Aufbau des Simulationsmodells ist eine Liste mit Konstruktionsdaten wie z. B. Materialkennwerten, Federsteifigkeiten oder Dämpfungskonstanten. Gemäß der ausgewählten CAE-Technik und den ermittelten Daten werden im Anschluss daran das CAD-Modell und das Lastkollektiv diskretisiert. Parallel dazu erfolgt die Modellierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Hierzu wird das menschliche Körperteil, wel-

ches mit dem Produkt interagiert und die Kraft einleitet, als Komponente dem Simulationsmodell hinzugefügt und mit einer Kraft oder Verschiebung beaufschlagt. Über diese Kontaktstelle ist es in der Simulation möglich, die Kontaktsituation detailliert zu betrachten und z. B. auch Scherkräfte zwischen dem Produkt und der Haut zu berechnen.

Um das Modell für die Optimierung nutzbar zu machen, werden unter Beachtung der Produktanforderungen die Designfreiheitsgrade in Form von einzelnen Designparametern definiert (siehe Tabelle 4.1). Die Designparameter sind somit die im Rahmen der Optimierung zu verändernden konstruktiven Stellgrößen.

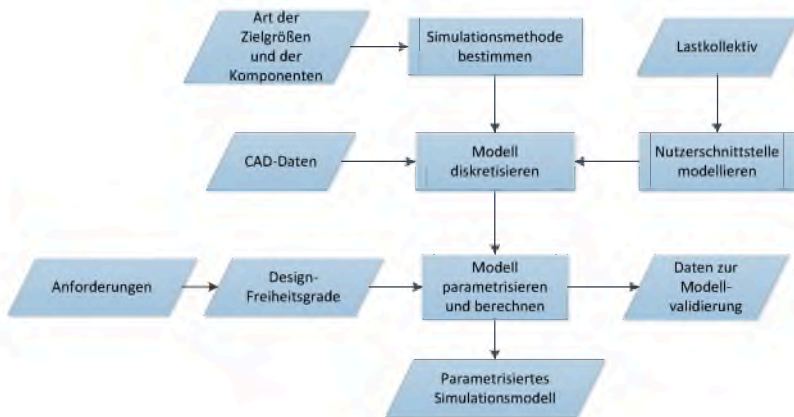


Abbildung 4.6: Ablauf zur Durchführung der Simulation

4.5 Optimierungsziele ermitteln

In einer ersten Analyse der Daten werden die Bewertungsergebnisse (Kapitel 4.2) den Messdaten (Kapitel 4.3) und bzw. oder den Simulationsdaten (Kapitel 4.4) gegenübergestellt. Mithilfe von Regressionsanalysen werden im nächsten Schritt Zusammenhänge identifiziert. Dabei ist das entsprechende Bestimmtheitsmaß R^2 zu beachten. Zeichnet sich durch das Regressionsmodell ein spezifischer Zusammenhang der Daten ab, handelt

es sich bei der untersuchten Eigenschaft um einen Qualitätsdeskriptor. Die Literatur im Bereich der empirischen Forschung liefert keine einheitlichen Vorgaben zur Interpretation des Bestimmtheitsmaßes. Eine Zusammenfassung verschiedener Interpretationen liefert Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2: Übersicht zur Interpretation von Bestimmtheitsmaßen nach Fazel (2014)

R^2	Interpretation	Quelle
$\geq 0,19$	schwach	(Chin, 1998)
$\geq 0,33$	moderat	
$\geq 0,67$	substanziell	
$\geq 0,1$	hinreichend	(Falk & Miller, 1992)
$\geq 0,3$	Mindestanforderung	(Hulland, 1999, Huber et al., 2007, Henseler et al., 2009)

Die Ermittlung der Zielgrößen wird anhand der Ausprägung des Regressionsmodells durchgeführt. In Anbetracht der Charakteristik, der Anforderungen, aber auch der Toleranzen gilt es, das Optimum zu definieren. Der Ablauf ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

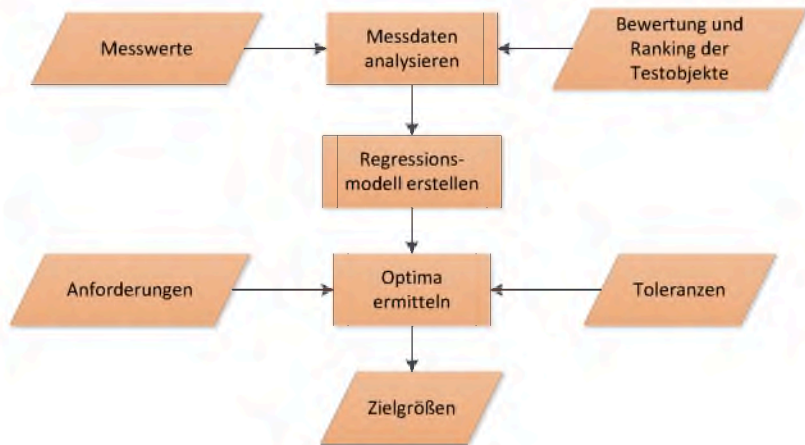


Abbildung 4.7: Optimierungsziele ermitteln

4.6 Optimierung durchführen

In einem ersten Schritt werden – anhand von definierten Anforderungen (z. B. Grenzmaßen und Mindestmaßen zu anderen Bauteilen oder Topologien) – die Optimierungsräume der Designparameter bestimmt. Im Anschluss daran folgt, basierend auf den Zielgrößen, die Erstellung von Response-Parametern. Diese müssen in der Lage sein, die Ausprägung des Qualitätsdeskriptors abzubilden, sodass über einen Soll-Ist-Vergleich der Grad der Zielerreichung geprüft werden kann. Neben weiteren Qualitätsdeskriptoren können an dieser Stelle auch Response-Parameter wie z. B. die Masse oder die Spannung als zusätzliche Zielgrößen der Optimierung hinzugefügt werden.

Über die Festlegung des DOE⁵-Schemas wird – in Abhängigkeit von den Wirkzusammenhängen der einzelnen Design- und Response-Parameter und der Anzahl an Stichproben –

⁵ Design of Experiments.

die Qualität der Optimierung definiert. Unter Berücksichtigung eines ausreichend hohen Bestimmtheitsmaßes des Regressionsmodells werden durch die Optimierung die idealen Designparameter ermittelt. Nach Will et al. (2006) ist für die Bildung von Regressionsmodellen zur Beschreibung physikalischer Zusammenhänge ein Bestimmtheitsmaß $> 80\%$ als akzeptabel und $> 90\%$ als hoch anzusehen. Im Falle von nicht linearen Wirkzusammenhängen zwischen Designparametern und Response-Parametern kann an dieser Stelle auch eine Robustheitsoptimierung durchgeführt werden.

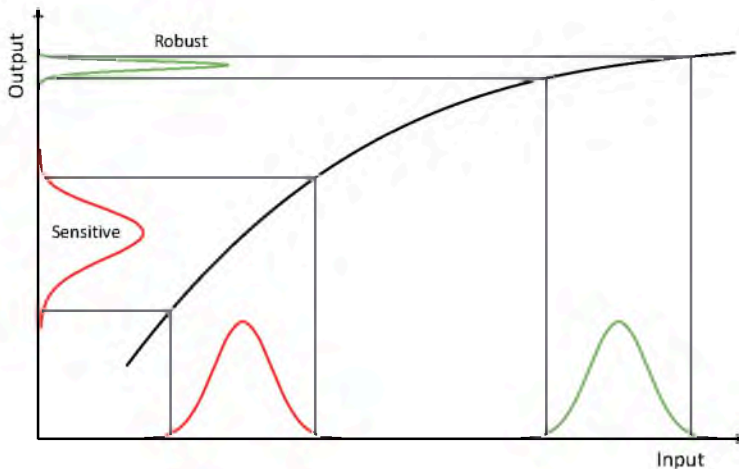


Abbildung 4.8: Ausnutzung nicht linearer Zusammenhänge durch Robust Design nach Taylor (2017)

Wie in Abbildung 4.8 zu erkennen, zeigen sich robuste Systeme unempfindlicher gegenüber sich verändernden Designparametern, die z. B. durch produktionsbedingte Einflüsse entstehen können. Dies ist somit – neben der Gestaltung einer „robusten Wahrnehmung“ (siehe Kapitel 5.5) – eine weitere Möglichkeit, die Haptik des Produktes robust auszugestalten. Im Konstruktionsprozess ist an dieser Stelle abzuwägen, welcher dieser Ansätze (oder eine Kombination aus beiden) gewählt wird. Nach der Validierung des optimierten Produktes kann der ermittelte Satz an Designparametern in den weiteren Prozess der Produktentwicklung einfließen. Der Prozessablauf ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

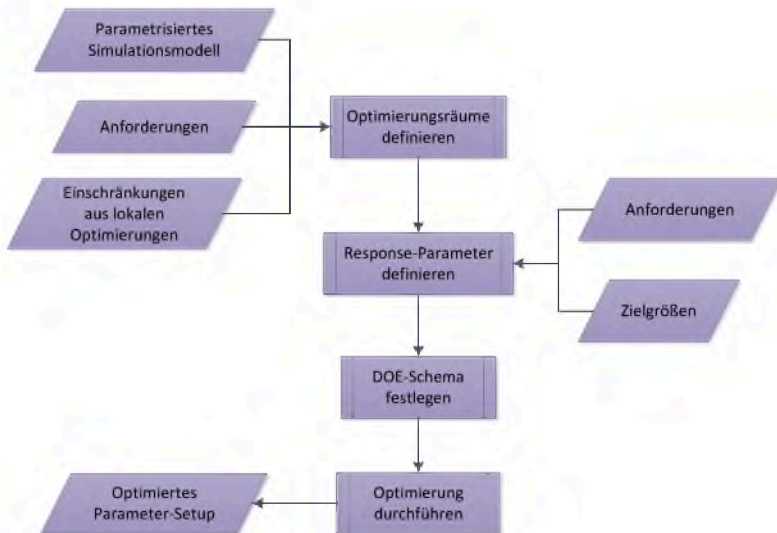


Abbildung 4.9: Ablauf zur Durchführung der Optimierung

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Gesamt- und Teilprozesse des Verfahrens durchlaufen und exemplarisch an einem Handygehäuse beschrieben. Zusätzlich dient das Beispiel der Validierung des Verfahrens.

5 Erprobung des Verfahrens am Beispiel eines Handygehäuses

Dieses Kapitel dient der anwendungsorientierten Beschreibung, Erprobung und Validierung des in Kapitel 4 vorgestellten Verfahrensablaufs. Aus diesem Grund wird ein möglichst bekanntes und anschauliches Produkt gewählt, bei dem ein großer Einfluss der Haptik auf das Urteil der Nutzerinnen und Nutzer zu erwarten ist. Zusammengefasst werden folgende Anforderungen an das Produkt definiert:

- Möglichst bekanntes und weit verbreitetes Produkt mit Mensch-Maschine-Schnittstelle
- Baugruppe mit einer möglichst geringen Anzahl an Bauteilen und Kontaktstellen zur Reduktion der Berechnungszeit und Umsetzbarkeit im Musterbau
- Durchführbarkeit von messtechnischen Analysen an einem linearen Kraft-Weg-Prüfstand

Mit über eine Milliarde⁶ verkaufter Geräte wird das iPhone ausgewählt (siehe Abbildung 5.1).



Abbildung 5.1: iPhone 4s in drei Ansichten

⁶ apple.com (2017).

Aufgrund des Bedienkonzepts des iPhones ist besonders das Gehäuse ein geeignetes Anwendungsbeispiel. Wie in Spiegel (2014) berichtet, ziehen Nutzerinnen und Nutzer die Steifigkeit zur Bildung eines Qualitätsurteils heran (Stichwort „Bendtest“). Daher soll mithilfe des zuvor vorgestellten Verfahrens der Einfluss der konstruktiven Auslegung des Gehäuses auf das Werturteil der Nutzerinnen und Nutzer analysiert und im Anschluss daran auf ein optimales Maß geändert werden.

Die Reihenfolge der folgenden Kapitel entspricht dem Verfahrensablauf in der Gesamtansicht (siehe Abbildung 4.1). Innerhalb der Kapitel werden die jeweiligen Teilprozesse des Verfahrens chronologisch durchgeführt und beschrieben.

5.1 System analysieren

Aufgabe klären

Die Optimierungsaufgabe liegt in der Ermittlung der vom Nutzer bzw. Kunden als optimal empfundenen Stabilität des Handygehäuses. Um die Anschaulichkeit der Verfahrensanwendung zu erhöhen, wird angenommen, dass es sich um eine Neuentwicklung handelt. Die Form des Gehäuses entspricht der des zuvor vorgestellten iPhone 4s aus Abbildung 5.1.

System abgrenzen

Die Komponenten, mit denen der Nutzer interagieren kann, sind zwei Deckel (Ober- und Unterseite) sowie der Rahmen des Handys. Weitere Bedienelemente wie z. B. die Taster zur Steuerung der Lautstärke werden aufgrund ihrer Funktion aus dem Prozess der Optimierung ausgeschlossen.

Systemelemente analysieren

Zur Analyse der einzelnen Systemelemente wird mit drei Probanden ein Pretest durchgeführt. Hierbei handelt es sich um einen Vorversuch, der der Beobachtung der Probanden in einer ähnlichen Testsituation dient. In dieser Situation wird festgestellt, dass neben dem typischen 5-Finger-Zufassungsgriff ein beidhändig ausgeführter Zufassungsgriff mit

gegenübergestelltem Daumen zur Exploration und Bewertung des Handygehäuses verwendet wird. Ferner wird beobachtet, dass Probanden teilweise Hinweise benötigen, um den Fokus auf den zu messenden Parameter zu lenken.

5.2 Nutzertest durchführen

Hypothese formulieren

Anhand der in Kapitel 5.1 festgelegten Aufgabe werden folgende Hypothesen formuliert:

Hypothese 1: Die Steifigkeit des Handygehäuses hat einen Einfluss auf die wahrgenommene Wertigkeit.

Hypothese 2: Je steifer das Gehäuse ist, desto höher das Wertigkeitsurteil.

Testobjekt wählen und vorbereiten

Für den Test werden fünf verschiedene Handygehäuse als Versuchsobjekte verwendet, die sich in dem zu untersuchenden Parameter bzw. Qualitätsdeskriptor unterscheiden – in diesem Fall in der Steifigkeit der Gehäuse. Hierzu werden die einzelnen Gehäusedeckel so gestaltet, dass sie über unterschiedliche Flächenwiderstandsmomente verfügen. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass es durch die Verformung der Deckel unter Last zu einzelnen Kontakten kommt, wodurch zusätzlich Unterschiede im Verformungsverhalten entstehen. Abbildung 5.2 beschreibt schematisch den Aufbau der Gehäuse in der Schnittansicht.

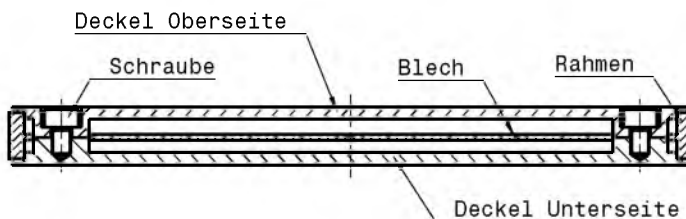


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung des Gehäuseaufbaus in der Schnittansicht

Jedes Gehäuse besteht aus einem Edelstahlrahmen, einer Ober- und einer Unterseite (Deckelpaar), vier M3-Schrauben und einer Klebefolie zur Erzeugung einer identischen Optik (siehe Abbildung 5.3).

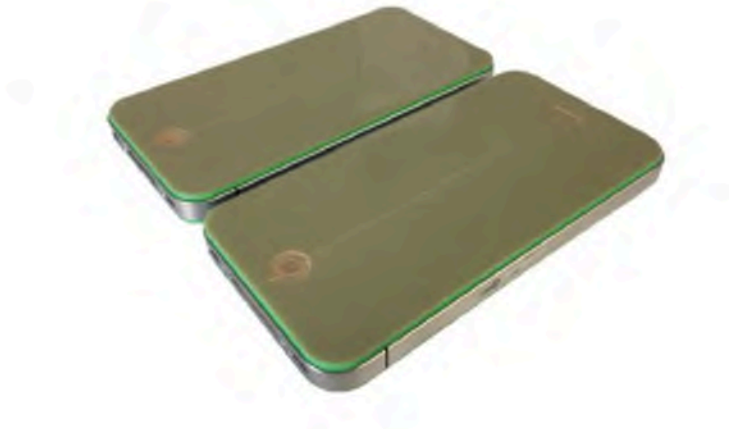


Abbildung 5.3: Gehäuse 1 und Gehäuse 3 im Vergleich

Die Deckel werden durch einen FDM⁷-Druck hergestellt und bestehen aus ABS-Kunststoff. Gewichtsunterschiede der einzelnen Gehäuse werden durch Ausgleichsgewichte, die sich im Inneren des Gehäuses befinden, kompensiert. Abbildung 5.4 zeigt die unterschiedliche Gestaltung der einzelnen Deckelpaare im CAD.

⁷ Fused Deposition Modeling.

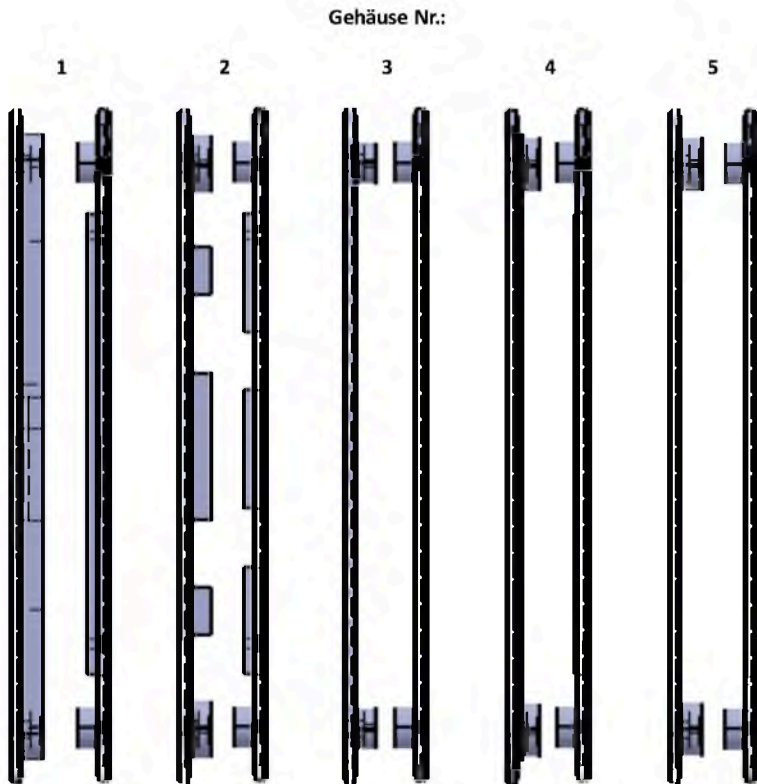


Abbildung 5.4: Gestaltung der Deckelpaare. Links – Deckel Unterseite, rechts – Deckel Oberseite

Testgruppe auswählen

Die Testgruppe besteht aus 5 weiblichen und 8 männlichen Probanden, die vorwiegend einen technischen Hintergrund haben.

Test vorbereiten

Um den Fragebogen einfach zu halten, wird eine 1-Item-Skala verwendet, sodass nur ein Kriterium entsprechend einer vorgegebenen Skala zu bewerten ist. Um eine analytische Gewichtung der Item-Ausprägung zu ermöglichen, wird das Item über eine Ratingskala abgefragt (siehe Abbildung 5.5). Zur Sicherstellung der Objektivität erhält die Probandin bzw. der Proband eine einleitende Instruktion durch den Leiter der Befragung. Die Instruktion sieht vor, dass jede Probandin / jeder Proband darauf hingewiesen wird, dass es sich bei den Handys um fünf optisch identische Geräte handelt. Die Probandin bzw. der Proband darf diese 5 Minuten lang testen und miteinander vergleichen. Dabei soll insbesondere die Aufmerksamkeit auf die Stabilität der Gehäuse gerichtet werden. Darüber hinaus soll den Probanden die Aufgabe in Verbindung mit der Skala vorgestellt werden, die sie nach Ablauf der Zeit für jedes Gehäuse beantworten müssen. Die metrische Skalierung in Kombination mit der ausformulierten Beschreibung soll dem besseren Verständnis dienen und entspricht der von Anguelov (2009) verwendeten Bewertungsskala.

Wie hochwertig finden Sie die Gehäuse? (In Relation zueinander)	Sehr minderwertig	Ziemlich minderwertig	Eher minderwertig	Weder noch	Eher hochwertig	Ziemlich hochwertig	Sehr hochwertig
	-3	-2	-1	0	1	2	3
Gehäuse 1							
Gehäuse 2							
Gehäuse 3							
Gehäuse 4							
Gehäuse 5							

Abbildung 5.5: Fragebogen

Zur Sicherstellung der Validität wird die Testperson anschließend über die Beweggründe ihres Urteils befragt. Stehen diese im Zusammenhang mit dem Testkonstrukt, wird die Untersuchung als valide betrachtet. Steht die Begründung in keinem Zusammenhang mit dem Testkonstrukt, gilt die Befragung als nicht valide und findet in der Auswertung keine Berücksichtigung.

Test durchführen und auswerten

Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse aus der Befragung von 10 Testpersonen inklusive der arithmetischen Mittelwerte und der Standardabweichungen.

Wie hochwertig finden Sie die Gehäuse? (In Relation zueinander)	Sehr minderwertig	Ziemlich minderwertig	Eher minderwertig	Weder noch	Eher hochwertig	Ziemlich hochwertig	Sehr hochwertig	Mittelwert	Standardabweichung
	-3	-2	-1	0	1	2	3		
Gehäuse 1						4	6	2,6	0,52
Gehäuse 2					1	6	3	2,2	0,63
Gehäuse 3	8	2						-2,8	0,42
Gehäuse 4		1	3	3	3			-0,2	1,03
Gehäuse 5	2	6	2					-2	0,67

Abbildung 5.6: Bewertung der Handygehäuse

Die Verteilung der Bewertungen ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Hierzu werden die absoluten Häufigkeiten der Bewertungen je Handygehäuse über die sieben Klassen der Bewertungsskala aufgetragen.

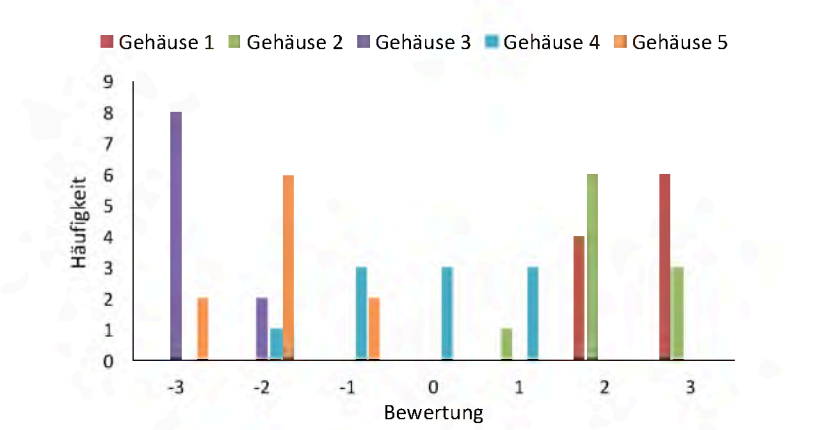


Abbildung 5.7: Häufigkeitsverteilung der einzelnen Bewertungen

Aufgrund der signifikanten Unterschiede in der Bewertung der Handygehäuse kann davon ausgegangen werden, dass das Wertigkeitsurteil von der Steifigkeit der Gehäuse abhängt. Diese Beobachtung wird durch die einfaktorielle ANOVA (siehe 2.2.3) in Abbildung 5.8 bestätigt, sodass die Hypothese H1 bestätigt werden kann.

SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
Gehäuse 1	10	26	2,6	0,27		
Gehäuse 2	10	22	2,2	0,40		
Gehäuse 3	10	-28	-2,8	0,18		
Gehäuse 4	10	-2	-0,2	1,07		
Gehäuse 5	10	-20	-2	0,44		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F-value</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	234,72	4	58,68	124,56	9,89E-24	2,58
Within Groups	21,2	45	0,47			
Total	255,92	49				

Abbildung 5.8: Ergebnis der Varianzanalyse zur abhängigen Variable: Wertigkeit der Haptik; α -Niveau: 0,05

Interaktion erfassen und analysieren

Parallel zur Testdurchführung wird das Verhalten von drei Probanden mit dem Handschuhsystem (siehe Kapitel 3.2) untersucht. Nach der schematischen Darstellung in Abbildung 5.9 wird eine Versuchsumgebung aufgebaut, die eine detaillierte Beobachtung dieser Nutzer (rot markiert) während der Testsituation ermöglicht. Um eine Verzerrung der Befragungsergebnisse durch eine mögliche Desensibilisierung der Probanden auszuschließen, werden diese Bewertungen in der Gesamtauswertung des Fragebogens nicht berücksichtigt.



Abbildung 5.9: Versuchsumgebung zur Erfassung des Lastkollektivs

Die Versuchsobjekte werden den Probanden vorgelegt, die mit der Hilfe des Fragebogens aus Abbildung 5.5 ein Urteil über die empfundene Wertanmutung der einzelnen Handygehäuse abgeben. Die Nutzer tragen dabei das in Kapitel 3.2 beschriebene Handschuhsystem und werden bei der Exploration des Produktes mit einer Videokamera gefilmt.

Das zentrale Lastkollektiv ist in Abbildung 5.10 zu erkennen. Dabei handelt es sich um einen 5-Finger-Zufassungsgriff (links) oder einen 2-Finger-Zufassungsgriff mit gegenübergestelltem Daumen, der mit beiden Händen (rechts) ausgeführt wird. Die mit dem Handsystem ermittelte Maximalkraft liegt hierbei bei ca. 32 N am Daumen D2 (Lastfall mit einer Hand), der zumeist in der Mitte des Gehäuses angreift. Im zweiten Lastfall leiten beide Daumen die Kraft zentrisch in das Gehäuse ein. Die Maximalkraft liegt dabei bei ca. 60 N. Ferner zeigt sich, dass nicht jedes Gehäuse gleich stark belastet wird. Das Gehäuse, die eine hohe Elastizität aufweisen, werden mit weniger Kraft belastet als steifere Gehäuse. So wird z. B. Gehäuse 3 mit 24 N, Gehäuse 1 und 2 mit 60 N belastet.



Abbildung 5.10: Befragungssituation mit dem Handschuhsystem. Links 5-Finger-Zufassungsgriff mit gegenübergestelltem Daumen. Rechts beidhändig ausgeführter 2-Finger-Zufassungsgriff mit gegenübergestelltem Daumen.

Anhand dieser Daten kann ein zentrales Lastkollektiv erstellt werden, welches die Explorationsprozedur der Nutzer beschreibt. Die schematische Darstellung zeigt Abbildung 5.11. Um im weiteren Ablauf alle wahrnehmungsrelevanten „Feedbackinformationen“ zu betrachten, wird die Kraft mit 60 N festgelegt.

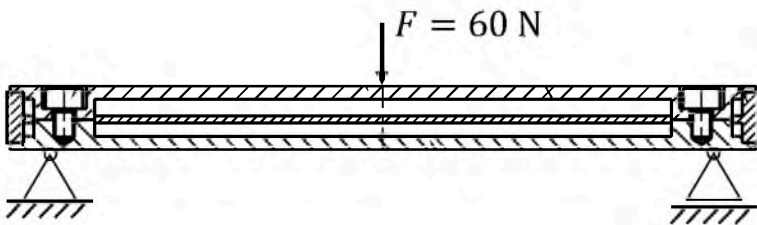


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung des ermittelten Lastkollektivs

5.3 Testobjekt vermessen

Die Objektivierung der Produkthaptik wird durch die messtechnische Erfassung der zuvor ermittelten Belastung im Probandenversuch durchgeführt.

Messverfahren wählen

Da die Stabilität durch das Verhältnis von Kraft zu Weg charakterisierbar ist, werden die einzelnen Gehäuse auf einem Kraft-Weg-Prüfstand vermessen. Dem zuvor in Kapitel 5.2 ermittelten Belastungskollektiv folgend wird der Messaufbau realisiert (siehe Abbildung 5.12). In der Abbildung sind die folgenden Komponenten gekennzeichnet:

1. Lineareinheit mit digitaler Wegerfassung (OPKON SLPS-10D-10K) und Spannfutter
2. Kraftaufnehmer HBM S2M100
3. Druckstempel mit $d = 16 \text{ mm}$
4. Handygehäuse
5. Auflager

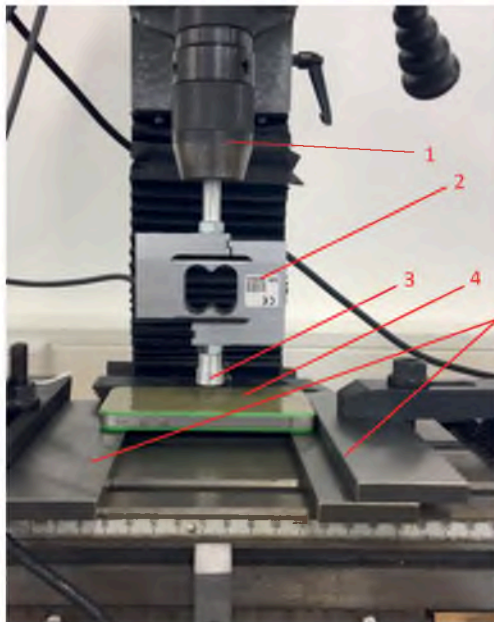


Abbildung 5.12: Messaufbau der Handygehäuse

Testobjekte vermessen

Zur Erfassung des gesamten Wahrnehmungsbereichs werden die Gehäuse – entsprechend der Handschuhmessung – mit einer Kraft von bis zu 60 N quasistatisch belastet. Bei Gehäuse 3 wird die Messung bei ca. 35 N abgebrochen, damit das Testobjekt keine plastische Verformung erfährt und damit keinen irreversiblen Schaden nimmt. Die Messdaten werden über einen Messverstärker (QuantumX MX840B der Firma HBM) mit einer Frequenz von 500 Hz aufgezeichnet und im Anschluss daran ausgewertet. Die Kennlinien der einzelnen Gehäuse sind Abbildung 5.13 zu entnehmen.

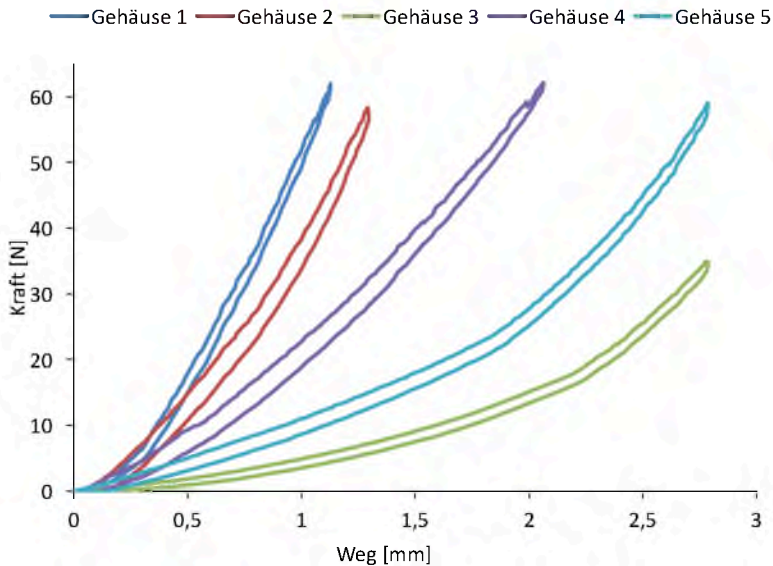


Abbildung 5.13: Gemessene Kennlinien der Handygehäuse

5.4 Simulation durchführen

Simulationsmethode bestimmen

Der Aufbau des Simulationsmodells erfolgt, wie auch der Messaufbau (Kapitel 5.3), dem Belastungskollektiv entsprechend. Da in diesem Anwendungsfall davon auszugehen ist, dass die Produkthaptik aus dem Verformungsverhalten verschiedener Festkörpern resultiert, wird die Methode der finiten Elemente gewählt. Um Rechenzeit einzusparen, wird die Mensch-Maschine Schnittstelle als Starrkörper definiert, sodass daraus eine Kopplung von FEM und MKS entsteht. Der Modellaufbau basiert auf der Arbeit von Hoppe (2017).

Nutzerschnittstelle modellieren

Die Bildung der Mensch-Maschine-Schnittstelle erfolgt – wie auch in der Messung – über das mit dem Handsystem erfasste Lastkollektiv. Der rote Zylinder in Abbildung 5.14 stellt das Ersatzmodell des Daumens dar, sodass in der Simulation die Kontaktkraft berechnet wird, die zwischen Daumen und dem Produkt entsteht. An dieser Stelle wäre es beispielsweise auch möglich, Reibeffekte und die daraus resultierenden Tangentialkräfte zu ermitteln.

Modell diskretisieren

Basis für das Simulationsmodell ist das CAD-Modell des Handygehäuses (Abbildung 5.14), welches durch die finiten Elemente und weitere Randbedingungen diskretisiert wird (Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16). Die Lagerung der Baugruppe wird über sphärische Lagerpunkte realisiert. Über den roten Zylinder wird die zuvor bestimmte Kraft von 60 N über eine lineare Rampe in die Baugruppe eingeleitet.



Abbildung 5.14: CAD-Modell in RecurDyn V8R5

In Relation zur resultierenden Verschiebung des roten Zylinders wird das haptische Verhalten des Simulationsmodells beschrieben. Für die Diskretisierung der einzelnen Bauteile werden Hexaederelemente verwendet. Da bei der Verwendung von linearen Elementen im Falle von Biegung der Effekt des Lockings (siehe Koschnick, 2004) zu beachten ist, wird das Modell anhand eines realen Musters validiert. In diesem Falle wird Gehäuse 1 gewählt.

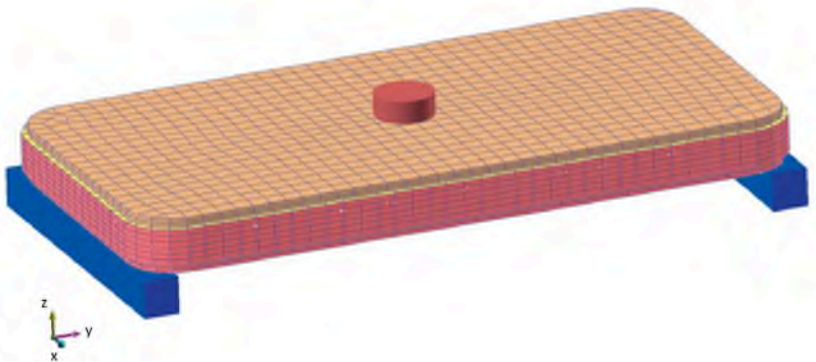


Abbildung 5.15: Diskretisiertes FE-Modell von Gehäuse 1

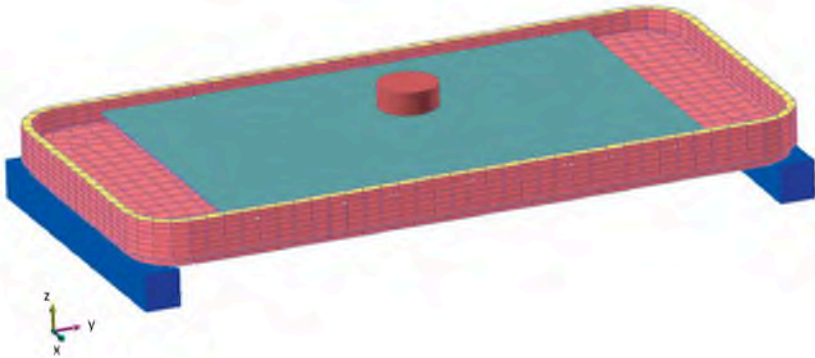


Abbildung 5.16: Diskretisiertes FE-Modell von Gehäuse 1 ohne Deckel.

Abbildung 5.17 zeigt die Messkurve des Kraft-Weg-Verlaufs von Gehäuse 1 im Vergleich zum berechneten Kraft-Weg-Verlauf des Simulationsmodells. Der Verlauf der Kurven zueinander zeigt, dass das Simulationsmodell die Charakteristik des realen Modells mit einer hinreichenden Genauigkeit abbildet. Der Effekt des Lockings ist somit zu vernachlässigen. Die gemittelte Abweichung liegt bei ca. 1 % und ist z. B. durch die Vereinfachung des Modells im Rahmen der Diskretisierung zu begründen. Des Weiteren handelt es sich um einen Prototypen, der zum einen durch Fertigungs-, zum anderen auch durch Montageprozesse keine ideale Geometrie wie die des Simulationsmodells aufweist.

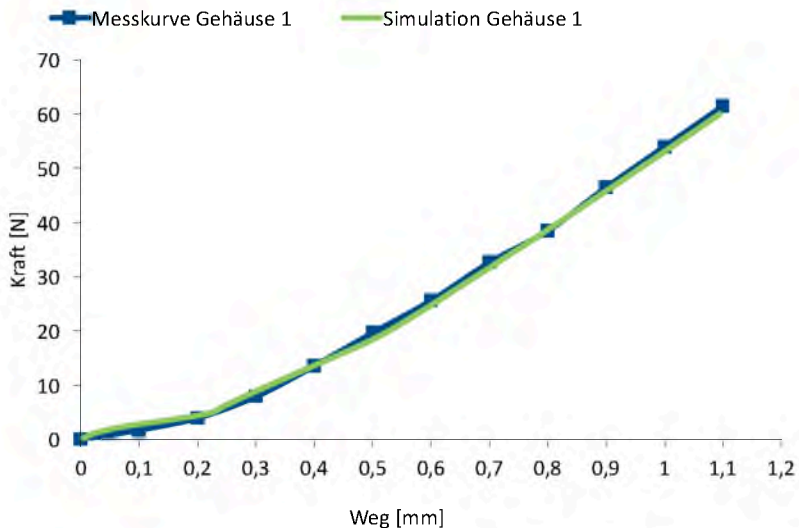


Abbildung 5.17: Validierung des Simulationsmodells. Messkurve (blau), Simulation (grün)

Modell parametrisieren

Um die Optimierung für dieses Anwendungsbeispiel so einfach wie möglich zu gestalten, werden nur zwei Designparameter als variable Größen gewählt. Alle anderen Größen bleiben konstant. Abbildung 5.18 zeigt den diskretisierten Deckel von Gehäuse 1 mit den veränderbaren Designparametern DP_{DU} und DP_{DO} . Eine Größenänderung dieser Parameter bewirkt eine Verschiebung des Knotensets des FE-Netzes in Richtung der eingezeichneten x-Achse und – damit einhergehend – eine Erhöhung oder Verminderung der Deckelstärken. Die Änderung der Designparameter erfolgt unabhängig voneinander.

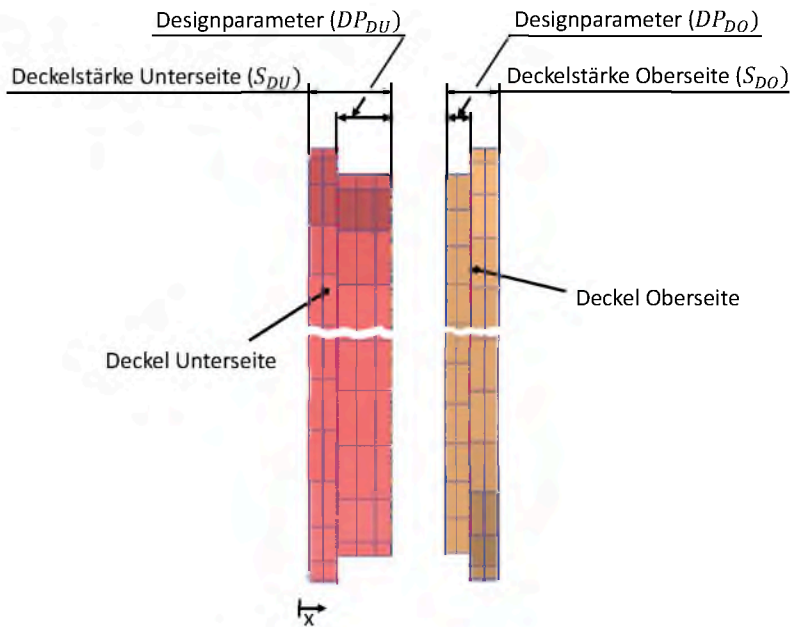


Abbildung 5.18: Parametrisierung der Deckelstärke über das Knotenset (Bruchdarstellung der vernetzten Deckel)

5.5 Optimierungsziele ermitteln

Anhand der zuvor ermittelten Daten wird im Folgenden der Zusammenhang zwischen den subjektiven Messwerten (aus den Fragebögen, Kapitel 4.2) und objektiven Messwerten (Messkurven der Gehäuse, Kapitel 4.3) gesucht. Es werden die folgenden Teilprozesse durchgeführt:

Messdaten analysieren

Um eine erste Aussage über die Form des Zusammenhangs zwischen der Gehäusesteifigkeit und dem Werturteil zu treffen, werden aus den Messkurven gemittelte Steifigkeiten gebildet und über die Mittelwerte der Probandenurteile aufgetragen (Abbildung 5.19).

Regressionsmodell erstellen

Durch die Bildung einer polynomischen Regressionskurve 3. Grades wird der Zusammenhang zwischen der Wertigkeit und der Steifigkeit mit einem Bestimmtheitsgrad von $R^2 = 0,99$ in Form einer Funktion beschrieben. Aufgrund des Verlaufs der polynomischen Funktion liegt das zu erwartende Maximum des Wertigkeitseindrucks von 2,6 bei einer durchschnittlichen Steifigkeit⁸ von $39,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$.

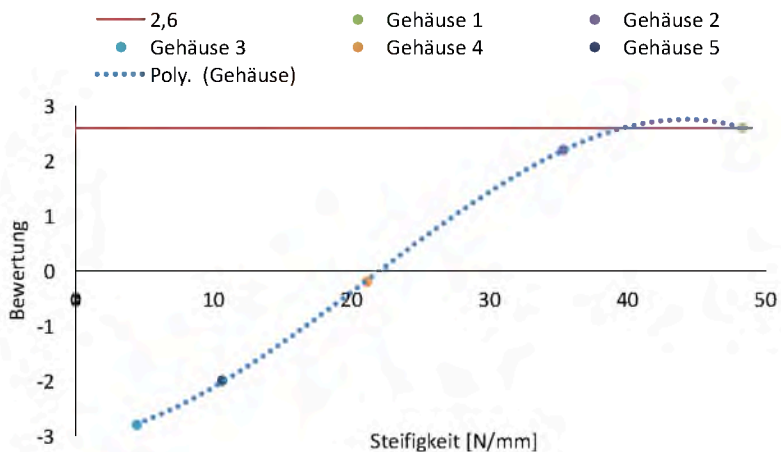


Abbildung 5.19: Verhältnis der Wertkeitsbewertung und der Gehäusesteifigkeit

⁸ Arithmetischer Mittelwert über den Bereich von 0,4 bis 1,1 mm Verformung.

Optima ermitteln

Zur Bildung der optimierten Kennlinie werden die Gehäusekennlinien in einzelne Verformungsinckremente unterteilt und – wie in Abbildung 5.19 dargestellt – mit dem Wertigkeitsurteil verglichen, sodass für jede einzelne Verformung ein Regressionsverlauf entsteht. Über die Schnittpunkte der Regressionsverläufe mit dem Wertigkeitsmaximum von 2,6 wird so der optimale Kraft-Weg-Verlauf bestimmt. Abbildung 5.20 zeigt die Regressionsverläufe der einzelnen Verformungsinckremente (0,1 mm bis 1,1 mm).

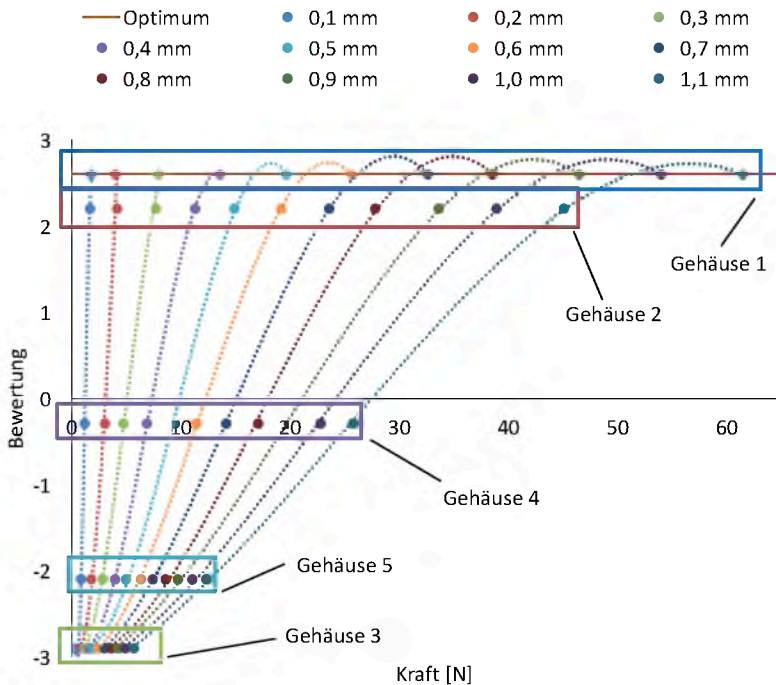


Abbildung 5.20: Regressionsmodelle zur Bestimmung der Optima

Da die geringen Steifigkeitsunterschiede der Gehäuse in den Inkrementen $< 0,4$ mm keine eindeutige Differenzierung in Bezug auf die Bewertung zulassen, werden die Optima für diesen Bereich über das gemittelte Regressionsmodell aus Abbildung 5.19 interpoliert. Die Kurve des optimalen Kraft-Weg-Verlaufs ist in Abbildung 5.21 dargestellt. Zusätzlich sind die Messkurven der Gehäuse 1 bis 5 abgebildet.

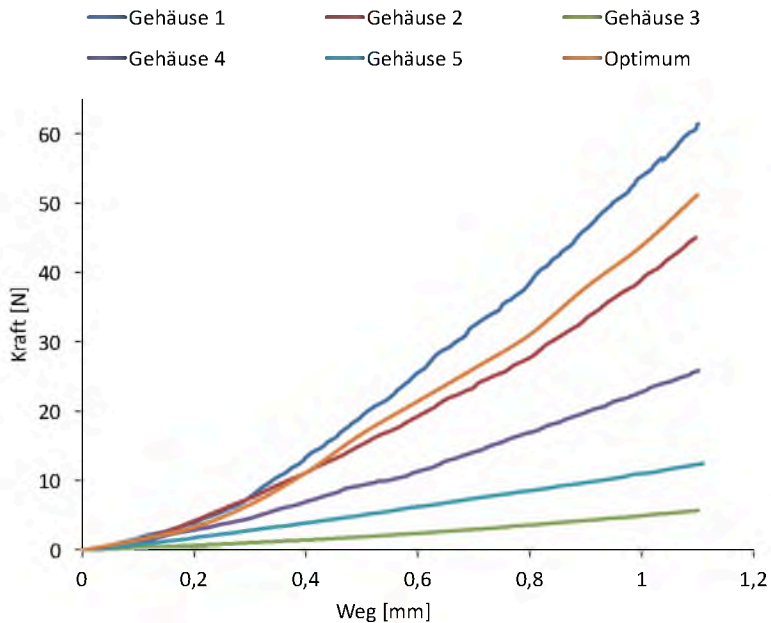


Abbildung 5.21: Kennlinien der Handy-Gehäuse bis zu einer Verformung von 1,1 mm

Die optimierte Kraft-Weg-Kennlinie wird zum Aufbau der Antwortfunktion für die Optimierung in Kapitel 5.6 verwendet. Das Ziel ist dabei, ausgewählte Konstruktions- bzw. Designparameter so zu wählen, dass das Handygehäuse bei entsprechender Belastung mit dieser Kennlinie reagiert.

Bei der Betrachtung des Verlaufs der Regressionsfunktion aus Abbildung 5.19 weist die Funktion im Bereich des Schnittpunktes mit der Geraden („2,6“) eine konkave Form mit einer positiven Steigung auf. Daher ist davon auszugehen, dass an diesem Punkt eine negative Abweichung der Steifigkeit (z. B. durch Materialabweichungen, Maß-, Form- und Lagetoleranzen) mit einer Minderung des Wertigkeitsurteils einhergeht. Somit lässt sich – unter der Annahme, dass das Regressionsmodell den Zusammenhang verlässlich abbildet – Hypothese 2 (Kapitel 5.2) widerlegen, da das Verhältnis von Wertigkeitsurteil und Gehäusesteifigkeit nicht linear ist.

Um das Handygehäuse – in Bezug auf eine derartige Abweichung – robust auszulegen, muss die ermittelte Zielfunktion bzw. der Zielwert als untere Toleranzgrenze definiert werden, sodass – in Abhängigkeit von der Standardabweichung – Nennwerte festzulegen sind. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.22 grafisch dargestellt.

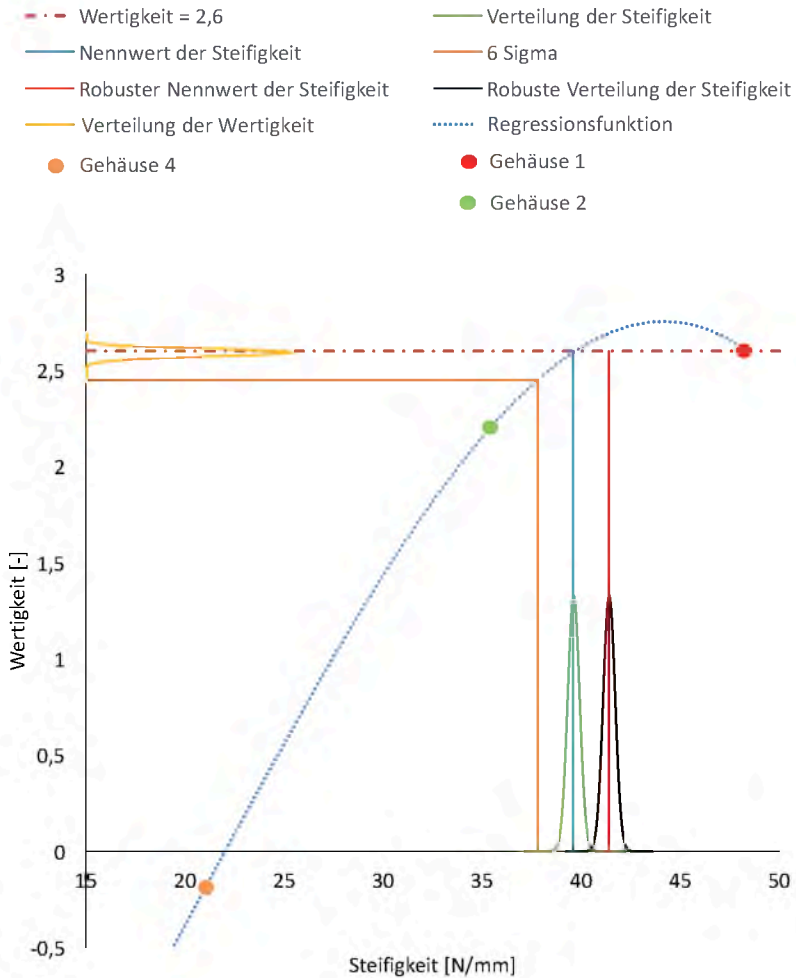


Abbildung 5.22: Robuste Auslegung der Zielfunktion

5.6 Optimierung durchführen

Im ersten Schritt des Optimierungsprozesses werden die Optimierungsräume auf Basis der zuvor definierten Designparameter gewählt.

Optimierungsräume definieren

Die Designparameter DP_{DO} und DP_{DU} dürfen (aufgrund des beschränkten Bauraums) im Inneren des Gehäuses nicht größer als 1,8 mm (DP_{DO}) bzw. 3,3 mm (DP_{DU}) werden. Ein Überschreiten dieser Grenzen hätte zur Folge, dass die Montage des Handygehäuses aufgrund von Bauteilkollisionen nicht mehr möglich ist.

Response-Parameter definieren

Die Response-Parameter werden anhand der in Kapitel 5.5 ermittelten Kraft-Weg-Kurve erstellt. Um ein möglichst gutes Konvergenzverhalten der Optimierung zu erzielen, werden vier charakteristische Verformungspunkte gewählt, die das Optimierungsziel bestmöglich abbilden. Eine Erhöhung der Anzahl an Verformungspunkten wäre möglich, führt in diesem Fall jedoch zu keinem besseren Ergebnis. Für diese Punkte werden die Response-Parameter erstellt. Sie ermitteln am jeweiligen Verformungspunkt, wie groß die Abweichung der Ist-Größe der Kraft im Vergleich zu ihrer Soll-Größe ist. Ziel der Optimierung ist es, durch die Änderung der in Kapitel 5.4 beschriebenen Designparameter alle vier Response-Parameter zu minimieren und damit die gewünschte Kraft-Weg-Kurve zu erreichen. Für die Kraft-Weg-Punkte 1 bis 3 wird der quadratische Mittelwert (RMS-Value) über den Simulationszeitraum berechnet. Mithilfe einer Filterfunktion wird dies jedoch auf den jeweiligen Zeitraum beschränkt. Der letzte Kraft-Weg-Punkt entspricht dem Endwert der Berechnung, sodass auf die Filterfunktion verzichtet werden kann. Eine Übersicht der Response-Parameter liefert Tabelle 5.1. Der Informationsfluss zur Berechnung der Response-Parameter ist dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 5.1: Auflistung der Response-Parameter und Optimierungsziele

Nr.	Bezeichnung	Performance Index	Ziel
1	AR_Fehler_Weg1	RMS-Value	Min
2	AR_Fehler_Weg2	RMS-Value	Min
3	AR_Fehler_Weg3	RMS-Value	Min
4	AR_Fehler_Max_Durchbiegung	End-Value	Min

DOE-Schema Festlegen

Als DOE-Schema wird in diesem Produktbeispiel ein Latin Hypercube Sampling mit 20 Stichproben verwendet.

Optimierung durchführen

Nachdem alle Schritte dieses Prozesses durchlaufen sind, kann die Optimierung gestartet werden. Die Gesamtrechnenzeit der Optimierung beträgt auf einem Intel Core-i7 mit 3,4 GHz 9,5 Stunden und zeigt anhand des Verlaufs der SAO-Iteration (Sequential Approximation Optimization⁹) ein gutes Konvergenzverhalten (Abbildung 5.23).

⁹ Siehe Kim et al. (2007).

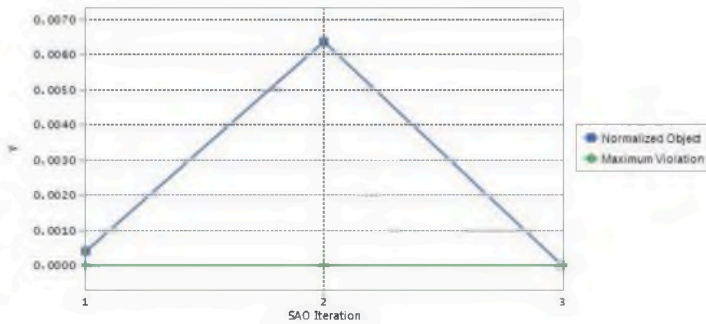


Abbildung 5.23: Konvergenzverhalten der Optimierung

Der aus der Optimierung resultierende Kurvenverlauf ist in Abbildung 5.24 dargestellt. Die mittlere Abweichung zur vorgegebenen Zielfunktion (dunkelgrüne Kurve) liegt bei ca. 2,1 %. Zusätzlich sind der berechnete Verlauf sowie die Messkurve von Gehäuse 1 abgebildet, anhand derer die Validität des Simulationsmodells nachweisbar ist (mittlere Abweichung von ca. 2,2 %).

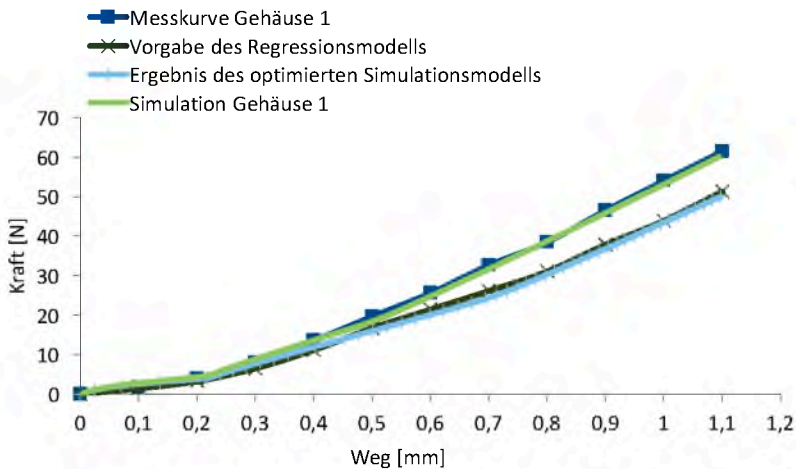


Abbildung 5.24: Kraft-Weg-Verlauf des optimierten Modells

Das Ergebnis der Optimierung ist Tabelle 5.2 zu entnehmen. Das Optimum der Deckelstärke liegt für die Oberseite bei 3,01 mm und für die Rückseite bei 4,68 mm. Somit wird durch die Reduzierung der Deckelstärken im Vergleich zu Gehäuse 1 eine Materialersparnis von ca. 3,5 % bei einer zu erwartenden gleichbleibenden Wertanmutung erzielt.

Tabelle 5.2: Satz der optimierten Parameter

Parameter	Startwert [mm]	Endwert [mm]	Differenz [mm]
Designparameter DP_{DO}	1,59	1,41	0,18
Designparameter DP_{DU}	3,3	3,09	0,21
Deckelstärke Oberseite S_{DO}	3,19	3,01	0,18
Deckelstärke Unterseite S_{DU}	4,89	4,68	0.21

5.7 Validierung der Optimierung

Im Rahmen der Validierung wird die Verlässlichkeit der in Kapitel 5.6 ermittelten Ergebnisse anhand eines neuen Gehäuses geprüft. Der Aufbau des Gehäuses folgt dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Schema der Gehäuse 1 bis 5. Die Gehäusedeckel werden anhand der optimierten Parameter (Endwerte aus Tabelle 5.2) mit einem 3D-Drucker im FDM-Verfahren ausgedruckt und über eine Verschraubung mit dem Rahmen montiert. Im Folgenden wird dieses Gehäuse als Gehäuse 6 bezeichnet.

Die Vermessung erfolgt unter identischen Bedingungen wie in Kapitel 5.3 und wird bis zu einer Verformung von 1,1 mm durchgeführt. Abbildung 5.25 stellt die Messkurve in Relation zu dem Zielverlauf des Regressionsmodells und zum berechneten Verlauf der Optimierung dar.

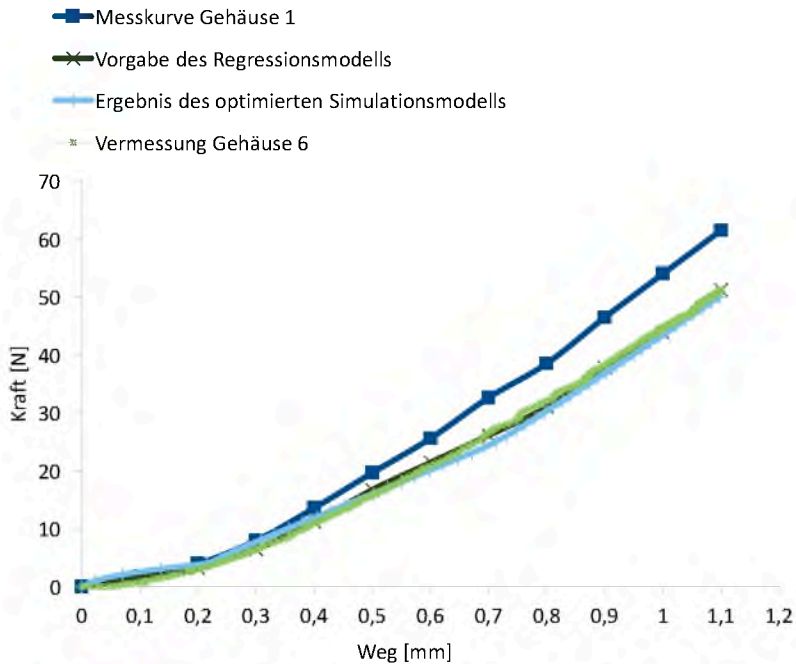


Abbildung 5.25: Kraft-Weg-Verläufe zur Validierung des Prototypen

Im Vergleich mit der Vorgabe des Regressionsmodells zeigt die Messkurve von Gehäuse 6 mit einer durchschnittlichen Abweichung von ca. 0,8 % einen annähernd deckungsgleichen Verlauf. Somit kann das Ergebnis der Optimierung und der darauf folgenden Fertigung von Gehäuse 6 als valide bezeichnet werden. Neben der Validierung der Optimierung wird zusätzlich der Effekt der Optimierung auf die Nutzerbewertung geprüft. Den Testaufbau aus Kapitel 5.2 zugrunde legend, wird das optimierte Gehäuse als Testobjekt in den Versuch aufgenommen und eine erneute Befragung durchgeführt. Die Ergebnisse der Befragung sind Abbildung 5.26 zu entnehmen. Anhand der Bewertungen ist zu erkennen, dass – im Vergleich zur Testdurchführung in Kapitel 5.2 – die Bewertung der Gehäuse im Durchschnitt ca. 0,1 Punkte geringer ausfällt. Gehäuse 1 und 6 weisen jedoch eine identische Bewertung auf, was die Effektivität der durchgeführten Optimierung belegt.

5 Erprobung des Verfahrens am Beispiel eines Handygehäuses

Wie hochwertig finden Sie die Gehäuse (in Relation zueinander)	Sehr minderwertig -3	Ziemlich minderwertig -2	Eher minderwertig -1	Weder noch 0	Eher hochwertig 1	Ziemlich hochwertig 2	Sehr hochwertig 3	Mittelwert	Standardabweichung
Gehäuse 1					1	5	4	2,3	0,67
Gehäuse 2					2	5	3	2,1	0,79
Gehäuse 3	8	2						-2,8	0,42
Gehäuse 4		1	3	4	2			-0,3	0,95
Gehäuse 5	2	5	3					-1,9	0,74
Gehäuse 6					1	5	4	2,3	0,67

Abbildung 5.26: Ergebnisse der Befragung zur Prüfung der Effektivität des Verfahrens

6 Anwendungsbeispiel Gartenschere

In diesem Kapitel werden zur Demonstration der produktübergreifenden Anwendbarkeit des im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Verfahrens Anwendungsbeispiele für die in Abbildung 6.1 dargestellte Gartenschere aufgeführt. Zusätzlich soll hiermit der iterative Charakter des Verfahrens hervorgehoben werden, da sich aus dem System der Schere mehrere Nutzungsszenarien ergeben.



Abbildung 6.1: Handschere Typ 1110 der
JULIUS BERGER GmbH & Co. KG – Werkzeugfabrik

In Kooperation mit der JULIUS BERGER GmbH & Co. KG – Werkzeugfabrik wird die Haptik der Gartenschere des Typs 1110 – einer Handschere aus dem Premiumsegment – analy-

siert und optimiert. Es werden zwei Nutzungsszenarien definiert, die im Folgenden behandelt werden. In Kapitel 6.1 liegt der Fokus auf der Haptik beim Schließen bzw. Öffnen der Schere, während in Kapitel 6.2 die Haptik des Griffs aufgrund seiner Verformung im Falle einer Belastung betrachtet wird.

6.1 Optimierung der Schneidhaptik

Das Ziel liegt in der Findung der Haptik, der dafür verantwortlichen Komponenten sowie der zu wählenden technischen Parameter, die dem Kunden einen maximal hohen Qualitätseindruck beim Bedienen der Schere (Betätigung der Schere ohne Schnittgut) vermittelt. Die Kapitelfolge richtet sich nach den Hauptprozessen des Verfahrensablaufs.

6.1.1 System analysieren

Die in Abbildung 6.1 dargestellte Handschere besteht aus insgesamt 18 einzelnen Komponenten, die einen Einfluss auf die Produkthaptik und möglicherweise auf die wahrgenommene Qualität des Produktes haben.

Folgende Randbedingungen werden zu Beginn des Analyse- und Optimierungsprozesses festgelegt:

- Für eine einfache Umsetzbarkeit der Optimierungsmaßnahmen werden Grundgeometrie und Werkstoff der Griffe und Klingen sowie Reibwerte als Konstanten angenommen.
- Federkonstanten, Dämpferkonstanten, Anziehdrehmoment des Gewerbes sollen parametrisiert werden.

6.1.2 Nutzertest durchführen

Der Test soll prüfen, ob und inwieweit das Kraft-Weg-Verhalten beim Schließen der Schere einen Einfluss auf die empfundene Wertigkeit hat. Als Testobjekte werden 12 Scheren verwendet, von denen 6 eine unterschiedliche Feder zur Rückstellung erhalten und 6 einen anderen Dämpfer, der die überschüssige Handkraft bei Blockanschlag abbaut.

Die Befragung wird in zwei voneinander getrennten Teilen durchgeführt:

- Befragung A: 6 verschiedene Testobjekte mit unterschiedlichen Federn

Die Federn unterscheiden sich in Bezug auf ihre Bauart und die einzelnen Parameter (z. B. freie Federlänge, Federbandbreite, Windungsradius etc.). Die Scheren A1 und A3 bis A6 erhalten Doppel evoluf Federn, während in Schere A2 eine doppelkonische Feder verwendet wird.

- Befragung B: 6 verschiedene Testobjekte mit unterschiedlichen Dämpfern

Die eingesetzten Dämpfer unterscheiden sich in Bezug auf Form, Material und Blocklage. Die in den Scheren B1 bis B6 verbauten Dämpfer sind Tabelle 6.1 zu entnehmen.

Tabelle 6.1: Dämpfer der Scheren B1 bis B6

	Dämpfer		
Schere	Form	Material	Blocklage
Schere B1	Kugelkopf	Gummi	6,5 mm
Schere B2	Kugelkopf	Gummi	—
Schere B3	Zylinder	EVAC	5 mm
Schere B4	Kugelkopf	PA	—
Schere B5	—	—	0 mm
Schere B6	Zylinder	PA	—

Abbildung 6.2 zeigt die Ergebnisse aus der Befragung A. Die mithilfe des Handschuhs erfasste gemittelte Bedienkraft liegt dabei bei 16 N.

Wie hochwertig finden Sie das Gefühl beim Schließen der Schere (in Relation zueinander)	Sehr minderwertig -3	Ziemlich minderwertig -2	Eher minderwertig -1	Weder noch 0	Eher hochwertig 1	Ziemlich hochwertig 2	Sehr hochwertig 3	Mittelwert	Standardabweichung
Schere A1	1	3	3	1	1	1		-0,9	1,52
Schere A2	1	4	4	1				-1,5	0,85
Schere A3			1	1	2	4	2	1,5	1,27
Schere A4			4	4	2			-0,2	0,79
Schere A5				1	1	5	3	2	0,94
Schere A6					6	2	2	1,6	0,84

SUMMARY						
Groups	Count	Sum	Average	Variance		
Schere A1	10	-9	-0,9	2,32		
Schere A2	10	-15	-1,5	0,72		
Schere A3	10	15	1,5	1,61		
Schere A4	10	-2	-0,2	0,62		
Schere A5	10	20	2	0,89		
Schere A6	10	16	1,6	0,71		
ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F-value	P-value	F crit
Between Groups	108,68	5,00	21,74	18,96	7,69E-11	2,39
Within Groups	61,90	54,00	1,15			
Total	170,58	59,00				

Abbildung 6.2: Ergebnisse der Befragung A. Oben: Bewertungen. Unten: Ergebnis der Varianzanalyse. α -Niveau: 0,05

Die Mittelwerte der Bewertungen reichen von -1,5 bis zu 2,0. Die Standardabweichung liegt (bis auf 2 Scheren) unter dem Skalenniveau von 1. Da der ermittelte F-Wert der Varianzanalyse deutlich über dem kritischen F-Wert liegt, ist anzunehmen, dass das Gefühl beim Schließen der Schere einen signifikanten Einfluss auf die Wertanmutung hat.

Abbildung 6.3 zeigt die Ergebnisse aus der Befragung B. Die mithilfe des Handschuhs erfasste gemittelte Bedienkraft beträgt 60 N.

Wie hochwertig finden Sie das Gefühl beim Schließen der Scheren (in Relation zueinander)	Sehr minderwertig	Ziemlich minderwertig	Eher minderwertig	Weder noch	Eher hochwertig	Ziemlich hochwertig	Sehr hochwertig	Mittelwert	Standardabweichung
	-3	-2	-1	0	1	2	3		
Schere B1	1	2	1	1	4	1		-0,2	1,69
Schere B2		2	5	1	1		1	-0,5	1,51
Schere B3	2	3	2	1		2		-1	1,83
Schere B4			1	1		6	2	1,7	1,25
Schere B5	1	2	3		1		3	0	2,31
Schere B6		1	1		6	2		0,7	1,25

SUMMARY				
Groups	Count	Sum	Average	Variance
Schere B1	10	-2	-0,2	2,84
Schere B2	10	-5	-0,5	2,28
Schere B3	10	-10	-1	3,33
Schere B4	10	17	1,7	1,57
Schere B5	10	0	0	5,33
Schere B6	10	7	0,7	1,57

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F-value	P-value	F crit
Between Groups	45,88	5,00	9,18	3,25	0,01	2,39
Within Groups	152,30	54,00	2,82			
Total	198,18	59,00				

Abbildung 6.3: Ergebnisse der Befragung B. Oben: Bewertungen. Unten: Ergebnis der Varianzanalyse. α -Niveau: 0,05

Die Mittelwerte der Bewertungen liegen zwischen -1 (Schere B3) und 1,7 (Schere B4). Die Standardabweichung ist mit einem durchschnittlichen Wert von 1,64 stark ausgeprägt. Der F-Wert der Varianzanalyse ist daher – im Vergleich zu Versuch A – geringer und liegt mit 0,86 Punkten nur knapp über dem kritischen F-Wert. Somit hat der Anschlag bzw. Dämpfer zwar einen Einfluss auf das Wertigkeitsurteil, ist aber im Vergleich zur reinen Schließbewegung als geringer gewichtig einzustufen.

6.1.3 Testobjekte vermessen

Zur Vermessung der Scheren wird der in Abbildung 6.4 dargestellte Messaufbau verwendet.

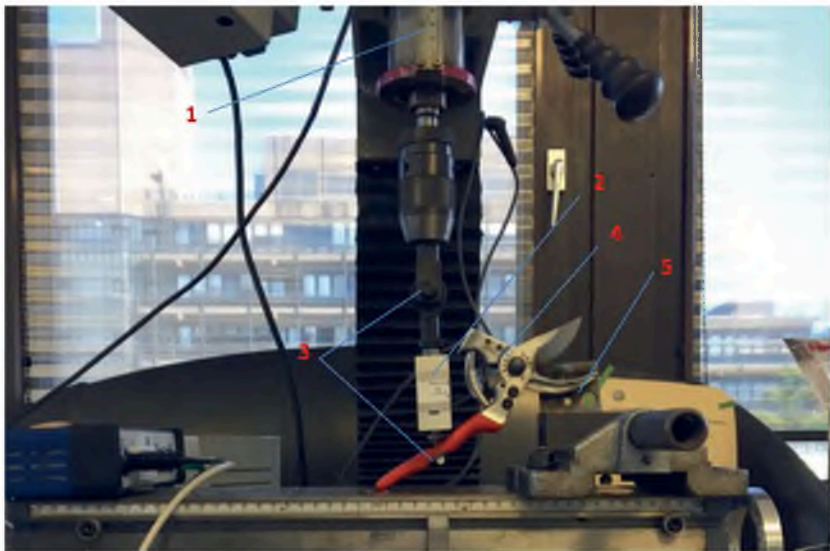


Abbildung 6.4: Messaufbau zur Ermittlung der Kraft-Weg-Kennlinie

Der Prüfaufbau (Abbildung 6.4) besteht aus den folgenden Komponenten:

- 1: Lineareinheit mit digitaler Wegerfassung (OPKON SLPT 150) und Spannfutter
- 2: Kraftmessdose HBM S2M 100N

3: Gelenk

4: Handschere

5: Festlager (über Schweißpunkte an der Klinge)

Die Kraft-Weg-Verläufe aus der Vermessung der Scheren A1 bis A6 sind in Abbildung 6.5 dargestellt. Die Messergebnisse der Scheren B1 bis B6 sind Abbildung 6.6 zu entnehmen.

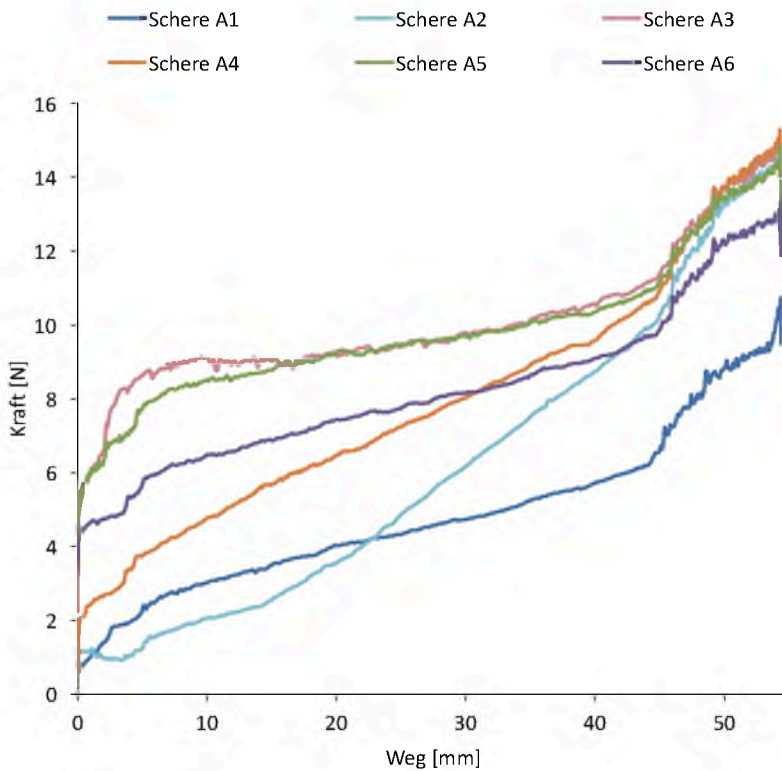


Abbildung 6.5: Messkurven der Scheren A1 bis A6

Wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, liegen die Unterschiede zwischen den Scheren A1 bis A6 in der verwendeten Feder. Dies wirkt sich zum einen auf die Vorspannung der Scheren und zum anderen auf die Kraftzunahme während des Schließvorgangs aus.

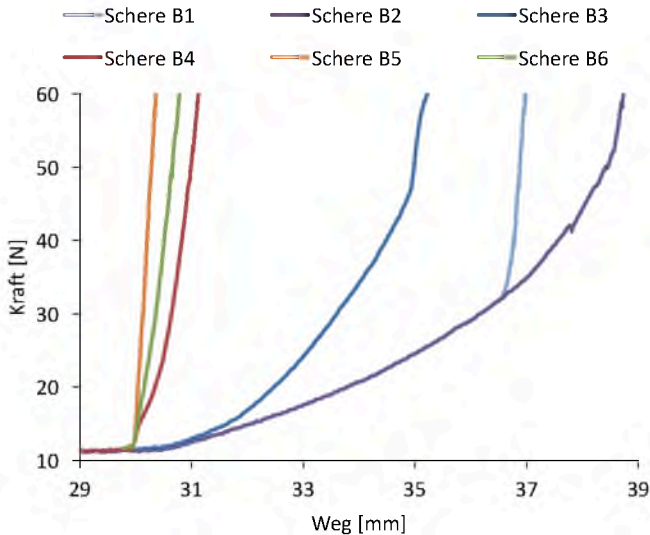


Abbildung 6.6: Messkurven der Scheren B1 bis B6

6.1.4 Simulation durchführen

Bedingt durch die zu optimierende Kinematik und den dynamischen Verlauf der Handkraft erfolgt der Aufbau eines MKS-Modells in RecurDyn V8 R5. Abbildung 6.7 zeigt das daraus resultierende MKS-Modell, welches auf der Arbeit von Gerling & Witte (2017) basiert. Es besteht aus der Schere und der Mensch-Maschine-Schnittstelle, an der die Reaktionskraft erfasst wird.

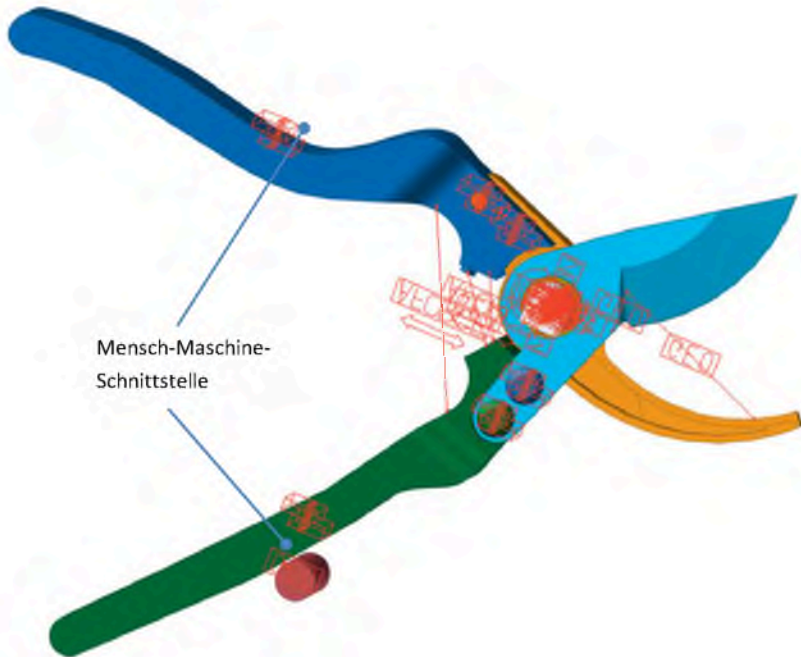


Abbildung 6.7: MKS-Modell der Handschere in RecurDyn V8 R5

Der Aufbau des Modells ist so gestaltet, dass die Schließbewegung der Schere durch den roten Zylinder der Mensch-Maschine-Schnittstelle eingeleitet wird. Die Lagerung der Gegenseite (Handfläche) wird über ein Festlager realisiert. In Abhängigkeit vom Schließwinkel der Schere entsteht aus Federkraft, Dämpferkraft und der – durch die Vorspannkraft und Oberflächenbeschaffenheit verursachte – Reibkraft die Reaktionskraft, die der Nutzer der Schere wahrnimmt.

6.1.5 Optimierungsziele ermitteln

Auf Grundlage der Messkurven werden die einzelnen Kraft-Weg-Verläufe in spezifische Bereiche bzw. Inkremente unterteilt. In Verbindung mit den Bewertungen wird so für jeden Bereich ein lineares Regressionsmodell erstellt (analog zum Vorgehen in Kapitel 5.5). Über die Maxima der jeweiligen Modelle werden somit die in Tabelle 6.2 aufgelisteten Stützpunkte der Zielfunktion (Optimum) ermittelt. Die Bestimmung der Kennlinie für den Dämpfer verläuft identisch, sodass die beiden Optimierungsziele im nächsten Prozessschritt zu der in Abbildung 6.8 blau dargestellten Zielfunktion zusammengeführt werden und ein globales Optimum ermittelt wird.

Tabelle 6.2: Messpunkte der Scheren A1 bis A6 und die Optima

Weg [mm]	Schere A1	Schere A2	Schere A3	Schere A4	Schere A5	Schere A6	Optimum
0,0	1,0	1,2	6,0	2,4	6,1	4,6	5,5
3,4	1,9	0,9	8,3	2,9	6,9	4,9	6,7
6,8	2,7	1,7	8,8	4,1	8,2	6,1	7,5
13,6	3,4	2,4	9,1	5,4	8,7	6,8	8,1
20,4	4,0	3,7	9,2	6,5	9,3	7,4	8,7
27,2	4,5	5,5	9,5	7,6	9,6	7,9	9,2
34,0	5,1	7,2	10,0	8,7	9,9	8,5	9,8
40,8	5,8	9,0	10,8	9,9	10,5	9,2	10,4
47,6	7,9	12,1	12,8	12,5	12,5	11,3	12,4
50,0	8,8	13,3	13,6	13,7	13,4	12,2	13,3
53,3	9,4	14,1	14,5	14,7	14,1	12,8	14,0

6.1.6 Optimierung durchführen

Das Ergebnis der Optimierung ist in Abbildung 6.8 rot dargestellt. Verglichen mit der Zielfunktion liegt die durchschnittliche Abweichung bei 1,4 %. Die zugehörigen Designparameter, die sich aus der Optimierung ergeben, sind Tabelle 6.3 zu entnehmen.

Tabelle 6.3: Designparameter als Ergebnis der Optimierung

Federkonstante linear	Federkonstante progressiv	Dämpfer	Drehmoment Gewerbe	Federvorspannung
$0,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	$0,024 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$808 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	154 Nmm	5,5 N

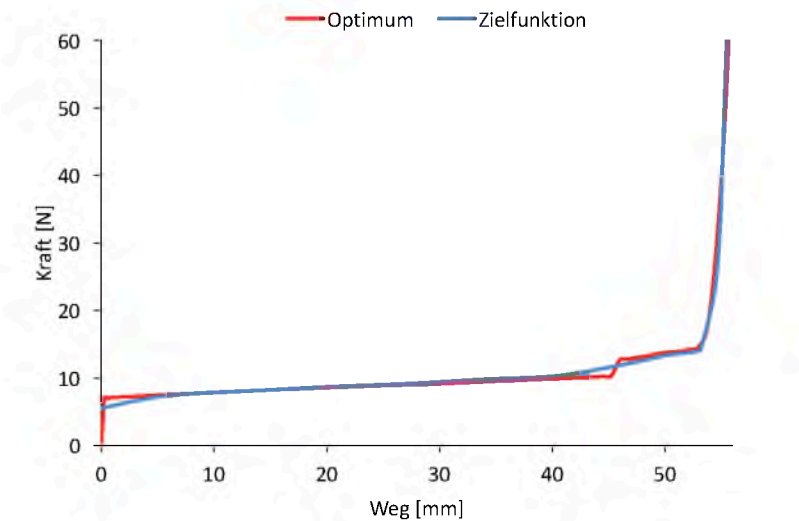


Abbildung 6.8: Ergebnis der Optimierung im Vergleich zur Zielgröße

6.2 Optimierung der Haptik im Lastfall

Ein weiterer Anwendungsfall für das Verfahren ist das quasi-statische Belasten der Schere, das z. B. beim Schneiden von harten Hölzern auftritt. Die Haptik der Schere soll auch in diesem – bis zu einer bestimmten Kraft – statischen Lastfall vom Nutzer als hochwertig

empfundene werden. Die Kapitelfolge richtet sich nach den Hauptprozessen des Verfahrensablaufs. Im Vergleich zum vorherigen Anwendungsfall aus Kapitel 6.1 wird hierfür ein FE-Modell zur Simulation verwendet.

6.2.1 System analysieren

Das Ziel der Optimierung ist die Anpassung der Griffgeometrie, sodass ein optimales Verhältnis von Materialersparnis (am Griff) und einem maximal hohen Qualitätseindruck beim Kunden erzielt wird. Für den zuvor beschriebenen statischen Lastfall ist insbesondere das Verformungsverhalten der einzelnen Komponenten der Schere von Bedeutung. Hieran sind vor allem die Griffe beteiligt, über die der Nutzer die Kraft in die Schere einleitet. Der Scherenhersteller vermutet, dass mit einer reduzierten Steifigkeit des Scherengriffs eine Minderung des Qualitätsurteils des Kunden einhergeht.

6.2.2 Nutzertest durchführen

Bezogen auf den zuvor beschriebenen Anwendungsfall werden für die Messung des Urteils über die Wahrnehmung der haptischen Qualität Scheren präpariert, die sich ausschließlich in ihrem Verformungsverhalten unterscheiden. Hierzu wird das Flächenträgheitsmoment der Griffe durch Ausfräsungen verschiedener Größe reduziert. Damit die Testpersonen keine optischen Unterschiede wahrnehmen, die die Validität des Tests beeinflussen können, werden die Griffe wieder mit dem originalen Kunststoffmantel überzogen, der die bearbeitete Stelle verdeckt (siehe grüner Kreis in Abbildung 6.9). Zur Gewährleistung konstanter Test- und Versuchsbedingungen wird das Schnittgut durch den Schaft einer Schraube (Durchmesser = 6 mm) ersetzt (Abbildung 6.9 links). Die Scheren werden mit folgender Bezeichnung versehen: „Schere C□“, wobei □ der Platzhalter für die jeweilige Scherennummer ist.



Abbildung 6.9: Klinge mit „Schnittgut“ (links); Testobjekt: Schere C1 mit Griffüberzug (Mitte) und ohne Griffüberzug (rechts)

Die Nutzergruppe besteht aus 13 Testpersonen, die bei der Befragung die Scheren untereinander vergleichen und über die 7-stufige Ratingskala von -3 bis 3 bewerten müssen. Die Höhe der Belastung der Schere wird – analog zum Vorgehen in Kapitel 5.2 – mithilfe des in Kapitel 3.2 beschriebenen Handschuhsystems bestimmt. Ebenso wird hiermit die Form der Lasteinleitung auf den Griff der Schere ermittelt, sodass die Lage einer Zentralkraft bestimmt werden kann. Die durchschnittliche Belastung der drei Handschuhmessungen liegt bei 200 N.

Die Erhebung der Daten erfolgt, wie auch in den Beispielen zuvor, mithilfe eines Fragebogens. Die Ergebnisse der Befragung sind in Abbildung 6.10 dargestellt. Anhand der Ausprägung des Bewertungsprofils zeigt sich, dass die Änderung der Steifigkeit nur eine geringe Differenz von maximal 0,8 Bewertungspunkten der einzelnen Mittelwerte zur Folge hat. Gleichzeitig streuen die Werte um bis zu 1,48 Punkte. Dies zeigt sich auch im Ergebnis der Varianzanalyse (Abbildung 6.11). Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um einen – im Vergleich zum Schließkraftverlauf – wenig relevanten Anwendungsfall mit einem „schwachen“ Qualitätsdeskriptor handelt. Aus diesem Grund sind – bezogen auf die Produkthaptik – sowohl die Optimierung des Scherenanschlages als auch die Optimierung der Schließbewegung (Kapitel 6.1) der Griffoptimierung vorzuziehen.

Wie hochwertig finden Sie die Haptik der Schere, wenn Sie sie belasten? (In Relation zueinander)	Sehr minderwertig	Ziemlich minderwertig	Eher minderwertig	Weder noch	Eher hochwertig	Ziemlich hochwertig	Sehr hochwertig	Mittelwert	Standardabweichung
	-3	-2	-1	0	1	2	3		
Schere C1			1		2	6	1	1,6	1,07
Schere C2			1		1	4	4	2,0	1,25
Schere C4				1	4	4	1	1,5	0,85
Schere C5		1		1	4	2	2	1,2	1,48

Abbildung 6.10: Ergebnisse der Befragung zur Steifigkeit der Schere bei Belastung

SUMMARY						
<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
Schere C1	10	16	1,6	1,16		
Schere C2	10	20	2	1,56		
Schere C4	10	15	1,5	0,72		
Schere C5	10	12	1,2	2,18		
ANOVA						
<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F-value</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	3,27	3,00	1,09	0,78	0,51	2,87
Within Groups	50,50	36,00	1,40			
Total	53,78	39				

Abbildung 6.11: Varianzanalyse der Scheren; α -Niveau: 0,05

6.2.3 Testobjekte vermessen

Die Vermessung der Muster wird auf einem linearen Kraft-Weg-Prüfstand durchgeführt. Der Versuchsaufbau richtet sich nach dem zuvor – in der Nutzerbefragung – bestimmten

Lastkollektiv. Die Messkurven der Testobjekte sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Die Flächenträgheitsmomente an der bearbeiteten Stelle sowie die Verformung der Schere (bei einer Belastung von 200 N) sind Abbildung 6.12 zu entnehmen.

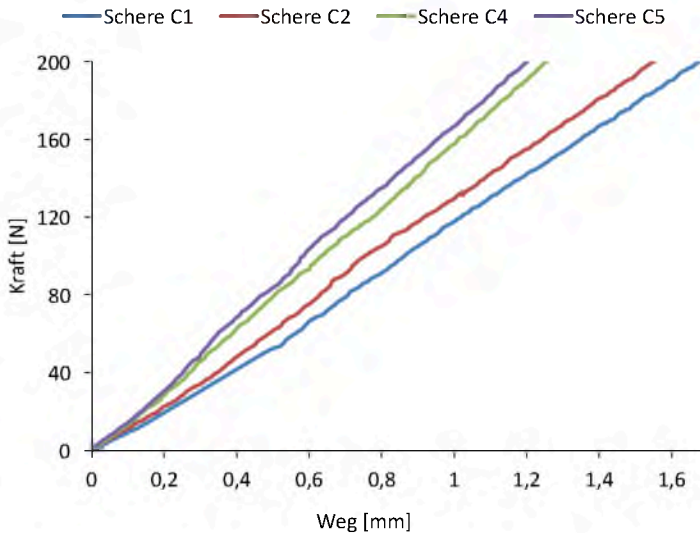


Abbildung 6.12: Verformungsverhalten der Scheren bis 200 N Belastung

Tabelle 6.4 gibt die Verformungen der Scheren C1 bis C5 bei einer Last von 200 N an. Zusätzlich können die jeweiligen Flächenträgheitsmomente entnommen werden.

Tabelle 6.4: Flächenträgheitsmoment und gemessene Verformung der Scheren bei einer Belastung von 200 N

Objekt	Schere C1	Schere C2	Schere C4	Schere C5
Flächenträgheitsmoment ¹⁰ [mm ⁴]	208	270	787	1303
Verformung [mm]	1,68	1,55	1,26	1,20

6.2.4 Simulation durchführen

Aufgrund des statischen Lastfalls und der Art der Zielgröße wird der Modellaufbau als FE-Modell in ANSYS-Mechanical durchgeführt. Der Modellaufbau erfolgt in der Arbeit von Babashahi (2017). Abbildung 6.13 zeigt einen Griff des diskretisierten Modells der Schere C5, die zur Validierung des Simulationsmodells verwendet wird und gleichzeitig die Grundlage für die Optimierung ist. Das Modell besteht aus Tetraeder-Elementen mit einer minimalen Elementgröße von 1,5 mm. In relevanten Bereichen wie der Einspannung (dunkelblauer Bereich in Abbildung 6.13) wird das Netz lokal verfeinert. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle liegt an dem hervorgehobenen Punkt. An diesem Punkt wird die Kraft in das Modell geleitet und die Verschiebung / die Verformung, die der Nutzer neben der Reaktionskraft wahrnimmt, berechnet.

¹⁰ An der bearbeiteten Stelle (siehe grüne Markierung in Abbildung 6.9).

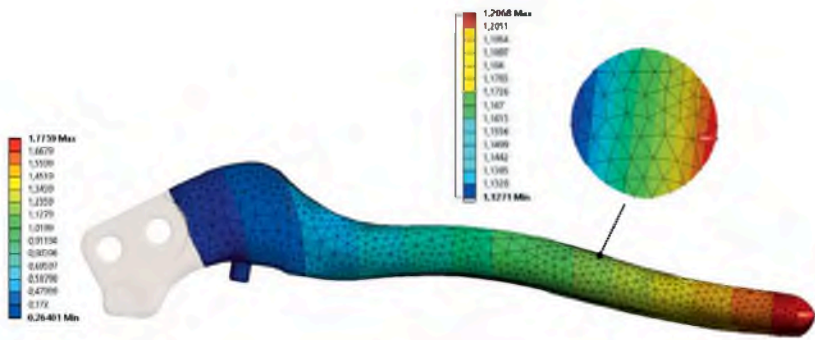


Abbildung 6.13: Die berechnete Verformung von Schere C5 in mm

Zur Parametrisierung des Simulationsmodells wird im Bereich der Griff einspannung eine Tasche eingefügt, deren Form und Größe veränderbar ist (siehe Abbildung 6.15). Es wäre denkbar, dem Modell weitere boolesche Elemente und Parameter hinzuzufügen. Da dieses Bauteil jedoch geschmiedet wird und der direkte Griffbereich nicht verändert werden soll, wird darauf verzichtet. Die Gesamtansicht des FE-Modells befindet sich im Anhang.

6.2.5 Optimierungsziele ermitteln

Auf Grundlage der Testergebnisse und der gemessenen Verformung wird das in Abbildung 6.14 dargestellte Regressionsmodell gebildet. Der Verlauf des Regressionsmodells zeigt, dass die Wertigkeit bei einem sehr steifen Scherengriff (Schere 5) von den Testpersonen als negativ empfunden wird, wobei eine zu geringe Steifigkeit (Verformung > 1,49 mm) ebenfalls einen negativen Einfluss auf das Bewertungsergebnis hat.

Der Zusammenhang zwischen den Bewertungen und der Verformung wird durch ein Polynom 3. Grades beschrieben (Formel (17)).

$$WQ(f) = -4,3f^3 + 7,9f^2 + 5f - 8,8 \quad (17)$$

Der Funktionsverlauf im untersuchten Verformungsbereich zeigt, dass das Optimum der Verformung f bzw. der Bewertung am Wendepunkt liegt. Somit ist das Optimum der lokale Extrempunkt der Funktion im Intervall von $1,2 \leq f \leq 1,68$ und wird durch die Lösung von Gleichung (18) bestimmt. Damit ist die höchste Bewertung bei einer Verformung von ca. 1,49 mm zu erwarten.

$$WQ'(f) = 0 = -12,9f^2 + 15,8f + 5 \quad (18)$$

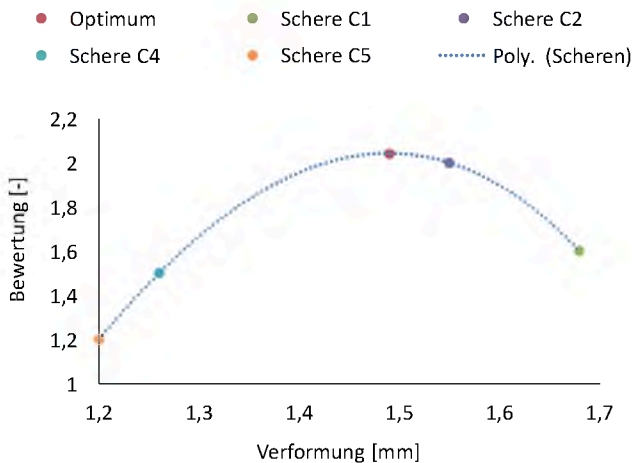


Abbildung 6.14: Darstellung des Regressionsmodells zur Optimierung der Schere bei Belastung

6.2.6 Optimierung durchführen

Ziel der Optimierung ist es, die Taschen des Griffs (siehe Kapitel 6.2.4) so anzupassen, dass eine optimale Verformung von 1,49 mm bei 200 N Belastung und einer maximalen Materialersparnis erreicht wird. Wie in Kapitel 4.6 beschrieben, müssen bei der Durchführung der Optimierung Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden, berücksichtigt und in den Prozess der Optimierung eingebunden werden. Da in den Anforderungen an die

Schere die maximal zulässige Belastung mit 500 N definiert ist und die Schere dabei keine plastische Verformung erfahren darf, muss die Optimierung mit einer Belastung von 500 N gerechnet werden. Da das Verhältnis zwischen der aufgebrachten Last und der resultierenden Verformung linear ist, kann die Optimierung ohne weitere Anpassung – Bezug auf das Regressionsmodell – mit der erhöhten Kraft von 500 N durchgeführt werden. Tabelle 6.5 zeigt die entsprechenden Response-Parameter.

Tabelle 6.5: Response-Parameter zur Optimierung der Schere bei Belastung

Response-Parameter	Ziel	Richtung
Verformung bei 200 N	$\leq 1,49 \text{ mm}$	Maximieren
Spannung bei 500 N	$< 260 \text{ Mpa}$	—
Masse	—	Minimieren

Die Optimierung wird mit optiSLang unter der Verwendung eines Latin Hypercube Sampling durchgeführt. Das Ergebnis der Optimierung in Form des finalen Griffdesigns zeigt Abbildung 6.15.

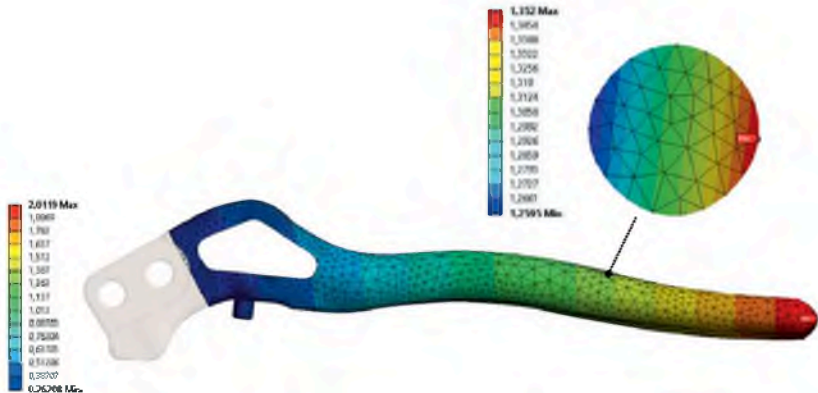


Abbildung 6.15: Verformung in mm der optimierten Schere bei einer Belastung von 200 N

Die Masse der Schere wird um ca. 4 % reduziert und die Verschiebung (bei einer Belastung von 200 N) am Kraftangriffspunkt von ca. 1,21 mm auf ca. 1,35 mm erhöht. Somit kann nach dem Regressionsmodell aus Abbildung 6.14 von einer Wertigkeitssteigerung von 1,2 auf 1,84 ausgegangen werden, was einer Steigerung von ca. 53 % entspricht. Auf dieser Datengrundlage wird die Vermutung des Herstellers, dass die Minderung der Steifigkeit einen geringeren Qualitätseindruck hervorruft, widerlegt.¹¹ Die Spannung liegt (mit $\sigma = 253$ MPa bei 500 N Belastung) unter der Streckgrenze von 260 MPa, sodass das verwendete Material eine weitere Vergrößerung der Tasche begrenzt. Da es sich bei dieser Belastung um einen einmaligen Prüfversuch handelt und die durchschnittliche Betriebslast deutlich unter dieser Belastungsgrenze liegt, werden Kriterien der Dauerfestigkeit nicht näher berücksichtigt. Der Verlauf der Von-Mises-Vergleichsspannung aus zwei Perspektiven ist Abbildung 6.16 zu entnehmen. Die rote Markierung im Bereich der Einspannung kennzeichnet das Spannungsmaximum.

¹¹ Bis zu einer Verformung von maximal 1,49 mm bei einer Belastung von 200 N. Eine weitere Erhöhung der Verformung würde den Qualitätseindruck vermindern.

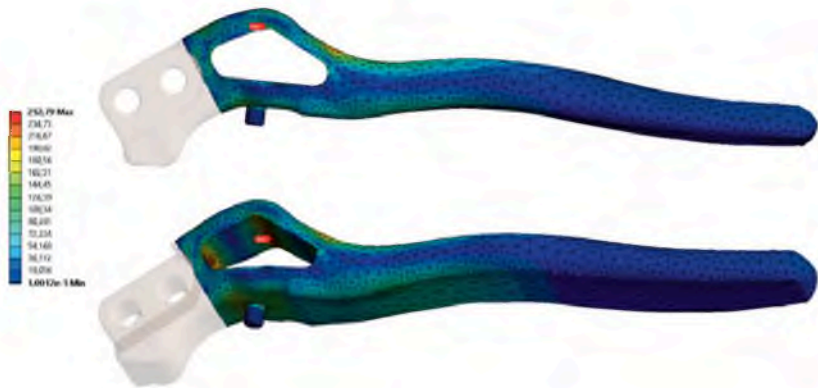


Abbildung 6.16: Vergleichsspannung nach von Mises in MPa bei einer Belastung von 500 N

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Bereich der haptischen Qualitätswahrnehmung liegt der Fokus der Forschung auf Produkten aus der Automobilindustrie. Hierbei zeigen einzelne Arbeiten, dass mithilfe von Mehrkörpersimulationen die Haptik von Drehschaltern oder Schaltgetrieben in Form von Kraft-Weg-Verläufen simuliert und optimiert werden kann. Jedoch fehlen – im Hinblick auf die Objektivierung der Qualitätswahrnehmung – Lösungswege, die eine durchgängige Optimierung mithilfe von Simulationsmodellen beschreiben. Infolgedessen werden mehr Prototypen benötigt, die Entwicklungszeit wird erhöht, und damit einhergehend steigt der finanzielle Aufwand. Eine Lösung dieser Problematik bietet das entwickelte Verfahren.

Die Grundlage der Arbeit bildet der Stand von Wissenschaft und Technik aus den Bereichen Psychologie, Ergonomie und Konstruktionstechnik. Auf dieser Basis beschreibt das entwickelte Verfahren den Ablauf zur systematischen Haptik-Optimierung. Das Verfahren beginnt mit der Systemanalyse, die der Findung von möglichen Qualitätsdeskriptoren dient. Darauf folgen der Aufbau und die Durchführung von Produkttests, die die Gewinnung von subjektiven Qualitätseindrücken der Probanden ermöglichen. Zur Schaffung einer verlässlichen Datengrundlage für den späteren Aufbau des Simulationsmodells wird ein Handschuhsystem zur Erfassung von Lastkollektiven verwendet, welches ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Die Ermittlung der haptischen Eigenschaften der Produkte erfolgt mithilfe von Messtechnik bzw. numerischen Simulationen. Anhand dieser subjektiven und objektiven Daten werden im nächsten Schritt Regressionsmodelle gebildet, die zur Ermittlung der Optimierungsziele genutzt werden. Diese werden abschließend im Rahmen einer numerischen Optimierung als Zielgrößen zur Berechnung der optimalen Designparameter verwendet.

Durch die Zielsetzung, das Verfahren möglichst anwendungsorientiert aufzubauen und zu beschreiben, wurden mehrere Produktbeispiele behandelt. Die Anwendungsbeispiele zeigen, dass das entwickelte Verfahren Produktentwicklern die Möglichkeit bietet, die Haptik von Produkten so zu gestalten, dass sie von der Zielgruppe als hochwertig wahrgenommen werden. Durch die systematische Ermittlung und Überführung der Zielgrößen in die Simulationstechnik kann dies nun vollständig in der Entwurfsphase der Produktentwicklung erfolgen. Anhand der Phasen der Produktentstehung nach VDI Richtlinie 2221 wird

der Effekt der Zeit- und Kosteneinsparung verdeutlicht (siehe Abbildung 7.1). Durch den Einsatz von Simulationstechnik wird die Optimierung der Produkthaptik vollständig in der Entwicklung und Konstruktion (grün hinterlegt) durchgeführt, wodurch die Anzahl an Prototypen, Versuchen und letztlich iterativen Schleifen zur Produktverbesserung (rote Pfeile) reduziert wird. Die Bereiche, in denen die Einsparungen stattfinden, sind gelb markiert.

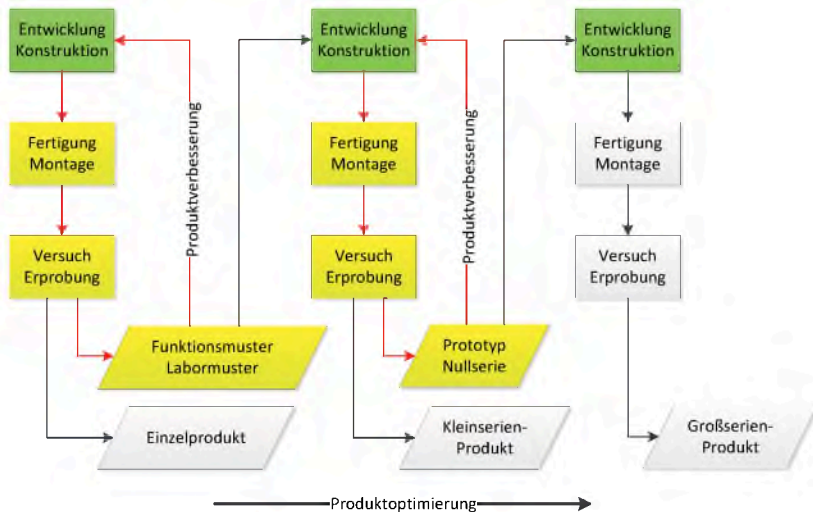


Abbildung 7.1: Phasen der Produktentstehung nach 2221 (1993)

Das Verfahren liefert somit einen Beitrag zur zielgerichteten, ressourcenschonenden Ermittlung und optimalen Auslegung von Qualitätsmerkmalen, die der Kunde bzw. Nutzer wahrnimmt und als hochwertig erachtet. Durch die Erprobung des Verfahrens anhand verschiedener Beispiele aus der Praxis konnte die Anwendbarkeit des Verfahrens auf unterschiedliche Fragestellungen im Bereich der haptischen Produktwahrnehmung nachgewiesen werden.

Mit dem voranschreitenden Anstieg an Rechenleistung und der Weiterentwicklung von numerischen sowie analytischen Berechnungsverfahren ist die Anwendung des Verfahrens für alle haptischen Nutzerschnittstellen in der Praxis denkbar – ebenso wie die Übertragbarkeit auf andere Sinne bzw. Wahrnehmungskanäle. So können beispielsweise optische Effekte, die aus elastischen Materialverformungen resultieren, analysiert und zielgerichtet im Produktentwurf optimiert werden. Dies sollte jedoch zuvor mit weiteren Beispielen evaluiert werden.

Weiterer Forschungsbedarf liegt im Einsatz von Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR). Durch den Einsatz von 3D-Brillen und AR-Systemen könnte in Zukunft – in Verbindung mit dem Einsatz von Robotertechnik und Force-Feedback-Systemen – ein Forschungsfeld entstehen, welches innerhalb des entwickelten Verfahrens eingesetzt wird. Denkbar ist der Einsatz solcher Systeme im Bereich der Nutzertests (siehe Kapitel 4.2). So ist beispielsweise zu prüfen, ob sich kollaborative Roboter zur Simulation des haptischen Verhaltens der Testobjekte einsetzen lassen. Bei entsprechender Eignung der Systeme (realitätsnahe Abbildung von haptischen Produkteigenschaften) ist dann sogar ein vollständiger Verzicht auf die Fertigung von Prototypen zur Versuchsdurchführung möglich.

Um die Objektivität im Bereich der Nutzerbefragung weiter zu steigern, sollten Möglichkeiten zur Ablösung von Fragebögen zur Messung der empfundenen Wertigkeit erforscht werden. Insbesondere der Einsatz von Elektroenzephalografie (EEG)-Systemen zur gezielten Messung von Hirnaktivitäten bietet weiteres Forschungspotenzial, da – wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben – die haptische Wahrnehmung und die menschliche Entscheidungsfindung definierten Arealen des Gehirns zuzuordnen ist.

Eine weitere Fragestellung resultiert aus dem Spannungsfeld der aktuellen Trends im Bereich der Produktentwicklung: additive Fertigung, Industrie 4.0 und Design Thinking. Ein Ziel der Methode des Design Thinking ist die möglichst frühe Realisierung von Produktideen und ersten Lösungen in Form von Prototypen, die dem Kunden bzw. Nutzer vorgestellt werden (vgl. Schallmo, 2017). Durch die Entwicklung im Bereich der additiven Fertigung und der Industrie 4.0 wird der Aufbau von Prototypen (bis hin zu fertigen Produkten) stetig effizienter, was letztendlich auch die Iterationsschritte des Design Thinking begünstigt. Der Nachteil – im Vergleich zu dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren – besteht darin, dass weiterhin ausschließlich Produktentwickler bzw. Produktdesigner über die Produktgestaltung entscheiden und dass intuitiv gestaltete Prototypen erstellt werden, die den Kunden zur Bewertung vorgelegt werden („Trial and Error“). Aus diesem Grund

erscheint es – auch im Zuge der voranschreitenden Entwicklungen im Bereich der additiven Verfahren – sinnvoll,

- a) die Vorteile der additiven Fertigung für den Verfahrensablauf zu erforschen (z. B. durch den Ausdruck von Produktmustern zur Nutzerbefragung aus dem potenziellen Serienwerkstoff) und
- b) die Implementierung des Verfahrens im Design-Thinking-Prozess zu untersuchen.

A Anhang

A.1 Sensoranordnung des Handschuhs

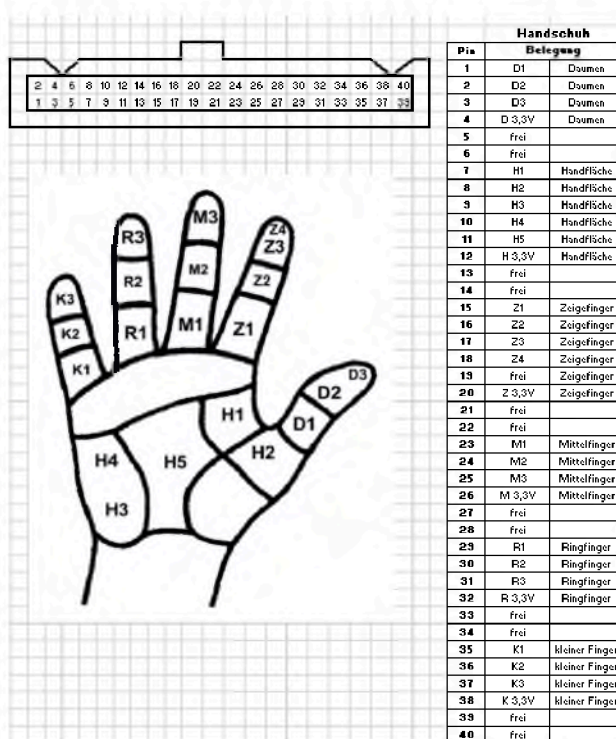


Abbildung A 1: Anordnung der Sensoren des Messhandschuhs (Odendahl, 2017)

A.2 Verwendete Messtechnik

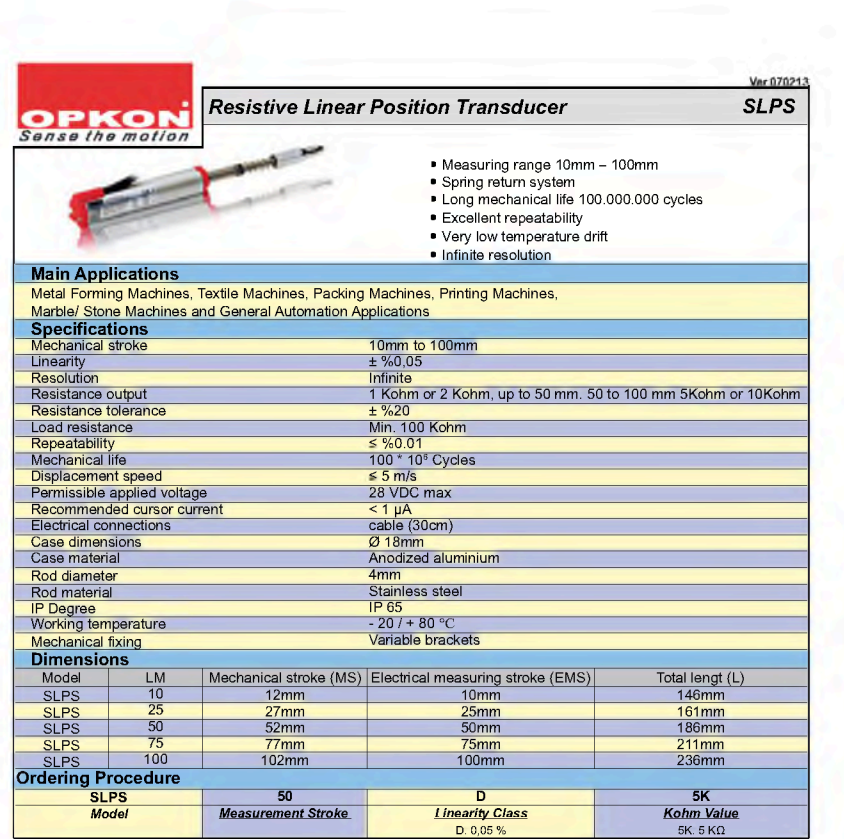


Abbildung A 2: Datenblatt – Linearpotentiometer OPKON SLPS-10-D-10K
(TDE-Instruments-b, 2018)

Ver.070213

OPKON
Sense the motion

Resistive Linear Position Transducer

SLPT

- Measuring range 10mm – 400mm
- Long mechanical life 100.000.000 cycles
- Excellent repeatability
- Very low temperature drift
- Infinite resolution

Main Applications

Metal Forming Machines, Textile Machines, Packing Machines, Printing Machines,
Marble/ Stone Machines and General Automation Applications

Specifications

Mechanical stroke	10mm to 400mm
Linearity	± %0.05
Resolution	Infinite
Resistance output	2 Kohm up to 50mm, 50 to 400 mm 5 Kohm or 10 Kohm
Resistance tolerance	± %20
Load resistance	Min. 100 Kohm
Repeatability	≤ %0.01
Mechanical life	100 * 10 ⁶ Cycles
Displacement speed	≤ 5 m/s
Permissible applied voltage	28 VDC max
Recommended cursor current	< 1 µA
Electrical connections	cable (30cm)
Case dimensions	Ø 18mm
Case material	Anodized aluminium
Rod diameter	4mm
Rod material	Stainless steel
IP Degree	IP 65
Working temperature	- 20 / + 80 °C
Mechanical fixing	Variable brackets

Dimensions

Model	LM	Mechanical stroke (MS)	Electrical measuring stroke (EMS)	Total lenght (L)
SLPT	10	12mm	10mm	78mm
SLPT	25	27mm	25mm	93mm
SLPT	50	52mm	50mm	118mm
SLPT	75	77mm	75mm	143mm
SLPT	100	102mm	100mm	168mm
SLPT	125	127mm	125mm	193mm
SLPT	150	152mm	150mm	218mm
SLPT	175	177mm	175mm	243mm
SLPT	200	202mm	200mm	268mm
SLPT	250	252mm	250mm	318mm
SLPT	300	302mm	300mm	368mm
SLPT	350	352mm	350mm	418mm
SLPT	400	402mm	400mm	468mm

Ordering Procedure

SLPT

Measurement Stroke

D

Linearity Class

5K

Kohm Value

Model

D: 0,05 %

5K: 5 KΩ
10K: 10 KΩ

Abbildung A 3: Datenblatt – Linearpotentiometer Opkon SLPT-150-D-10K
 (TDE-Instruments-a, 2018)

A Anhang

Typ						S2M			
Nennkraft	F_{nom}	N	10	20	50	100	200	500	1000
Genauigkeit									
Genauigkeitsklasse			0,02						
Rel. Spannweite in unveränderter Einbaulage	b_g	%	0,02						
Relative Umkehrspanne	v		0,02						
Linearitätsabweichung	d_{lin}		0,02						
Relatives Kriechen über 35 min.	$d_{\text{kr, F+E}}$		0,02						
Biegemomenteneinfluss bei 10% $F_{\text{nom}} \cdot 10 \text{ mm}$	d_B		0,02						
Querkrafteinfluss (Querkraft = 10% F_{nom})	d_Q		0,02						
Temperatureinfluss auf den Kennwert	TK_C		0,02						
Temperatureinfluss auf das Nullsignal	TK_0		0,02						
Elektrische Kennwerte									
Nennkennwert	C_{nom}	mV/V	2						
Relative Abweichung des Nullsignals	$d_{N, 0}$	%	5						
Relative Kennwertabweichung	d_C		0,25						
Relativer Kennwertunterschied Zug/Druck	d_{2C}		0,1						
Eingangswiderstand	R_i		> 345						
Ausgangswiderstand	R_a	Ω	350 \pm 50						
Isolationswiderstand	R_{is}	G Ω	> 2						
Gebrauchsbereich der Spisespannung	$U_{\text{U, 0}}$	V	0,5 ... 12						
Referenzspisespannung	U_{ref}		5						
Anschluss	Sechselekt-Schaltung								
Temperatur									
Nenntemperaturbereich	$B_{T, \text{nom}}$	$^{\circ}\text{C}$	-10 ... +45						
Gebrauchstemperaturbereich	$B_{T, 0}$		-10 ... +70						
Lagerungstemperaturbereich	$B_{T, 0}$		-10 ... +85						
Mechanische Kenngrößen									
Maximale Gebrauchskraft	F_G	%	150						
Grenzkraft	F_L		1000						
Bruchkraft	F_B		1000						
Grenzdehnmoment	M_G	Nm	4	8	25	28			
Grenzbiegemoment	$M_{G, 2D}$		6	25	34	50	71	05	125
Statische Grenzquerkraft	F_Q		% von F_{nom}	100					
Nennmessweg	$s_{\text{N, 0}}$	mm	0,27	0,21	0,18	0,15	0,13	0,12	0,13
Grundresonanzfrequenz	f_G	Hz	94,4	146	243	358	475	582	618
Relative zulässige Schwingbeanspruchung	$F_{T, 0}$	% von F_{nom}	140						
Allgemeine Angaben									
Schutzart nach DIN EN 60529	IP 67								
Messkörperwerkstoff	Aluminium								
Vergussmasse	Silikon								
Kabel	Sechselekt-Schaltung, PUR-Isolierung, schlenkettensuglich								
Kabellänge	8								
Masse (mit Kabel)	0,5								

Abbildung A 4: Technische Daten – Kraftaufnehmer: HBM – S2M 100N (HBM-a, 2018)

Typ			S9M							
Nennkraft	F_{nom}	kN	0.5	1	2	5	10	20	50	
Genauigkeit										
Genauigkeitsklasse			0,02							
Relative Spannweite in unveränderter Einbaulage	b_{ig}	%	0,02							
Rel. Umkehrspanne	v		0,02							
Linearitätsabweichung	d_{lin}		0,02							
Relatives Kriechen	d_{cr+E}		0,02							
Temperatureinfluss auf den Kennwert	TK_C	% / 10K	0,02							
Temperatureinfluss auf das Nullsignal	TK_0		0,02							
Elektrische Kennwerte										
Nennkennwert	C_{nom}	mV/V	2							
Relative Abweichung des Nullsignals	$d_{a,0}$		5							
Kennwertabweichung	d_C	%	0.25							
Kennwertunterschied Zug/Druck	d_{zd}		0.1							
Eingangswiderstand	R_e	Ω	389 ± 15							
Ausgangswiderstand	R_a		350 ± 1.5							
Isolationswiderstand	R_{is}	Giga Ω	>2							
Gebrauchsbereich der Speisespannung	U_{ugt}	V	0.5...12							
Referenzspeisespannung	U_{ref}		5							
Anschluss			6-Leiterschaltung							
Temperatur										
Referenztemperatur	T_{ref}	°C	+23							
Nenntemperaturbereich	$B_{L,nom}$		-10...+70							
Gebrauchstemperaturbereich	B_{Lg}		-30...+85							
Lagortemperaturbereich	B_{LS}		-30...+85							
Mechanische Kenngrößen										
Maximale Gebrauchskraft	F_G	% von F_{nom}	150							
Grenzkraft	F_L		150							
Bruchkraft	F_B		200		300		200			
Grenzdrehmoment	$M_{G, zul}$	Nm	25	50	90		150			
Statische Grenzquerkraft	F_q	% von F_{nom}	10							
Nennmessweg	s_{nom}	mm	0.35	0.4	0.35	0.1	0.2	0.2	0.4	
Grundresonanzfrequenz	f_G	kHz	0,6	0,9	1	1,7	2,1	2,3	2,5	
Relative zulässige Schwingbeanspruchung	F_{ra}	% von F_{nom}	100							70
Allgemein Angaben										
Schutzart nach EN 60529			IP68 Prüfbedingung 1 m Wassersäule / 100 Stunden							
Federkörperwerkstoff			Rostfreier Stahl nach EN 10088-1							
Messstellenschutz			Hermetisch verschweißtes Gehäuse							

Abbildung A 5: Technisches Datenblatt – Kraftaufnehmer: HBM – S9M 1kN
(HBM-b, 2018)

A.3 Modelldaten aus der Simulation des Handygehäuses

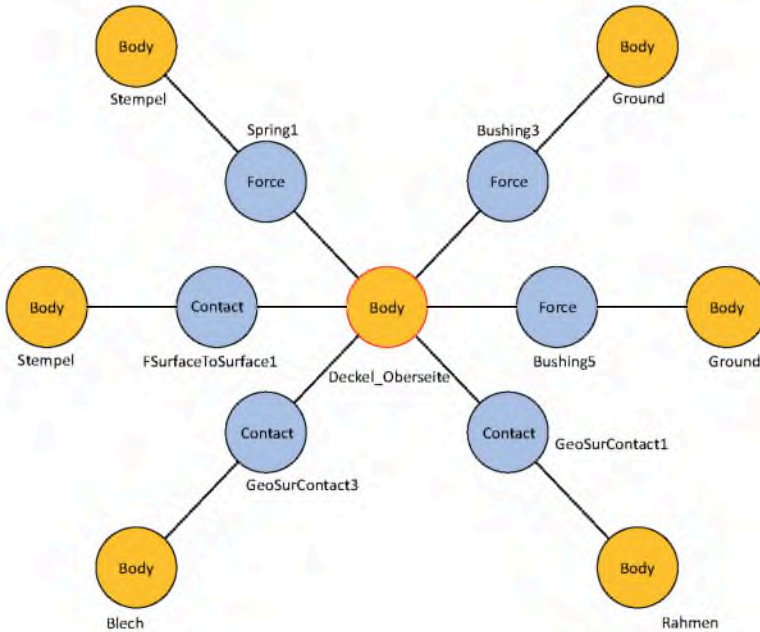
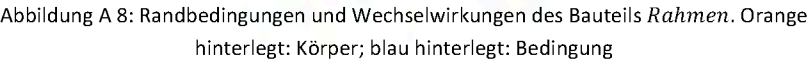


Abbildung A 6: Randbedingungen und Wechselwirkungen des Bauteils *Deckel_Oberseite*. Orange hinterlegt: Körper; blau hinterlegt: Bedingungen



Abbildung A 7: Randbedingungen und Wechselwirkungen des Bauteils *Deckel_Unterseite*. Orange hinterlegt: Körper; blau hinterlegt: Bedingung



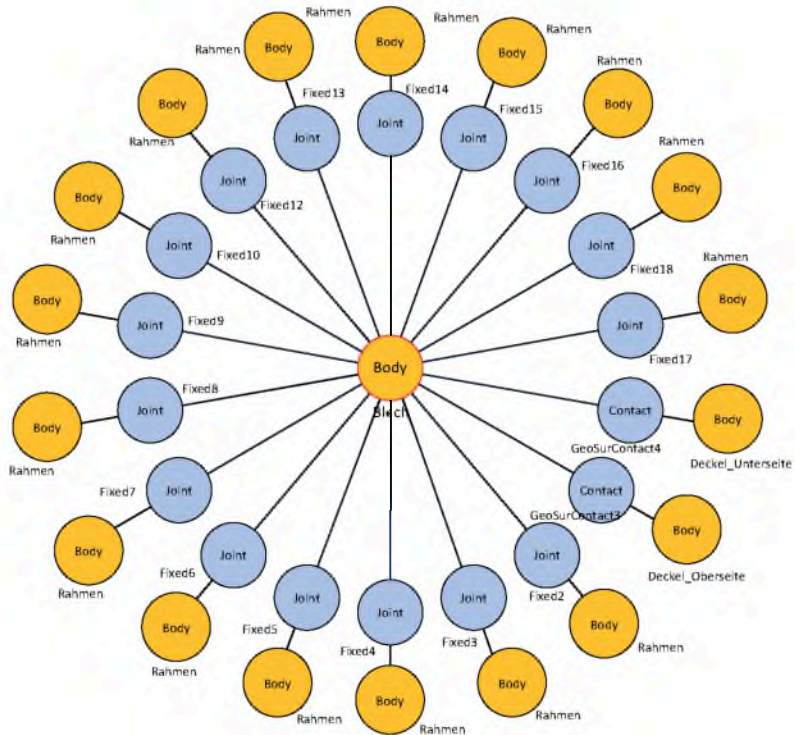


Abbildung A 9: Randbedingungen und Wechselwirkungen des Bauteils *Blech*. Orange hinterlegt: Körper; blau hinterlegt: Bedingung

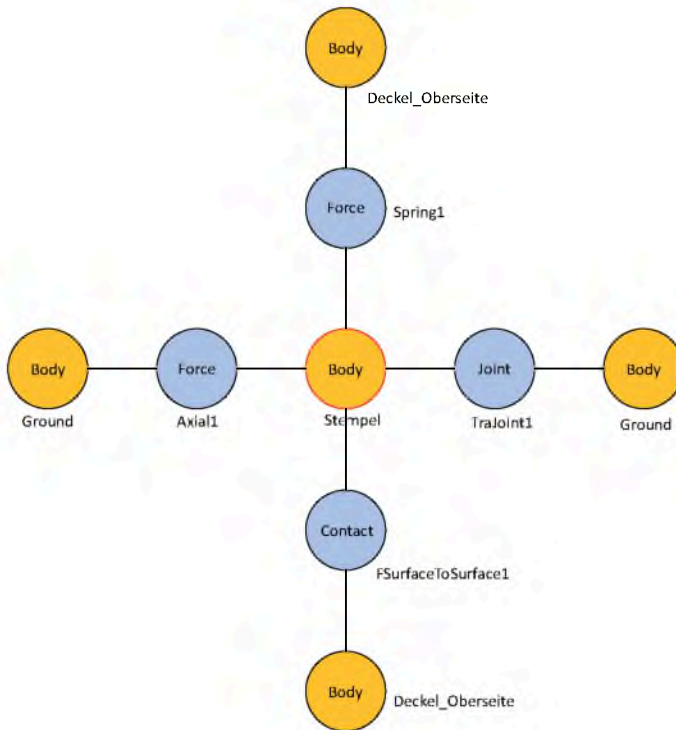


Abbildung A 10: Randbedingungen und Wechselwirkungen des Bauteils *Stempel*.
Orange hinterlegt: Körper; blau hinterlegt: Bedingung

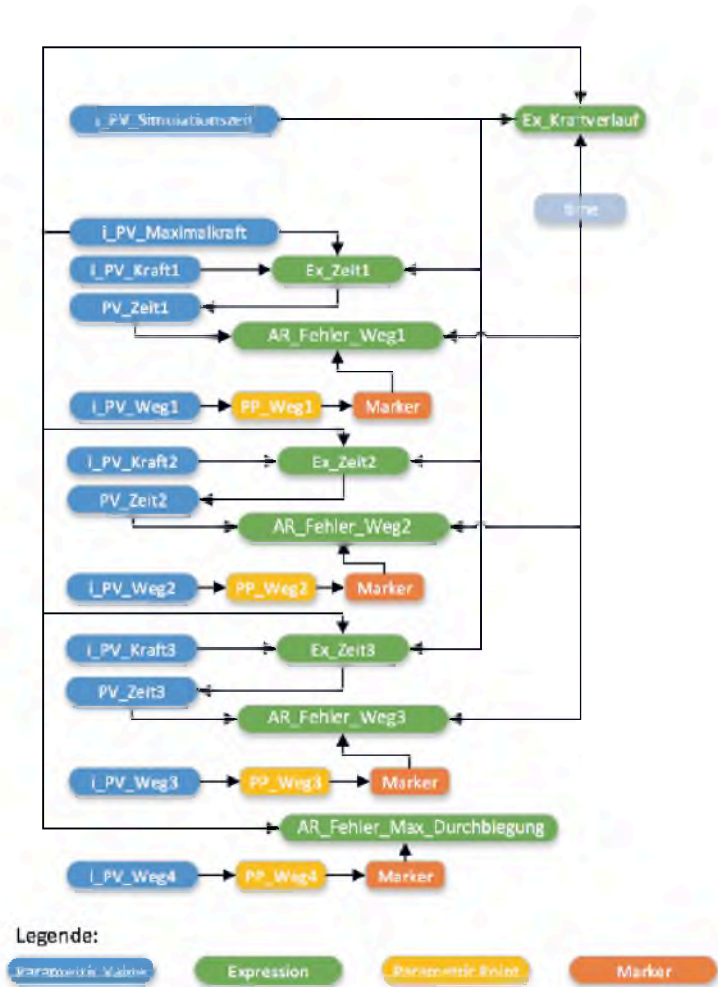


Abbildung A 11: Informationsfluss zur Erzeugung der Response-Funktion für die Optimierung des Handygehäuses, nach Hoppe (2017)

A.4 Daten der Scheren A1-A6 und B1-B6

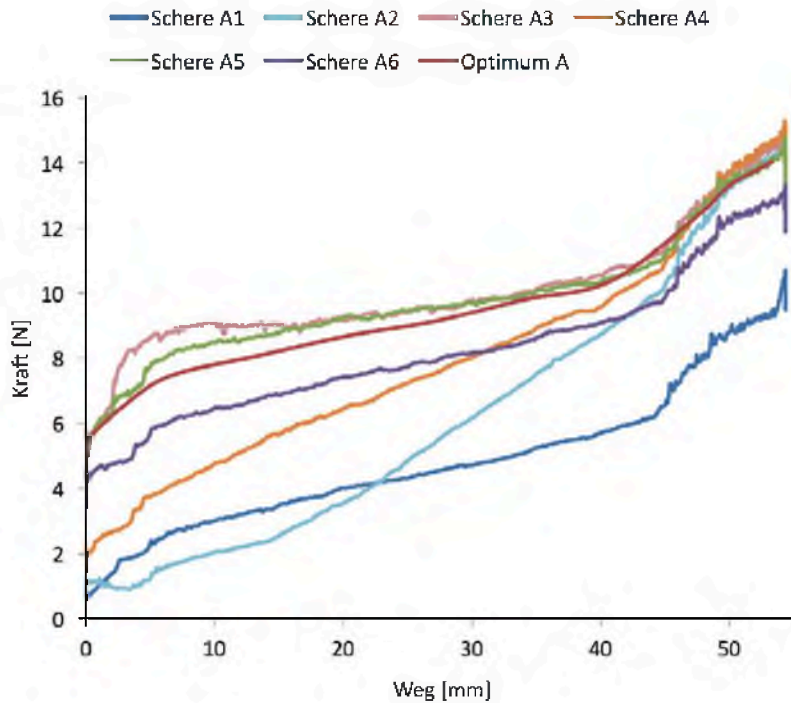


Abbildung A 12: Messkurven der Scheren A1 bis A6 im Vergleich zum ermittelten Optimum A

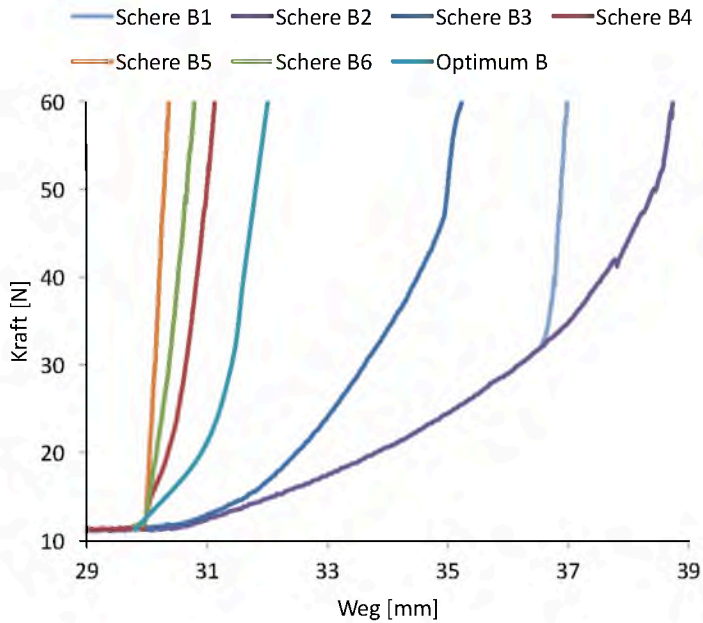


Abbildung A 13: Messkurven der Scheren B1 bis B6 im Vergleich zum ermittelten Optimum B

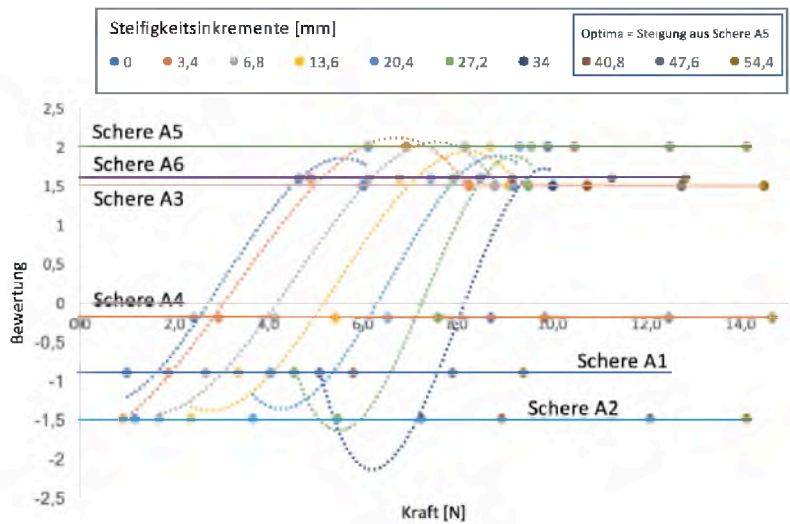


Abbildung A 14: Regressionsmodelle der Scheren A1 bis A6

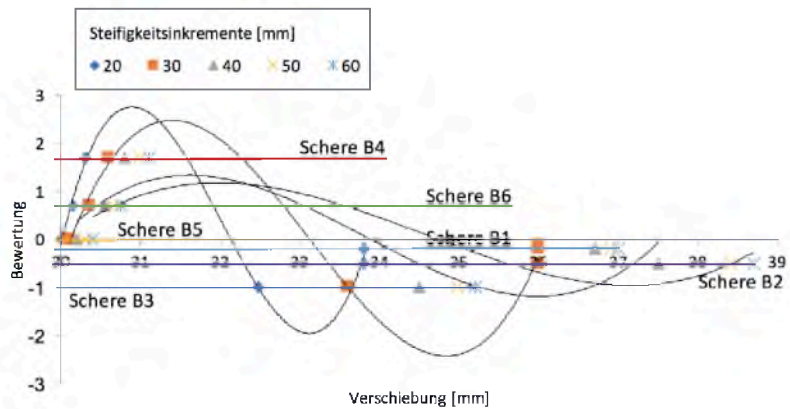


Abbildung A 15: Regressionsmodelle der Scheren B1 bis B6

A.5 Gesamtansicht des FE-Modells der Schere C5

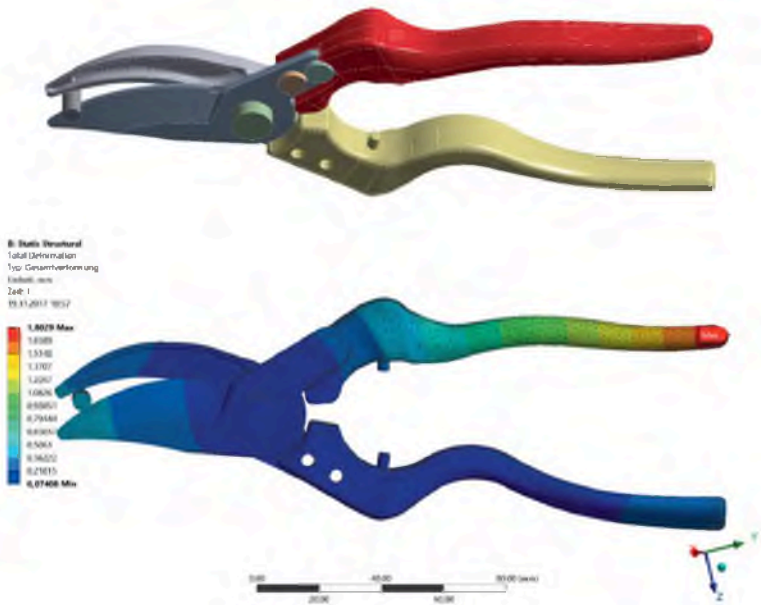


Abbildung A 16: Gesamtansicht der Gartenschere. Obere Darstellung: CAD-Modell der gesamten Baugruppe. Untere Darstellung: FE-Modell in der Gesamtansicht bei einer Belastung von 500 N.

Literaturverzeichnis

2221, V., 1993. VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag.

9241-910, 2011. DIN EN ISO 9241-910:2011-11: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion. Berlin: Beuth Verlag.

Angelov, N., 2009. Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und Bedienfeldern für den Kfz-Innenraum. Dresden, Techn. Univ.: Dissertation. Berlin: dissertation.de – Verlag im Internet GmbH

apple.com, 2017. Apple celebrates one billion iPhones. [Online] Available at: www.apple.com/newsroom/2016/07/apple-celebrates-one-billion-iphones.html [Zugriff am 20. 08.2017].

Babashahi, A., 2017. Formoptimierung eines handgeführten Werkzeugs. Abschlussarbeit Bergische Universität Wuppertal: Lehrstuhl Konstruktion.

Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R., 2016. Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung. 14. Auflage Berlin Heidelberg: Springer Gabler.

Battenberg, 2008. Internetpräsenz der Battenberg Robotic GmbH & Co. KG. [Online] Available at: www.battenberg.biz

Bauer, W. & Dangelmaier, M., 2016. Virtuelles Engineering. In: Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, pp. 939–952.

Bensaïa, S. J. & Yau, J. M., 2011. The Organization and Function of Somatosensory Cortex. In: S. J. Weiss, Hrsg. The Handbook of Touch: Neuroscience, Behavioral and Health Perspectives. New York: Springer, pp. 161–188.

- Bickel, P. J. & Doksum, K. A., 2007. *Mathematical Statistics: Basic Ideas and Selected Topics*. New York: Chapman and Hall/CRC.
- Birbaumer, N. & Schmidt, R. F., 2010. *Biologische Psychologie*. 7. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Bortz, J. & Schuster, C., 2010. *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 7. Auflage Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Bullinger, H.-J., 1994. *Ergonomie – Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Bullinger, H. & Solf, J., 1979. *Ergonomische Arbeitsmittelgestaltung II. Handgeführte Werkzeuge – Fallstudien*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- Chin, W. W., 1998. The Partial Least Squares Approach to Structural Equation Modeling. In: *Modern methods for business research*. Mahawa: Lawrence Erlbaum Associates, pp. 295–336.
- Clauss, W., 2009. *Humanbiologie kompakt*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Corlett, E. N. & Bishop, R. P., 1976. A technique for assessing postural discomfort. In: *Ergonomics*. Birmingham: Taylor & Francis.
- Cramer, E. & Kamps, U., 2017. *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik [Elektronische Ressource]: Eine Einführung für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften*. 4. Auflage Berlin: Springer Spektrum.
- Dangelmaier, M. & Haselberger, F., 2008. Immersive virtuelle Begehung und Inspektion. In: *Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*. Paderborn: 7. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, pp. 127–139.
- Danzer, W., 2016. *Qualitätsmanagement in der Produkt- und Prozessentwicklung. Kundenorientiert entwickeln und zielsicher planen*. München: Carl Hanser Verlag.
- Davis, G., Donin, R., Findlay, M. et al., 2004. Simulationsgestützte Optimierung der Schaltqualität von Handschaltgetrieben. *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*, Ausgabe 7–8/2004, 8, pp. 668–675.

Döring, N. & Bortz, J., 2016. Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. 5. Auflage Berlin Heidelberg: Springer.

Dylla, S., 2009. Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der subjektiv erlebten Schaltbetätigungsqualität von Fahrzeugen mit manuellem Schaltgetriebe. Karlsruhe: Dissertation – Forschungsberichte IPEK.

Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. & Mörtl, M., 2014. Kostengünstig entwickeln und konstruieren [Elektronische Ressource]: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Auflage Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Eigner, M. R. D., 2014. Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

Fahrmeir, L., Kneib, T. & Lang, S., 2009. Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Falk, B., Quattelbaum, B. & Schmitt, R., 2010. Product Quality from the Customers' Perspective – Systematic Elicitation and Deployment of Perceived Quality Information. In: Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 211–222.

Falk, F. R. & Miller, N. B., 1992. A Primer for Soft Modeling. Akron: The University of Akron.

Fazel, L., 2014. Akzeptanz von Elektromobilität – Entwicklung und Validierung eines Modells unter Berücksichtigung der Nutzungsform des Carsharing. Wiesbaden: Springer Gabler.

FunctionBay, 2017. RecurDyn Professional – functionbay.org. [Online] Available at: http://www.functionbay.org/flexible-multibody-dynamics-software/catalog/recurdyn_professional-item-9.html [Zugriff am 20.12.2017].

Gerling, M. & Witte, D., 2017. Optimierung einer Gartenschere mithilfe einer Mehrkörpersimulation. Studienarbeit Bergische Universität Wuppertal: Lehrstuhl Konstruktion.

Goldstein, E. B., 1997. Wahrnehmungspsychologie – Eine Einführung. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

- Grunwald, M., 2009. Der Tastsinn im Griff der Technikwissenschaften? Herausforderungen und Grenzen aktueller Haptikforschung. Leipzig: LIFIS ONLINE.
- Gust, P., Ünlü, A. & Hoppe, M., 2016. Developing of a System for Measuring and Evaluating the Hand Stress in Relation to the Strain Index. In: Advances in Ergonomics in Design – Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Ergonomics in Design. Florida: Springer Verlag, pp. 455–463.
- Gust, P. & Mersch, F., 2014. The use of RecurDyn in the simulation of a man-machine interaction: Optimization of the product haptic with RecurDyn V8, München: RecurDyn Technologie Tage.
- Gust, P. & Mersch, F., 2016. Method to Handle Haptics Optimization of Products Based on Simulation Models. In: Advances in Affective and Pleasurable Design. Berlin: Springer Nature, pp. 423–432.
- Halata, Z. & Baumann, K., 2008. Anatomy of Receptors. In: M. Grundwald, Hrsg. Human Haptic Perception: Basics and Applications. Basel: Birkhäuser, pp. 85–92.
- Hartig, J., Frey, A. & Jude, N., 2012. Validität. In: Testtheorie und Fragebogenkonstruktion. 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 143–171.
- HBM-a, 2018. S2M Kraftaufnehmer Hochpräziser „S-Type“-Kraftaufnehmer. [Online] Available at: www.hbm.com/de/3364/s2m-kraufnehmer-zum-messen-von-zug-und-druckkraeften/ [Zugriff am 05.01.2018].
- HBM-b, 2018. S9M Hochpräziser „S-Type“-Kraftaufnehmer, sehr gut geschützt. [Online] Available at: <https://www.hbm.com/de/2425/s9m-kraftaufnehmer-fuer-viele-anwendungen/> [Zugriff am 05.01.2018].
- Henseler, J., Ringe, C. M. & Sinkovics, R. R., 2009. The use of partial least squares path modeling in international marketing. In: Advances in International Marketing. Bingley: Emerald Group Publishing Limited, pp. 277–319.
- Homburg, C., 2001. Kundenzufriedenheit – Konzepte. Methoden. Erfahrungen. 4. Auflage Wiesbaden: Gabler Verlag.

- Hoppe, M., 2017. Simulation und Optimierung eines Handygehäuses. Studienarbeit Bergische Universität Wuppertal: Lehrstuhl Konstruktion.
- Hsiao, S. S. & Yau, J., 2008. Neural Basis of Haptic Perception. In: M. Grundwald, Hrsg. Human Haptic Perception: Basics and Applications. Basel: Birkhäuser, pp. 101–112.
- Huber, F. et al., 2007. Kausalmodellierung mit Partial Least Squares – Eine anwendungsorientierte Einführung. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Huber, F., Meyer, F. & Lenzen, M., 2014. Grundlagen der Varianzanalyse, Konzeption – Durchführung – Auswertung. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Hulland, J., 1999. Use of partial least squares (PLS) in strategic management research: a review of four recent studies. Strategic Management Journal, 02, Vol. 20(2), pp. 195–204.
- Kern, T. A. et al., 2009. Entwicklung haptischer Geräte. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kiekert AG, 2016. Haptik – Kiekert fühlt sich gut an!. [Online] Available at: <http://www.kiekert.com/de/komfort/haptik> [Zugriff am 03.10.2017].
- Kim, M.-S. & Cho, H. & Lee, S.-G. & Choi, J. & Bae, D., 2007. DFSS and Robust Optimization Tool for Multibody System with Random Variables. Journal of System Design and Dynamics, Vol. 1 (No. 3), pp. 583–592.
- Klein, B., 2015. FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 10. Auflage Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Koschnick, F., 2004. Geometrische Locking-Effekte bei Finiten Elementen und ein allgemeines Konzept zu ihrer Vermeidung. München: Dissertation.
- Kühner, M. L., 2014. Haptische Unterscheidbarkeit mechanischer Parameter bei rotatorischen Bedienelementen. TU München: Dissertation.
- Lederman, S. J. & Klatzky, R. L., 1987. Hand movements: A window into haptic object recognition. Cognitive Psychology, 19(3), pp. 342–368.
- Lowe, B., Kong, Y. & Han, J., 2006. Development and application of a hand force measurement system. Proceedings of the XVIth Triennial Congress of the International Ergonomics Association.

Matthiesen, S., Germann, R., Schmidt, S. & Uhl, M., 2016. Prozessmodell zur anwendungsorientierten Entwicklung von Power-Tools. Hamburg, Zweite transdisziplinäre Konferenz zum Thema „Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen“.

Meßlinger, K., 2014. Somatoviszzerale Sensibilität. In: H. C. Pape, A. Kurtz & S. Silbernagl, (Hrsg.) Physiologie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, pp. 701–735.

Mercedes-Benz, 2017. Next Level Interieur-Design für die künftige E-Klasse. [Online] Available at: <https://www.mercedes-benz.com/de/mercedes-benz/design/modelle/next-level-interieur-design-fuer-die-kuenftige-e-klasse/> [Zugriff am 20.11.2017].

Meywerk, M., 2007. CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

Moosbrugger, H. & Kelava, A., 2012. Qualitätsanforderungen an einen psychologischen Test (Testgütekriterien). In: A. Kelava, Hrsg. Testtheorie und Fragebogenkonstruktion. 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Nißl, A. M., 2006. Modell zur Integration der Zielkostenverfolgung in den Produktentwicklungsprozess. München: Dissertation.

Nikonovas, A., Harrison, A. J., Sammut, D. & Hoult, S., 2004. The application of forcesensing resistor sensors for measuring forces developed by the human hand. Journal of Engineering, 01 02, pp. 121–126.

nobelprize.org, 2014. „Der Preis für Wirtschaftswissenschaften des Jahres 2002 – Pressemitteilung“. [Online] Available at: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/2002/press-ge.html [Zugriff am 14.10.2017].

Odendahl, F., 2017. Entwicklung und Aufbau eines Messsystems zur Analyse der Belastung von handgeführten Produkten. Abschlussarbeit Bergische Universität Wuppertal: Lehrstuhl Konstruktion.

Olson, J. & Jacoby, J., 1972. Cue Utilization in the Quality Perception Process. In: SV – Proceeding of the Third Annual Conference of the Association for Consumer Research. Chicago: Association for Consumer Research, pp. 167–179.

Papula, L., 2016. Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler – Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Quattelbaum, B. & Schmitt, R., 2009. Qualität so wie der Kunde sie wahrnimmt – Umsetzung der wahrgenommenen Qualitätsmerkmale in der gesamten Wertschöpfungskette. In: Erfolgsfaktor Qualität – 20 Jahre FQS. 2009: Deutsche Gesellschaft für Qualität, pp. 146–157.

Rill, G. & Schäfer, T., 2017. Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Samorey, K., 2016. Entwicklung eines Simulationsmodells zur Optimierung der wahrgenommenen Produktqualität am Beispiel eines elektrisch betriebenen Rollators. Abschlussarbeit Bergische Universität Wuppertal: Lehrstuhl Konstruktion.

Schäfer, K., Braun, H. A. & Kürten, L., 1988. Analysis of Cold and Warm Receptor Activity in Vampire Bats and Mice. *European Journal of Physiology*, p. 188–194.

Schallmo, D. R., 2017. Design Thinking erfolgreich anwenden – So entwickeln Sie in 7 Phasen kundenorientierte Produkte und Dienstleistungen. Wiesbaden: Springer Gabler.

Schmitt, R. & Betzold, M., 2007. Der Kunde entscheidet am Produkt. Die wahrgenommene Qualität. *Management und Qualität*, 10, pp. 14–16.

Schmitt, R. & Pfeifer, T., 2015. Qualitätsmanagement: Strategien – Methoden – Techniken. 3. Auflage München: Carl Hansa Verlag GmbH & Co. KG.

Spiegel, 2014. Spiegel Online – Kunden beschwerten sich über verbogene iPhones. [Online] Available at: <http://www.spiegel.de/netzwelt/gadgets/apple-iphone-6-plus-laesst-sich-verbiegen-a-993446.html> [Zugriff am 10.01.2018].

Spingler, M. R., 2011. Metrological System for Perceived Quality Parameters to Establish Transfer Functions to Human Perception. Aachen: Apprimus Verlag.

Strasser, H. & Bullinger, H.-J., 2007. A Systematic Approach for the Analysis and Ergonomic Design of Hand-Held Tools and Control Actuators – Visualized by some Real-Life Examples. In: H. Strasser, Hrsg. Assessment of the Ergonomic Quality of Hand-Held Tools and Computer Input Devices. Amsterdam; Washington, DC: IOS Press.

Taylor, W. A., 2017. Methods and Tools for Process Validation. [Online] Available at: <http://www.variation.com/techlib/val-1.html> [Zugriff am 20.11.2017].

TDE-Instruments-a, 2018. Opkon SLPT Linearpotentiometer. [Online] Available at: www.tde-instruments.de/component/content/article/1654-opkon-slpt-linearpotentiometer.html [Zugriff am 05.01.2018].

TDE-Instruments-b, 2018. Opkon SLPT Linearpotentiometer. [Online] Available at: www.tde-instruments.de/component/content/article/1654-opkon-slpt-linearpotentiometer.html [Zugriff am 05.01.2018].

Tekscan, 2017. Tekscan Inc. Tekscan's Grip™ System. [Online] Available at: <https://www.tekscan.com/applications/product-ergonomics-grip-testing> [Zugriff am 10.11.2017].

Währisch, S. & Wall, C., 2012. Haptik- und Akustik – Simulation von Kfz-Bedienelementen, Dresden: 6. Tagung Feinwerktechnische Konstruktion.

Wakula, J., Berg, K., Schaub, K. & Bruder, R., 2009. Der montagespezifische Kraftatlas. In: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Hrsg. (BGIA-Report 3/2009). Berlin.

Will, J., Baldauf, H. & Bucher, C., 2006. Robustheitsbewertung bei der virtuellen Auslegung passiver Sicherheitssysteme und beim Strukturcrash. 3. Weimarer Optimierung- und Stochastiktag, 23-24 11.

Woernle, C., 2016. Mehrkörpersysteme – Eine Einführung in die Kinematik und Dynamik von Systemen starrer Körper. 2. Auflage Heidelberg: Springer Vieweg.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Geburtsdatum/-ort 07. April 1987, Schwelm

Kontakt frank_mersch@gmx.de

Schule und Studium

2011–2013 Qualitätsingenieurwesen, Master of Science
Bergische Universität Wuppertal

2007–2011 Maschinenbau, Bachelor of Science
Bergische Universität Wuppertal

2003–2006 Allgemeine Hochschulreife
Berufskolleg Werther Brücke, Wuppertal

Berufliche Tätigkeiten

2015–2017 Qualitätsbeauftragter
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Bergische Universität Wuppertal

Seit 2013 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Lehrstuhl Konstruktion, Bergische Universität Wuppertal

2011–2013 Technischer Angestellter
Lehrstuhl Konstruktion, Bergische Universität Wuppertal

Veröffentlichungen

Schluer, C., Gust, P., Mersch, F., Diepschlag, F., Sersch, A., 2017. A geometric approach to tolerance analysis: Contribution to the robust design of flexible assemblies, 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vancouver, Canada

Gust P., Mersch F., 2017. Method to Handle Haptics Optimization of Products Based on Simulation Models. In: Chung W., Shin C. (eds) Advances in Affective and Pleasurable Design. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 483. Springer, Cham

Gust, P., Ünlü, A., Mersch, F., Feller, N. 2016. „Wir packen es an“ – Von der Konstruktion zur Innovation, BUW-Output August

Gust P., Mersch F., 2016. Method to Handle Haptics Optimization of Products Based on Simulation Models. AHFE-Konferenz, Florida

Gust, P., Mersch, F., (2014). The use of RecurDyn in the simulation of a man-machine interaction – Optimization of the product haptic with RecurDyn V8, RecurDyn Technologie Tage, München

Online-Buchshop für Ingenieure

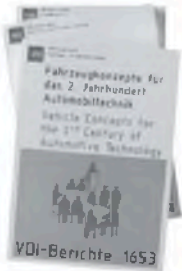
■ ■ VDI nachrichten

BUCHSHOP

Online-Shops



**Fachliteratur und mehr -
jetzt bequem online recher-
chieren & bestellen unter:
www.vdi-nachrichten.com/
Der-Shop-im-Ueberblick**



**Täglich aktualisiert:
Neuerscheinungen
VDI-Schriftenreihen**



Im Buchshop von vdi-nachrichten.com finden Ingenieure und Techniker ein speziell auf sie zugeschnittenes, umfassendes Literaturangebot.

Mit der komfortablen Schnellsuche werden Sie in den VDI-Schriftenreihen und im Verzeichnis lieferbarer Bücher unter 1.000.000 Titeln garantiert fündig.

Im Buchshop stehen für Sie bereit:

VDI-Berichte und die Reihe **Kunststofftechnik**:

Berichte nationaler und internationaler technischer Fachtagungen der VDI-Fachgliederungen

Fortschritt-Berichte VDI:

Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte aus sämtlichen ingenieurwissenschaftlichen Fachrichtungen

Newsletter „Neuerscheinungen“:

Kostenfreie Infos zu aktuellen Titeln der VDI-Schriftenreihen bequem per E-Mail

Autoren-Service:

Umfassende Betreuung bei der Veröffentlichung Ihrer Arbeit in der Reihe Fortschritt-Berichte VDI

Buch- und Medien-Service:

Beschaffung aller am Markt verfügbaren Zeitschriften, Zeitungen, Fortsetzungsreihen, Handbücher, Technische Regelwerke, elektronische Medien und vieles mehr – einzeln oder im Abo und mit weltweitem Lieferservice

VDI nachrichten

BUCHSHOP

www.vdi-nachrichten.com/Der-Shop-im-Ueberblick

Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
 - 2 Fertigungstechnik
 - 3 Verfahrenstechnik
 - 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
 - 6 Energietechnik
 - 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
 - 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
 - 10 Informatik/Kommunikation
 - 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
 - 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
 - 15 Umwelttechnik
 - 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
 - 21 Elektrotechnik
 - 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-344601-8