



Institut für Konstruktionstechnik  
und Technisches Design  
Universität Stuttgart  
Forschungs- und Lehrgebiet  
Technisches Design  
Prof. Dr.-Ing. T. Maier

Felix Oberhofer

# **Untersuchung von Modellen und Werkzeugen der Produktgestaltung und deren adaptive Einbindung**

Bericht Nr. 713



# **Untersuchung von Modellen und Werkzeugen der Produktgestaltung und deren adaptive Einbindung**

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der  
Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Felix Oberhofer

geboren in Stuttgart

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath (i.R.)

Tag der mündlichen Prüfung: 08.02.2022

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design

Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design

Universität Stuttgart

2022

**D 93**

**ISBN-13: 978-3-946924-20-3**

**Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design  
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9

D-70569 Stuttgart

Telefon +49 (0)711 685-66055

Telefax: +49 (0)711 685-66219

E-Mail: [mail@iktd.uni-stuttgart.de](mailto:mail@iktd.uni-stuttgart.de)



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, der Universität Stuttgart.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier danke ich herzlich für die Möglichkeit zur Promotion und die Betreuung der Arbeit, für den wertvollen fachlichen Austausch sowie das entgegengebrachte Vertrauen, sowohl im Rahmen der Promotion als auch bei allen weiteren Tätigkeiten am Institut. Ebenfalls danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath (i.R.) für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Mitberichts. Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Der fachliche Austausch, der Zusammenhalt, die Hilfsbereitschaft und der freundschaftliche Umgang unter den Kolleginnen und Kollegen waren sehr wertvoll und eine wichtige Säule für diese Arbeit und die Zeit am Institut. Vielen herzlichen Dank an alle ehemaligen Kolleginnen und Kollegen. Allen voran Andrea, Philipp und Kristian für die Unterstützung, die fachlichen Anregungen, aber auch den privaten Austausch. Besonderer Dank gilt meinem Gruppenleiter des Bereichs Fahrzeugdesign Dr.-Ing. Daniel Holder für die fachlichen Diskussionen, die wertvollen Denkanstöße, die Durchsicht der Arbeit, aber auch für die persönlichen Gespräche darüber hinaus. Vielen Dank auch an alle Studierenden, die ich während meiner Zeit am Institut betreut habe, für den Beitrag zu dieser Arbeit sowie an die Probandinnen und Probanden der Studie.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern für die Unterstützung von klein auf, um den Grundstein für diese Arbeit legen zu können. Mein größter und innigster Dank gilt meiner Frau Verena für die unendliche Unterstützung, die Geduld, den Rückhalt und die Motivation während aller Höhen und Tiefen von Beginn an. Nur durch dein Zutun war dieser Weg so möglich.

Stuttgart, im Juli 2022

Felix Oberhofer



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	2
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung .....	3
1.3 Struktur der Arbeit.....	4
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b> .....	<b>6</b>
2.1 Nutzerzentrierte Produktentwicklung .....	6
2.1.1 Aspekte der Nutzerzentrierten Produktentwicklung.....	8
2.1.1.1 Definition des Produkts .....	9
2.1.1.2 Technik .....	10
2.1.1.3 Ergonomie .....	11
2.1.1.4 Design.....	12
2.1.2 Entwicklungsprozess.....	13
2.2 Werkzeuge der Produktgestaltung.....	17
2.2.1 Klassifizierung von Designwerkzeugen .....	17
2.2.2 Produktmodellierung und -gestaltung.....	18
2.2.2.1 Computer Aided Design.....	19
2.2.2.2 Computer Aided Styling .....	23
2.2.2.3 Generative Design .....	25
2.2.2.4 Virtual Clay Modeling .....	27
2.2.2.5 Modellierung in virtueller Umgebung .....	29
2.2.2.6 Grafikwerkzeuge .....	30
2.2.2.7 Physische Modellierung.....	32
2.2.2.8 Rendering-Werkzeuge .....	33
2.2.2.9 Eingabegeräte .....	35
2.2.3 Darstellung .....	37
2.2.3.1 Additive Fertigung.....	37
2.2.3.2 Klassische Werkzeuge.....	42
2.2.3.3 Virtual und Augmented Reality .....	42
2.2.4 Transfer.....	46
2.2.4.1 Reverse Engineering Hardware .....	47
2.2.4.2 Reverse Engineering Software .....	49

2.3	Modelle in der Produktentwicklung .....	50
2.3.1	Modelleinteilung .....	51
2.3.2	Modellwahrnehmung .....	52
2.4	Arbeit mit und Auswahl von Produktmodellen und Werkzeugen.....	53
<b>3</b>	<b>Ansatz der Modell-Werkzeug-Auswahl.....</b>	<b>56</b>
3.1	Grundlagen und Aufbau des Ansatzes .....	56
3.1.1	Grundprinzipien und Geltungsbereich des Ansatzes.....	56
3.1.2	Anforderungen an den methodischen Ansatz .....	57
3.2	Konzeption.....	58
3.2.1	Zusammenhang von Werkzeugen, Modellen und der Aufgabe.....	58
3.2.1.1	Werkzeugklassifizierung .....	59
3.2.1.2	Gestaltung .....	60
3.2.1.3	Darstellung.....	60
3.2.1.4	Transfer .....	61
3.2.1.5	Zuordnung zum Problemlösezyklus .....	61
3.2.2	Modelleinteilung .....	62
3.2.2.1	Untersuchung von Modellanwendungen.....	63
3.2.2.2	Studie zur Wahrnehmung von Produktmodellen.....	67
3.2.3	Werkzeuge der Produktentwicklung .....	68
3.2.3.1	Bündelung der Werkzeuge .....	68
3.2.3.2	Beschreibung der Werkzeuge.....	70
3.2.3.3	Digitale Gestaltungswerkzeuge und Eingabegeräte .....	75
3.2.4	Modell-Werkzeug-Kombinationen .....	76
3.2.4.1	Einteilung von Werkzeug-Modell-Kombinationen .....	76
3.2.4.2	Zusammenführen der Werkzeuge .....	77
3.2.5	Tätigkeiten im Entwicklungsprozess.....	81
3.2.5.1	Teilaufgaben bei der Produktgestaltung .....	81
3.2.5.2	Analyse von Entwicklungsprojekten.....	82
3.2.6	Entscheidungsprozess zur Modell-Werkzeug-Auswahl.....	86
<b>4</b>	<b>Studienplanung und Modellerstellung .....</b>	<b>90</b>
4.1	Versuchsplanung und -design .....	90
4.1.1	Forschungsfragen und Forschungshypothesen .....	91
4.1.2	Versuchsplan.....	92
4.1.2.1	Stichprobe.....	93
4.1.2.2	Versuchseinführung.....	94
4.1.2.3	Befragung .....	96

---

4.1.2.4	Zeitlicher Ablauf der Studie .....	101
4.2	Untersuchungsmodelle .....	101
4.2.1	Modelleinteilung .....	103
4.2.2	Modellbeschreibung und -umsetzung.....	106
4.2.2.1	Physische Modelle .....	107
4.2.2.2	Abbildungen.....	108
4.2.2.3	Digitale Modelle .....	109
4.2.2.4	Virtuelle Modelle .....	110
4.2.3	Festlegung der Modellreihenfolge .....	112
4.3	Versuchsaufbau.....	113
4.4	Vorversuch und Pretest .....	114
<b>5</b>	<b>Studie zur Wahrnehmung von Produktmodellen .....</b>	<b>116</b>
5.1	Versuchsdurchführung und Probandenkollektiv.....	116
5.2	Studienergebnisse der Modell-Produkt Abweichung .....	119
5.2.1	Vorgehen bei der Auswertung .....	120
5.2.1.1	Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision.....	120
5.2.1.2	Deskriptive und inferentielle Statistik .....	123
5.2.1.3	Forschungshypothesen.....	125
5.2.1.4	Zusammenhangsprüfung und Gruppenunterschiede.....	126
5.2.1.5	Überprüfung der Kontrollmodelle .....	128
5.2.2	Darstellung der Modell-Produkt Abweichung .....	129
5.2.3	Parametrische Auswertung der Modell-Produkt Abweichung.....	132
5.3	Studienergebnisse der Modellbewertung.....	134
5.3.1	Vorgehen bei der Auswertung .....	135
5.3.1.1	Forschungshypothesen.....	136
5.3.1.2	Zusammenhangsprüfung und Gruppenunterschiede.....	136
5.3.1.3	Überprüfung der Kontrollmodelle .....	138
5.3.2	Darstellung der Modellbewertung.....	139
5.3.3	Parametrische Auswertung der Modellbewertung .....	141
5.4	Studienergebnisse der Maßabweichung.....	144
5.4.1	Vorgehen bei der Auswertung .....	144
5.4.1.1	Forschungshypothesen.....	145
5.4.1.2	Zusammenhangsprüfung und Gruppenunterschiede.....	146
5.4.1.3	Überprüfung der Kontrollmodelle .....	147
5.4.2	Darstellung der Maßabweichung.....	148
5.4.3	Parametrische Auswertung der Maßabweichung.....	151

5.5	System Usability Scale (SUS).....	153
5.5.1	Vorgehen bei der Auswertung .....	153
5.5.2	Darstellung des SUS .....	155
5.5.3	Parametrische Auswertung des SUS .....	156
5.6	Diskussion der Ergebnisse .....	157
5.6.1	Modell-Produkt Abweichung.....	159
5.6.2	Modellbewertung .....	160
<b>6</b>	<b>Vorgehensweise bei der Modell-Werkzeug-Auswahl .....</b>	<b>162</b>
6.1	Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozess (MWEPE).....	162
6.1.1	Beschreibung der Aufgabe .....	164
6.1.2	Auswahl des Modells.....	166
6.1.3	Werkzeugauswahl .....	169
6.2	Validierung des MWEPE .....	172
6.2.1	Durchführung des Beispiel-Prozesses für Projekt 1 .....	173
6.2.1.1	Ausgangssituation Projekt 1 .....	173
6.2.1.2	Anwendung des MWEPE für Teilschritt 1.....	174
6.2.1.3	Anwendung des MWEPE für Teilschritt 2.....	177
6.2.2	Durchführung des Beispiel-Prozesses für Projekt 2 und 3 .....	178
6.2.2.1	Ausgangssituation Projekt 2 und 3 .....	179
6.2.2.2	Anwendung des MWEPE für Projekt 2.....	180
6.2.2.3	Anwendung des MWEPE für Projekt 3.....	182
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>185</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>188</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>190</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>203</b>
A1	Analyse von Entwicklungsprojekten.....	203
A2	Versuchseinführung .....	211
A3	Fragebogen .....	213
A4	Reihenfolge Probanden .....	218
A5	Poster der Modell-Studie .....	219
A6	Auswertungsergebnisse.....	221
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>231</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
3DP	Three Dimensional Printing
AF	Additive Fertigung
AP-I	Anforderungsprofil I
AP-II	Anforderungsprofil II
AR	Augmented Reality
AV	Augmented Virtuality
aV	Abhängige Variable
BB	Betätigung und Benutzung
BJ	Binder Jetting
CAD	Computer Aided Design
CAID	Computer Aided Industrial Design
CAS	Computer Aided Styling
D	Detailierung
D1 / D2 / D3	Detailierung gering / mittel / hoch
De	Design
df	Freiheitsgrade (Statistik)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLP	Digital Light Processing
DOP	Drop on Demand
DP	Darstellung physisch
DS	Digital Sculpting
DV	Darstellung virtuell / digital
E	Ergonomie
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
EBM	Electron Beam Melting

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
EH	Eingabe Hardware
FDM	Fused Deposition Modeling
FH	Forschungshypothese
G	Gesamtprodukt
GD	Gestaltung digital
GE	Genauigkeit
GP	Gestaltung physisch
GT	Gebrauchstauglichkeit
HMD	Head Mounted Display
IKTD	Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design
KM	Kontrollmodell
LBM	Laser Beam Melting
LENS	Laser Engineering Net Shape
LLM	Layer Laminated Manufacturing
M1 / M2 / M3	Modellinhalt 1 / 2 / 3
MA-I	Modellauswahl-I
MA-II	Modellauswahl-II
MD	Mittlere Differenz (Statistik)
MJ	Material Jetting
MJM / PJM	Multi-/Poly Jet Modelling
MR	Mixed Reality
MSE	Mittlere Quadratische Abweichung (Mean Squared Error)
MWEP	Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozess
NPJ	Nano Particle Jetting
Ob/Fa	Oberfläche / Farbe
p	Wert der Signifikanz (Statistik)
P	Präzision
P1 / P2 / P3	Produkt 1 / 2 / 3
Pr	Produkt



---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
R	Repräsentationsform
R1	Physisches Modell
R2	Abbildung
R3	Digitales Modell
R4	Virtuelles Modell
RE	Reverse Engineering
Ri	Richtigkeit
RP	Rapid Prototyping
S	Studie
SD	Standardabweichung
SE	Sichtbarkeit und Erkennbarkeit
SK	Schwierigkeit
SL	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Surface Tessellation Language
SUS	System Usability Scale
t	T-Wert (Statistik)
T	Technik
T1	Tätigkeit 'Gestalten'
T2	Tätigkeit 'Bewerten'
T3	Tätigkeit 'Transfer'
TD	Technisches Design
TG	Teilgestalt
TH	Transfer Hardware
TS	Transfer Software
Ü	Überprüfung
uV	Unabhängige Variable
VCM	Virtual Clay Modeling
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
VDID	Verband Deutscher Industrie Designer
VG	Versuchsgruppe
VR	Virtual Reality
WA-I	Werkzeugauswahl I
WA-II	Werkzeugauswahl II
WTS	Wiener Testsystem
ZU	Zufriedenheit

---

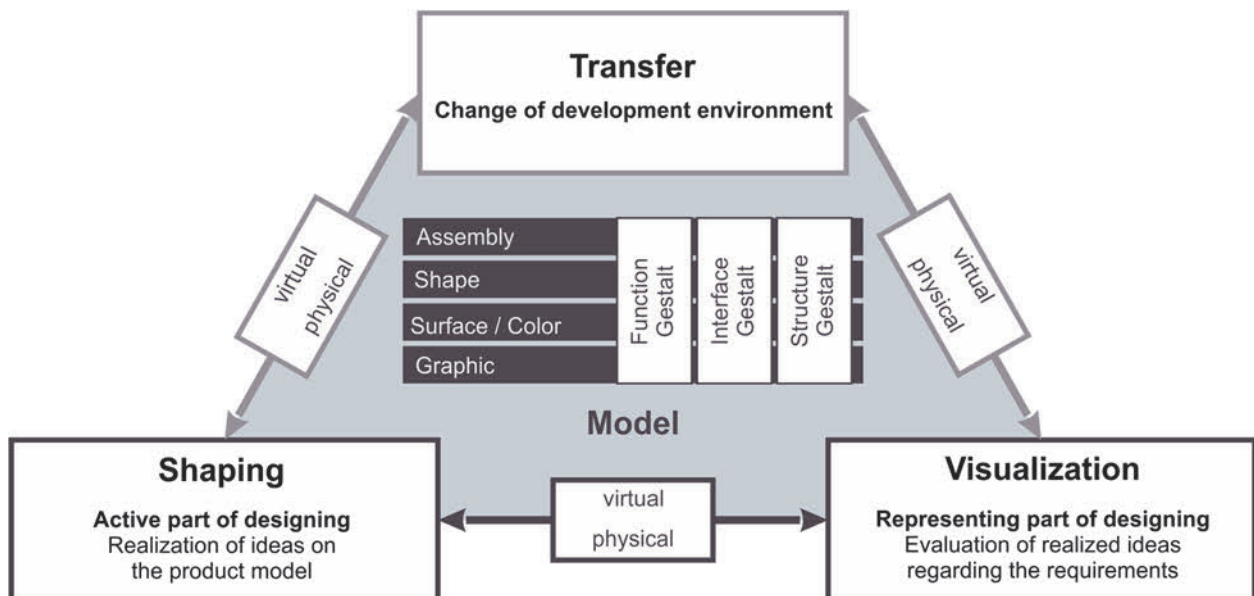
## Abstract

Over the last decades, the product development process has changed to a networked and highly digital process due to shortened lead times, increased complexity and collaboration across countries and borders [FELDHUSEN & GROTE 2013, p. 5 ff]. As a result of these changes as well as the availability of new technologies, both in the virtual and physical sector, a variety of supporting product models and tools are available within the development process to achieve the development goals. At the Research and Teaching Department Industrial Design Engineering of the Institute for Engineering Design and Industrial Design at the University of Stuttgart, the focus on the user with his physiological and psychological properties is an essential part of product design [SEEGER 2005, p. 89]. This orientation implies specific requirements for the shaping and evaluation of the product gestalt. Thereby, the product model is crucial for defining and evaluating the product gestalt, with the aim of fulfilling and verifying these requirements. Models and tools are closely and sometimes inextricably linked to each other. The model is the basis of the activities to be performed [VAJNA ET AL. 2018, p. 140 ff]. This causes challenges for engineers and designer in terms of selecting, using and combining models and tools [LUTTERS ET AL. 2014]. This thesis investigates the importance of the model regarding the decision process and shows how the type of representation and the level of detail affects an evaluation. Based on this, an approach for a targeted application of models and tools in terms of evaluative and creative tasks within user-centered product design is derived.

For this purpose, the current state of research and technology (Chapter 2) will be examined with focus on related research projects as well as on relevant topic areas. This concerns particularly the requirements and activities of user-centered product design, the use and perception of product models as well as tools for shaping and visualization, for instance from the fields of virtual reality or additive manufacturing.

Based on these investigations, the basic principle, the requirements and the scope of the approach of a model-tool selection are defined (Chapter 3). For this purpose, the linkage between task, model and tools are derived and a categorization according to the activity on the model (shaping, visualization and transfer) is introduced for the further consideration of tools as shown in Figure 1. The three basic aspects of the approach (task, model and tool) are analyzed, abstracted, classified and described through several preliminary investigations. The model classification differs the models both in terms of the type of representation, from physical to virtual, and according to the model content, described by

the level of detail, abstraction and functionality. The analyzed tools will be abstracted to their basic technology, described and classified regarding application, dimension and type of the model, application environment, additional requirements and model outcome. Appropriate industrial projects of the Research and Teaching Department Industrial Design Engineering are analyzed in terms of the activities carried out, the models and tools used, and the difficulties encountered as a basis for a further decision process. The investigation and derivation of the approach clarify the central importance of the product model as a starting point for a decision process. Sufficiently accurate and detailed data are not available within the environment of research and application for a well-founded decision regarding the activities of evaluating the product properties on the model. Therefore, a study on model perception, differentiated by the type of representation and the level of detail, is planned and carried out.

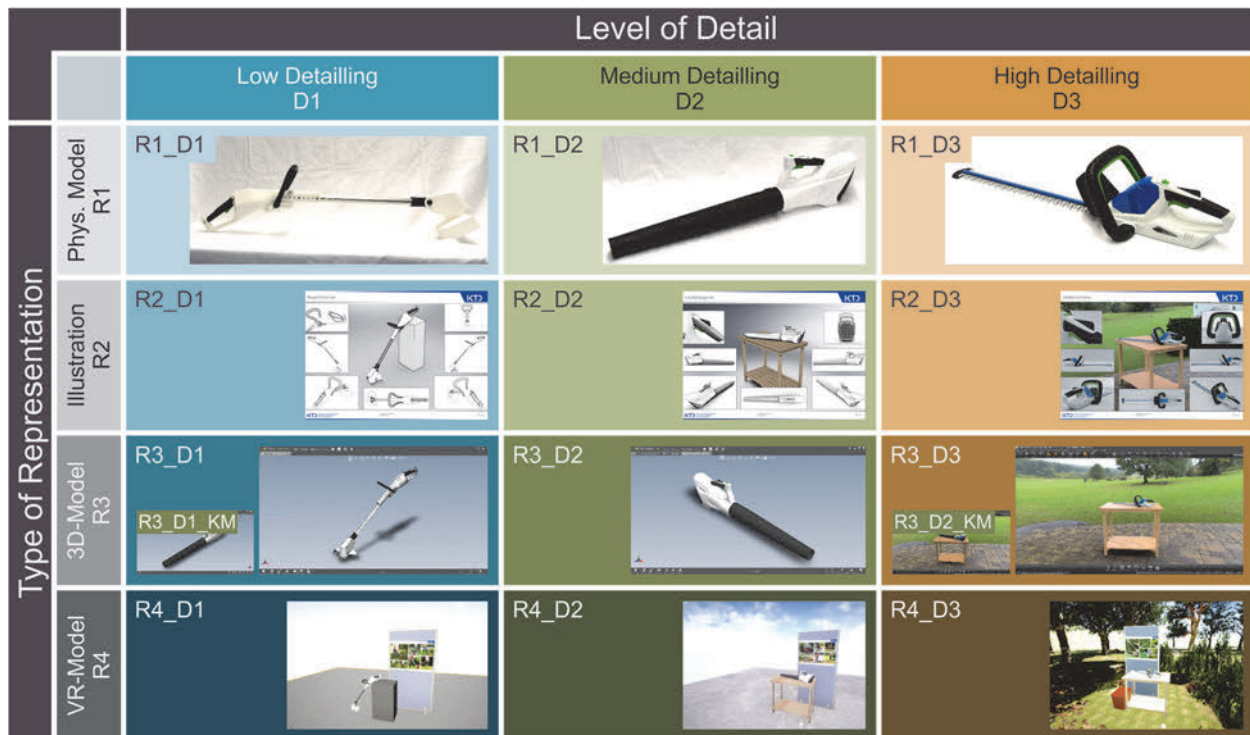


**Figure 1:** Triangle of essential work on the product model

Based on the described investigations on the use of models, the study is prepared according to scientific standards. This involves defining the content of the study, designing the method and verifying it in pretests (Chapter 4). For this purpose, three research hypotheses are formulated considering the influence of the type of representation and the level of detail of the model as well as the prior experience of the subjects. Based on the model classification in Chapter 3, a total of twelve models with different types of representation and levels of detail are defined for the study as shown in Figure 2.

The models are evaluated by the subjects within the study of models, which is described in Chapter 5. Using a six-point rating scale, they initially evaluate nine properties of the product gestalt, which are then compared to the final evaluation of the same properties

on the product. Thus, a difference can be calculated between an evaluation based on the model and one based on the product. The results indicate that both the type of presentation and the level of detail have an influence on the difference of the evaluation. The subjects' prior experience, on the other hand, has no significant effect on the accuracy of the evaluation. Regarding the determined accuracy, a further distinction is made between the correctness and precision of the evaluation in order to derive dedicated conclusions about the models.

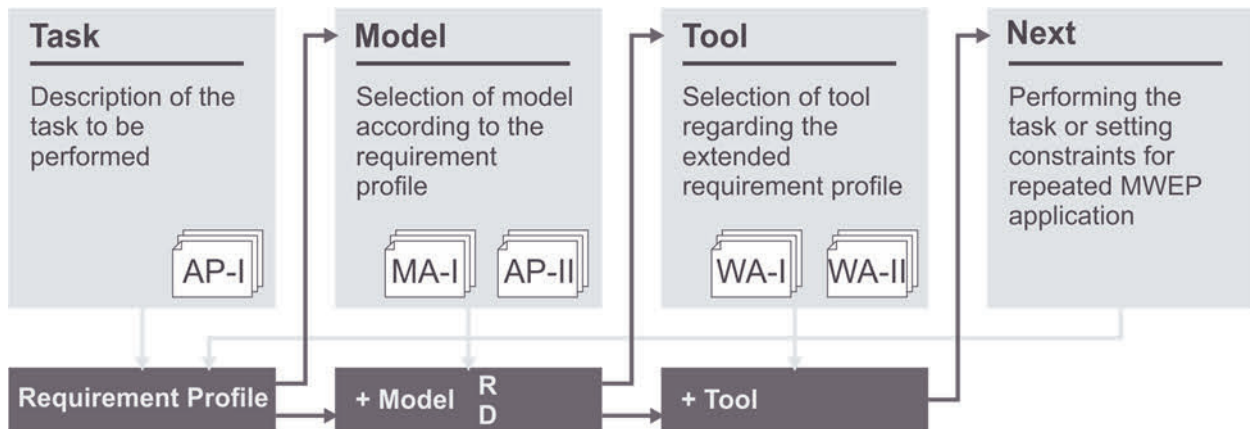


**Figure 2:** Classification and visualization of the models

Furthermore, the subjects evaluate the usability of the models from a user's point of view based on the factors of accuracy and simplicity of evaluation as well as satisfaction with the model using a six-point rating scale. Significant differences can be observed again, caused by both the type of representation and the level of detail of the models. As a further aspect of the study, the subjects estimate the dimensions based on the models. This is particularly interesting regarding ergonomic and technical aspects and shows significant differences between the investigated types of representation. The results of the study provide the necessary basis for a targeted application of models for evaluative tasks in terms of the product gestalt.

In order to transfer these findings into practice, a model-tool decision process (MWEP) is developed in Chapter 6, based on the theoretical framework in Chapter 3, and is exemplarily conducted and validated using the analyzed projects. The general approach of the

MWEP is shown in Figure 3. Initially, the MWEP focuses on the task being evaluated and the people involved in it. By means of an iterative decision process based on the defined constraints, suitable models and necessary tools related to the task can be determined.



**Figure 3:** Layout and basic steps of the MWEP

The exemplary application of the MWEP demonstrates the complex courses of action and interrelations when selecting models and tools for tasks of shaping and evaluating within user-centered product design. The MWEP provides an interdisciplinary and expandable basis for making well-founded decisions on the application of models and tools for a specific task, based on a scientific study on model perception (Chapter 5). The validation based on several examples selected from the analysis of the projects, in comparison to expert decisions from practice, confirms the basic suitability of the MWEP for the application in user-centered product design. Furthermore, a qualitative improvement of the decision for explicit models and tools can be shown and confirmed by the results of the model study.

# 1 Einleitung

Bei der Definition und Gestaltung von Produkten werden im Rahmen der Produktentwicklung eine Vielzahl an Tätigkeiten aus unterschiedlichen Fachbereichen durchgeführt [VDI 2221-1 2019, S. 24 f]. Diese Zusammenarbeit, beispielsweise von Ingenieuren und Designern, ist herausfordernd hinsichtlich eines gemeinsamen Verständnisses bei der Bewertung von Produkteigenschaften. Die spezifischen Vorprägungen und erlernten Fähigkeiten der Personen beeinflussen insbesondere deren Wahrnehmung und Einschätzung der Produktgestalt [REESE 2005, S. 32]. Eine besondere Bedeutung bekommt dieses notwendige gemeinsame Verständnis bei der nutzerzentrierten Produktentwicklung mit dem übergeordneten Ziel einer hohen Gebrauchstauglichkeit und den daraus resultierenden Auswirkungen auf die Produktgestalt [DIN EN ISO 9241-220 2017]. Im Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design (TD) des Instituts für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart ist bei der Produktgestaltung die Ausrichtung auf den Nutzer mit seinen physiologischen und psychologischen Eigenschaften ein wesentlicher Bestandteil [SEEGER 2005, S. 89]. Die Vorgehensweise ist dabei durch einen umfangreichen Prozess mit Berücksichtigung spezifischer Anforderungen, bedingt durch die Nutzerzentrierung, beschrieben [SEEGER 2005, S. 78]. Die Basis dieses Prozesses bildet die allgemeine Konstruktionsmethodik nach der Richtlinie VDI 2221-1 [2019]. In den vergangenen Jahrzehnten hat sich der Entwicklungsprozess zu einem vernetzten und hochdigitalen Prozess entwickelt, bedingt durch verkürzte Durchlaufzeiten, eine gestiegene Komplexität sowie Länder und Grenzen übergreifende Zusammenarbeit [FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 5 ff]. Durch die beschriebenen Veränderungen der letzten Jahre stehen im Rahmen des Entwicklungsprozesses eine Vielzahl an unterstützenden Produktmodellen und Werkzeugen zur Erreichung der Entwicklungsziele zur Verfügung [LINDEMANN 2009, S. 11 f]. Dies stellt den Entwickler und Designer vor große Herausforderungen hinsichtlich Auswahl, Einsatz und Kombination der Modelle und Werkzeuge [LUTTERS ET AL. 2014]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Herausforderungen untersucht und ein Ansatz zur zielgerichteten Auswahl von Modellen und Werkzeugen für konkrete bewertende und gestaltende Aufgaben innerhalb der nutzerzentrierten Produktentwicklung abgeleitet. Es wird hierzu in den folgenden Abschnitten zunächst die aktuelle Situation und Problemstellung aufgezeigt und die Zielsetzung darin eingeordnet sowie zu anderen Arbeiten und Themenschwerpunkten abgegrenzt. Abschließend werden die Struktur und Vorgehensweise der Arbeit vorgestellt.

## 1.1 Problemstellung

Bei der Definition und der begleitenden Bewertung der Produktgestalt, mit dem Ziel der Erfüllung und Überprüfung der im Rahmen der Entwicklung definierten Anforderungen an das Produkt, kommt dem Produktmodell eine wesentliche Bedeutung zu [PONN & LINDEMANN 2011, S. 20 f]. Modelle und Werkzeuge sind dabei eng und teilweise unlösbar miteinander verknüpft. Das Modell bildet die Basis der durchzuführenden Tätigkeiten [VAJNA ET AL. 2018, S. 140 ff]. Für die Tätigkeiten der Gestaltung und Darstellung existieren eine Vielzahl an Werkzeugen, die bereits erfolgreich eingesetzt werden [ARAUJO 2001]. Aber auch in der Forschung und Entwicklung werden derzeit zahlreiche neue Werkzeuge und Ansätze untersucht. Eine wichtige Rolle nehmen digitale und virtuelle Werkzeuge ein [BJOERKLI 2014], aber auch der Bereich der additiven Fertigung (AF) wird dabei fokussiert [THOMPSON ET AL. 2016]. Deren Einsatz wird vielfältig für die Produkt- und Designentwicklung diskutiert [SELF 2011] oder in Testumgebungen genutzt. Die Wahl geeigneter Modelle zur Analyse und Bewertung von Produkteigenschaften wirkt sich entscheidend auf die Effizienz, die Qualität und den Erfolg eines Entwicklungsprozesses aus [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 617 ff]. Der aktuelle Forschungsstand zeigt jedoch vielfältige Schwierigkeiten hinsichtlich eines differenzierten und zielgerichteten Einsatzes sowie der Wahl geeigneter Werkzeuge zur Gestaltung und Darstellung [LUTTERS ET AL. 2014].

Bei der Bewertung von Produkteigenschaften anhand des Modells spielt die Wahrnehmung eine wesentliche Rolle [ŞAHIN ET AL. 2007]. Über verschiedene Darstellungsformen und deren Detaillierung kann Einfluss auf die Bewertbarkeit von Produkteigenschaften genommen werden [REID ET AL. 2013]. Besonders herausfordernd sind dabei gestalterische und ergonomische Aspekte, da sie ein Zusammenspiel mehrere Wahrnehmungssinne erfordern [MAIER 2008]. Hieraus stellt sich die Frage des richtigen Modell- und Werkzeugeinsatzes sowie ihrer Kombinationsfähigkeit über die verschiedenen Phasen und Tätigkeiten der Entwicklung. Auch den Einfluss des spezifischen Produkts und des Entwicklungsprojekts gilt es hierbei zu berücksichtigen. Die Untersuchung des Forschungsstands zeigt weiter, dass die Auswahl passender Modelle und Werkzeuge in heutigen Methoden hinsichtlich der spezifischen Aufgaben und Randbedingungen der nutzerzentrierten Produktentwicklung nicht hinreichend unterstützt wird. Dies äußert sich zum einen in einer eingeschränkten, allgemeinen und nicht differenzierten Betrachtung der Modelle und Werkzeuge, in einer mangelnden Vernetzung der Teilaufgaben (Gestalten und Bewerten) sowie in einer separaten Betrachtung hinsichtlich der Fachbereiche



(Technik, Ergonomie und Design). Die Untersuchungen sind häufig getrennt nach der Umgebung (virtuell und physisch) bzw. es werden beide Richtungen separat voneinander vorangetrieben. Eine zielgerichtete Abwägung oder Zusammenführung der Welten erfolgt noch nicht allumfassend [BJOERKLI 2014]. Die komplexen Herausforderungen bei der Gestaltung nutzerzentrierter Produkte können derzeit weder mit rein digitalen noch mit rein physischen Werkzeugen gelöst werden [SCHMID & MAIER 2017, S. 43 ff]. Eine zielgerichtete Auswahl und Vernetzung entsprechend der Aufgabe, dem Nutzer und der Umgebung ist notwendig. Die Wahl passender Modelle und Werkzeuge ist demnach nicht nur allein in Bezug auf die auszuführende Teilaufgabe, sondern im Kontext der Gesamtaufgabe zu sehen.

## 1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Basierend auf der beschriebenen Problemstellung ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung eines Ansatzes zur Modell-Werkzeug-Auswahl für gestaltende und bewertende Aufgaben innerhalb der nutzerzentrierten Produktentwicklung. Aufgrund der beschriebenen zentralen Bedeutung des Modelles und dessen Wahrnehmung ist eine ganzheitliche Untersuchung, aufgespannt über die Darstellungsformen und Detaillierung der Modelle, in Bezug auf die konkreten Aufgaben zur Definition und Bewertung der Produktgestalt notwendig. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei eine gesamtheitliche Betrachtung von Modellen und Werkzeugen, ohne Trennung zwischen virtuell oder physisch, Technik, Ergonomie oder Design und den einzelnen Prozessphasen. Es soll dabei eine Zuordnung zwischen Aufgabe, Modell, Nutzer und Werkzeugtechnologie geschaffen werden und neue Wege bei der Umsetzung von Ideen aufgezeigt werden. Der Ansatz dient der Entscheidungshilfe bei der Wahl von Modellen und Werkzeugen unter den Aspekten der Verbesserung der Ergebnisse des Einsatzes, Verkürzung der benötigten Zeit sowie Sicherheit bei der Modell- und Werkzeugauswahl, um damit die Risiken zu minimieren. Modelle haben einen großen Einfluss auf die Abläufe innerhalb der Entwicklung und wirken sich somit unmittelbar auf die Wirtschaftlichkeit und Effizienz aus. Den Herausforderungen des interdisziplinären Prozesses wird durch Betrachtung der verschiedenen beteiligten Rollen und deren spezifischen Eigenschaften besondere Berücksichtigung geschenkt, um eine Erhöhung des Verständnisses von Ideen und deren Umsetzungen über Fachbereiche hinweg zu schaffen. Auf Basis der Untersuchungen soll der Ansatz, wie von SCHMID & MAIER [2017, S. 43] angemerkt, eine optimierte Verteilung analoger/physischer und virtueller/digitaler Anteile bei der Produktgestaltung in Bezug auf

eine konkrete Aufgabenstellung liefern und ist dabei adaptiv im Rahmen der Produkt-/Design-Entwicklung anwendbar. Entsprechend dieser Ziele ist der Hauptfokus dieser Arbeit das Modell sowie dessen Werkzeuge zur Gestaltung und Darstellung. Die Werkzeuge der Gestaltung werden jedoch aufgrund des Einflusses des Anwenders nicht hinsichtlich ihrer Handhabung verglichen, sondern auf Basis ihrer Eigenschaften und Fähigkeiten eingestuft und in Bezug auf das Modell betrachtet. Darüber hinaus erfolgt keine Entwicklung von neuen Werkzeugen oder Tools, sondern bestehende Verfahren, abstrahiert auf ihre Basistechnologie, werden auf ihre Möglichkeiten untersucht und angewendet. Die gewählte Abstraktion ist hierbei ein entscheidender Faktor, um einen langfristigen und erweiterbaren Ansatz zu gestalten, welcher nicht nur eine Momentaufnahme aktueller Werkzeuge und Anbieter zeigt.

### **1.3 Struktur der Arbeit**

Die Struktur dieser Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Diese gliedert sich in insgesamt sieben Kapitel. Nach der Einführung in die Arbeit in Kapitel 1 erfolgt im Stand der Forschung und Technik in Kapitel 2 die Beschreibung der notwendigen Grundlagen zu den betrachteten Themenfeldern sowie ergänzende Erklärungen und Definitionen. Diese dienen als Basis für die theoretischen Überlegungen zum Ansatz der Modell-Werkzeug-Auswahl in Kapitel 3. Hierin wird das grundsätzliche Vorgehen des Ansatzes hergeleitet sowie die Modelle und Werkzeuge analysiert, abstrahiert, zusammengeführt und bewertet. Die daraus abgeleitete Studie zur Modellwahrnehmung wird in Kapitel 4 hinsichtlich der Planung und des Designs beschrieben sowie die für die Untersuchung erstellten Modelle aufgezeigt. Die Durchführung und Ergebnisse der Studie werden in Kapitel 5 beschrieben und diskutiert. Ein wesentlicher Aspekt ist die Abweichung zwischen der Bewertung am Modell und am Produkt sowie die subjektive Einschätzung der Modelle aus Anwendersicht. Die Ergebnisse der Studie, in Verbindung mit der Beschreibung des Ansatzes, werden in Kapitel 6 zu einem konkreten Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozess (MWEPE) zusammengeführt. Dieser wird beschrieben und anhand konkreter Projekt-Beispiele aus dem Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design durchgeführt und validiert. Abschließend erfolgt in Kapitel 7 die Zusammenfassung der Arbeit und es werden Anknüpfungspunkte für angrenzende und weiterführende Forschungsfragen aufgezeigt.

<b>Kapitel 1</b>	<b>Einleitung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemstellung</li> <li>• Zielsetzung und Abgrenzung</li> <li>• Struktur der Arbeit</li> </ul>	
<b>Kapitel 2</b>	<b>Stand der Forschung und Technik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwerpunkte und Tätigkeiten der nutzerzentrierten Produktentwicklung</li> <li>• Produktmodelle und Werkzeug der Produktgestaltung</li> <li>• Aspekte der Wahrnehmung und Auswahl von Produktmodellen</li> </ul>	
<b>Kapitel 3</b>	<b>Ansatz der Modell-Werkzeug-Auswahl</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundlegender Aufbau des Ansatzes</li> <li>• Untersuchung und Gliederung der Produktmodelle und Werkzeuge</li> <li>• Ableitung von Modell-Werkzeug-Kombinationen als Ausgangsbasis</li> <li>• Entscheidungsprozess der Auswahl</li> </ul>	
	<b>Kapitel 4</b>	<b>Studienplanung und Modellerstellung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung des Versuchdesigns der Modellstudie</li> <li>• Erstellung der Modelle</li> <li>• Vorversuch und Pretest</li> </ul>
	<b>Kapitel 5</b>	<b>Studie zur Wahrnehmung von Produktmodellen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durchführung der Studie</li> <li>• Darstellung und Diskussion der Ergebnisse zur Modell-Produkt-Abweichung, Modellbewertung, Maßabweichung und zum SUS</li> </ul>
<b>Kapitel 6</b>	<b>Vorgehensweise der Modell-Werkzeug-Auswahl</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung des Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozesses (MWEPE)</li> <li>• Beispielhafte Durchführung und Validierung des MWEPE</li> </ul>	
<b>Kapitel 7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>		

**Abbildung 1.1:** Vorgehen und Struktur der Arbeit

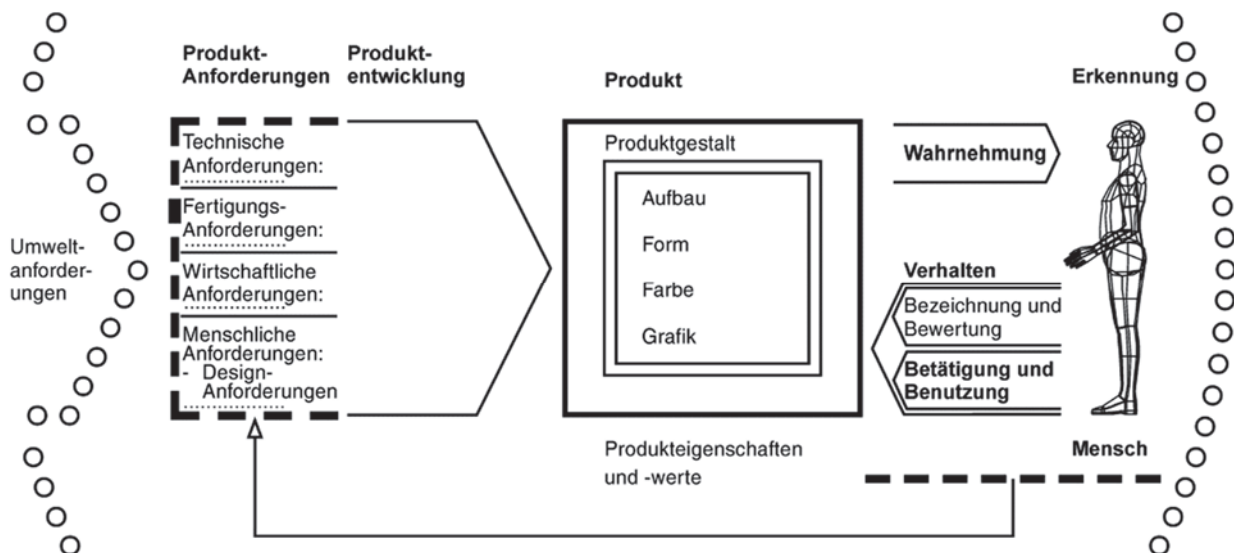
## 2 Stand der Forschung und Technik

Das vorliegende Kapitel schafft einen Überblick über die notwendigen Grundlagen für die spätere Untersuchung der Produktmodelle sowie deren Gestaltungs- und Darstellungswerkzeuge. Es wird hierzu der aktuelle Forschungs- und Wissensstand bezüglich der Themen Produktentwicklung, Entwicklungswerkzeuge sowie Produktmodelle erörtert und die Arbeit hierin eingeordnet und abgegrenzt. Zu Beginn wird die nutzerzentrierte Produktentwicklung als grundlegende Ausgangsbasis der Untersuchungen in ihren Schwerpunkten beleuchtet und insbesondere die Prozessschritte in Bezug auf Werkzeuge und Produktmodelle herausgearbeitet. Sie bildet somit den Rahmen dieser Arbeit, da sie die auszuführenden Tätigkeiten definiert und mit den untersuchten Werkzeugen und Modellen verbindet. Diese werden daraufhin im Detail betrachtet und der aktuelle Forschungsstand hinsichtlich ihres Einsatzes im Entwicklungsprozess dargestellt.

### 2.1 Nutzerzentrierte Produktentwicklung

Nach der Richtlinie VDI 2221-1 [2019, S. 8] ist die Produktentwicklung ein *„interdisziplinärer Unternehmensprozess zur Entwicklung eines marktfähigen Produkts, basierend auf der Definition initialer Ziele und Anforderungen an das Produkt, welche im Lauf des Prozesses kontinuierlich weiterentwickelt und iterativ angepasst werden“*. ULRICH & EPPINGER [2012, S. 2] betrachten dabei die gesamte Phase von der Marktbeobachtung bis zur Herstellung, Verkauf und Auslieferung des Produkts. Die tatsächliche Produktgestaltung, wie sie in dieser Arbeit thematisiert wird, ist somit ein Teil der Produktentwicklung und in deren Prozess eingegliedert. Das prozessuale Vorgehen der Produktentwicklung wird in Kapitel 2.1.2 thematisiert. Die nutzerzentrierte Produktentwicklung basiert auf diesem allgemeinen Vorgehen der Produktentwicklung unter besonderer Berücksichtigung und Integration des Nutzers in allen Phasen [ZÜHLKE 2012, S. 36]. Dieser wird hierbei hinsichtlich seiner physiologischen und psychologischen Eigenschaften betrachtet [ZÜHLKE 2012, S. 5]. Die DIN EN ISO 9241-220 [2017] weist an dieser Stelle darauf hin, die Bezeichnung *„menschzentrierte Gestaltung“* zu verwenden, da auch Stakeholder (direkt oder indirekt betroffene Interessengruppen) berücksichtigt werden, die nicht direkt als Benutzer zu betrachten sind. Im Zentrum der Entwicklung steht das Produkt, das in seiner Gestalt entsprechend den Anforderungen zu entwickeln ist, mit dem Ziel eines maximalen Nutzwertes und optimalen Gebrauchswertes [SEEGER 2005, S. 77 ff]. Nach SEEGER [2005, S. 23] unterteilen sich diese in Technische-, Fertigungs-, Wirtschaftliche- sowie Menschliche-Anforderungen (Design-Anforderungen), wobei den letztgenannten hierbei

eine besondere Bedeutung zukommt. Unter der Produktgestalt wird ein „dreidimensionales und materiales Gebilde verstanden, das beschriftet, farbig, geformt und einen Aufbau besitzt“ [SEEGER 2005, S. 47]. Demnach ist die Gestalt die Vereinigung der Teilgestalten (TG) Aufbau, Form, Oberfläche bzw. Farbe und Grafik [SCHMID & MAIER 2017, S. 30]. Die dreidimensionalen Aufbauelemente einer Gestalt bilden dabei die Funktionsgestalt, die Interfacegestalt sowie die Tragwerksgestalt [SEEGER 2005, S. 49] und erzeugen somit die Matrix der Produktgestalt [SCHMID & MAIER 2017, S. 31]. Diese Produktgestalt steht durch den Gebrauch in Beziehung zum Menschen. Als Gebrauch wird die „Ganzheit von Wahrnehmung, Erkennung und Verhalten des Menschen gegenüber einem Produkt“ [SEEGER 2005, S. 23] verstanden. Diese Interaktion und die davon bedingte Herleitung von Designanforderungen wird durch das Basisschema beschrieben (siehe Abbildung 2.1).



**Abbildung 2.1:** Basisschema der Mensch-Produkt-Beziehung für die Ableitung von Designanforderungen [SEEGER 2005, S. 22]

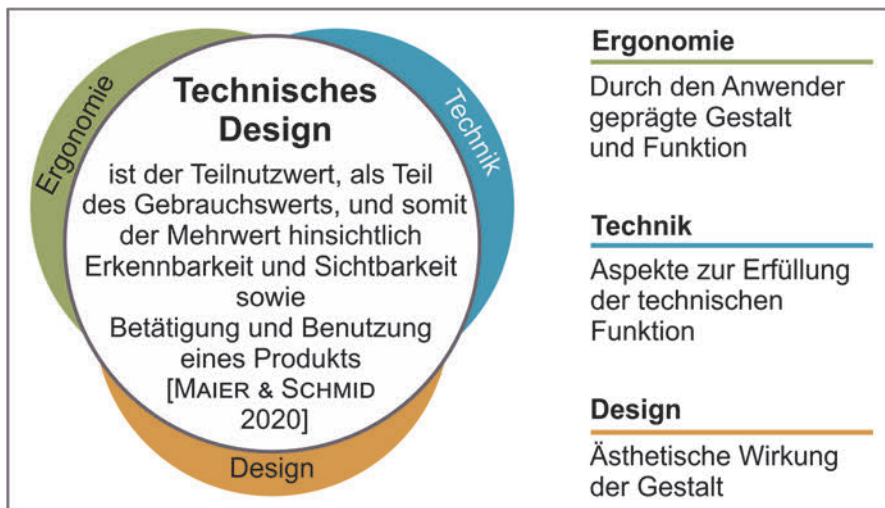
Die Anwendung einer nutzerzentrierten Produktgestaltung birgt vielfältige Vorteile wirtschaftlicher und sozialer Natur für Anwender und Hersteller [DIN EN ISO 9241-210 2019, S. 11]. Neben einer Verbesserung der nutzerzentrierten Qualität, wie eine bessere Verständlichkeit oder höhere Leistungsfähigkeit des Nutzers bei geringerer Belastung, können derartig gestaltete Produkte höhere Verkaufspreise erzielen und einen Wettbewerbsvorteil mit sich bringen [DIN EN ISO 9241-220 2017, S. 20].

Die nutzerzentrierte Produktentwicklung umfasst in ihrer Gesamtheit die drei Bestandteile Technik, Ergonomie und Design, auf die in Kapitel 2.1.1 gesondert eingegangen wird. Dies ist im Technischen Design nach SEEGER [2005] grundlegend verankert. Eine exakte Trennung zwischen diesen Bereichen in Bezug auf die Produktgestalt ist nicht möglich,

da sich diese gegenseitig beeinflussen oder überschneiden. Dieses Zusammenspiel und insbesondere die Betrachtung des Nutzers hat Auswirkungen auf den Gestaltungsprozess und den damit verbundenen Einsatz von Werkzeugen (vgl. Kapitel 2.2) und Modellen (vgl. Kapitel 2.3).

### 2.1.1 Aspekte der Nutzerzentrierten Produktentwicklung

Die nutzerzentrierte Produktentwicklung umfasst wie beschrieben die drei Bereiche Technik, Ergonomie und Design. Dieser Dreiklang des Technischen Designs, wie er in dieser Arbeit betrachtet wird, ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Mit diesen Begrifflichkeiten werden nicht die Tätigkeiten innerhalb der Entwicklung beschrieben, sondern die Einflussfaktoren auf ein Produkt.



**Abbildung 2.2:** Zusammenhang von Technik, Ergonomie und Design im Technischen Design

Die Umsetzung dieser drei Faktoren erfolgt im Rahmen der Konstruktion. Hierunter versteht man zum einen die Dokumentation der Produktumsetzung als Ergebnis [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 308] und zum anderen den Prozess des Konstruierens und die damit betraute organisatorische Abteilung [FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 13]. Aufgrund des zweiten Aspekts wird der Begriff Konstruktion häufig mit der Entwicklung gleichgesetzt [VDI 2221-1 2019]. Bedingt durch den gestiegenen Betrachtungsumfang der Entwicklung unter Einbeziehung beispielsweise des Versuchs, des Musterbaus oder der Berechnung ist er jedoch organisatorisch als Teilbereich dieser zu verstehen [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 308]. Für eine klarere Unterscheidung wird daher im Rahmen dieser Arbeit für diese umfassende Betrachtung der Entwicklung der Begriff *Produktentwicklung* verwendet. Die Konstruktion dagegen wird im Sinne der Umsetzung und Dokumentation der Produktgestalt gesehen und verbindet somit die Aspekte Technik,

Ergonomie und Design. Diese werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Inhalte, Zusammenhänge und Überschneidungen detailliert betrachtet. Darüber hinaus werden die jeweiligen Definitionen und Einschränkungen für diese Arbeit getroffen.

### 2.1.1.1 Definition des Produkts

VAJNA [2014, S. 68 f] definiert Produkte als „*Ergebnis oder Erzeugnis menschlicher Arbeit und menschlichen Könnens, etwas, was nicht auf natürliche Weise, sondern künstlich hervorgebracht wurde, ein Artefakt*“. Diese können dabei dingliche Artefakte, also physische oder materielle Gebilde, oder nicht-dingliche, immaterielle Gebilde sein. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf den materiellen Gebilden mit einer Produktgestalt, bestehend aus den zuvor beschriebenen Teilgestalten. Die Erzeugung technischer, materieller Produkte erfolgt im Rahmen eines Entwicklungs- bzw. Erstellungsprozesses (siehe Kapitel 2.1.2) [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 198 f]. Auf diesen Prozess hat in großem Maß das zu entwickelnde Produkt Einfluss. Dieses kann dabei anhand verschiedener Faktoren differenziert werden, siehe Tabelle 2.1.

Merkmal	Ausprägung			
Produktkategorie	Investitionsgüter	Konsumgüter		
Produktart	Nach Kundenspezifikation	Typisiert mit kundenspezifischen Varianten	Standarderzeugnis mit Varianten	Standarderzeugnis ohne Varianten
Komplexität	Mehrteilig mit komplexer Struktur	Mehrteilig mit einfacher Struktur	Geringteilig	
Stückzahl	Massenfertigung	Serienfertigung	Kleinserienfertigung	Einzelfertigung
Änderungsumfang	Keine Änderung	Variantenkonstruktion	Anpassungskonstruktion	Neukonstruktion

**Tabelle 2.1:** Mögliche Merkmale zur Differenzierung von Produkten nach

[EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 201], [SCHMID & MAIER 2017, S. 27 f]

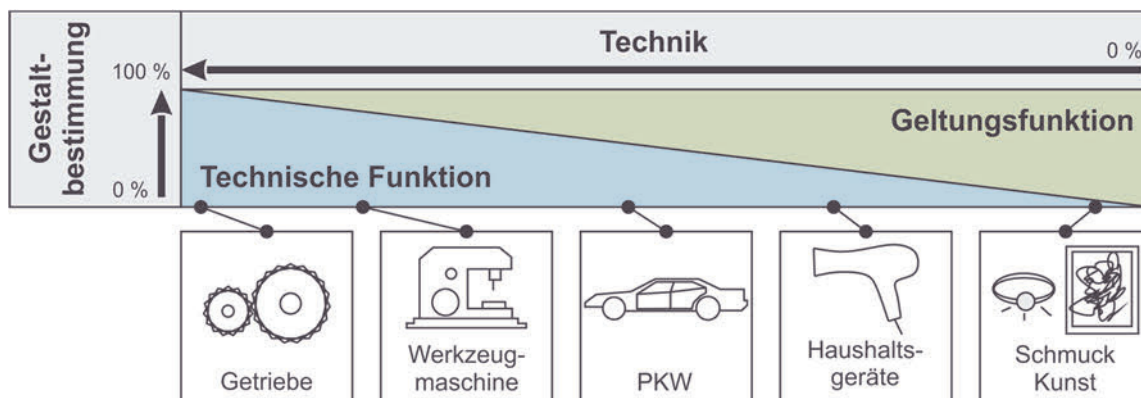
Die Differenzierung und Merkmale der Produkte hat nicht nur Einfluss auf den generellen Ablauf des Entwicklungsprozesses, sondern auch auf die Vorgänge, Randbedingungen und Anforderungen an die Produktgestaltung, die bei der nutzerzentrierten Produktgestaltung eine besondere Rolle einnimmt. So haben beispielsweise Investitionsgüter eine spezifischere Benutzergruppe als Konsumgüter, die bei der Auslegung zu berücksichtigen ist. Auch kann sich die Lebensdauer unterscheiden, was wiederum Einfluss auf die Gestaltung hinsichtlich der Designlebensdauer hat [SCHMID & MAIER 2017, S. 27 ff]. Die



Kenntnis über das Produkt und seine Eigenschaften ist daher ein wesentlicher Bestandteil bei der Gestaltung und hat somit Einfluss auf die Wahl notwendiger Modelle und Werkzeuge.

### 2.1.1.2 Technik

Der Begriff Technik beschreibt nach DUDEN [2020a] die „Gesamtheit der Maßnahmen, Einrichtungen und Verfahren, die dazu dienen, die Erkenntnisse der Naturwissenschaften für den Menschen praktisch nutzbar zu machen“. Für RÖPÖHL [1991, S. 18] umfasst der Begriff Technik drei Aspekte: „die Menge der nutzenorientierten, künstlichen, gegenständlichen Gebilde (Artefakte oder Sachsysteme)“, „die Menge menschlicher Handlungen und Einrichtungen, in denen Sachsysteme entstehen“ sowie „die Menge menschlicher Handlungen, in denen Sachsysteme verwendet werden“. Im Kontext der Entwicklung ist insbesondere der erste Aspekt zur Beschreibung des technischen Produkts von Interesse [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 35]. Innerhalb des Dreiklangs Technik, Ergonomie und Design umfasst die Technik die Aspekte, die für die reine Funktionalität eines Produktes, die beispielsweise durch „*physikalische oder mathematische Zusammenhänge als Gleichung beschrieben werden können*“ [VDI 2221-1 2019, S. 19], verantwortlich sind und dabei nicht durch die Ergonomie (vgl. Kapitel 2.1.1.3) und das Design (vgl. Kapitel 2.1.1.4) geprägt sind. Diese technische Funktionalität drückt nach EHRENSPIEL & MEERKAMM [2017, S. 514] die Eigenschaftsänderung eines Produkts aus. Demgegenüber steht die Geltungsfunktion im Sinne des Designs (siehe Abbildung 2.3).



**Abbildung 2.3:** Gestaltbestimmung eines Produkts durch Technik und Design nach [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 514]

Die zu realisierenden technischen Funktionen eines Produkts werden durch Anforderungen beschrieben, die nach PAHL ET AL. [2007, S. 220] beispielsweise die Leistung, Kräfte, Festigkeit, Kinematik oder Elektrik betreffen und grenzen sich somit von nutzerbezogenen Anforderungen der Ergonomie und des Designs ab. Im Rahmen der Produkt-



entwicklung ist die Erfüllung der rein technischen Anforderungen die Voraussetzung für die Umsetzung der geforderten Funktionalitäten eines Produkts und ist gemäß Abbildung 2.3 bei alleiniger Betrachtung maßgeblich für die Gestaltbestimmung. Adaptiert auf das Modell von KANO ET AL. [1996] können sie im Rahmen dieser Arbeit als vorausgesetzte Basismerkmale definiert werden und stehen daher im Sinne der nutzerzentrierten Produktgestalt nicht im Fokus der Betrachtung. Im Gegenzug dazu stehen die Ergonomie- und Designanforderungen, die zu einer Zunahme an Zufriedenheit bei der Nutzung des Produkts beitragen [DIN EN ISO 9241-220 2017, S. 220]. Entsprechend des Modells nach KANO ET AL. [1996] können Sie im Rahmen dieser Arbeit als Begeisterungsmerkmale betrachtet werden. Sie wirken sich bei Berücksichtigung unmittelbar auf die Produktgestalt aus und stehen daher im Zentrum der Betrachtung.

### 2.1.1.3 Ergonomie

Unter Ergonomie wird nach DIN EN ISO 6385 [2016, S. 7] die wissenschaftliche Disziplin verstanden, die sich mit den „*Wechselwirkungen zwischen menschlichen und anderen Elementen eines Systems befasst*“. Das Ziel der Anwendung „*der Erkenntnisse, Prinzipien, Daten und Methoden der Ergonomie [...] bei der Gestaltung von Arbeitssystemen [...] ist das Wohlbefinden des Menschen und die Leistung des Gesamtsystems zu optimieren*“ [DIN EN ISO 6385 2016, S. 7]. Im Technischen Design wird nach SCHMID & MAIER [2017, S. 7] in Bezug auf die Ergonomie zwischen Mikro- und Makroergonomie unterschieden. Die Makroergonomie fokussiert dabei den Aufbau der Produktgestalt, welcher entsprechend eines Ergonomie- und Höhenrasters auf Basis der Körpergrößen der Anwender ausgelegt wird, mit dem Ziel eine optimale Erreichbarkeit von Elementen in Bezug auf den Use-Case durch den Aufbau zu ermöglichen [SCHMID & MAIER 2017, S. 89]. Die Mikroergonomie umfasst dagegen die Form, Oberfläche/Farbe und Grafik der Produktgestalt und orientiert sich an der konkreten Interaktion des Anwenders mit dem Produkt entsprechend des Bedienszenarios in den Aspekten Wahrnehmung, Erkennung und Verhalten [SCHMID & MAIER 2017, S. 125, 199]. Im Kontext der Produktgestaltung umfasst nach VDI 2242 [2016, S. 4] eine ergonomiegerechte Gestaltung die „*bewusste Festlegung und Ausführung der Eigenschaften eines Objektes oder eines Zustands nach menschbezogenen Zielvorstellungen*“, die in Form von Anforderungen definiert werden. Diese Zielvorgaben werden im Technischen Design durch Mensch-Produkt-Anforderungen beschrieben, die sich wiederum in Anforderungen der Betätigung und Benutzung (BB) sowie Sichtbarkeit und Erkennbarkeit (SE) unterteilen [SEEGER 2005, S. 65]. Im Fokus der Festlegung der Anforderungen ist dabei der Mensch mit den individuellen

Ausprägungen seiner Fähigkeiten, Eigenschaften und Vorstellungen zu beachten. Diese untergliedern sich nach SCHMID & MAIER [2017], SEEGER [2005] und ergänzt nach der Richtlinie VDI 2242 [2016] in:

- demografische- und geografische Merkmale (Alter, Geschlecht, körperlicher Zustand, Körpermaße, Bedienort),
- psychografische Merkmale (Einstellung, Werthaltung, Verhalten, Lifestyle) sowie
- kognitive und motorische Fähigkeiten (Wahrnehmung, Lernfähigkeit, Kondition/Koordination).

Durch entsprechende Umsetzung der Anforderungen wird die Produktgestalt in allen Teilmustern Aufbau, Form, Oberfläche/Farbe und Grafik geformt. Das Vorgehen wird durch den Gestaltungsprozess (vgl. Kapitel 2.1.2) beschrieben. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei die Überprüfung der zuvor beschriebenen ergonomischen Aspekte der Produktgestalt. Diese Bewertung kann durch den Faktor der Gebrauchstauglichkeit erfolgen [VDI 2242 2016]. Unter der Gebrauchstauglichkeit wird nach DIN EN ISO 9241-210 [2019, S.10] das *„Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“*.

Die Berücksichtigung der ergonomischen Aspekte erfolgt somit im Rahmen der nutzerzentrierten Produktentwicklung in allen Phasen (vgl. Kapitel 2.1.2) und stellt besondere Anforderungen an die Werkzeuge und Modelle der Entwicklung zur Festlegung und Überprüfung der Produktgestalt. Die direkte Auswirkung der Berücksichtigung der Ergonomie auf die Produktgestalt steht damit ebenfalls in Wechselwirkung mit dem Design.

#### **2.1.1.4 Design**

Die Definitionen des Begriffs Design sind im deutschen Sprachgebrauch vielfältig. Die breite und alltägliche Verwendung führt zu einer Vermischung an Inhalten und Werten, sodass keine klare und eindeutige Interpretation möglich ist [REESE 2005, S. 7]. Insbesondere dieses unterschiedliche Verständnis erschwert nach REESE [2005, S. 7] den *„Dialog zwischen Ingenieuren und Designern“*. Nach SEEGER [2005, S. 3] beinhaltet Design sowohl das Design als auch das Designen. In diesem Sinne ist das Design *„derjenige Nutzwert oder diejenige Qualität einer Produktgestalt, die ihre Betätigbarkeit und Benutzbarkeit sowie ihre Sichtbarkeit und Erkennbarkeit durch den Menschen beinhaltet“* [SEEGER 2005, S. 3]. Im Sinne des Designens bedeutet es *„die Entwicklung einer Produktgestalt im Rahmen einer systematischen und konstruktiven Produktentwicklung*

*nach den Anforderungen der Betätigbarkeit und Benutzbarkeit sowie der Sichtbarkeit und Erkennbarkeit“* [SEEGER 2005, S. 3]. VAN DEN BOOM [1994, S. 78] führt an, dass Design mehr ist als „*die Formgebung, Formgestaltung und Formbestimmung*“, also die „*äußere Form der Dinge, der Gegenstände, der Objekte*“. Das Design wandelt sich somit und umfasst mehr als diese Aspekte. Es beinhaltet den Mensch mit seiner Wahrnehmung und Handlung und umfasst das System in seiner Tiefe sowie seinen Elementen und nicht nur die Hülle [VAN DEN BOOM 1994, S. 78]. Diese Aufgaben kommen der Rolle des Designers zu. Der Verband deutscher Industriedesigner VDID [2012] sieht „*die Gestaltung der körperhaften Form*“ als die Kernkompetenz des Industriedesigners an. Es wird dabei „*das Objekt als ein interagierendes Element innerhalb von technischen, sozialen, kulturellen, ökologischen und ökonomischen Prozessen*“ [VDID 2012] verstanden. Mit Blick auf den Menschen, trotz Berücksichtigung anderer Anforderungen „*erfüllt das gute Produktdesign immer auch die funktionalen, psychologischen und soziokulturellen Bedürfnisse der Menschen*“ [VDID 2012]. Dem Design kommt somit eine entscheidende Rolle in Bezug auf eine Vielzahl von Aspekten zu. Im Kontext des Technischen Designs gilt jedoch „*der allgemeine Ansatz des Funktionalismus Form follows function*“ [SEEGER 2005, S. 73], der auf den Architekten Louis Henry Sullivan zurückgeht. Gemeint ist damit, dass sich die Gestalt eines Produktes aus der Umsetzung aller Anforderungen ergibt [SEEGER 2005, S. 73]. Dies verdeutlicht die enge Verknüpfung zwischen Design, Ergonomie und Technik. Eine klare Trennung dieser Begrifflichkeiten ist daher kaum möglich und im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen. Jedoch erfolgt eine Spezifizierung in Bezug auf die untersuchten Aspekte zur differenzierten Zuordnung der Untersuchungsparameter in Kapitel 4. Im Kontext des Dreiklangs Technik, Ergonomie und Design wird im Rahmen dieser Arbeit das Design als Formung der Produktgestalt unter formalästhetischen Gesichtspunkten in den Teilgestalten Aufbau, Form, Oberfläche/Farbe und Grafik betrachtet, das sich am Gefallen des Anwenders orientiert. Somit umfasst es nur einen Teilbereich des Designs nach SEEGER [2005], das ebenfalls die in dieser Arbeit unter Ergonomie (vgl. Kapitel 2.1.1.3) erläuterten Aspekte beinhaltet. Da die Umsetzung des Designs demzufolge möglichst von Beginn an in den Entwicklungsprozess integriert werden sollte [VDID 2009, S. 12-15], steht es somit in direkter Beziehung zur Ergonomie in Bezug auf die Produktgestalt.

### **2.1.2 Entwicklungsprozess**

Nach PONN & LINDEMANN [2011, S. 16] ist bei der Produktentwicklung das Ziel „*ein funktionierendes und produzierbares Produkt zu generieren*“. Um dieses Ziel zu erreichen,

sind verschiedene Schritte unter Einsatz von Ressourcen notwendig, um auf Basis der Eingangsinformationen (Input) Ausgangsinformationen (Output) zu generieren [PONN & LINDEMANN 2011, S. 16]. In Bezug auf die Gesamtunternehmensabläufe ist die Entwicklung und deren Abläufe, beschrieben durch den Entwicklungsprozess, als Teil dieser zu verstehen, der in Wechselbeziehung zu anderen Bereichen steht [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 208]. Für die Beschreibung des Entwicklungsprozesses existieren in der Theorie und Praxis unterschiedliche Ansätze, die sich in Sichtweise und Umfang unterscheiden [FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 14 ff]. Gemein ist diesen Ansätzen, dass die Abläufe in Vorgehensplänen beschrieben sind [VDI 2221-1 2019, S. 15]. Ein allgemeines Vorgehensmodell bietet die Richtlinie VDI 2221-1 [2019], siehe Abbildung 2.4. Dieses kann entsprechend der Bedürfnisse in der Praxis übernommen und angepasst werden [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 208]. Das Vorgehen gliedert sich in die vier Phasen Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten [VDI 2221-1 2019]. Innerhalb der Phasen werden verschiedene Aktivitäten der Produktentwicklung durchgeführt. Diese werden jedoch meist nicht sequenziell abgearbeitet, sondern entsprechend der Randbedingungen greifen sie ineinander und werden häufig iterativ mehrmals durchlaufen [VDI 2221-1 2019, S. 17]. Auch die Intensität der Teilschritte kann dabei variieren. Aus den Teilschritten gehen Zwischenergebnisse hervor, die mit den Anforderungen abgeglichen werden. Das kann durch unterschiedliche virtuelle und reale Absicherungen erfolgen [VDI 2221-1 2019, S. 17]. Die entstandenen Ergebnisse liegen entsprechend der Systembetrachtung in Form von Modellen vor [PONN & LINDEMANN 2011, S. 20]. Nach [LINDEMANN 2009, S. 288] ist ein Modell gegenüber einem Original definiert als ein „*zweckorientiertes vereinfachtes gedankliches oder stoffliches Gebilde, das Analogien zu diesem Original aufweist, was bestimmte Rückschlüsse auf das Original zulässt*“. Hinsichtlich der Ergebnisdarstellung kann es als „*die Spezifikation von Produktinformationen in Form technischer Dokumente oder sonstiger Produktrepräsentationsformen*“ [LINDEMANN 2009, S. 20] verstanden werden. Die grundsätzliche Ausführung und Definition von Modellen ist vielfältig und wird gesondert in Kapitel 2.3 betrachtet.

Innerhalb der Produktentwicklung werden Methoden eingesetzt, um die Abläufe systematisch zu unterstützen [PONN & LINDEMANN 2011, S. 22]. Eine Methode ist nach der Richtlinie VDI 2223 [2004, S. 88] ein „*planmäßiges Vorgehen zum Erreichen eines bestimmten Ziels*“. EHRENSPIEL & MEERKAMM [2017, S. 173] betrachten die Methode als Teil einer Methodik. Hierunter wird ein „*planmäßiges Verfahren zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan unter Einschluss von Strategien, Methoden,*

*Werkzeugen und Hilfsmitteln*“ [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 173] verstanden. Methoden verfolgen somit ein bestimmtes Ziel und können bewusst oder unbewusst ablaufen [VDI 2223 2004]. Entsprechend dieser Definition unterstützen Werkzeuge die Durchführung von Methoden bei der Umsetzung von Modellen [PONN & LINDEMANN 2011, S. 23]. Diese können dabei von einfachen Werkzeugen, wie Checklisten oder Konstruktionskatalogen, bis zu komplexen Werkzeugen, wie Analyse- oder Gestaltungssoftware, reichen [LINDEMANN 2009, S. 52]. Somit besteht ein starker Zusammenhang zwischen Modellen, Werkzeugen und Methoden [PONN & LINDEMANN 2011, S. 23], der die Grundlage der Betrachtung dieser Arbeit in Bezug auf Werkzeuge und Modelle bietet. Eine detaillierte Betrachtung der Werkzeuge in dieser Hinsicht erfolgt in Kapitel 2.2.

Der Entwicklungsprozess des Technischen Designs nach SEEGER [2005] basiert auf dem in der VDI 2221-1 [2019] beschriebenen Vorgehen und ist um den Faktor Mensch erweitert. Der dieser Arbeit zugrundeliegende Prozess ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Im Mittelpunkt dieses Prozesses steht die Produktgestalt, entsprechend der Definition in Kapitel 2.1, die vom Abstrakten zum Konkreten detailliert wird. Diese Festlegung der Produktgestalt entsteht in Wechselwirkung mit dem Menschen. Der Nutzer des Produktes stellt Anforderungen an die Sichtbarkeit und Erkennbarkeit sowie an die Betätigung und Benutzung, auch als Mensch-Produkt-Anforderungen bezeichnet, die bei der Entwicklung nutzerzentrierter Produkte zu berücksichtigen sind. Der exakte Prozessablauf variiert jedoch in der Praxis [VDI 2221-2 2019, S. 3] und kann individuell festgelegt werden. KIM & LEE [2016] haben die Entwicklungs- und Designprozesse von mehreren Konsumgüterherstellern untersucht und vier typische Kollaborationsprozesse von Designern und Ingenieuren abgeleitet. Die Prozesse sind dabei vergleichbar zu phasenbasierten Prozessen wie in [VDI 2221-1 2019], [BAXTER 1995] oder [PAHL ET AL. 2007], aber unterscheiden sich nach der Anwendung und bestätigen die spezifische Anpassung auf individuelle Randbedingungen, die sich unter anderem durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit ergeben. Die beschriebenen Zusammenhänge und Zusammenarbeit unterschiedlicher Beteiligter verdeutlichen die Wichtigkeit von verschiedenen Produktmodellen, die für die iterative Gestaltung des Produkts notwendig sind [BAXTER 1995, S. 286]. Die für deren Gestaltung und Umsetzung eingesetzten Werkzeuge sind vielfältig und werden im Folgenden beschrieben.

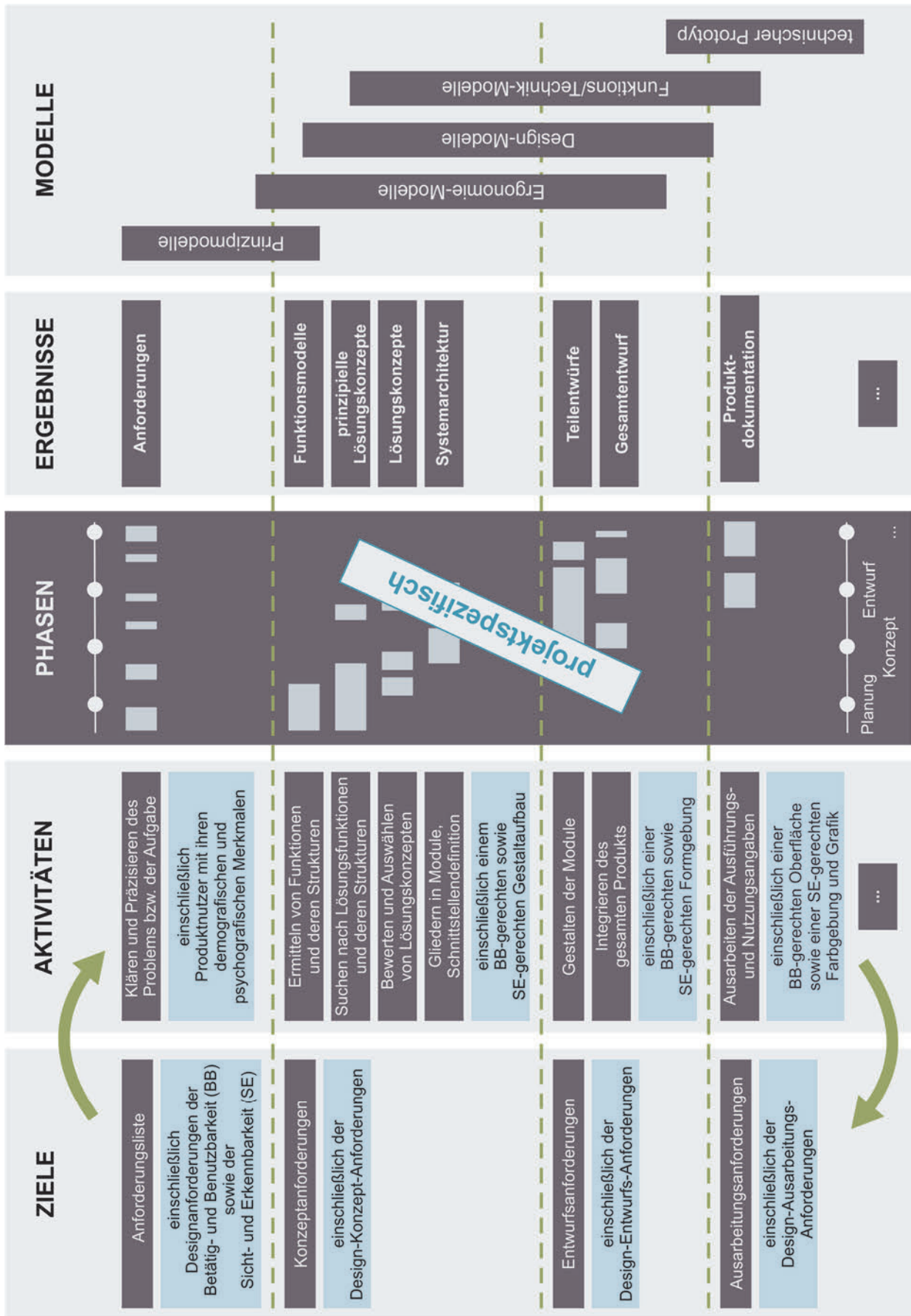


Abbildung 2.4: Prozess der nutzerzentrierten Produktentwicklung in Anlehnung an [SEGER 2005] und [VDI 2221-1 2019]

## 2.2 Werkzeuge der Produktgestaltung

Nach DUDEN [2020b] handelt es sich bei einem Werkzeug um einen „für bestimmte Zwecke geformten Gegenstand, mit dessen Hilfe etwas (handwerklich) bearbeitet oder hergestellt wird“. In Bezug auf die Produktentwicklung definiert die Richtlinie VDI 2223 [2004, S. 88] ein Werkzeug bzw. ein Instrument als Unterstützung für „das Vorgehen zum Anwenden einer Methode“. Beim Gestalten eines Produkts können unterschiedliche Arten an Werkzeugen, von sehr einfach bis hoch komplex, eingesetzt werden [PONN & LINDEMANN 2011, S. 23]. Es werden dabei eine „Vielzahl von Tätigkeiten in raschem Wechsel und enger gegenseitiger Abhängigkeit durchgeführt“ [VDI 2223 2004, S. 44]. Die Effizienz dieser Tätigkeiten ist in großem Maß von den Hilfsmitteln bzw. Werkzeugen abhängig [VDI 2223 2004, S. 44]. Ziel der Anwendung ist in Bezug auf die Produktgestaltung die Festlegung der gestaltgebenden Eigenschaften und Parameter (vgl. Kapitel 2.1). In der Literatur werden häufig auch Ansätze aus der klassischen Ingenieurtheorie als Werkzeuge angesprochen, wie beispielsweise bei ARAUJO [2001], NIEBERDING [2010] oder LUTTERS ET AL. [2014]. Der Fokus liegt dabei jedoch häufig auf dem Datenhandling des gesamten Entwicklungsprozesses, nicht aber auf der konkreten Entwicklung der Produktform in ihrer vollen Komplexität, wie sie in der ganzheitlichen Betrachtung funktionaler, ergonomischer und gestalterischer Aspekte zum Tragen kommt. In diesem Zusammenhang erfolgt eine Fokussierung auf Werkzeuge, die als Hilfsmittel zur Erzeugung und Visualisierung der Gestalt des späteren Produkts gedacht sind und die an einem Produktmodell als Repräsentant durchgeführt werden. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Werkzeuge, differenziert nach ihrer grundlegenden Technologie, betrachtet und hinsichtlich ihres Einsatzpotentials im Kontext der Aspekte Technik, Ergonomie und Design untersucht. Hierzu wird zunächst die Klassifizierung von Werkzeugen analysiert, von der ausgehend die Einteilung der Werkzeuge vorgenommen wird.

### 2.2.1 Klassifizierung von Designwerkzeugen

Bei einer Klassifizierung erfolgt eine Einteilung von Objekten nach unterschiedlichen Kriterien oder Klassen [DUDEN 2020c] und dient in Bezug auf Designwerkzeuge einer besseren Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit. Zentrales Element der Klassifizierung ist dabei die Wahl der Kriterien. Nach SELF & DALKE [2009] ist eine Klassifizierung von Werkzeugen notwendig, um deren Nutzen und Praxistauglichkeit zu messen, zu bewerten und zu vergleichen. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine reine Sammlung von auf dem

Markt erhältlichen Werkzeugen nicht zweckmäßig, da sie weder den Anspruch auf Vollständigkeit oder Aktualität erheben kann noch die Komplexität der Anwendung im Designprozess abbildet. Um eine sinnvolle Zuordnung zu den Aufgaben des Gestaltungsprozesses zu schaffen, ist ein Überblick über die verfügbaren grundlegenden Werkzeugtechnologien notwendig, ohne dabei den zuvor beschriebenen Einschränkungen der Aktualität zu unterliegen. Aus diesem Grund sind in Tabelle 2.2 übliche, in der Literatur recherchierte, Kriterien dargestellt, an denen sich die folgende Untersuchung, die Bewertung und die Auswahl von Werkzeugen in Kapitel 3.2.3 orientiert.

Designwerkzeuge				
Tätigkeit	Prozessphase	Umgebung	Dimension	Typ
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestalten</li> <li>• Darstellen</li> <li>• Transfer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planen</li> <li>• Konzipieren</li> <li>• Entwerfen</li> <li>• Ausarbeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Physisch</li> <li>• Virtuell / digital</li> <li>• Hybrid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2D</li> <li>• 2 ½ D</li> <li>• 3D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Methode</li> <li>• Ansatz</li> <li>• Technik</li> <li>• Werkzeug / Tool</li> </ul>

**Tabelle 2.2:** Kriterien zur Klassifizierung von Designwerkzeugen

### 2.2.2 Produktmodellierung und -gestaltung

Die Tätigkeit der Produktmodellierung und -gestaltung befasst sich mit der formgebenden Definition der Gestalt nach SEEGER [2005] (vgl. Kapitel 2.1). LÜDDEMANN [1996, S. 7] definiert die Formgestaltung als „*ein[en] Prozess des Modellierens strukturierter geometrischer Formen, der aus geforderten Eigenschaften des Gesamtprodukts hinsichtlich Ästhetik, Ergonomie und Funktion sowie gesetzlicher Regelungen die Produktgestalt zunehmend entwickelt*“. Entsprechend Tabelle 2.2 können Werkzeuge der Produktmodellierung nach verschiedenen Kriterien, wie Umgebung, Dimension oder Prozessphase differenziert werden. Aufgrund der hohen Vernetzung innerhalb der Produktentwicklung spielen insbesondere digitale, dreidimensionale (3D) Modelle und die Werkzeuge für deren Gestaltung eine elementare Rolle [VAJNA ET AL. 2018, S. 205 ff]. Auch wenn digitale 3D Modelle in einigen Bereichen Vorteile gegenüber zweidimensionalen (2D) Modellen und physischen Modellen besitzen [VDI 2209 2009, S. 5 ff], ist eine Entscheidung nicht trivial. Die Unterschiede bezüglich der zugrundeliegenden Modelle werden detailliert in Kapitel 2.3 betrachtet. Aufgrund der direkten Beziehung zwischen Modell und Werkzeug werden daher an dieser Stelle die Werkzeuge differenziert nach der Umgebung betrachtet. Da insbesondere bei physischen Modellen eine klare Zuordnung zwischen Gestalten und Darstellen nicht möglich ist, erfolgt die Einteilung nach der primären Verwendung.



Dementsprechend ist das kreative Prototyping oder auch physische Modellieren der Produktmodellierung zugeordnet und die reine händische bzw. manuelle Umsetzung von Modellen der Darstellung. Der Prozess der digitalen 3D Modellierung ist nach OLSEN ET AL. [2009] sehr komplex und bietet großes Potential, um insbesondere die frühen, konzeptionellen Phasen zu unterstützen. Hierbei werden häufig Stift und Papier für Skizzen verwendet, die aufwändig in ein Computer Aided Design (CAD) System überführt werden müssen [OLSEN ET AL. 2009]. Aber auch in späteren Phasen bestehen große Herausforderungen für die Produktmodellierung. Insbesondere die Wahl der Modellierungstechnik ist hierbei entscheidend [YANG ET AL. 2008]. Neben den etablierten Systemen des Computer Aided Designs (vgl. Kapitel 2.2.2.1), ermöglichen geometrisch freiere Systeme, beispielsweise aus der Animationsszene (vgl. Kapitel 2.2.2.2) oder der Algorithmus basierten Gestaltung (vgl. Kapitel 2.2.2.3), insbesondere für die Formgestaltung in der frühen Phase neue Möglichkeiten. Aber auch die Produktmodellierung in virtueller Umgebung (vgl. Kapitel 2.2.2.5) bietet neben den klassischen Werkzeugen (vgl. Kapitel 2.2.2.6) neue Ansätze.

### **2.2.2.1 Computer Aided Design**

Unter Computer Aided Design wird die rechnerunterstützte Konstruktion verstanden, die den „Systemen der Rechnerunterstützung in einem Unternehmen“ [VAJNA ET AL. 2018, S. 1] zuzuordnen ist. Die als CAx bezeichneten Systeme decken dabei alle Bereiche des Produktlebenszyklus von der Forschung über die Entwicklung bis zur Produktion und Fertigung sowie Begleitprozesse ab [VAJNA ET AL. 2018, S. 15]. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Werkzeugen der Konstruktion und insbesondere der Produktgestaltung. Eine besondere Rolle nehmen im Zusammenhang mit der Produktgestalt die Werkzeuge des Computer-Aided Styling (CAS) oder auch Computer-Aided Industrial Design (CAID) ein, die aus diesem Grund separat in Kapitel 2.2.2.2 betrachtet werden.

Die Ursprünge des CADs gehen nach GRIEB [2010, S. 17] zurück auf den Wissenschaftler Ivan Sutherland [SUTHERLAND 1963], der im Rahmen seiner Doktorarbeit mithilfe des Programms Sketchpad erste digitale Linien zeichnete. Insbesondere durch die Luftfahrtindustrie und später auch durch die Automobilbranche wurde die Entwicklung in den 70er und 80er Jahren weiter vorangetrieben und etablierte sich zunehmend auch in anderen Bereichen [VAJNA ET AL. 2018, S. 10 ff]. Durch die Gründung der heute noch weitverbreitenden Hersteller Autodesk (AutoCAD) [FLANDERA 2014, S. 3] und Dassault

Systems (CATIA) [KORNPROBST 2019, S. 1] wurden die zu anfangs noch zweidimensionalen Anwendungen weiterentwickelt und zu Beginn der 90er Jahre zunehmend durch die 3D-Modellierung ersetzt [GRIEB 2010, S. 19]. Auch der heute noch gebräuchliche Schnittstellenstandard STEP wurde 1994 eingeführt [ISO 10303-1 1994], um den Datenaustausch zu vereinheitlichen und vereinfachen [VAJNA ET AL. 2018, S. 537 f]. Mitte der 90er etablierten sich auch PTC (Parametric Technology Corporation) und SolidWorks am Markt [GRIEB 2010, S. 19], die heute insbesondere im Bereich der Konsumgüter große Anwendung finden. In den 2000er erfolgt eine zunehmende Erweiterung der Funktionsumfänge. Neben der Integration von Parametrik und Feature-Technologie unterstützen die Systeme eine Betrachtung des gesamten Produkts über die reine Geometriemodellierung hinaus. Im Zuge der Industrie 4.0 verändern sich auch die CAX-Systeme weiter zu Cloud-basierten Anwendungen und ermöglichen eine hohe Vernetzung [VAJNA ET AL. 2018, S. 12 f].

Die Verwendung von CAD-Systemen ist in der Industrie seit Jahren Standard und aus der Entwicklung nicht wegzudenken [VAJNA ET AL. 2018, S. 16]. Dennoch ist die Auswahl eines passenden Systems schwierig und insbesondere im Kontext der Produktgestaltung hinsichtlich ergonomischer und ästhetischer Aspekte mit Herausforderungen verknüpft. Neben wirtschaftlichen Aspekten ist eine Vielzahl an Kriterien zu berücksichtigen und mit den Stärken und Schwächen der jeweiligen Systeme abzuwiegen. In Tabelle 2.3 sind die wesentlichen Vor- und Nachteile bzw. Herausforderungen von 3D CAD-Systemen gegenübergestellt, die es bei der Bewertung zu bedenken gilt. Bei der Anwendung von CAD-Systemen, insbesondere in Bezug auf die Produktmodellierung, können eine Reihe verschiedener Techniken und Vorgehensweisen eingesetzt werden bzw. stehen zur Verfügung [VDI 2209 2009, S. 22]. In Tabelle 2.4 sind diese Faktoren dargestellt.

Vorteile	Nachteile / Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unermesslicher Funktionsumfang für alle Bereiche der Entwicklung</li> <li>• Direkte Verfügbarkeit und Integration aller Informationen bei Anbindung eines PDM-Systems</li> <li>• Potential zur Effizienzsteigerung durch Reduzierung von Routineaufgaben und damit Kapazität für kreatives Arbeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mangelnde Unterstützung konzipierender Tätigkeiten aufgrund der Arbeit mit exakten Geometriedaten</li> <li>• Geringe Ausschöpfung des Leistungspotentials aufgrund mangelnder Ausbildung und Anpassbarkeit an spezifische Bedürfnisse</li> <li>• Geringe Usability und Konsistenz der Systeme, insbesondere bei Parallelnutzung</li> </ul>

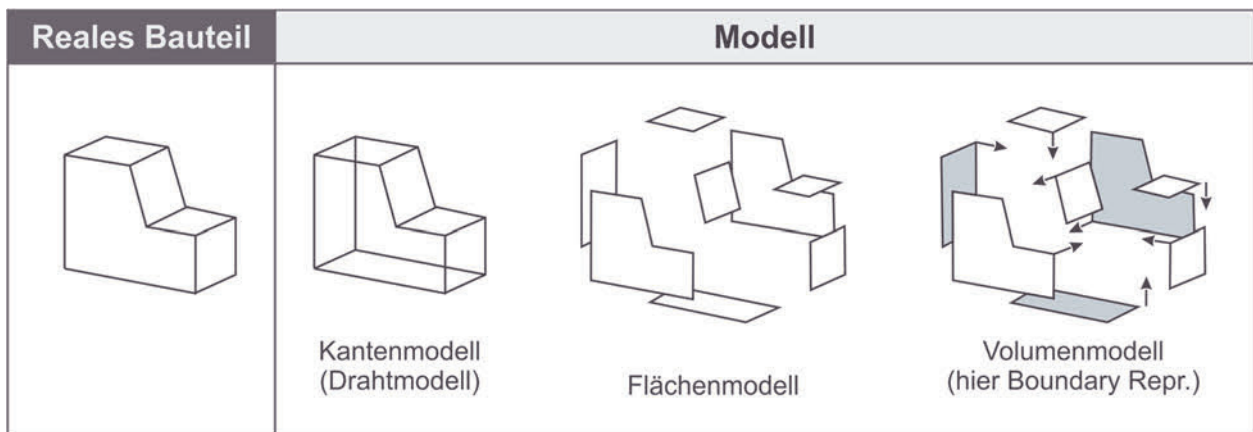
**Tabelle 2.3:** Vor- und Nachteile von 3D CAD-Systemen in Bezug auf die Auswahl des Einsatzbereichs in Anlehnung an [VAJNA ET AL. 2018], [VDI 2209 2009]

Wie beschrieben hat sich das zugrundeliegende Modell in den letzten Jahrzehnten von 2D- zu 3D-Modellen gewandelt. 2D-Modelle kommen heute nur noch in wenigen Ausnahmefällen zum Einsatz. 3D-Modelle können bei der Produktmodellierung mittels CAD in vier Modellarten, siehe Tabelle 2.4, unterschieden werden.

Computer Aided Design			
Modellarten	Geometriemodell	Modellierungsverfahren	Vorgehen / Strategie
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kantenmodell</li> <li>• Flächenmodell</li> <li>• Volumenmodell</li> <li>• Zellenmodell (Voxel)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CSG-Modell</li> <li>• B-Rep-Modell</li> <li>• Hybrid-Modell</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konventionell (direkt)</li> <li>• Parametrisch</li> <li>• Featurebasiert</li> <li>• Wissensbasiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Top-down</li> <li>• Bottom-up</li> <li>• Außen nach innen</li> <li>• Innen nach außen</li> </ul>

**Tabelle 2.4:** Aspekte der Produktmodellierung mittels CAD in Anlehnung an [VDI 2209 2009] und [VAJNA ET AL. 2018]

Bei Kantenmodellen erfolgt die Darstellung und Beschreibung des Objekts durch Linien-elemente. Aufgrund der einfachen Beschreibung benötigen sie sehr wenig Speicherplatz, was die Handhabung vereinfacht, auch wenn dies bei der heutigen Rechnerleistung nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Modelle sind durch die reine Beschreibung der Kan-ten nicht eindeutig und die Identifizierung von Außen- und Innenflächen ist erschwert, siehe Abbildung 2.5. In klassischen CAD-Anwendungen finden Kantenmodelle heute nur noch selten Anwendung. Bei Layout- und Großanlagenplanungen sowie vermehrt im Be-reich des Computer-Aided Styling in Form von Polygonmodellen, siehe Kapitel 2.2.2.2, werden sie jedoch eingesetzt. [VDI 2209 2009, S. 23 f]



**Abbildung 2.5:** Modellvarianten nach [VAJNA ET AL. 2018, S. 218]

Flächenmodelle sind gegenüber Kantenmodellen eindeutiger bezüglich der Kennzeich-nung der Vorder- und Rückseite einer Fläche, in Bezug auf das Gesamtmodell fehlt jedoch ebenfalls die Information von Innen und Außen, wie in Abbildung 2.5 zu erkennen ist. Die Regel- und Freiformflächen entstehen zum einen durch die Extrusion von 2D-

Konturen oder die Zusammensetzung von 3D-Randkurven. Aufgrund der gestalterischen Freiheit von Flächenmodellen, werden diese häufig im Design-Bereich eingesetzt, wofür gesonderte Anwendungen, das Computer-Aided Styling, existieren (vgl. Kapitel 2.2.2.2). Aber auch in klassischen CAD-Anwendungen finden Flächenmodelle Einsatz, überwiegend unter folgenden Aspekten:

- Nicht-Eignung der volumenorientierten Modellierung (beispielsweise im Karosseriebau oder für Blechteile),
- Flächen mit hoher geometrischer Komplexität (Guss- und Schmiedeteile),
- Berücksichtigung fertigungstechnischer Aspekte (Modellierung von Fräsflächen für den Form- und Werkzeugbau) [VDI 2209 2009, S. 24].

Die gängigste Modellierung im Bereich CAD ist die Volumenmodellierung. Hierbei handelt es sich um einen geschlossenen Flächenverbund, der zusätzlich Informationen zum Volumen enthält. Durch Zuordnung der Dichte können geometrische und physikalische Angaben zum Produkt definiert werden. Die Beschreibung des Volumenmodells kann zum einen durch die B-Rep-Methode oder CSG-Bäume erfolgen. Bei aktuellen CAD-Systemen kommen vermehrt hybride Ansätze aus diesen beiden Möglichkeiten zum Einsatz. [VDI 2209 2009, S. 24]

Eine weitere Unterteilung ist die Technik der Produktmodellierung. Hierbei wird unterschieden zwischen direkter (konventionell), parametrischer, featurebasierter und wissensbasierter Modellierung [VAJNA ET AL. 2018, S. 218 ff]. Bei der parametrischen Modellierung können gegenüber der konventionellen Modellierung neben festen Werten auch Beziehungen zwischen Werten der geometrischen Elemente definiert werden. Als Erweiterung können bei der featurebasierten Modellierung zusätzlich weitere Informationen (Semantik) hinterlegt werden, wie beispielsweise Funktionen oder Fertigungstechnologien [VAJNA ET AL. 2018, S. 219]. Bei den meisten heute eingesetzten CAD-Systemen handelt es sich um featurebasierte Systeme. Hierunter werden hauptsächlich geometrische Elemente verstanden, welche über sogenannte Feature-Bibliotheken eingefügt werden können [VDI 2209 2009, S. 46].

Bei der Modellierung mittels CAD kann nach verschiedenen Strategien vorgegangen werden, die sich hinsichtlich des Einsatzes innerhalb des Konstruktionsprozesses unterscheiden. In Tabelle 2.5 sind die unterschiedlichen Ansätze dargestellt und beispielhafte Einsatzbereiche beschrieben. Die Wahl des passenden Ansatzes bzw. der Strategie richtet sich sowohl nach dem Produkt, wobei unter anderem dessen Komplexität, spezielle Gestaltungsschwerpunkte oder Herstellungsverfahren berücksichtigt

werden. Aber auch die Art der Konstruktion, z. B. ob es sich um eine Neukonstruktion, eine Anpassung oder Varianten handelt, ist entscheidend. [VDI 2209 2009, S. 60]

	<b>Erzeugnisorientierte Modellierung (top-down)</b>	<b>Einzelteilorientierte Modellierung (bottom-up)</b>
Modellierung „von außen nach innen“	Komplexe Gesamtprodukte, Neukonstruktion, z. B. Gesamtfahrzeug	Bauteile mit besonderen Anforderungen an Design / Fertigung, z. B. Verkleidungsteile, (Guss-)Gehäuse, Blechteile, Erstellung von Baukästen
Modellierung „von innen nach außen“	Funktionsbaugruppe, Neukonstruktion, z.B. Verbrennungsmotoren, Getriebe Anwendung vorhandener Baukästen, z. B. Maschinen- und Anlagenbau	Funktionsbauteile mit besonderen physikalischen Anforderungen, z. B. strömungstechnische Bauteile

**Tabelle 2.5:** Modellierungsstrategien und deren Anwendung nach [VDI 2209 2009]

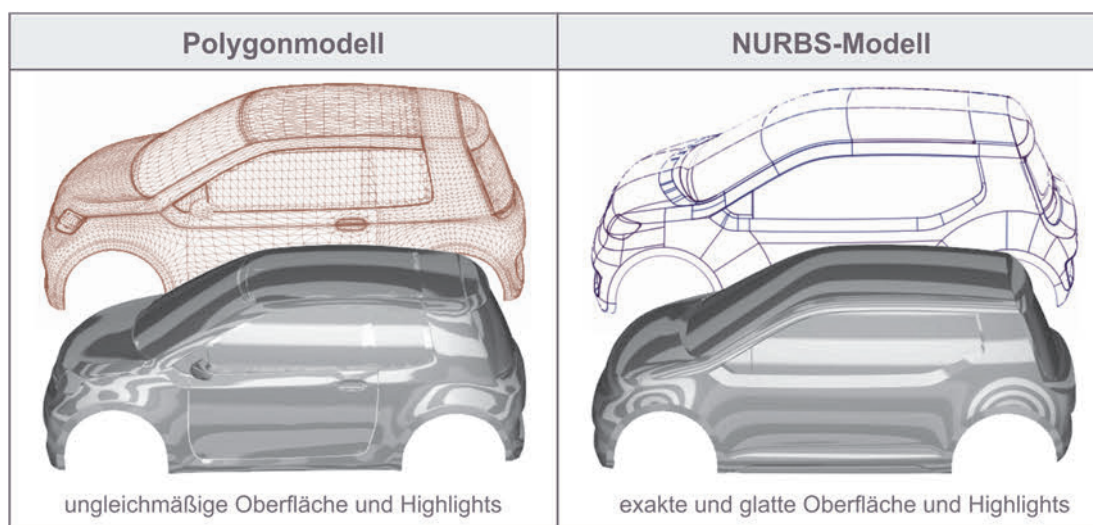
Insbesondere bei der Gestaltung komplexer und ästhetisch geprägter Formen stoßen klassische CAD-Systeme an die Grenzen ihrer Möglichkeiten, weshalb sich spezielle Systeme, zusammengefasst unter dem Begriff Computer-Aided Styling, etabliert haben, worauf im Folgenden näher eingegangen wird.

### 2.2.2.2 Computer Aided Styling

Die Abgrenzung zwischen CAD und CAS ist in der Literatur nicht klar definiert und weist in Bezug auf das konkrete Anwendungssystem Überschneidungen auf. Nach WESTIN [1998] handelt es sich bei CAS um ein auf CAD aufbauendes System speziell für kreative Bereiche. Neben CAS ist in der Literatur häufig der Begriff Computer-Aided Industrial Design zu finden [VAJNA ET AL. 2018, S. 12]. Bei CAS bzw. CAID handelt es sich um „Systeme zur rechnerunterstützten Formgebung im Sinne des Technischen Designs“ [VAJNA ET AL. 2018, S. 12]. CAS Systeme werden häufig in der Automobilentwicklung sowie im Konsumgüterbereich eingesetzt und dabei insbesondere von Designern und Modelleuren angewendet, um neue Produkte zu entwerfen oder bestehende digitale Modelle zu modifizieren [KÜDERLI 2007, S. 302].

Insbesondere die Bereiche, welche sich durch eine hohe Vernetzung von Design und der klassischen technischen Entwicklung auszeichnen, haben die Verbreitung von CAS vorangetrieben. WESTIN [1998] differenziert bei CAS-Tools zwischen 2D-Sketching und 3D-Modellierung. In dieser Arbeit beziehen sich CAS-Tools insbesondere auf die 3D-Modellierung, welche über die Möglichkeiten von CAD-Tools in Bezug auf freie und komplexe Formgebung hinausgeht. Aber auch gängige CAD-Anwendungen beinhalten mittlerweile integrierte Tools speziell für gestalterische Tätigkeiten und Flächenmodellierung, was die Überschneidungen verdeutlicht. Die 2D-Sketching Systeme werden in Kapitel 2.2.2.6 unter Grafikwerkzeugen behandelt. Auch bei CAS bzw. CAID kann in Bezug auf die

Systeme nach den zugrundeliegenden Modellen und den dadurch bedingten Modellierungsansätzen differenziert werden. Grundsätzlich kann hierbei zwischen polygonbasierten Systemen und flächenbasierten Systemen unterschieden werden (siehe Abbildung 2.6). Hieraus ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften, die sich auf den möglichen Einsatzbereich auswirken. Insbesondere frühe Entwürfe werden mit der Polygonmodellierung erstellt [GULANOVÁ ET AL. 2017], da sich diese durch eine schnelle und einfache Gestaltung auszeichnen. Jedoch ist hier anzumerken, dass innerhalb der CAS-Systeme meist eine Verbindung der Polygonmodellierungstechnik mit Freiformflächen-Modellierungswerkzeugen erfolgt und diese dem Anwender parallel zu Verfügung stehen [GULANOVÁ ET AL. 2017].

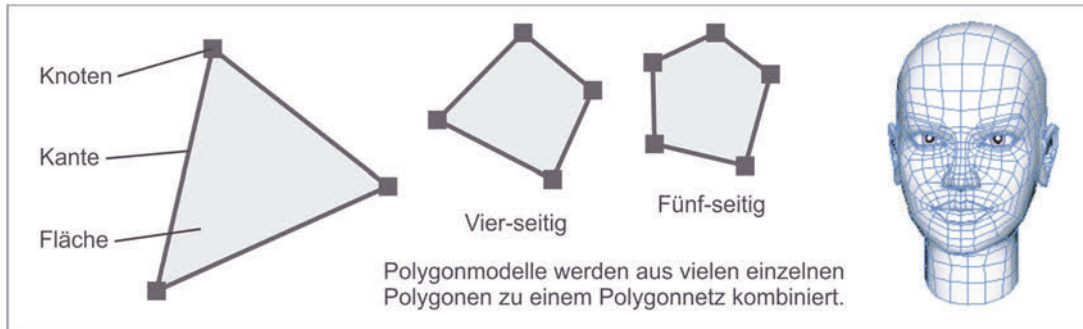


**Abbildung 2.6:** Vergleich von polygonbasierten und flächenbasierten CAS-Systemen in Anlehnung an [AUTODESK 2020c]

Polygone sind Formen mit geraden Seiten, die durch dreidimensionale Punkte (Eckpunkte) und die sie verbindenden geraden Linien (Kanten) definiert sind. Der innere, umschlossene Bereich beschreibt dabei eine Fläche. Meist werden drei- oder vierseitige Polygone eingesetzt, es können aber auch mehrseitige Polygone verwendet werden. Ein Polygonmodell setzt sich aus diesen Grundelementen zusammen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.7 dargestellt. [AUTODESK 2020b]

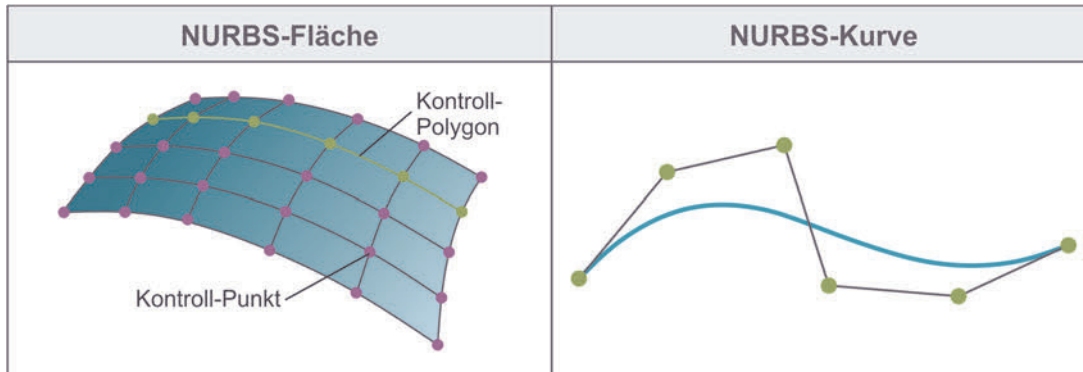
Flächenmodelle dagegen werden durch Extrusion oder Rotation von Splines (2D-Konturen) oder das Zusammenfügen von 3D-Kurven erzeugt [VAJNA ET AL. 2018, S. 223]. Im Bereich der computergestützten Darstellung (CAD und CAS) hat sich für eine Vielzahl von Anwendungen das Basis-Spline-Verfahren als Standard etabliert [VAJNA ET AL. 2018, S. 212]. Als Erweiterung dazu wurden die nicht uniforme rationale B-Splines (NURBS)

eingeführt, bei denen eine genauere Darstellung sowie einfachere und lokale Manipulationen möglich ist [VAJNA ET AL. 2018, S. 215]. Der Schwerpunkt der Anwendung von NURBS-Flächen liegt insbesondere im Industriedesign, da durch die Parametrisierung eine notwendige Genauigkeit und Flexibilität erzielt werden kann und damit entscheidende Vorteile bietet [MÜLLER 2005, S. 1f].



**Abbildung 2.7:** Aufbau von Polygonmodellen nach [AUTODESK 2020b]

In Abbildung 2.8 ist der Aufbau einer NURBS-Fläche sowie eines dazugehörigen Splines mit den manipulierbaren Kontrollpunkten dargestellt. Durch mehrere NURBS-Patches, die getrimmt und passend aneinandergesetzt werden, können komplexe Flächenmodelle generiert werden [MÜLLER 2005, S. 1 f].



**Abbildung 2.8:** Aufbau von NURBS-Flächen und Splines

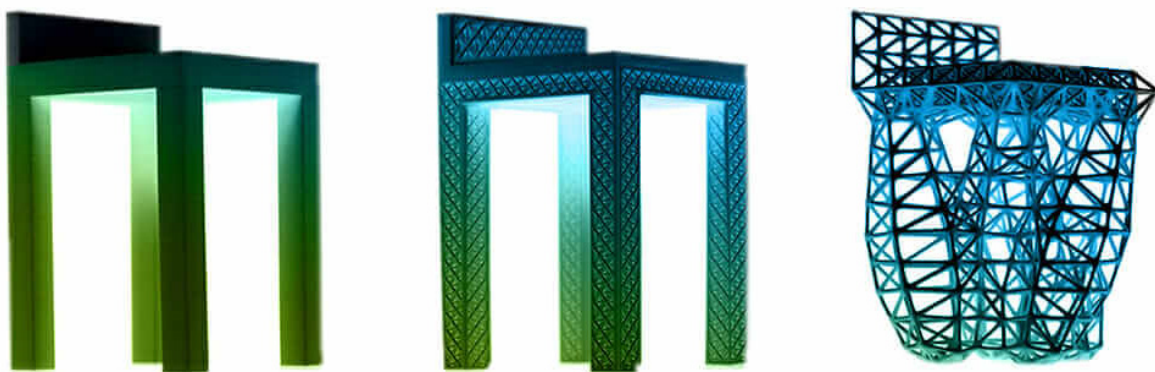
Die Unterschiede der Modellierungsansätze haben somit Auswirkungen auf die Genauigkeit, aber auch auf den Aufwand und Komplexität zur Umsetzung einer Gestalt, die es bei der Auswahl zu berücksichtigen und abzuwägen gilt.

### 2.2.2.3 Generative Design

Unter Generative Design versteht man die Verwendung von Algorithmen zur Erzeugung einer Vielzahl an unterschiedlichen Entwurfs- oder Konstruktionsvarianten [MCKNIGHT 2017]. Der Anwender formuliert hierzu das gestalterische Ziel sowie eingrenzende Parameter, wie beispielsweise Leistung, räumliche Gegebenheiten, Material, Fertigungs-

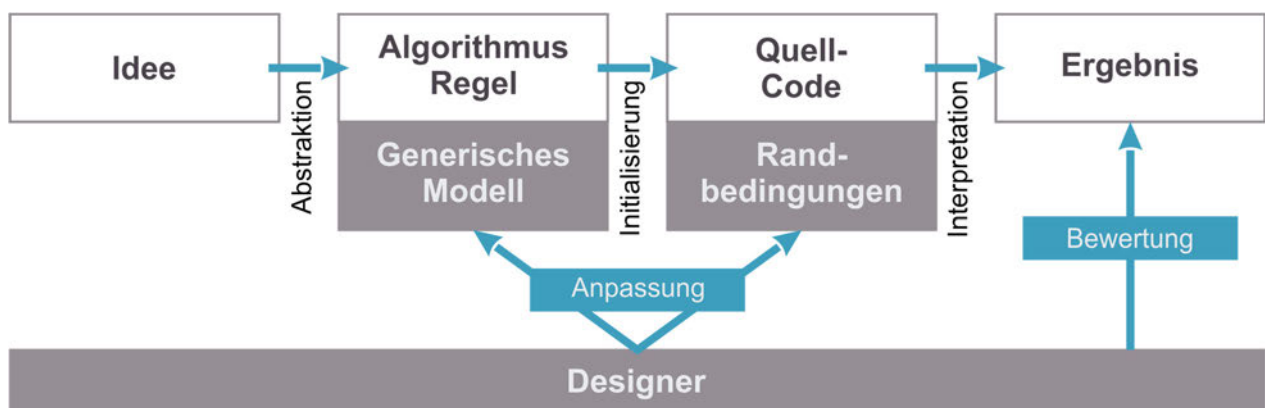


verfahren oder Kostenziele, mithilfe einer Generative-Design-Software, welche unter Berücksichtigung dieser Eingangsgrößen mögliche Varianten generiert [AUTODESK 2020]. Der virtuelle Raum des Computers wird dabei in Analogie zu evolutionären Prozessen in der Natur genutzt und bildet diese ab [FRAZER ET AL. 2002]. Das Generative Design ist bereits seit den 1970er Jahren ein wichtiges Designwerkzeug, welches ursprünglich in der Informatik sowie der Architektur-, Ingenieur- und Bauindustrie eingesetzt wurde und seit den letzten Jahren zunehmend Einzug in anderen Designdisziplinen wie der Produktgestaltung und dem Kommunikationsdesign findet [LOBOS 2018]. In Abbildung 2.9 ist beispielhaft das Ergebnis von Generative Design dargestellt.



**Abbildung 2.9:** Beispiel von Generative Design [REDSHIFT 2016]

Nach SHEA ET AL. [2005, S. 263] ist das Ziel von Generative Design demnach „*neue Entwurfsprozesse zu schaffen, die räumlich neuartige, aber dennoch effiziente und realisierbare Entwürfe unter Ausnutzung der derzeitigen Rechen- und Fertigungsmöglichkeiten erzeugen*“. Der Prozess gliedert sich dabei nach MCKNIGHT [2017] in vier Abschnitte, siehe Abbildung 2.10, bei denen der Designer insbesondere die Rolle der Bewertung übernimmt und auf Basis seiner Entscheidung Anpassungen am Algorithmus und Quellcode vornimmt.



**Abbildung 2.10:** Generative Design Prozess nach [KRISH 2011]

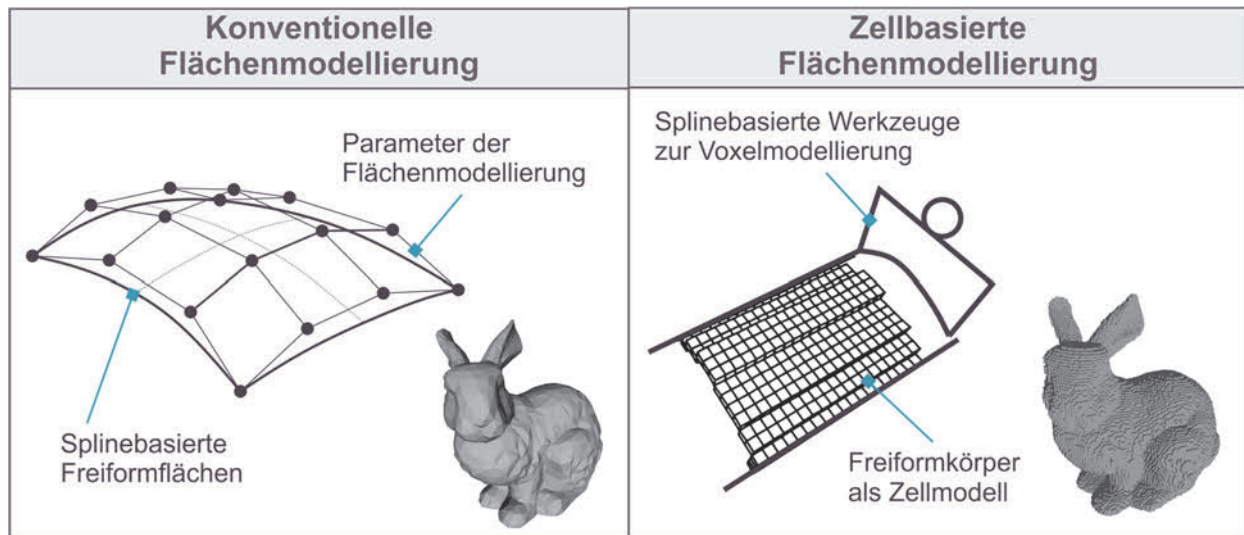


Das Generative Design ist ein interessanter Ansatz zur Erstellung von Modellen mit vielen Freiheitsgraden sowie guter Anpassbarkeit. Dies bietet beispielsweise im Kontext der Individualisierung in Verbindung mit der Additiven Fertigung neue Möglichkeiten. LEE & LIN [2014] konnten in ihrer Studie die Potentiale von Generative Design und der Additiven Fertigung bei der Gestaltung von Varianten und deren schnellen Überprüfung aufzeigen. FANTINI ET AL. [2017] haben in ihrer Studien einen ersten methodischen Ansatz für individualisierte, an den menschlichen Körper angepasste Teile vorgestellt. Hierbei wird die Prozesskette vom 3D-Scan des Körperteils bis zum additiv gefertigten Teil beleuchtet. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Anwendungen im Technischen Design, siehe Kapitel 2.1, von Interesse. Aber auch in frühen Phasen der Entwicklung zeigen sich bekannte Herausforderungen in der Zusammenarbeit zwischen Designern und Ingenieuren [KAZI ET AL. 2017]. DreamSketch beispielsweise bietet hierfür einen neuen Design-Workflow, der es dem Designer ermöglicht, eine Reihe von funktionalen 3D-Designs zu entwerfen und zu erforschen, indem er die Designabsichten skizziert [KAZI ET AL. 2017]. Dieses Vorgehen „*ermutigt Ingenieure, mehr wie Designer zu denken, und Designer, mehr wie Ingenieure zu denken*“ [KAZI ET AL. 2017]. Im Automobilbereich zeigen sich nach GULANOVÁ ET AL. [2017] Vorteile, um Designänderungen und die Konstruktion zusammenzubringen. Ihre Generative Engineering Design-Methodik beschreibt einen umfassenden Arbeitsablauf zur Unterstützung der Zusammenarbeit bei der Design-Erstellung und der funktionalen Konstruktion. Trotz dieser Ansatz benötigt die Anwendung des Generative Design in der Praxis nach GAVAČOVÁ & VEREŠ [2013] weitere Forschung zu den Möglichkeiten und spezifischen Methoden sowie deren Umsetzung. Auch LOBOS [2018] sieht in der zukünftigen Anwendung zwei Herausforderungen. Dies betrifft zum einen die Notwendigkeit von spezifischen mathematischen und informatischen Kenntnissen des Anwenders und zum anderen die Berücksichtigung und Integration ästhetischer, emotionaler und usabilitygerechter Vorstellungen und Bedürfnissen des Produktnutzers bei der Erstellung und Auswahl der Designlösungen [LOBOS 2018].

#### **2.2.2.4 Virtual Clay Modeling**

Virtual Clay Modeling (VCM) oder auch Digital Sculpting (DS) ist der Einsatz von Software um die Form eines digitalen Modells zu manipulieren (drücken, ziehen, glätten oder greifen), als ob es sich um ein physisches Modell beispielsweise aus Clay handelt [KRAUSE & LÜDDEMANN 1997]. Dieser Ansatz ist vor allem im Bereich des Charakterdesigns weit verbreitet, worunter die Gestaltung von Figuren, beispielsweise für Animationen oder

Grafiken, verstanden wird [LA FLOR & MONGEON 2012]. LÜDDEMANN [1996] präsentiert einen Ansatz, um es in der frühen Phase des Industriedesigns anzuwenden und kreative und intuitive Designprozesse computerbasiert zu unterstützen. In Abbildung 2.11 ist der grundsätzliche Unterschied der Methode gegenüber dem zuvor beschriebenen CAS dargestellt. Entgegen der abstrakteren und komplexeren Formgestaltung über Kontrollpunkte, erfolgt die Formgebung beim VCM über das Hinzufügen und Entfernen von Material wie beim physischen Modellieren.



**Abbildung 2.11:** VCM im Vergleich zu klassischen flächenbasierten CAS sowie die unterschiedlichen Modellarten nach [LÜDDEMANN 1996, S. 46], [YLIMÄKI ET AL. 2015]

Das zugrundeliegende Modell bei VCM kann entweder polygonbasiert oder voxelbasiert sein [GAGET 2019]. Beide Varianten bieten Vor- und Nachteile, die es bei einer Wahl des Tools zu berücksichtigen gilt. Der Vorteil eines netzbasierten Modells ist die Möglichkeit einer unterschiedlichen Auflösung innerhalb des gleichen Modells [VAUGHAN 2011, S. 281 ff]. Dadurch können einzelne Bereiche unterschiedlich stark detailliert werden. Ein voxelbasiertes Modell dagegen bietet mehr Freiheiten bei der Gestaltung der Form und Topologie, da die Anordnung von Polygonen auf der Modelloberfläche nicht berücksichtigt werden muss [VAUGHAN 2011, S. 281 ff].

Neben dem Modell existieren auch hinsichtlich der Eingabe der Befehle unterschiedliche Ansätze. In Kombination mit einem Force Feedback Gerät (vgl. Kapitel 2.2.2.9) kann ein realitätsnahes Gefühl von Claymodellierung auch auf dem haptischen Kanal geschaffen werden [BORDEGONI & CUGINI 2006]. TCHEBETCHOU [2005] hat eine Methode und ein Werkzeug entwickelt, welche die Interaktion im virtuellen Raum erleichtern und ein realistisches Modellieren wie im Physischen ermöglichen. ALCAIDE-MARZAL ET AL. [2013]

verfolgen dagegen einen Ansatz, bei dem durch Striche, die auf einem Grafiktablett ausgeführt werden, ein Netzmodell verformt wird und Material ähnlich wie echter Ton hinzugefügt oder entfernt werden kann, um eine Form zu generieren. Trotz der Vorzüge von VCM, insbesondere durch die direkte Arbeit in der virtuellen Umgebung und am digitalen Modell, haben ALCAIDE-MARZAL ET AL. [2013] in ihrer Studie auch die Schwierigkeiten von 3D Sculpting im Vergleich zum 2D Skizzieren aufgezeigt, die belegen, dass traditionelle Werkzeuge wie Papier und Bleistift nach wie vor in gewissen Bereichen leistungsfähiger sein können, um konzeptuelle Lösungen zu erstellen.

### **2.2.2.5 Modellierung in virtueller Umgebung**

Aufgrund der Entwicklungen im Bereich der Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) Technologien eröffnen sich neue Möglichkeiten, neben der klassischen digitalen Arbeitsweise in einer Standard-Umgebung mittels Computer, Monitor und Eingabegeräten, die Gestaltung in der virtuellen Umgebung vorzunehmen [WACKER ET AL. 2018]. Dies bezieht sich sowohl auf das Modellieren, als auch auf das Zeichnen [REIPSCHLÄGER & DACHSELT 2019]. Nach DEISINGER ET AL. [2000] und ARAÚJO ET AL. [2013] bietet das Modellieren in der virtuellen Umgebung drei wesentliche Vorteile für den konzeptionellen Gestaltungsprozess. Neben einer direkten Interaktion in Echtzeit, kann der Anwender vollständig in die Darstellung und Interaktion eintauchen. Dadurch wird der Abstand zur Designidee reduziert und ein intuitives Arbeiten ermöglicht. Die Herausforderungen bei der Modellierung in virtueller Umgebung sind jedoch nach wie vor groß, beginnend bei der Art der Eingabe und den erlernten Fähigkeiten des Anwenders [WIESE ET AL. 2010], der Manipulation des Objekts bis hin zur Darstellung und der damit verbundenen Rechnerleistung. In zahlreichen Studien wurden verschiedene Ansätze untersucht, jedoch haben sich bis heute nur wenige Systeme am Markt etabliert [MINDESK 2020], [GOOGLE 2020], [GRAVITY SKETCH 2020]. Die Vorbehalte der Anwender, insbesondere durch das ungewohnte Arbeiten [WIESE ET AL. 2010] und die Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten bei der Führung und das fehlende Feedback sind dabei Hürden [ARORA ET AL. 2017]. Das Vorhandensein einer dritten Dimension erhöht zusätzlich die Anforderungen an die räumliche Wahrnehmung und die motorischen Fähigkeiten des Nutzers [MACHUCA ET AL. 2018]. Zahlreiche Ansätze untersuchen die Möglichkeiten, diese Schwierigkeiten, beispielsweise durch Force-Feedback-Geräte, die Führung durch Prototypen oder eine visuelle Führung zu verringern [WACKER ET AL. 2018]. Weiter vorangetrieben wird die Entwicklung durch heutige VR Head Mounted Displays (HMD), die ein einfacheres und ungebundenes

Arbeiten mit Controllern ermöglichen [WACKER ET AL. 2018]. Aber auch die AR-Technologie, wie beispielsweise die Microsoft HoloLens [MICROSOFT 2020], bieten neue Einsatzbereiche. Mögliche Unterschiede zwischen VR und AR sollten dabei weiter untersucht werden. Beispielsweise zeigen sich Abweichungen bezüglich der Genauigkeit, wie WACKER ET AL. [2018] belegen konnten. Hierzu wurde die Genauigkeit beim Zeichnen auf virtuellen und realen Objekten verglichen. Durch die physische Führung verbessert sich die Genauigkeit, allerdings zu Lasten der Geschwindigkeit. MACHUCA ET AL. [2018] verfolgen hierzu einen Ansatz, um durch Ebenen, Kontrollpunkte und geometrische Beziehungen zwischen Objekten ungeübten Anwendern das Zeichnen zu erleichtern. Auch DUDLEY ET AL. [2018] verknüpfen in ihrem Ansatz die Möglichkeiten des immersiven Skizzierens mit der Orientierung im Raum durch die AR-Technologie und der Flexibilität, Freiheit und Schnelligkeit des Freihandzeichnen. Hierbei muss jedoch teilweise auf Genauigkeit verzichtet werden, wofür weitere Eingabemöglichkeiten geschaffen wurden, um eine gute Balance zu ermöglichen. Das Zeichnen und Modellieren im virtuellen Raum bietet aufgrund seiner Freiheiten großes Potential für zukünftige Anwendungen [ARORA ET AL. 2017], jedoch bedarf es hier noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, um diese Systeme zielführend in der realen Anwendung einsetzen zu können.

#### **2.2.2.6 Grafikwerkzeuge**

Zeichnungen und Skizzen werden von Designern und Konstrukteuren häufig zur Erfassung und Entwicklung ihrer Ideen verwendet [BAXTER 1995], [CROSS 1996], [ULLMAN ET AL. 1990]. In den frühen Phasen der Entwicklung, wenn die Lösung noch unscharf und abstrakt ist, werden nach ALCAIDE-MARZAL ET AL. [2013] Werkzeuge benötigt, die es ermöglichen, Gedanken auszudrücken, zu erfassen und zu analysieren; insbesondere, wenn diese nur Teile des zu entwerfenden Objekts darstellen. Skizzen sind hierfür häufig eines dieser Werkzeuge. Eine Skizze kann nach PIPES [2007, S. 19] definiert werden als "*eine Sammlung von visuellen Hinweisen, die ausreichen, um einem informierten Beobachter einen Entwurf nahezubringen*". Die Werkzeuge zur Erstellung von Skizzen reichen von den klassischen Utensilien wie Stift und Papier, Copic-Markern und Air-Brush [PIPES 2007, S. 72] über Tapedrawings bis hin zu digitalen Varianten bestehend aus spezieller Grafiksoftware und -hardware. Insbesondere in frühen Phasen können hiermit einfach erste Ideen und grobe Ansätze festgehalten werden. Aber auch detaillierte und fotorealistische Zeichnungen können damit erstellt werden [PIPES 2007, S. 18]. Tapedrawings ermöglichen es insbesondere im Automobildesign durch wenige wesentliche maßstabsgetreue Kurven, die die charakteristische Form und das Design definieren, das

Autodesign zu bewerten [GROSSMAN ET AL. 2002]. Aufgrund der Schwierigkeiten der Weiterverwendungen existieren auch hierzu digitale Ansätze [BALAKRISHNAN ET AL. 1999], [GROSSMAN ET AL. 2002]. Unabhängig des Werkzeugs ist die Wahl des passenden Detaillierungsgrades und der Darstellungsform hierbei schwierig und sollte im Kontext der beteiligten Personen, der Aufgabe und des Ziels erfolgen. MACOMBER & YANG [2011] haben in ihrer Studie gezeigt, dass detailliertere und realistischere Zeichnungen bei potentiellen Endnutzern besser bewertet werden, diese aber auch deutlich mehr Zeit bei der Umsetzung benötigen. Weitere Kriterien und Auswirkungen hierzu werden detailliert in Kapitel 2.3.2 in Bezug auf das zugrundeliegende Modell betrachtet.

Neben den klassischen Werkzeugen Stift und Papier werden heute jedoch häufig, vor allem im Designbereich, digitale Varianten des Zeichnens verwendet, welche eine größere Flexibilität und Gestaltungsmöglichkeiten bieten. Die Vorteile können nach RANSCOMBE & BISSETT-JOHNSON [2017] wie folgt zusammengefasst werden:

- Rückgängig machen von nicht gewünschten Ausführungen,
- Ausschneiden, Einfügen, Duplizieren und Transformieren von Elementen,
- Auswahl an Markern/Pinseln,
- Linienvorlagen für gerade und exakte Linien und Formen und
- Arbeiten mit Ebenen.

Beim digitalen Zeichnen erfolgt die Anfertigung der Zeichnung in einer Grafiksoftware. Statt mit Bleistift und Papier wird mit einem Tablet oder Computer und einem Zeichengerät, z. B. Maus oder Stylus gearbeitet. Digitale Zeichenprogramme enthalten Features wie Layer, Pinsel, Farbpaletten, Lineale und Gitterlinien und reagieren sensibel auf verschiedene Druckstärken [AUTODESK 2020a]. Die hierfür eingesetzte Grafiksoftware kann in Raster- und Vektorgrafik Systeme untergliedert werden, siehe Abbildung 2.12.

Objekt	Pixel Grafik	Vektor Grafik
		

**Abbildung 2.12:** Vergleich von Vektor- und Rastergrafik in Anlehnung an [PESTER 2020] „Eine Rastergrafik ist aus einzelnen kleinen Flächenelementen (Bildelementen) zusammengesetzt, die ihrerseits unterschiedlich gefärbt bzw. mit verschiedenen Grauwerten

*belegt sein können und ein Raster bilden“* [SCHIELE 2012, S. 23]. Wesentliche Merkmale einer Rastergrafik sind die Bildauflösung sowie die Farbtiefe [FISCHER-STABEL 2018, S. 28]. *„Eine Vektorgrafik ist die praktische Umsetzung der analytischen Geometrie, mit der ausnahmslos Linien [...] gezeichnet werden. Die Linien werden wie Vektoren behandelt [...], mit einem Anfangs- und einem Endpunkt und Koordinaten für diese Punkte“* [SCHIELE 2012, S. 25]. Vektorgrafiken sind unabhängig von der Bildauflösung und erlauben eine verlustfreie Vergrößerung und Bearbeitung der Bildinhalte [SCHIELE 2012, S. 25]. Vor allem im Transportation- und Industrial-Design gehören diese Systeme zu den Basiswerkzeugen der Designer, aber auch im Ingenieurbereich finden sie durch die direkte Vernetzung und Integration in CAD-Anwendung zunehmend Anwendung bzw. bieten hier Potential [RANSCOMBE & BISSETT-JOHNSON 2017], [ALCAIDE-MARZAL ET AL. 2013].

Jedoch hat der Einsatz von Skizzen auch Grenzen. Sie *„sind in der Regel ungeeignet, über technische Details zu urteilen. Im Dialog mit dem Konstrukteur bedürfen sie der verbalen Erläuterung“* [FRICK 1996, S. 105]. Auch *„zur Visualisierung bestimmter Aussagen reichen Skizzen oft nicht aus. Aus diesem Grund werden maßstäbliche Vormodelle [...] angefertigt. Damit können besondere Probleme der räumlichen Wirkung überprüft werden“* [FRICK 1996, S. 106]. Die beschriebenen Möglichkeiten und Grenzen der Grafikerwerkzeuge gilt es bei einem Einsatz im Gestaltungsprozess zu berücksichtigen.

### **2.2.2.7 Physische Modellierung**

Die Erweiterung des Zeichnens ist die physische Gestaltung im dreidimensionalen, um die zuvor beschriebenen Einschränkungen und begrenzte Einsatzmöglichkeiten von 2D-Darstellungen zu erweitern. Der Fokus der Untersuchung der physischen Modellierung liegt auf dem Ziel der Gestaltung. Die reine Darstellung von zuvor gestalteten Modellen in Form eines physischen Modells wird in Kapitel 2.2.3 untersucht.

Im Bereich des Designs und insbesondere des Transportation Designs ist die sogenannte Clay-Modellierung eine weit verbreitete Art der physischen Modellierung. Bei Clay handelt es sich um eine wachsartige Plastilin-Masse, welche sich bei ca. 60° leicht auf ein Grundgerüst auftragen lässt und bei Raumtemperatur mechanisch bearbeitet werden kann. Dies kann zum einen mit speziellen Fräsmaschinen oder von Hand mit Klingen, Spachteln und Schabern erfolgen. Auf diese Art und Weise können jegliche Formen einfach und direkt in ein Modell eingebracht und auch überprüft werden. Dies eignet sich insbesondere für ergonomisch geprägte Formen, wie beispielsweise Handgriffe [MAIER 2008], in einer frühen Phase der Entwicklung, da die Gestaltung und Auslegung ohne

Umwege direkt überprüft werden kann. Die Weiterverarbeitung der erzeugten Formen, in einem heute hoch digitalisierten Entwicklungsprozess macht jedoch weitere und aufwändige Schritte notwendig, die in Kapitel 2.2.4 beschrieben werden.

Neben der Clay-Modellierung können im Design und der technischen Entwicklung auch andere Werkzeuge und Materialien eingesetzt werden, die sich über den gesamten Bereich des klassischen Modellbaus erstrecken können. In Abbildung 2.13 sind etablierte Verfahren und Materialien dargestellt.



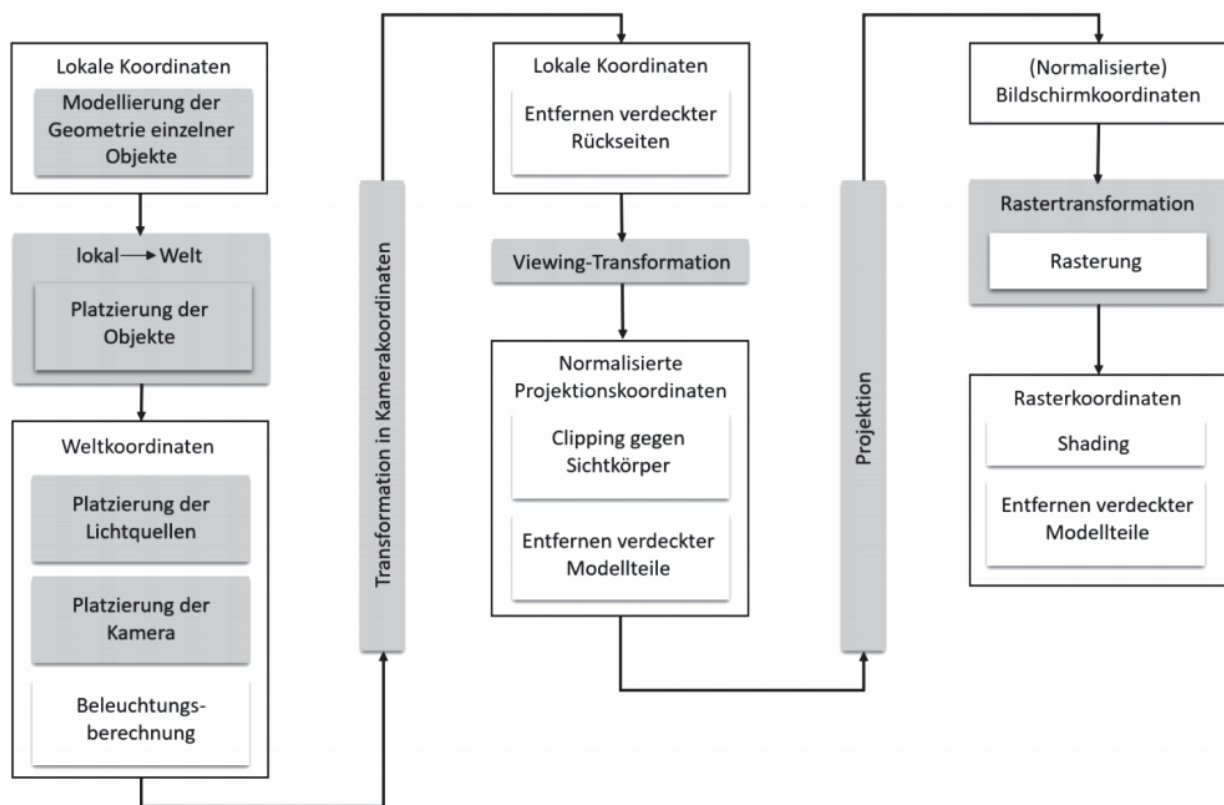
**Abbildung 2.13:** Werkzeuge des Modellbaus nach [MENICHINELLI ET AL. 2017, S. 34 f]

Auch bei der physischen Modellierung gilt es den Aspekt der Detaillierung und Darstellungsform beim Einsatz im Gestaltungs- und Entwicklungsprozess zu berücksichtigen, welcher in Kapitel 2.3.2 untersucht wird.

### 2.2.2.8 Rendering-Werkzeuge

Der Begriff Rendering bedeutet, übersetzt aus dem Englischen, Wiedergabe [DICT 2020]. Im Rahmen der Computergrafik beschreibt es den Prozess der Erzeugung von Bildern aus Modellen, insbesondere der Visualisierung von 3D-Modellen und somit aus den eigentlichen Daten bzw. aus der aktuellen Szene [SCHIELE 2012, S. 171]. Dabei müssen verschiedene Aufgaben wie die Beleuchtung, die Sichtbarkeitsberechnung, die Window-Viewport-Transformationen und das Shading gelöst werden [FISCHER-STABEL 2018,

S. 88 ff]. Der gesamte und aufwändige Prozess von der Erzeugung des Modells bis zum fertigen Bild ist in Abbildung 2.14 dargestellt. In Abbildung 2.15 ist beispielhaft das Ergebnis des Vorgehens aus Abbildung 2.14 dargestellt. Neben eigenständigen Spezialanwendungen zur Erstellung von Renderings auf Basis von 3D Modelldaten, besitzen die meisten gängigen CAD-Anwendungen heute integrierte Tools für die Erstellung fotorealistischer Darstellungen. Diese unterscheiden sich jedoch im Umfang und der realisierbaren Qualität von den eigens dafür vorgesehenen Anwendungen [KREBS 2017, S. 63].



**Abbildung 2.14:** Render-Pipeline [SCHLECHTWEG 2010]

Durch den hohen Detaillierungsgrad und die realitätsnahe Darstellung können vor allem auch ungeübtere Personen leichter Aussagen über das dargestellte Objekt treffen [MACOMBER & YANG 2011]. Der Anwender bzw. Betrachter ist somit ein wichtiges Kriterium für die Wahl der Darstellung [PIPES 2007, S. 153]. Da diese Art von Darstellung jedoch mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden ist, ist bei einem Einsatz stets ein Abwägen zwischen Aufwand und Nutzen vorzunehmen. Wohingegen der Aufwand anhand definierbarer Kriterien transparent bewertbar ist, handelt es sich beim Nutzen häufig neben objektiven Kriterien auch um die subjektive Wahrnehmung des Anwenders, welche in verschiedenen Studien untersucht wurden und in Kapitel 2.3.2 näher betrachtet werden.





**Abbildung 2.15:** Gerendertes Modell einer Heckenschere

### 2.2.2.9 Eingabegeräte












Wie bereits in den Kapiteln 2.2.2.5 und 2.2.2.6 beschrieben, werden für die Gestaltung mit digitalen Werkzeugen Eingabegeräte benötigt, um Vorgänge auszuführen. Nach DÖRNER ET AL. [2019, S. 117] dienen Eingabegeräte „*der sensorischen Erfassung von Nutzerinteraktionen ebenso wie der Erfassung weiterer Objekte und der umgebenden Welt*“. Durch Zusammenfassung und Interpretation der Daten können diese weiterverarbeitet und Eingaben in ein System ausgeführt werden [DÖRNER ET AL. 2019, S. 117 f]. Die Vielfalt an Eingabegeräten ist dabei groß und eine Klassifikation kann auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. In Abbildung 2.16 ist die Kategorisierung von Eingabegeräte nach RADEMACHER ET AL. [2014, S. 27 f] dargestellt.

	Exozentrisch	Egozentrisch
nicht-isomorph	<b>Tastaturen / Mäuse</b>  Spacemouse Tastatur & Maus	<b>Tracking</b>  Flystick Datenhandschuh
isomorph	Werkzeug WIM  <b>Nachbildungen</b>	Kinect Wii Leap Motion  <b>Gesten</b>

**Abbildung 2.16:** Kategorisierung von Eingabegeräten nach [RADEMACHER ET AL. 2014, S. 28]

Eine wesentliche Unterscheidung der Eingabegeräte erfolgt hinsichtlich der Art der Interaktion zwischen diskreter Eingabe, wie ein Maustastendruck, oder kontinuierlicher Eingabe, beispielsweise eine fortlaufende Erfassung der Position (Tracking) [DÖRNER ET

AL. 2019, S. 118]. POUPYREV ET AL. [1998] differenzieren zwischen exozentrischen und egozentrischen Technologien. Das bedeutet zum einen die Eingabe von außen auf ein System und zum anderen die Eingabe innerhalb des Systems oder der Umgebung. ZACHMANN [2011] unterscheidet weiter bezüglich den Abbildungsarten von Interaktionsraum und physischem Raum zwischen isomorph (direkte Interaktionstechniken) und nicht-isomorph (remote Interaktionstechniken). Anhand dieser grundsätzlichen Einteilung können Eingabegeräte analysiert und für die Anwendung innerhalb des Entwicklungsprozesses angemessene Werkzeuge definiert werden [PREIM & DACHSELT 2015, S. 286]. Insbesondere die Technologien der Virtual Reality unterliegen einem stetigen Wandel und Weiterentwicklung, weshalb hier insbesondere die grundlegenden Klassifizierungen betrachtet werden und aktuelle Technologien beispielhaft aufgeführt sind. In Tabelle 2.6 sind mögliche Eingabegeräte, wie sie für die Anwendung im Entwicklungsprozess in Betracht kommen, aufgeführt. Bei der Wahl von Eingabegeräten sind die Kriterien Anzahl der Freiheitsgrade, Anzahl der gleichzeitig verfolgten Objekte, Größe der überwachten Fläche bzw. des überwachten Volumens, Wiederholrate, Latenz, Drift, Empfindlichkeit gegenüber äußeren Rahmenbedingungen, Kalibrierung und Usability zu berücksichtigen, um ein möglichst optimales Ergebnis zu realisieren [DÖRNER ET AL. 2019, S. 120 ff].

Eingabegeräte										
Force-Feedback			Standard							
Haptic Pen (3D)	FFB Maus / Controller	Haptik/VR-Handschuh	PC-Maus/Tastatur	Body-Tracking	Space Mouse	Joystick	Eye-Tracking	Digital-Pen (Tablet/Monitor)	Leap Motion	Flystick / Controller
										
[3dsystems.com]	[hapticshouse.com]	[origin.dextarobotics.com]	[logitech.com]	[xsense.com]	[3dconnection.com]	[thrustmaster.com]	[tobipro.com]	[wacom.pro]	[ultraleap.com]	[ar-tracking.com]

**Tabelle 2.6:** Eingabegeräte mit und ohne Force-Feedback, eigene Darstellung nach [DÖRNER ET AL. 2019, S. 177 ff], [PREIM & DACHSELT 2015, S. 485 ff]

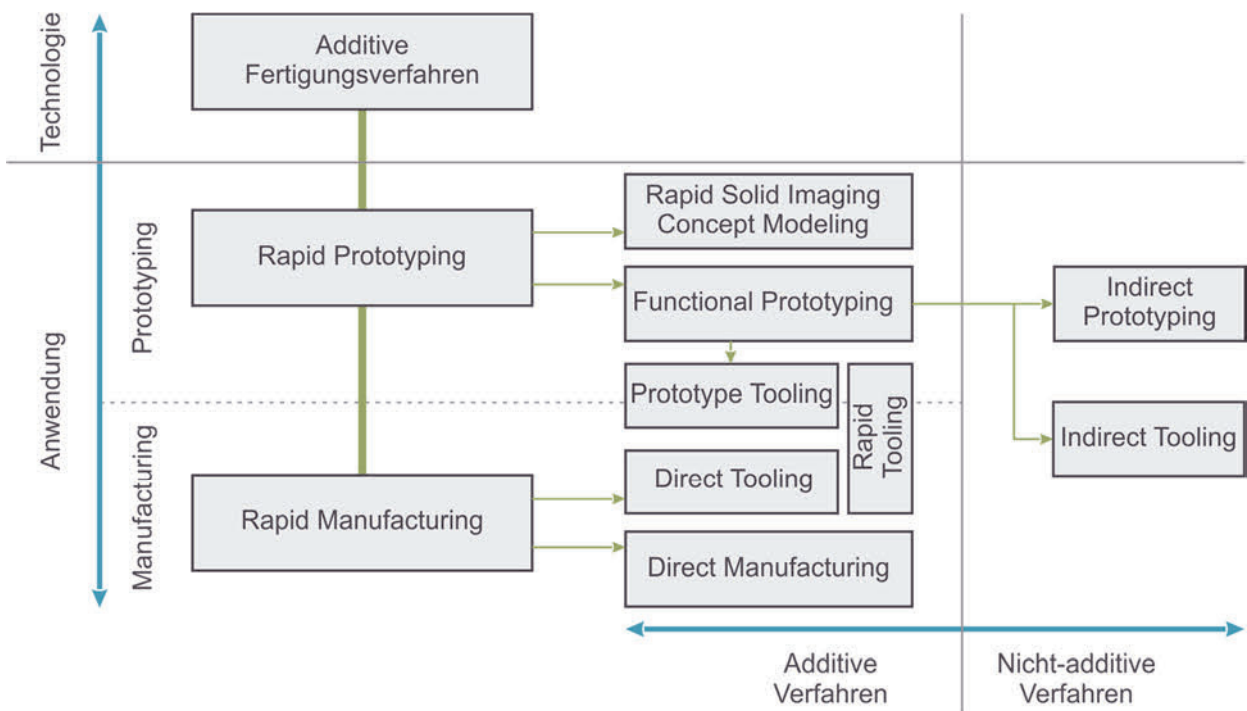
Zu beachten ist jedoch, dass Eingabegeräte und Ausgabegeräte, wie sie in Kapitel 2.2.3 näher betrachtet werden, nicht zwangsläufig unabhängig voneinander sind und teilweise die Aufgaben in einem Gerät kombiniert sind [PREIM & DACHSELT 2015, S. 286]. Bei Force-Feedback Geräten handelt es sich um Eingabegeräte, die eine haptische Rückmeldung erzeugen und somit eine Kombination aus Ein- und Ausgabegerät darstellen [HEINECKE 2012, S. 146]. Diese Geräte können einen wesentlichen Beitrag leisten die Interaktion zu verbessern, wie WACKER ET AL. [2018] in ihrer Untersuchung zeigen konnten. Die Ausführungen hierbei sind vielfältig, siehe Tabelle 2.6, und auf den jeweiligen Anwendungsfall abzustimmen, wobei die Richtlinie DIN EN ISO 9241-910 [2011] hierfür mögliche Kriterien aufzeigt.

### **2.2.3 Darstellung**

Innerhalb der Entwicklung können wie beschrieben unterschiedliche Modelle sowohl für den Vorgang der Gestaltung sowie eine anschließende Bewertung durch unterschiedliche Stakeholder eingesetzt werden. Insbesondere bei der digitalen Gestaltung ist das Modell, welches gestaltet wird, nicht zwangsläufig das gleiche, wie das Modell für die Bewertung. Hierfür ist der Schritt der Darstellung notwendig. Dies kann sowohl das physische oder das digitale Modell als Ausgangsbasis haben, wobei es zu einem Wechsel der Umgebung kommen kann (Transfer), welcher in Kapitel 2.2.4 untersucht wird. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Verfahren und Ansätze der Darstellung betrachtet.

#### **2.2.3.1 Additive Fertigung**

Bei der additiven Fertigung handelt es sich um Fertigungsverfahren, „*die Bauteile durch Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen (Voxel), vorzugsweise schichtweise, automatisiert herstellen*“ [GEBHARDT 2016, S. 3]. In der Literatur und Praxis wird häufig auch die Begrifflichkeit des englischen Pendant, das Additive Manufacturing (AM) verwendet. Im allgemeinen Sprachgebrauch ist häufig vom 3D-Drucken die Rede, wobei es sich aber um ein spezielles Verfahren (Three Dimensional Printing 3DP) der AF handelt, das auch unter dem Namen Binder Jetting (BJ) bekannt ist [GEBHARDT 2016, S. 3]. Die additiven Fertigungsverfahren werden für Prototypen, Werkzeuge bis hin zu Endprodukten eingesetzt [VDI 3405-1 2014]. Hierbei haben sich die Begriffe Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling sowie Rapid Manufacturing etabliert [VDI 3405-1 2014]. In Abbildung 2.17 sind diese Zusammenhänge dargestellt, die sich im Weiteren auf die Gestaltung, die Anwendung und die Eigenschaften der verschiedenen Verfahren auswirken sowie deren Einsatz beeinflussen.

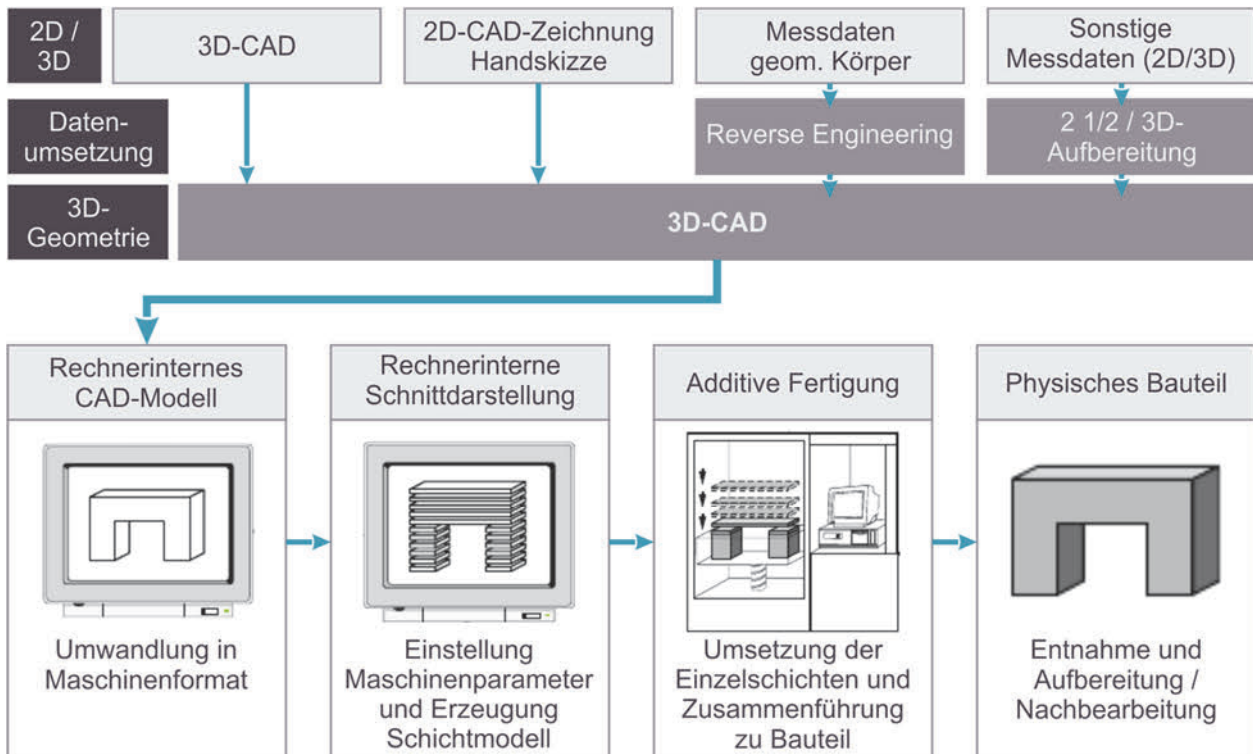


**Abbildung 2.17:** Die Additive Fertigung im Zusammenhang mit der Anwendung  
[GEBHARDT 2016, S. 7]

THOMPSON ET AL. [2016] bestätigen ein kontinuierliches Wachstum und die Entwicklung der AF Technologien, jedoch ist gleichzeitig die Entwicklung der Gestaltungstechnologien zur Nutzung der durch AM gebotenen Möglichkeiten und zur Bewältigung der mit der Technologie verbundenen Einschränkungen zurückgeblieben. In Verbindung mit den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Werkzeugen der Produktmodellierung besteht somit ein großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf für eine optimierte Anwendung.

Für die Realisierung additiv gefertigter Teile stellt das mit den untersuchten Produktmodellierungswerkzeugen erzeugte Modell eine Ausgangsgröße dar [GEBHARDT ET AL. 2016, S. 75]. Im Rahmen der nutzerzentrierten Produktentwicklung kann der Ausgangspunkt für das 3D-Modell jedoch vielfältig sein und das Wissen darüber ist für die Wahl von Werkzeugen und Modellen elementar, siehe Abbildung 2.18. Die sich anschließende AF-Prozesskette hat Einfluss auf die Eigenschaften und Qualität der realisierbaren Modelle [VDI 3405-1 2014]. Der Pre-Prozess umfasst dabei die Datenvorbereitung, die Bauteilordnung und Auslegung von Hilfsstrukturen sowie die Schichterzeugung unter Berücksichtigung der Maschinenparameter [VDI 3405-1 2014, S. 6]. Das hierbei zumeist verwendete STL-Format (Surface Tessellation Language) hat sich als Standard etabliert. Dabei werden die Begrenzungsflächen des Modells durch Dreiecke und deren Normalenvektoren beschrieben (Triangulation) [GEBHARDT 2016, S. 35 ff]. Neben den Vorteilen der einfachen Handhabung und Robustheit, weist das STL-Format auch Nachteile auf,

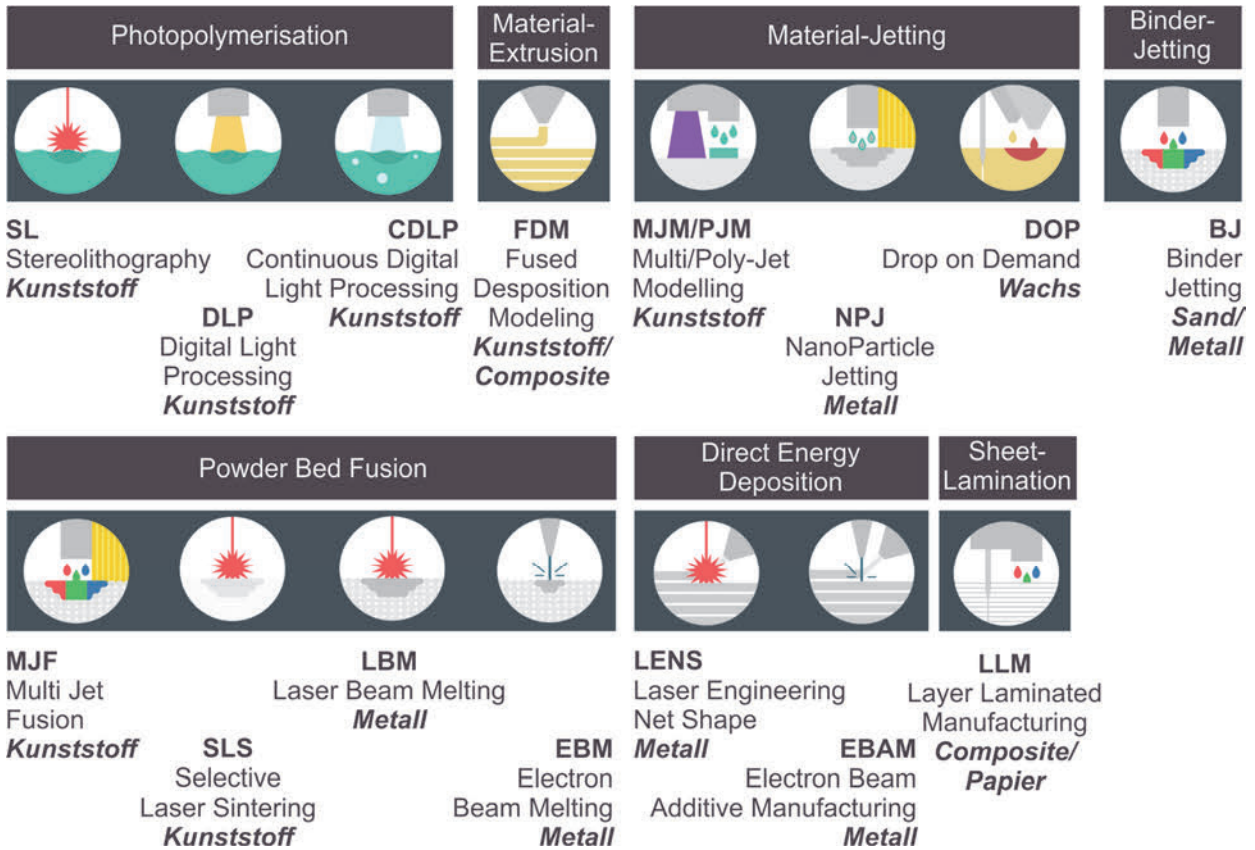
welche die Qualität eines Bauteils beeinflussen [GEBHARDT 2016, S. 37 ff]. Aufgrund zunehmender Möglichkeiten der additiven Fertigungsanlagen stößt das STL-Format auch an Grenzen, da keine Informationen wie Farbe, Texturen oder Materialien gespeichert werden können, die für moderne Anlagen relevant sind [THOMPSON ET AL. 2016].



**Abbildung 2.18:** Datenwege zum 3D-Modell und Prozess der additiven Fertigung, eigene Darstellung in Anlehnung an [GEBHARDT 2016, S. 24, 34]

Der In-Prozess ist die letztendliche Umsetzung des Modells mit der additiven Fertigungsanlage, an den sich der Post-Prozess anschließt. In Abhängigkeit des genutzten Verfahrens, der Bauteileigenschaften sowie des Einsatzzweckes des Modells sind verschiedene, nachbearbeitende Schritte zur Finalisierung des Modells notwendig [VDI 3405-1 2014, S. 6].

Die Auswahl an möglichen Verfahren und damit an Materialien sowie realisierbaren Eigenschaften ist immens. In Abbildung 2.19 sind diese Verfahren, unterteilt nach der Ausgangsform des Grundstoffes und den möglichen Materialien, dargestellt.



**Abbildung 2.19:** Übersicht von AF-Verfahren nach [3D HUBS 2020]

Eine Bewertung der Verfahren hinsichtlich deren Eignung in Abhängigkeit von den Produkteigenschaften bietet die Richtlinie VDI 3405-1 [2014], siehe Tabelle 2.7. Diese ist als grobe Hilfestellung zu verstehen und auf den konkreten Anwendungsfall, insbesondere in Hinblick auf die nutzerzentrierte Produktentwicklung, zu konkretisieren.

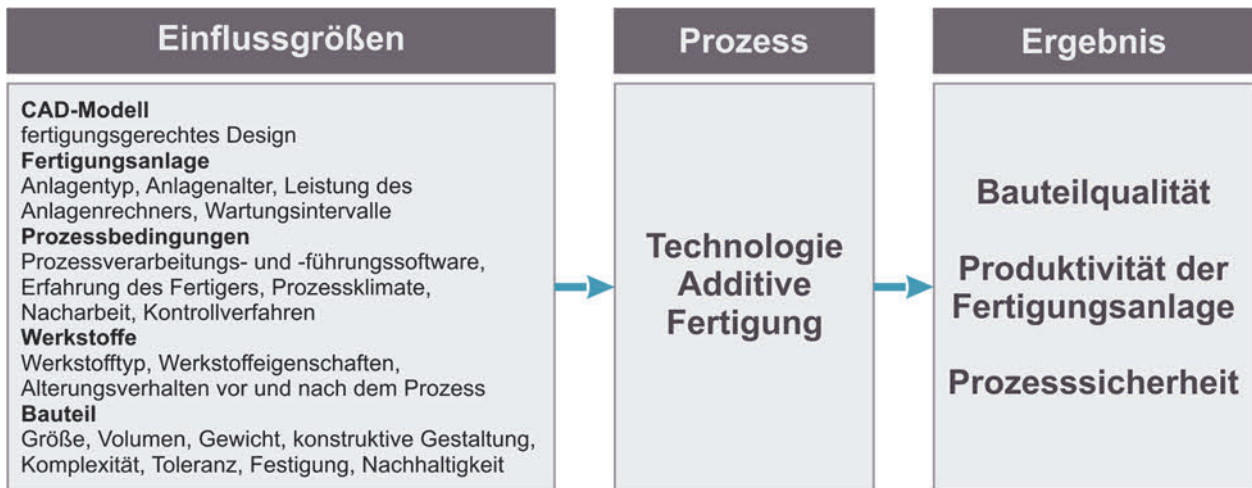
Additives Fertigungsverfahren	Anforderungskriterien						
	Gestalt	Geometrie	Verarbeitung	Mechanisch	Thermisch	Elektrisch	Chemisch
SL	+	+	o	o	o	o	o
SLS + LBM + EBM	o	+	+	+	+	+	+
FDM	o	o	+	+	+	+	+
MJM + PJM	+	+	+	o	o	-	-
BJ	+	o	o	-	-	-	-
LLM	o	+	o	o	o	-	-
DLP	+	+	o	o	o	-	-

+ empfehlenswert | o teilweise empfehlenswert | - nicht empfehlenswert

**Tabelle 2.7:** Eignung additiver Fertigungsverfahren hinsichtlich Produkteigenschaften nach [VDI 3405-1 2014, S. 33]

Das spätere Ergebnis ist durch verschiedene Faktoren entlang der AF-Prozesskette beeinflusst, weshalb eine individuelle Betrachtung des Anwendungsfall erfolgen sollte [VDI 3405-1 2014, S. 34]. In Abbildung 2.20 sind diese Zusammenhänge dargestellt.





**Abbildung 2.20:** Einflussfaktoren auf das Ergebnis der AF-Prozesskette nach [VDI 3405-1 2014, S. 34]

Wesentlicher Vorteil der additiven Fertigung ist die völlige Freiheit der zu realisierenden Gestalt [BREUNINGER ET AL. 2013, S. 16] und die Unabhängigkeit von Stückzahlen [THOMPSON ET AL. 2016]. Dies macht es insbesondere für individualisierte und personalisierte, also an einen Nutzer angepasste Produkte interessant [GEBHARDT ET AL. 2016, S. 156 ff]. ADAM & ZIMMER [2014] zeigen jedoch auf, dass fehlende Gestaltungsrichtlinien ein limitierender Faktor für den erfolgreichen Einsatz sind. Die übliche Konstruktionsweise mit den bisher bekannten Gestaltungswerkzeugen schränken nach THOMPSON ET AL. [2016] die Möglichkeiten ein bzw. schöpfen diese nicht vollständig aus. Hier sind neue Ansätze, wie beispielsweise das Generative Design, siehe Kapitel 2.2.2.3, notwendig [LEE & LIN 2014]. In Bezug auf die Umsetzung von Produkten und Modellen mit hohen ergonomischen und ästhetischen Anforderungen zeigen sich bei der additiven Fertigung noch verfahrensbedingte Einschränkungen, beispielsweise die Stufenbildung durch den schichtweisen Aufbau [SINGAMNENI ET AL. 2012]. Neben möglichen Nachbearbeitungsschritten, beispielsweise mit Aceton-Dampf [BREUNINGER ET AL. 2013, S. 33], entwickeln WULLE ET AL. [2017] ein Verfahren der mehrachsigen AF, wodurch die Oberflächenqualität verbessert werden kann. Diese limitierenden Faktoren, die Einflussfaktoren des AF-Prozesses sowie die Verfahrensspezifika verdeutlichen die Notwendigkeit einer engen Vernetzung von Modellen und Werkzeugen im Kontext der Aufgabe, insbesondere bei einer ganzheitlichen Betrachtung von Produkten mit technischen, ergonomischen und ästhetischen Randbedingungen, um das volle Potential der AF zu nutzen.

### 2.2.3.2 Klassische Werkzeuge

Neben dem zuvor beschriebenen Verfahren der additiven Fertigung können für die Umsetzung von physischen Modellen vor allem die etablierten Fertigungsverfahren (siehe Abbildung 2.21), wie sie in der Richtlinie DIN 8580 [2003] grundlegend definiert sind, eingesetzt werden. Hierbei zeigen sich Überschneidungen zu den in Kapitel 2.2.2.7 beschriebenen Werkzeugen der physischen Modellierung.

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		Hauptgruppe 6  Stoffeigenschaft ändern
Hauptgruppe 1  Urformen	Hauptgruppe 2  Umformen	Hauptgruppe 3  Trennen	Hauptgruppe 4  Fügen	Hauptgruppe 5  Beschichten	

**Abbildung 2.21:** Fertigungsverfahren der DIN 8580 nach [VAJNA 2014, S. 241]

In Abhängigkeit von der benötigten Stückzahl, den notwendigen Materialien, der Belastbarkeit, der Ähnlichkeit zum finalen Produkt, der Größe oder der Komplexität können die klassischen Fertigungsverfahren wie beispielsweise Drehen, Fräsen, Sandguss, Tiefziehen oder Vakuumguss Vorteile gegenüber den additiven Fertigungsverfahren bieten [KLOCKE 2015, S. 127 ff], [VIOPROTO 2020]. Die Entscheidung ist jedoch nicht trivial und muss unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen individuell erfolgen.

### 2.2.3.3 Virtual und Augmented Reality

Nach PREIM & DACHSELT [2015, S. 246] bezeichnet der Begriff Virtual Reality „*realistische 3D-Umgebungen, in denen eine virtuelle Welt in Echtzeit interaktiv exploriert und manipuliert werden kann*“. Hierzu werden „*Ein- und Ausgabegeräte benötigt, die möglichst das gesamte Sichtfeld umfassen, die einen Stereoeindruck vermitteln und damit beim Benutzer das Gefühl der Immersion auslösen*“ [PREIM & DACHSELT 2015, S. 247] Auf die Eingabegeräte wurde bereits in Kapitel 2.2.2.9 eingegangen, weshalb im Folgenden die Ausgabegeräte fokussiert betrachtet werden. BURDEA & COIFFET [2003, S. 3] beschreiben Virtual Reality als ein ganzheitliches Trio bestehend aus Interaktion, Immersion und Imagination. Die Interaktion und die Immersion fokussieren sich primär auf das System. Die Imagination dagegen bezieht sich auf die notwendigen mentalen Fähigkeiten des Betrachters [BURDEA & COIFFET 2003, S. 4].

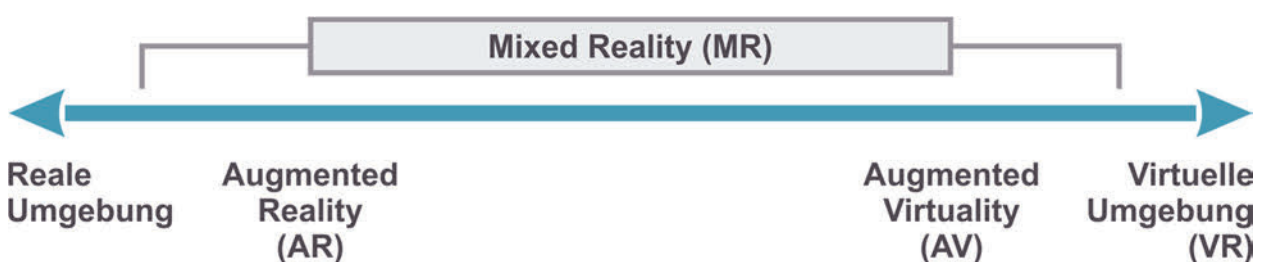


Nach REGENBRECHT [1999, S. 31] beschreibt die Immersion „*alle Voraussetzungen, die die Präsenz des Nutzers in einer virtuellen Umgebung bedingen und beeinflussen*“. Somit fühlt sich der Nutzer „*durch entsprechende technische Voraussetzungen in die virtuelle Szene eingebunden bzw. ist Teil dieser Szene*“ [RADEMACHER ET AL. 2014, S. 20]. Das kann alle Sinne der Wahrnehmung (visuell, auditiv, haptisch, olfaktorisch und gustatorisch) umfassen [BURDEA & COIFFET 2003, S. 3] und hat somit direkte Auswirkungen auf die Möglichkeit zur Bewertung und Einschätzung von Produkteigenschaften im Kontext der Produktentwicklung.

Im Gegensatz zu VR definiert AZUMA [1997] Augmented Reality als ein System, das es dem Nutzer erlaubt „*to see the real world, with virtual objects superimposed upon or composited with the real world. Therefore, AR supplements reality, rather than completely replacing it*“. Es verfügt demnach über die drei folgenden charakteristischen Merkmale:

- Kombination von Realität und Virtualität,
- Interaktivität in Echtzeit und
- Registrierung der virtuellen Inhalte in 3D [AZUMA 1997].

Zur Beschreibung jeglicher Formen zwischen Realität und Virtualität hat sich das Reality-Virtuality-Continuum nach MILGRAM & KISHINO [1994] etabliert, siehe Abbildung 2.22. Demnach kann Mixed Reality (MR) als ein Kontinuum beschrieben werden, welches sich zwischen der Realität und der Virtualität erstreckt.



**Abbildung 2.22:** Reality-Virtuality-Kontinuum nach [MILGRAM & KISHINO 1994]

Überwiegt der Anteil der Virtualität, ohne dass die Umgebung dabei ausschließlich virtuell ist, spricht man von Augmented Virtuality. Überwiegt jedoch die Realität, spricht man von Augmented Reality. [DÖRNER ET AL. 2019, S. 22]

Basierend auf dieser grundsätzlichen Betrachtung von VR und den verschiedenen Formen der MR, existieren zahlreiche technische Möglichkeiten zur Darstellung und Umsetzung, die einem stetigen Wandel und Weiterentwicklung unterliegen. In Tabelle 2.8 sind die technischen Formen der MR und deren Haupteigenschaften dargestellt.

Displaytyp	HMD		Handheld	
Technologie	Video-see-through	Optical-see-through	Video-see-through	
			Smartphone / PDA	Tablet
<b>Vorteile</b>	Vollständige Darstellungskontrolle, Synchronisation VR / reale Umgebung	Natürliche Wahrnehmung der realen Umgebung	Tragbar, leistungsstarke Hardware	Leistungsstärker als Smartphone/PDA
<b>Nachteile</b>	Tragen von Hardware auf dem Kopf, unnatürliche Umgebungswahrnehmung	Zeitverzögerung, Flackern des virtuellen Bilds	Kleines Display, zunehmend geringere Verbreitung (PDA)	Teurer und schwerer als Smartphone/ PDA
Displaytyp	Spatial			
Technologie	Video-see-through	Optical-see-through	Direct augmentation	
<b>Vorteile</b>	Kosteneffizient, Nutzung Standard-Hardware / PC	Natürliche Wahrnehmung der realen Umgebung	Darstellung direkt auf physisches Objekt	
<b>Nachteile</b>	Unterstützt keine mobilen Systeme	Unterstützt keine mobilen Systeme	Nicht Nutzerabhängig, alle Betrachter sehen das Gleiche → teils vorteilhaft	

**Tabelle 2.8:** Systeme der MR nach [DÖRNER ET AL. 2019], [FURHT 2011]

In Tabelle 2.9 sind die grundsätzlichen Technologien und die Eigenschaften von VR-Systemen dargestellt.

Kriterien	Nicht-immersive VR	Semi-immersive VR	Voll-immersive VR
Ausgabegerät	Hochauflösende Standardmonitore	Großformatige Bildschirme, Projektor- und Multiprojektor-Systeme	HMD, CAVE
Auflösung	Hoch	Hoch	Gering – durchschnittlich / hoch (HMD)
Grad der Immersion	Nicht vorhanden	Durchschnittlich – hoch	Hoch
Interaktion	Gering	Durchschnittlich	Hoch
Kosten	Gering	Hoch	Teils gering (HMD) – sehr hoch
Möglichkeiten zum kollaborativen Arbeiten	Durchschnittlich	Hoch	Gering – durchschnittlich (HMD)

**Tabelle 2.9:** Systeme der VR und deren Eigenschaften in Anlehnung an [MOREAU ET AL. 2004], [RADEMACHER ET AL. 2014], [DÖRNER ET AL. 2019]

Die Charakteristika und Eigenschaften der Systeme variieren dabei nicht nur bedingt durch die grundsätzliche Technologie, sondern auch durch die jeweils spezifische Umsetzung. Dies macht einen Vergleich und damit eine Auswahl eines Systems sehr aufwändig und schwierig [DÖRNER ET AL. 2019, S. 357]. Neben der Betrachtung der technischen Seite sollte jedoch hinsichtlich einer Einbindung in den Entwicklungsprozess eine nutzer- und aufgabenspezifische Betrachtung erfolgen [DÖRNER ET AL. 2019, S. 244 ff]. RADEMACHER ET AL. [2014, S. 43] haben hierzu ein Vorgehensmodell zur Evaluation von VR-Arbeitssystemen entwickelt, welches den Nutzer in den Mittelpunkt stellt. Um eine Akzeptanz für ein System zu erzeugen sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen.

Im Rahmen der Entwicklung und Anwendung der VR und MR Technologien haben sich zahlreiche Aspekte gezeigt, insbesondere hinsichtlich der Wahrnehmung, die bei Anwendern zu Problemen führen können. Nach DÖRNER ET AL. [2019, S. 57] sind die in Tabelle 2.10 beschriebenen Phänomene häufige Schwierigkeiten, die auftreten und die es bei der Wahl und dem Einsatz von VR-Systemen, teils auch von MR-Systemen, zu berücksichtigen gilt.

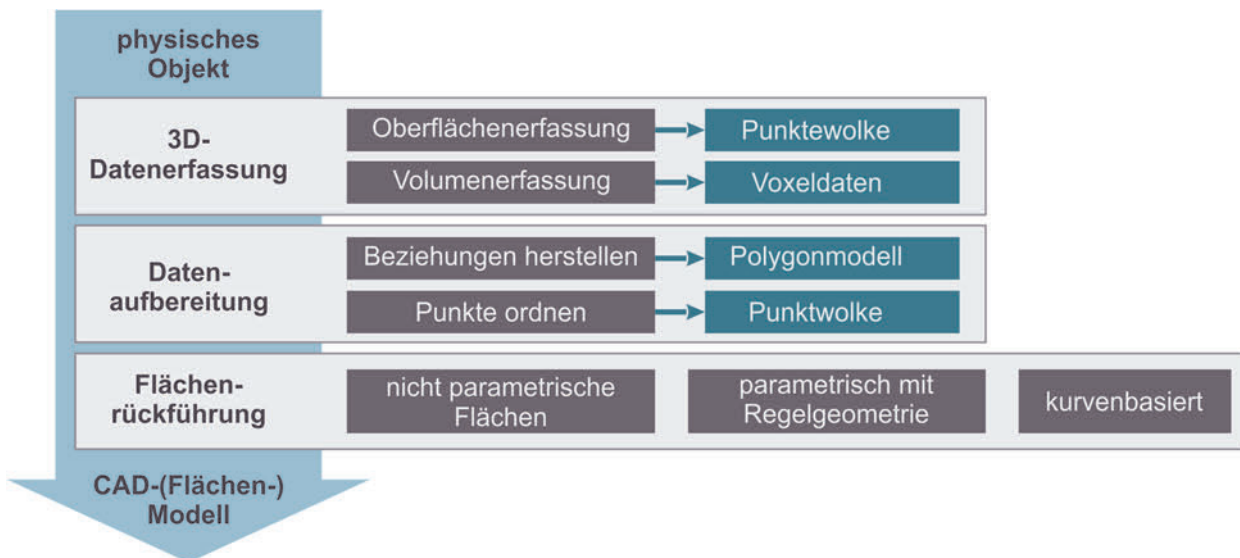
Phänomen/Problem von VR-Systemen	Kurzbeschreibung
abweichende Betrachtungsparameter	Abweichung zwischen virtuellem und realem Bild → Beeinflussung der Entfernungswahrnehmung und Neigung von Objekten
Doppelbilder	Betrachter kann die Bilder des linken und rechten Auges (Stereodisplay) nicht fusionieren (Diplopie) → Gefühl der Präsenz in VR beeinträchtigt
Frame Cancellation	Unvollkommenheit der Displays der Darstellung wie Helligkeit, Oberfläche oder Rand → Einschränkung der Wahrnehmung und Illusion
Vergence-Focus-Konflikt	Inkonsistente Tiefenhinweise, Konflikt zwischen Konvergenz und Fokus-Informationen → Augenstress, Erschöpfung oder Kopfschmerzen
Diskrepanzen in der Raumwahrnehmung	Unterschiede der Wahrnehmung von Größe und Distanzen zwischen virtueller und realer Welt → Fehleinschätzungen und fehlerhafte Simulation
Cybersickness	Multifaktorielles Syndrom aufgrund inkonsistenter Sinnesempfindungen → Vielfältige körperliche Auswirkungen (Kopfschmerzen, Störungen in der Bewegungskoordination, Benommenheit, Schwindel, Desorientierung, etc.)
Probleme der vertikalen Parallaxe	Abweichung zwischen virtuelle Projektionsebene und realen Ebene des Displays → Belastung des Betrachters und Fehler in Tiefenwahrnehmung

**Tabelle 2.10:** Typische Probleme und Phänomene von VR-Systemen in Anlehnung an [DÖRNER ET AL. 2019, S. 57 ff]

Ein wesentlicher Bestandteil für eine korrekte Wahrnehmung der virtuellen Umgebung und der darin dargestellten Objekte ist eine korrekte Tiefenwahrnehmung [MALLOT 1998, S. 9]. POHL [2009] fasst die Faktoren Schatten, Verdeckung von Objekten, perspektivische Verkürzung, stereoskopisches Sehen (Parallaxe), Bewegungsparallaxe, Akkommodation, Beleuchtung und relative Helligkeit als wesentliche Aspekte zusammen, die es für eine korrekte Tiefenwahrnehmung bei einer Umsetzung zu berücksichtigen gilt. Darüber hinaus beschäftigen sich beispielsweise MADARY & METZINGER [2016] mit ethischen Aspekten zur Nutzung von VR-Technologien in der Forschung und Anwendung, auf Basis psychologischer Gesichtspunkte. Sie haben insgesamt zehn Risiken herausgearbeitet und hierfür konkrete Ansätze für den Umgang definiert. Die beschriebenen Herausforderungen und Probleme von VR-Systemen sowie die ethischen Fragestellungen gilt es neben den technischen Aspekten insbesondere für den Einsatz eines solchen Systems innerhalb der Entwicklung mit unterschiedlich beteiligten Personen zu berücksichtigen, um sowohl eine hohe Akzeptanz als auch belastbare Resultate zu erzielen.

## 2.2.4 Transfer

Die vorherige Betrachtung der Tätigkeiten innerhalb der nutzerzentrierten Produktentwicklung sowie die dafür möglichen Werkzeuge zeigen, dass nach wie vor gestalterische Tätigkeiten am physischen Objekt vorgenommen werden und teilweise Vorteile bieten. Aufgrund der zunehmenden Digitalisierung des Entwicklungsprozesses ist jedoch eine Überführung (Transfer) dieser physischen Objekte in eine digitale Variante notwendig [RAJA & FERNANDES 2008, S. 2]. Dieser Prozess wird auch als Reverse Engineering (RE) bezeichnet [SCHÖNE & STELZER 2012]. Die Richtlinie VDI 5620 [2017] definiert das Reverse Engineering von Geometriedaten als „*Engineering-Prozess zur dreidimensionalen digitalen Rekonstruktion der Ist-Geometrie von physisch existierenden Bauteilen und Anlagen für industrielle Anwendungen*“. Dieser Prozess ist in drei Phasen unterteilt und in Abbildung 2.23 dargestellt.



**Abbildung 2.23:** Reverse Engineering Prozess nach [VDI 5620 2017, S. 23]

Aufgrund der großen Auswahl an RE Hard- und Software ist die Wahl der passenden RE-Strategie nicht trivial und bedarf der Berücksichtigung vielfältiger Faktoren, die zu Beginn eines Projekts zu klären und definieren sind. Wesentlich dabei ist die jeweilige Aufgabe bzw. Anwendung. [PHAM & HIEU 2008, S. 69]

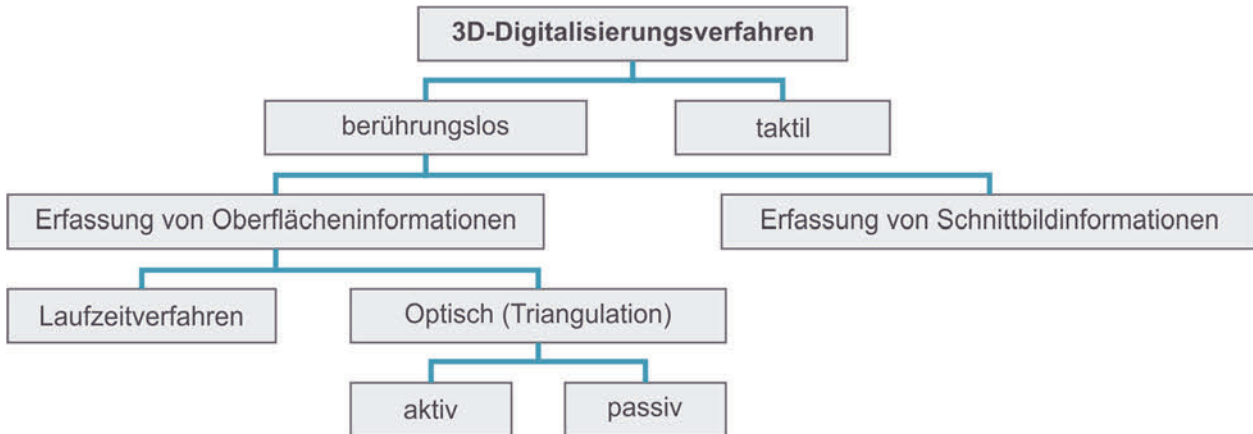
Da dieser Prozess nicht standardisiert werden kann, ist in der Richtlinie VDI 5620 [2017, S. 10 f] eine Hilfestellung definiert worden, die bei der Festlegung der Strategie und Wahl der notwendigen Hard- und Software unterstützen soll (siehe Tabelle 2.11). Im Folgenden wird auf die entsprechende Hard- und Software zur Durchführung des RE-Prozesses eingegangen.

Analysepunkte	Beispielhafte Fragestellungen
Objekteigenschaften	Dimension, Genauigkeit, Auflösung, Zugänglichkeit, Oberfläche, Regelgeometrien/Muster, Modifizieren, Texturen
Prozess, in den das Digitalisierungsprojekt eingebunden wird	Verfügbarkeit, Expertise, Automatisierungsgrad, Mobilität, Freiheitsgrade, Datenaustauschformate, Zielnutzung
Sonstige Randbedingungen bei der Installation der Technik im Hause	Verfügbarkeit Messlabor, Umwelteinflüsse, Schutzvorschriften, Platzverhältnisse
Postprocessing-Software	Verfügbarkeit, Kompatibilität, Spezialanwendungen, Austauschbarkeit von Daten, Weiterverarbeitung

**Tabelle 2.11:** Hilfestellung zur Definition von RE Hard- und Software nach [VDI 5620 2017, S. 10 f]

### 2.2.4.1 Reverse Engineering Hardware

Wie beschrieben ist die Hardware ein wesentlicher Bestandteil für die Qualität der Geometrierückführung. Mithilfe des 3D-Scanners wird die Geometrie des Objekts abgetastet und dabei eine Punktwolke der Oberfläche erzeugt. Diese Abtastvorrichtungen sind als eigenständige Werkzeuge oder als Add-Ons, beispielsweise für CNC-Werkzeugmaschinen oder Roboterarme, erhältlich. Abbildung 2.24 gibt einen Überblick über die Einteilung der möglichen Verfahren zur 3D Datenerfassung. Dies erfolgt zunächst in taktile und berührungslose Verfahren. [RAJA & FERNANDES 2008, S. 5]



**Abbildung 2.24:** Verfahren der 3D-Datenerfassung in Anlehnung an [VDI 5620 2017, S. 12], [BEYER 2002], [BEYERER ET AL. 2012, S. 431]

In Tabelle 2.12 sind die grundsätzlichen Vor- und Nachteile von taktilen und berührungslosen RE-Verfahren dargestellt. Bei den taktilen Verfahren wird eine Messspitze entlang der Oberfläche des Objekts geführt und die Topologie über die relative und absolute Position der Tastspitze, die an einem beweglichen Gelenk montiert ist, erfasst. Dieses Verfahren, beispielsweise an einer Koordinatenmessmaschine, ist besonders präzise und ausgereift. Aufgrund der punktwisen Erfassung ist es jedoch auch zeitintensiv und aufwändiger in der anschließenden Auswertung [VDI 5620 2017, S. 13]. Darüber hinaus

ist die Vermessung von weichen und nachgiebigen Objekten aufgrund der notwendigen Kontaktkraft schwierig und schränkt die Anwendung ein [RAJA & FERNANDES 2008, S. 6].

	Taktil	Berührungslos
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Genauigkeit</li> <li>• geringe Kosten</li> <li>• Messung tiefer Bohrungen und Taschen</li> <li>• unempfindlich bzgl. Farbe und Transparenz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kein physischer Kontakt</li> <li>• schnelle Erfassung großer Objekte</li> <li>• gute Genauigkeit und Auflösung für übliche Anwendungen</li> <li>• Erfassung von Farben</li> <li>• Erfassung feinerer Strukturen als Tastkörper es erlauben würde</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• langsame Datenerfassung</li> <li>• Verformung von weichen Objekten durch Messkörper</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einschränkungen bei schwierigen Oberflächen (z. B. transparent oder reflektierend)</li> <li>• geringere Genauigkeit</li> </ul>

**Tabelle 2.12:** Vor- und Nachteile von taktilen und berührungslosen RE-Verfahren nach [PHAM & HIEU 2008, S. 35 ff]

Bei vollflächigen Erfassungen großer Objekte werden meist optische Verfahren eingesetzt [VDI 5620 2017, S. 14]. Nach SACKEWITZ [2014] können diese aufgrund der Entwicklungen und Innovationen der letzten Jahren in immer mehr Anwendungen erfolgreich eingesetzt werden. Allgemein lässt sich mit diesen Verfahren eine Messgenauigkeit von bis zu 10 µm je Einzelpunkt erreichen. Diese ist jedoch maßgeblich abhängig von der verwendeten Projektionseinheit (Sensor), dem Messfeld, den Kameraauflösungen, der Geometrie des Objekts, dem Reflektionsgrad und der Textur der Oberfläche [VDI 5620 2017, S. 14].

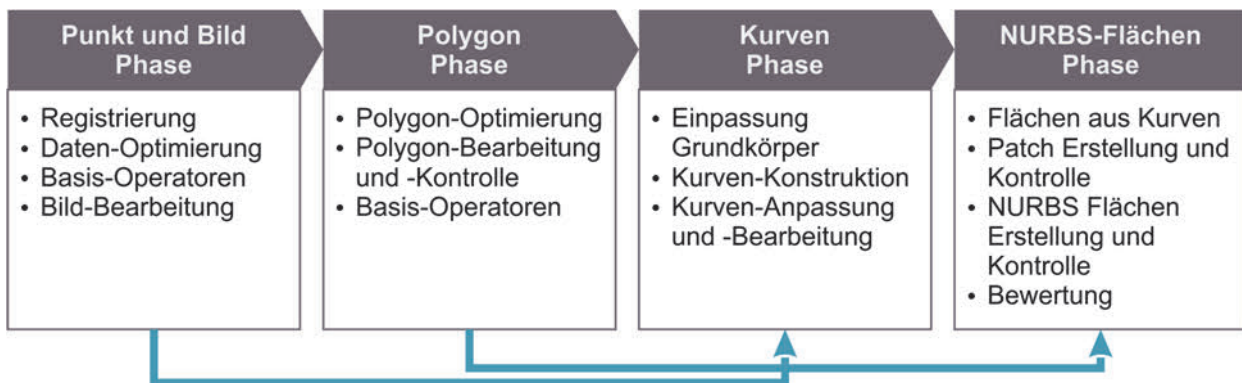
Bei den Verfahren der Triangulation unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Systemen. Bei den passiven Verfahren erfolgt die Erfassung des Messobjekts über mindestens zwei Kamerapositionen und Auswertung der Entfernungen entweder anhand der natürlichen Merkmale (Textur, Ecken, Kanten, etc.) oder durch codierte Marker [SACKEWITZ 2014, S. 14]. Bei den aktiven Verfahren wird dagegen eine spezielle Beleuchtung des Objekts, beispielsweise strukturiert mit Linien oder Punkten, genutzt und diese durch die Kamera erfasst [VDI 5620 2017, S. 14]. Bei den Laufzeitverfahren erfolgt die Ermittlung von Distanzen bzw. die Gewinnung von Konturen durch das Aussenden, Reflektieren am Objekt und wieder Empfangen eines Laserpuls oder einer kontinuierlichen Strahlung. Bei der Ausführung kann dabei grundsätzlich zwischen Laserscannern und Time-of-Flight-Kameras unterschieden werden [SACKEWITZ 2014, S. 33 ff].

Neben der eingesetzten Technologie haben jedoch auch äußere Faktoren einen Einfluss auf das Messergebnis, die es bei der konkreten Anwendung zu berücksichtigen gilt. Nach VDI 5620 [2017, S. 18] sind beispielsweise die korrekte Funktion des eingesetzten

Messgeräts, die Umgebungsbedingungen, wie Temperatur, Licht, Vibrationen, Feuchte oder Schmutz, die Eigenschaften des zu vermessenden Objekts, wie Oberfläche oder Nachgiebigkeit, sowie die Expertise des Anwenders zu berücksichtigen.

#### 2.2.4.2 Reverse Engineering Software

Neben der zuvor betrachteten RE-Hardware hat auch die eingesetzte Software einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität und das Ergebnis des RE-Prozesses. Bei der Entscheidung sollten die spezifischen Anforderungen und Randbedingungen der Aufgabe, aber auch betriebliche Strukturen berücksichtigt werden [RAJA & FERNANDES 2008, S. 8]. Nach RAJA & FERNANDES [2008, S. 8] ist die „Generierung von CAD-Modellen aus Punktdaten die wahrscheinlich komplexeste Aktivität innerhalb des RE-Prozesses, da leistungsfähige Oberflächenanpassungsalgorithmen erforderlich sind, um Oberflächen zu erzeugen, die die dreidimensionalen Informationen genau darstellen, welcher der Punktwolkendatensatz beschreibt“. Da die meisten klassischen CAD-Systeme nicht auf die Verarbeitung und Darstellung von großen Punktedatensätze ausgelegt sind, werden hierfür spezielle RE-Anwendungen oder Plug-Ins benötigt [RAJA & FERNANDES 2008, S. 8]. Innerhalb des zuvor beschriebenen RE-Prozesses werden für die verschiedenen Tätigkeitsschritte unterschiedliche Anforderungen an die RE-Software gestellt. In Abbildung 2.25 sind die vier Phasen, beginnend bei der Punkteerfassung bis zum fertigen Flächen- oder Volumen-Modell, für welche die Software eingesetzt wird, dargestellt.



**Abbildung 2.25:** Vier Phasen der RE Datenverarbeitung in Anlehnung an [PHAM & HIEU 2008, S. 54]

Nach der Daten- bzw. Punkteerfassung, Aufbereitung und Polygonisierung erfolgt die eigentliche Rückführung und Erstellung des Flächenmodells. Auch wenn nach der Polygonisierung bereits Flächeninformationen vorliegen, sind diese aufgrund der Unstetigkeit noch nicht für die meisten späteren Anwendungen geeignet. Die Verfahren zur Erzeugung mathematisch exakt beschriebener Flächen können in die drei Gruppen nicht

parametrische Flächen, parametrisch mit Regelgeometrien und kurvenbasierte Rückführung eingeteilt werden. Die Wahl des Verfahrens richtet sich dabei nach der konkreten Anwendung und des rückzuführenden Objekts, wobei häufig Mischformen der Verfahren eingesetzt werden. [VDI 5620 2017, S. 25]

Auch PHAM & HIEU [2008, S. 53] sehen eine Wahl von mehreren RE-Softwaretools als notwendig an, die auf den jeweiligen Anforderungen des RE-Projekts getroffen werden sollte, da eine einzelne Software meist nicht alle Randbedingungen zur vollständigen Zufriedenheit erfüllen kann. In Tabelle 2.13 ist daher eine typische Klassifikation von RE-Software dargestellt, die bei der Auswahl als Hilfestellung dienen kann.

Anwendung	Hauptfunktion
Hardware Steuerung	Steuerung der RE Hardware zur Datenerfassung
Erstellung von CAD-Regelgeometrien	Erstellung und Bearbeitung von CAD-Regelgeometrien, die aus der Punktwolke und Polygonnetzen extrahiert werden können
Polygon-Bearbeitung	Aufbereitung, Modifikation und Optimierung von 3D Polygonnetzen
Polygon und NURBS-Flächen Konstruktion	RE-Tools mit mehreren Funktionen von der Arbeit mit Punktwolken und Polygonnetzen, NURBS-Flächenkonstruktion bis 3D-Inspektion
2D Scanbild Verarbeitung und 3D Modellierung	Verarbeitung von 2D Scanbildern (Schnittverfahren) und 3D Rekonstruktion
3D Inspektion	Anwendungen für Fehlerkarten, Prüfberichte oder Dokumentation
NURBS- und Volumen-Modellierung	NURBS-Modellierungs- und Bearbeitungstools auf Basis von CAD-Objekten und Grundformen

**Tabelle 2.13:** Klassifikation von RE Software nach [PHAM & HIEU 2008, S. 53]

### 2.3 Modelle in der Produktentwicklung

Die Recherche der Literatur zur Konstruktions- und Designforschung liefert eine Vielzahl an Definitionen von Produktmodellen. Unterschieden wird dabei sowohl nach dem Inhalt und dem Umfang der Anforderungen an das Modell als auch nach der Anwendung. BAXTER [1995, S. 286] beschreibt ein Modell als physische oder mathematische Darstellung eines Objekts, das sich auf jegliche Darstellungen eines Produkts oder Teil dieses Produkts bezieht und unterscheidet weiter zu einem Prototyp, der das Produkt, wie es später gefertigt wird, physisch repräsentiert. Allerdings sieht BAXTER [1995, S. 286] hier auch Überschneidungen in der Verwendung des Begriffs entsprechend der Definition des Modells. KOHN [2014] unterscheidet bei der Definition von Produktmodellen auf Basis der Literatur in folgende zwei Gruppen:

- Formale Abbildungen eines Produkts oder von Teilaspekten eines Produkts [LINDEMANN 2009, S. 11 f],
- Integriertes Produktmodell – Gesamtheit aller im Produktzyklus entstandener Produktinformationen [GRABOWSKI ET AL. 1993, S. 6].



Modelle sind im Sinne der ersten Definition materielle oder immaterielle Konstrukte (z. B. Anschauungsmodelle, Konstruktionszeichnungen, Schaltpläne, aber auch Gedankenmodelle oder Bilder), die durch Modellbildung geschaffen werden, um für einen bestimmten Zweck ein Original zu repräsentieren. Sie können somit als vereinfachte Abbildungen oder Nachbildungen von Originalen aufgefasst werden [VAJNA ET AL. 2018, S. 177 ff]. Ein integriertes Produktmodell dagegen fasst alle Produktdaten aus allen Phasen des Produktlebenszyklus in einem einheitlichen Datenmodell zusammen und resultiert aus der Integration von anwendungsspezifischen Produktmodellen [GRABOWSKI ET AL. 1993, S. 6 f, 48 ff]. Hinsichtlich des zuvor beschriebenen Prozesses der nutzerzentrierten Produktentwicklung und der Bedeutung von Modellen für die Definition der Produktgestalt wird im Weiteren die erste Definition des Modells zugrunde gelegt. Ein großer Teil der Designfestlegung wird in den frühen Phasen der Entwicklung vorgenommen und zwar sowohl aus formal-ästhetischer als auch aus funktional-ergonomischer Sicht auf der Grundlage des Produktmodells in seiner gesamten Bandbreite, von der Form der Darstellung über den Zweck der Bewertung bis hin zum Detaillierungsgrad [SEEGER 2005, S. 79, 203, 207, 213, 231]. Ein wesentlicher Faktor ist also die Verwendung des passenden Modells für eine bestimmte Aufgabe. Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die verschiedenen Modelle und deren Einteilung näher eingegangen.

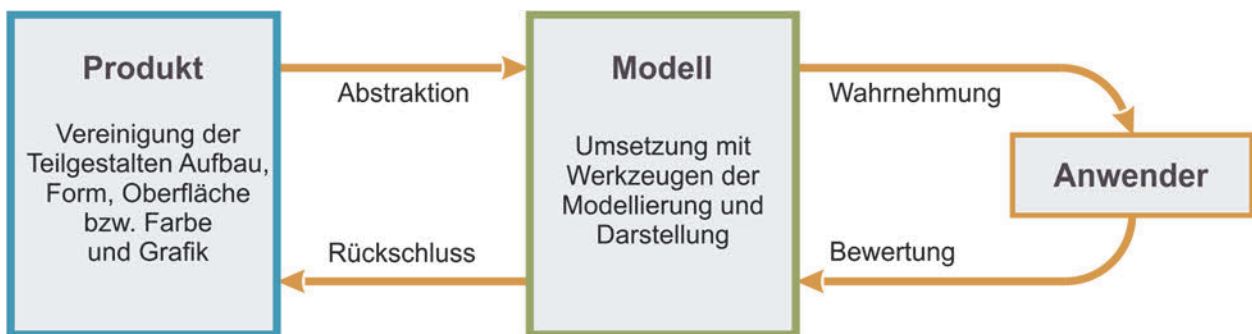
### **2.3.1 Modelleinteilung**

Wie zuvor beschrieben, ist die Vielfalt an unterschiedlichen Modellen sowie deren Ausprägung und Eigenschaften immens. Für einen zielgerichteten Einsatz ist ein tiefes Verständnis und Wissen über die verschiedenen Varianten notwendig. Anhand einer breiten Literaturrecherche im Umfeld der Konstruktions- und Designforschung wurden verschiedene Modelltypen und deren Eigenschaften bzw. Darstellungsformen ermittelt und entsprechend ihrer Form oder Funktion, ihres Einsatzbereiches und der Anwendung innerhalb des Entwicklungsprozesses kategorisiert. Aufgrund der engen Verknüpfung von Werkzeugen und Modellen, die sich gegenseitig bedingen, überschneiden sich die Kategorien zur Einteilung und Betrachtung teils mit denen in Kapitel 2.2.1. In Tabelle 3.3 auf Seite 65 ist das Analyseergebnis der wesentlichen Quellen der Recherche, welches als Grundlage für die weiteren Untersuchungen dient, dargestellt. Dabei zeigt sich die tiefe Verwurzelung von Produktmodellen über alle Phasen und Tätigkeiten innerhalb der Produktentwicklung und die Überschneidungen von Modellen aus den Bereichen Technik, Ergonomie und Design. Ein wesentlicher Aspekt bei der Arbeit mit Modellen und

deren Auswahl in Bezug auf darstellende und bewertende Aufgaben ist die Wahrnehmung dieser [REID ET AL. 2013]. Auf diesen Aspekt wird im Folgenden näher eingegangen.

### 2.3.2 Modellwahrnehmung

Zwischen dem Modell und dem Anwender besteht bei der Betrachtung eine direkte Beziehung über die menschlichen Sinne [LA ROSA ET AL. 2019]. Über die Sinne erkennt der Anwender das Modell und erfasst dessen Eigenschaften [MALLOT 1998, S. 3 f]. Auf Basis dieser Parameter kann er eine Bewertung durchführen, die er mit seinen Vorstellungen oder mit den im Rahmen der Entwicklung definierten Anforderungen abgleicht, um somit Rückschlüsse auf das zu entwickelnde Produkt zu ziehen. Der Vorgang ist grundsätzlich identische zur allgemeinen Wahrnehmung von Produkten, wie sie bei SEEGER [2005, S. 36] in Bezug auf das Design von Produkten beschrieben ist. Entsprechend der zuvor untersuchten Modelldefinition ist in diesem Fall die gewählte Abstraktion des Modells gegenüber dem Original ein wesentlicher Aspekt, den es zu berücksichtigen gilt. Um diesen Prozess bei der Festlegung der Abstraktion und Bewertung der Produktgestalt zu optimieren, ist sowohl die Seite des Modells, d. h. welche Informationen und in welcher Form stellt das Modell diese bereit, und die Seite des Betrachters hinsichtlich seiner Fähigkeiten, Erfahrungen und Vorstellungen zu beachten, siehe Abbildung 2.26.



**Abbildung 2.26:** Beziehung zwischen Produkt, Modell und Anwender

In Bezug auf die beschriebenen Aspekte der Modellwahrnehmung existieren verschiedene Studien, die sowohl die Seite der Modelle als auch des Anwenders beleuchten. In Tabelle 2.14 sind die ermittelten Studien aufgeführt und hinsichtlich der betrachteten Modelle, dem Fokus der Untersuchung und den möglichen Einschränkungen beschrieben. Die Studien zeigen dabei eine breite Betrachtung verschiedener Modelle und deren Detaillierung. Die aufgeführten Einschränkungen belegen jedoch, dass eine vollständige Untersuchung der verschiedenen Detaillierungsstufen über alle Modellformen nicht erfolgt, wie sie für einen ganzheitlichen Ansatz zur Entscheidungsfindung in einem Auswahlprozess notwendig wäre.

Quelle	Untersuchte Modelle	Fokus	Einschränkungen
[REID ET AL. 2013]	Silhouette, Skizze, Rendering (einfach und detailliert)	Einfluss der Darstellung auf die Bewertung des späteren Kunden. Unterscheidung zwischen Meinung, objektive Bewertung und Rückschlüsse auf Eigenschaften.	Keine Betrachtung unterschiedlicher Anwender und verschiedener Darstellungsmedien
[ŞAHİN ET AL. 2007]	Design Skizze, CAD Modelle und RP Modelle	Ermittlung von Wahrnehmungsfehlern bei unterschiedlichen Repräsentationsformen. Unterscheidung zwischen Design und Konstruktion sowie Studenten und Professionals.	Keine Berücksichtigung von VR-Modellen und unterschiedlichen Detaillierungen
[SÖDERMAN 2005]	Handskizzen, CAD in VR (Power Wall und HMD), reales Produkt	Endkunden Bewertung von Fahrzeugkonzepten im Zusammenhang mit den Darstellungsmedien	Fokus Pkw; kein Vergleich zwischen Darstellungsinhalten in verschiedenen Medien
[WALL ET AL. 1992]	CAD, RP, CNC Modelle und Vakuumguss	Ermittlung von Eigenschaften und Nutzen von Prototypen sowie deren Wahrnehmung im Entwicklungsumfeld	Keine Betrachtung von Design- und Ergonomieaspekten oder VR
[MACOMBER & YANG 2011]	Skizzen (Linien und schattierte Zeichnungen) und CAD Modelle	Feedback von Stakeholdern und End-Usern zum Design in Bezug auf die Detaillierung und Qualität der Darstellungen	Fokus Design; kein Vergleich von physischen und virtuellen Modellen
[FORBES & KINNELL 2018]	CAD (gedruckt, interaktiv, in VR, in AR) und reales Produkt	Bewertung von Eigenschaften bezüglich Komforts, Ergonomie und Design auf Basis verschiedener Darstellungsformen	Kein durchgängiger Vergleich der Detaillierungsstufen über die Medien, keine objektive Bewertung

**Tabelle 2.14:** Übersicht von relevanten Studien zur Modellwahrnehmung

## 2.4 Arbeit mit und Auswahl von Produktmodellen und Werkzeugen

Die Untersuchung zu den Werkzeugen der Produktgestaltung sowie den Produktmodellen zeigt die Schwierigkeiten bei der Entscheidungsfindung für eine konkrete Aufgabe. Insbesondere die hohe Komplexität von unterschiedlichen Tätigkeiten und Anforderungen, die es bei der nutzerzentrierten Produktgestaltung zu berücksichtigen gilt und die Breite und Vielzahl an Ansätzen, erschweren den Auswahlprozess. Eine wesentliche Herausforderung zeigt sich bei der Analyse der relevanten Ansätze zu den verschiedenen Modellen und Werkzeugen. Neben einer Fokussierung auf einzelne Technologien fehlt es an übergeordneten Strategien zur Verknüpfung und Abgrenzung der Verfahren im Kontext der konkreten Aufgabe. Hinsichtlich der grundlegenden Modellumgebung fällt eine häufige Betrachtung einer Umgebung auf, beispielsweise physisch [ISA ET AL. 2015], [MENOLD ET AL. 2017], [BERTSCHE & GRAF 2007] oder virtuell [BJOERKLI 2014], [RADEMACHER ET AL. 2014]. Eine Abwägung oder Verbindung dieser erfolgt, wie in Kapitel 2.3.2 gezeigt, in Bezug auf die Wahrnehmung, jedoch nicht hinsichtlich eines ganzheitlichen Einsatzes und den notwendigen Schritten und Werkzeugen. Auch bezüglich des Einsatzspektrums zeigen sich deutliche Unterschiede. So fokussieren beispielsweise

SELF [2011], STOLTERMAN ET AL. [2008] oder LUTTERS ET AL. [2014] gestalterische Aufgaben, wohingegen sich KOHN [2014] oder ARAUJO [2001] auf die klassischen Entwicklungstätigkeiten beziehen. Besonders KOHN [2014] zeigt eine umfangreiche Untersuchung und einen interessanten Ansatz zur Arbeit mit Produktmodellen auf. Das Zusammenspiel von Technik, Ergonomie und Design sowie die für die Umsetzung und Darstellung notwendigen Werkzeuge sind jedoch nicht wesentlicher Teil der Untersuchung. LUTTERS ET AL. [2014] zeigen einen Ansatz zur Auswahl und Arbeit mit Werkzeugen und Technologien. Es wird dabei jedoch der Entscheidungsprozess im Umfeld kreativer und gestaltender Tätigkeiten fokussiert und nicht die weiterreichende Betrachtung der Modelle und Werkzeuge und die angrenzenden Bereiche der Ergonomie und Technik.

MENOLD & JABLOKOW [2017] entwickelten eine Methode zur Unterstützung der Entwicklung mittels Prototypen. Hierbei steht nicht das Werkzeug, sondern der Prototyp in Form eines Modells im Vordergrund. Dieser kann sowohl physisch als auch virtuell sein. Wie genau der Prototyp erstellt wird ist nicht Bestandteil der Untersuchung. BJOERKLI [2014] betrachten insbesondere die Abgrenzung von virtuellen und physischen Prototypen zur Untersuchung und Bewertung von Nutzerinteraktionen. Es zeigt sich die aktuelle Notwendigkeit der Zusammenführung der Stärken der beiden Welten, ganz im Sinne des hybriden Gedankens. Die unterschiedlichen Stärken und Schwächen in Bezug auf zu bewertende Produkteigenschaften, wie Ästhetik, Ergonomie und Technik, sowie Entscheidungsfaktoren der verschiedenen Darstellungsformen werden grundsätzlich und allgemein betrachtet aufgezeigt und sind in Tabelle 2.15 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung der Werkzeuge zur Gestaltung und deren Zusammenwirken erfolgt nicht.

	Kriterium	Virtual Prototyping	Interactive VP	Mixed Prototyping	Physical Prototyping
<b>Bewertung</b> Design / Ergonomie	Farbe	++	++	++	++
	Form/Material	-	o	+	++
	Sichtbarkeit	++	++	++	++
	Anwendung/Komfort	-	+	++	++
	Erreichbarkeit/Sensorik	-	o	+	++
<b>Einsatz</b>	Komplexität/Kosten/Zeit	++	+	o	-
	Iterationsfähigkeit	++	++	+	-
	Haptik	-	o	++	++
	Technik/Ergonomie/Interaktion	-	o	+	++
	Einfache Produktstruktur	-	o	+	++

++ sehr gut | + gut | o neutral | - schlecht

**Tabelle 2.15:** Stärken und Schwächen von Prototypenansätzen nach [BJOERKLI 2014]

Auch ELVERUM ET AL. [2016] untersuchen einen prototypenbasierten Ansatz zur Lösungsfindung innerhalb der Produktentwicklung und zeigen anhand verschiedener Anwendungsstudien Strategien zum Prototypeneinsatz in der Praxis auf. Sie bestätigen die Vielzahl an Untersuchungen und Relevanz des Einsatzes von Modellen und Werkzeugen mit der Notwendigkeit der Zusammenführung der verschiedenen Strategien und Betrachtungsweisen für eine zielgerichtete und strategische Richtlinie. In Tabelle 2.16 ist eine Übersicht der wesentlichen Forschungsarbeiten und der dabei betrachteten Aspekte dargestellt.

Quelle	Modelle			Einsatzbereich			Anwendungsstudie	Werkzeugbetrachtung	Modellentscheidung
	physisch	virtuell	hybrid	Technik	Ergonomie	Design			
[ISA & LIEM 2014; ISA ET AL. 2015]	x	(x)			(x)	x	(x)		
[BROEK ET AL. 2000]	x	x	x			x	X		
[VERLINDEN & HORVÁTH 2009]	x		x			x	x		
[VISWANATHAN & LINSEY 2011]	x					x	x		
[BJOERKLI 2014]		x	x		(x)	x	x		x
[BAXTER 1995]	x	x		x		(x)		(x)	x
[ELVERUM ET AL. 2016]	x		(x)	x			x		x
[DORTA 2005; DORTA ET AL. 2008]		x	x			x	x	x	
[RIEUF ET AL. 2017]		x				x	x		
[WALL ET AL. 1992]	x	x		x			x	(x)	
[LUTTERS ET AL. 2014]	x	x			(x)	x			x
[KOHN 2014]	x	x		x					x
[MENOLD & JABLOKOW 2017]	x	x		(x)		x	x		x

x betrachtet | (x) teilweise / eingeschränkt betrachtet

**Tabelle 2.16:** Untersuchungen zur Arbeit mit Produktmodellen

Die Untersuchung der Forschungsarbeiten verdeutlicht die breite Betrachtungsweise der verschiedenen relevanten Aspekte, jedoch stellt keine Untersuchung einen durchgängigen Ansatz von Modellen und deren Werkzeugen in Bezug auf die Tätigkeiten der nutzerzentrierten Produktentwicklung, wie sie im Technischen Design verankert ist, dar. Des Weiteren bestätigt sich die elementare Bedeutung der Modelle, ihrer Umgebung (virtuell bis physisch) und deren Wahrnehmung als Ausgangspunkt für einen anwendungsbezogenen Entscheidungsprozess. In Kapitel 3 wird die notwendige theoretische Grundlage für eine Modell-Werkzeug-Auswahl in Kapitel 6 sowie für die Untersuchung des Modelleinsatzes und der Modellwahrnehmung in Kapitel 5 geschaffen.

### **3 Ansatz der Modell-Werkzeug-Auswahl**

Im Folgenden werden die Zusammenhänge der Modell- und Werkzeugauswahl innerhalb der Produktgestaltung untersucht und dargestellt sowie ein Ansatz erarbeitet, um diesen Auswahlprozess zu optimieren. Wie SCHMID & MAIER [2017, S. 43] anmerken, stellt sich unter anderem auf Basis der Arbeit von BEIER [2013] die Frage „nach dem richtigen Verhältnis von realen zu virtuellen Anteilen an einer modernen Produktentwicklung“ [SCHMID & MAIER 2017, S. 43]. Nach GEBHARDT [2016, S. 355] gilt es „unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten optimale Prototypen und die zu ihrer Herstellung nötigen Verfahren auszuwählen und unabhängig von strategischen Überlegungen (nicht von Kosten) zur Verbesserung des Produktentwicklungsprozesses zu nutzen“. Der vorgestellte Ansatz soll hierfür ein systematisches Vorgehen aufzeigen und für konkrete Anwendungsfälle bestätigt werden. Dazu sind neben den Grundlagen und Randbedingungen, welche in Kapitel 3.1 erläutert werden, verschiedene Untersuchungen am IKTD bezüglich der Werkzeuge und Modelle im Kontext des Technischen Designs durchgeführt worden, welche im Folgenden vorgestellt werden. Für die konkrete Anwendung und deren Anforderungen wird eine Analyse praxisrelevanter Industrieprojekte durchgeführt (siehe Kapitel 3.2.5.2), um die IST-Situation zu bewerten und mögliche Potentiale aufzuzeigen.

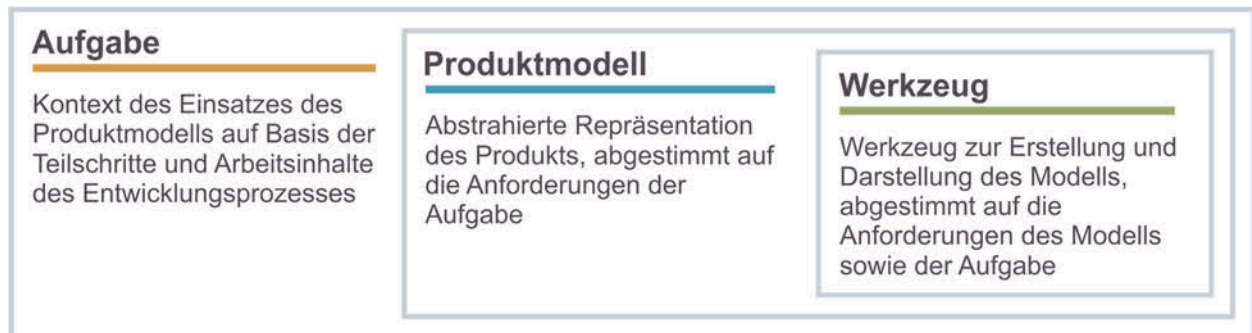
#### **3.1 Grundlagen und Aufbau des Ansatzes**

Für die Untersuchung der einzelnen Aspekte des Ansatzes werden zunächst die Grundbestandteile und deren Zusammenhänge dargestellt sowie die Grundprinzipien und Anforderungen des Ansatzes hergeleitet.

##### **3.1.1 Grundprinzipien und Geltungsbereich des Ansatzes**

Der Ansatz basiert auf den drei folgenden Grundbestandteilen: dem Produktmodell, wie es in Kapitel 2.3 beschrieben wird, den Werkzeugen zur Erstellung und Darstellung der Modelle, wie sie in Kapitel 2.2 beschrieben sind, sowie der auszuführenden Aufgabe des Entwicklungsprozesses, wie sie in Kapitel 2.1 beschrieben ist. In Abbildung 3.1 ist dieses Zusammenwirken dargestellt. Die Aufgabe, welche auf den Teilschritten und Arbeitsinhalten des Entwicklungsprozesses basiert und unterschiedlich weit gefasst werden kann, liefert hierbei den Rahmen. Dies wirkt sich auf die Anzahl der notwendigen Modelle und Werkzeuge aus, die in diesem Fall wiederum optimal zusammenwirken müssen. Das

Produktmodell steht in direktem Zusammenhang mit der Aufgabe, da diese mit dem entsprechenden Modell optimal zu realisieren ist. Die Kriterien hierfür können vielfältig sein und werden in Kapitel 3.2.6 näher betrachtet.



**Abbildung 3.1:** Zusammenhang von Aufgabe, Produktmodell und Tool

Das Werkzeug wiederum muss optimal für die Erstellung und Darstellung des Produktmodells geeignet sein, aber auch Anforderungen der übergeordneten Aufgabe genügen. Das Modell und das Werkzeug stehen hierbei im Wechselspiel. Die Kriterien für die Auswahl werden in Kapitel 3.2.6 erläutert.

Wie in Kapitel 1 beschrieben, liegt der Fokus des Ansatzes auf der nutzerzentrierten Produktentwicklung. Hierbei spielen die direkte Einbeziehung und die Ausrichtung auf den Anwender eine wesentliche Rolle bei der Gestaltung des Produkts. Die in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Auswirkungen auf die Produktgestalt sind entscheidend bei der Wahl des Produktmodells und der korrespondierenden Werkzeuge. Um für den beschriebenen Anwendungsbereich zielgerichtet angewendet werden zu können, werden im Folgenden Anforderungen an den Ansatz definiert.

### 3.1.2 Anforderungen an den methodischen Ansatz

Nach JÄNSCH [2007] sind bei der Anwendung von Konstruktionsmethoden aufgabenbezogene, personenbezogene sowie organisatorische Aspekte zu berücksichtigen. Der Fokus des hier betrachteten Ansatzes liegt auf den aufgabenbezogenen Aspekten, da diese allgemeingültig und dennoch umfassend betrachtet werden können und als Grundvoraussetzung für die jeweilige Funktion der Methode als grundlegendes Ziel des Ansatzes definiert werden können. Insbesondere personenbezogene und organisatorische Aspekte sind höchst individuell und nicht allgemeingültig definierbar, auf die aber notwendigerweise in Kapitel 3.2.6 eingegangen wird. Bei den in Tabelle 3.1 beschriebenen Anforderungen handelt es sich um allgemeine Anforderungen, welche als Grundlage für die Anwendung des Ansatzes betrachtet werden können und als Vorgaben für die Entwicklung des Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozesses in Kapitel 6.1 dienen.

Sie basieren auf der Arbeit von KIRCHNER [2011, S. 56 f], der sieben Anforderungskriterien an die Konstruktionsmethoden definiert, die für einen erfolgreichen Einsatz und hohe Akzeptanz der Anwender berücksichtigt werden sollten.

Nr.	Anforderung	Beschreibung
1	Aufwand	Geringer Aufwand bei hohem Nutzen
2	Aussagegüte	Ausreichende Aussagegüte der Ergebnisse
3	Reproduzierbarkeit	Reproduzierbare Ergebnisse
4	Transparenz	Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und Transparenz der Methode
5	Anpassung	Anpassung an den Konstruktionsablauf
6	Anpassbarkeit	Anpassbarkeit an unterschiedliche Anwendungen
7	Erweiterbarkeit	Erweiterbarkeit um neue Informationen, Objekte und Methoden

**Tabelle 3.1:** Anforderungen an Konstruktionsmethoden nach [KIRCHNER 2011, S. 56]

Auf Basis dieser Vorüberlegungen und Anforderungen werden im Folgenden die grundlegenden Aspekte betrachtet, die Ist-Situation analysiert und die Zusammenhänge des Ansatzes beschrieben. Ziel ist hierbei nicht eine starre Auswahl aus einer Liste mit einer zufälligen und begrenzten Vielzahl an Werkzeugen und Modellen, sondern in Anlehnung an LUTTERS ET AL. [2014] ein Vorgehen analog eines Entscheidungsprozesses, um sich einer möglichst idealen Auswahl iterativ zu nähern.

## 3.2 Konzeption

Für die Entwicklung des Ansatzes entsprechend der zuvor beschriebenen Randbedingungen werden zunächst die Zusammenhänge von Werkzeugen, Modellen und der Aufgabe erläutert um anschließend eine grundlegende Einteilung der relevanten Produktmodelle sowie Werkzeuge vornehmen zu können. Dies erfolgt auf Basis mehrerer Studien, welche am Lehrstuhl für Technisches Design durchgeführt wurden. Ziel ist es, das Grundgerüst eines Entscheidungsprozesses zu erarbeiten, welcher die Tätigkeiten und Teilschritte, basierend auf der umfangreichen Analyse durchgeführter Entwicklungsprojekte, berücksichtigt und als Ausgangsbasis nutzt.

### 3.2.1 Zusammenhang von Werkzeugen, Modellen und der Aufgabe

Die Analyse und Betrachtung des Stands der Forschung und Technik in Kapitel 2 hat gezeigt, dass in der Literatur und Praxis eine Vielzahl an unterschiedlichen Betrachtungen und Ansätzen zu Produktmodellen und den Werkzeugen der Produktentwicklung existieren. Diese unterscheiden sich sowohl im Umfang, dem Einsatzbereich und insbesondere in der Detaillierung bzw. Abstraktion der Betrachtung. Dies macht eine Auswahl und eine für die Anwendung notwendige Kombination schwierig, da Informationen aus



unterschiedlichen Quellen und mit nicht einheitlichem und teils nicht kompatibelem Abstraktionsgrad kombiniert werden müssten, um die Auswahl und Arbeit für einen oder auch mehrere Teilaufgaben mit dem passenden Produktmodell und korrespondierenden Entwicklungswerkzeugen im Kontext der nutzerzentrierten Produktentwicklung zu unterstützen. Zusätzlich erschwert die Interdisziplinarität (Ergonomie, Design und Technik, siehe Kapitel 2.1.1) der beteiligten Personen und Aufgaben die Entscheidung, da jeder Bereich über spezialisierte Werkzeuge verfügt und häufig nur innerhalb der eigenen Grenzen untersucht wird. Dieses Zusammenwirken unterschiedlicher Fachdisziplinen bietet jedoch ein großes Potential, da viele Aufgaben ähnliche Anforderungen besitzen und aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit ist daher für eine gesamtheitliche, interdisziplinäre Betrachtung von Aufgabe, Produktmodell und Werkzeug eine einheitliche, untereinander kompatible, langfristig gültige sowie erweiterbare Klassifizierung der genannten Bestandteile notwendig.

Die folgende Betrachtung, Klassifizierung und Benennung der Werkzeuge und Produktmodelle mit Zuordnung zur Aufgabe basiert auf dem grundsätzlichen Schema in Kapitel 3.1.1 (siehe Abbildung 3.1) und definiert diese im Detail.

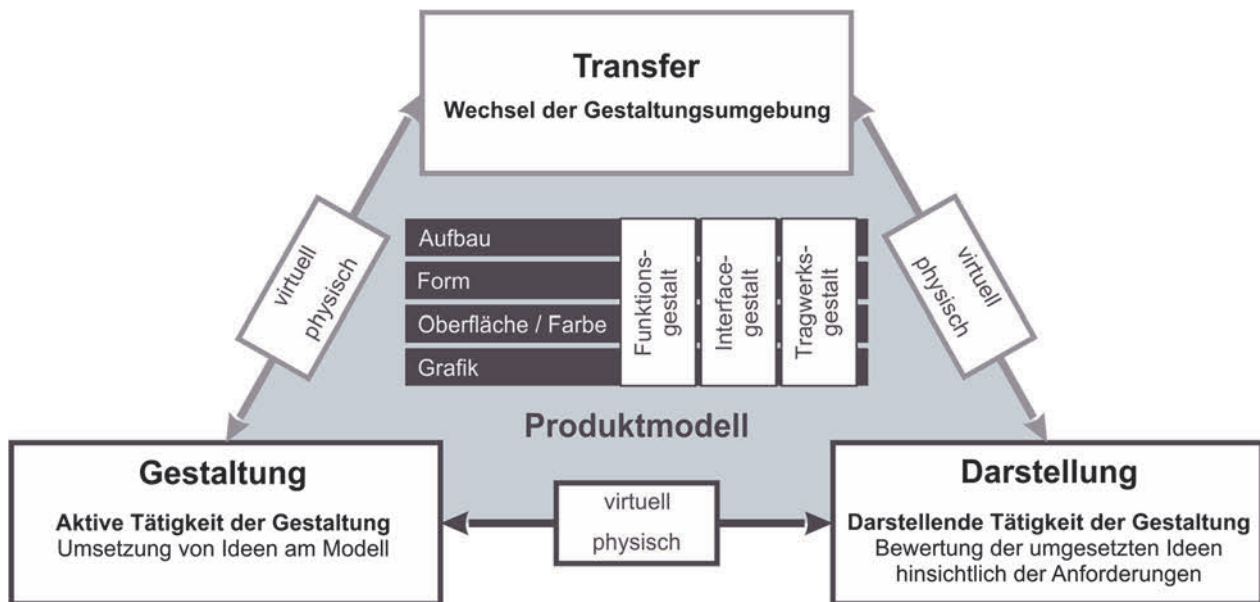
### **3.2.1.1 Werkzeugklassifizierung**

Die Werkzeuge, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, sind untrennbar mit dem Produktmodell verknüpft, da alle ausgeführten Arbeitsschritte an diesem vorgenommen werden. Dementsprechend ist das Modell die Basis der Anwendung. Für eine allgemeingültige Betrachtung der Werkzeuge ist eine abstrahierte Beschreibung dieser notwendig. Sie werden daher aufgrund des beschriebenen Zusammenhangs entsprechend der grundlegenden Arbeiten am Modell definiert. GEBHARDT [2016, S. 355] differenziert bei der Anwendung von Rapid Prototyping Modellen nach den zwei Einsatzbereichen:

- Entwicklung des Produkts und
- Visualisierung der Objekte.

Diese Betrachtung kann aber auch auf andere Modelle und ihre Repräsentationsformen übertragen werden. Basierend auf dieser Einteilung werden im Rahmen dieser Arbeit die Kategorien Gestaltung und Darstellung definiert, anhand derer relevante Werkzeuge klassifiziert werden können. Bei der Arbeit mit unterschiedlichen Modellen, beispielweise bei der Gestaltung und Nutzung eines Modells, kann ein weiterer Schritt, eine Umwandlung, notwendig sein. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit zusätzlich die dritte Kategorie Transfer definiert.

In Abbildung 3.2 ist die grundlegende Einteilung von Werkzeugen zur Arbeit am Produktmodell dargestellt.



**Abbildung 3.2:** Grundlegende Tätigkeiten am Modell nach [OBERHOFER & MAIER 2018]

Die einzelnen Bestandteile werden dabei entsprechend der im Folgenden beschriebenen Definitionen betrachtet.

### 3.2.1.2 Gestaltung

Bei der Gestaltung handelt es sich um eine aktive Tätigkeit am Modell mit dem Ziel der Modellerstellung oder Anpassung. Es werden hierbei Ideen und intrinsische Vorstellungen des Anwenders umgesetzt und weiterentwickelt. Mithilfe der Werkzeuge wird das zugrundeliegende Modell aktiv nach den eigenen Vorstellungen unter Berücksichtigung der Anforderungen geformt. Die Tätigkeit 'Gestaltung' umfasst die Inhalte:

- Neuerstellung (Gestaltung) eines Modells und
- Anpassung bzw. Weiterentwicklung eines vorhandenen Modells.

### 3.2.1.3 Darstellung

Die darstellenden Werkzeuge haben das Ziel der Visualisierung oder Verbildlichung des gestalteten Modells, um dieses in spezifischer Form zu nutzen, beispielsweise für Begutachtungen, Analysen oder zu Kommunikationszwecken. Dabei handelt es sich um eine passive Tätigkeit des Umsetzens, ohne dem Modell neue Informationen hinzuzufügen. Die Tätigkeit 'Darstellung' umfasst die Inhalte:

- Umsetzung eines Modells und
- Nutzung des Modells.

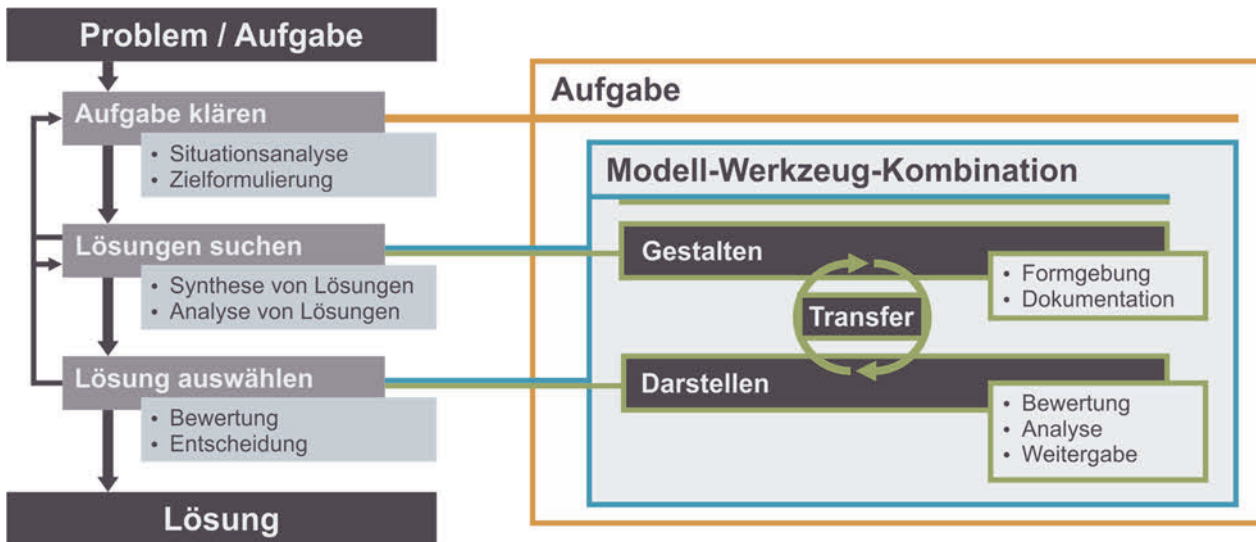
#### **3.2.1.4 Transfer**

Arbeiten die Werkzeuge der Gestaltung und der Darstellung in unterschiedlichen Welten, ist ein Transfer des Modells notwendig. Hierzu können Werkzeuge eingesetzt werden, die einen Weltentransfer vornehmen, ohne jedoch dem Modell neue, gestalterische Informationen hinzuzufügen. Dennoch kann es zu Veränderungen des Modells durch die Aufbereitung kommen. Die Tätigkeit 'Transfer' umfasst die Umwandlung des Modells.

Da es auch bei Werkzeugen der Darstellung zu einem Weltenwechsel kommen kann, ist hier eine Abgrenzung vorzunehmen, die sich auf das Ziel, welches mit dem Resultat verfolgt wird, bezieht. Bei Werkzeugen der Darstellung ist das Ziel, die Darbietung des Modells zu verwenden, um es zu beurteilen, bewerten, analysieren oder kommunizieren. Der darstellende Charakter ist hierbei im Fokus. Bei den darstellenden Werkzeugen handelt es sich um eine abschließende Tätigkeit mit dem Ziel der Bewertung und Analyse. Bei den Werkzeugen des Transfers handelt es sich dagegen um einen Zwischenschritt. Hierbei liegt der Fokus auf der Weiterverwendung des Modells, nicht zu darstellenden, sondern verarbeitenden Tätigkeiten. Der Übergang der Werkzeuge ist teilweise fließend, vor allem bei physischen Modellen, da diese keine weiteren Werkzeuge zur Darstellung benötigen.

#### **3.2.1.5 Zuordnung zum Problemlösezyklus**

Grundvoraussetzung für die Funktionsweise des Ansatzes ist die Kompatibilität zu etablierten und grundlegenden Methoden und Prozessen der Produktentwicklung, wie sie in Kapitel 2.1.2 erläutert sind. Im Rahmen der Entwicklung von Produkten sind eine Reihe von Aufgaben bzw. Problemen zu lösen, deren Vorgehen durch den Ansatz des Problemlösezyklus der Systemtechnik [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 110] beschrieben werden kann. Hierbei werden iterativ auf Basis einer Aufgabe bzw. eines Problems Lösungen durch die Teilschritte Aufgabe klären, Lösungen suchen und Lösung auswählen ermittelt und definiert [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 106 ff]. Diesen Teilschritten können die Aspekte des Ansatzes dieser Arbeit, die Aufgabe sowie das Gestalten und Darstellen, inklusive des situativ notwendigen Transfers, zugeordnet werden (siehe Abbildung 3.3). Wie in der Richtlinie VDI 2221-1 [2019] beschrieben, können hierfür Modelle und Werkzeuge eingesetzt werden, die in enger Verbindung stehen und im Weiteren als Modell-Werkzeug-Kombination (siehe Kapitel 3.2.4) beschrieben werden.



**Abbildung 3.3:** Problemlösezyklus in Anlehnung an [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017, S. 110] mit Zuordnung zu Aufgabe, Modell und Werkzeug

Nach den Richtlinien VDI 2221-1 [2019, S. 17] werden bei der Suche nach Lösungen „*alternative Lösungsideen oder schon konkrete Lösungen oder Teile davon erarbeitet und kombiniert*“. Diese Tätigkeit lässt sich den gestaltenden Werkzeugen zuordnen, mit dem Ziel der Formgebung und Dokumentation der erarbeiteten Lösungen. Anschließend werden die „*Eigenschaften der Lösungsalternativen in Bezug auf das Ziel als Grundlage für eine abschließende Entscheidung bewertet*“ [VDI 2221-1 2019, S. 17]. Hier wiederum können die darstellenden Werkzeuge zugeordnet werden. Diese Aspekte basieren auf dem korrespondierenden Produktmodell und bilden zusammen die Modell-Werkzeug-Kombination. Bei unterschiedlichen Modellwelten erfolgt zwischen den Schritten der notwendige Transfer, wie er in Kapitel 3.2.1.4 beschrieben ist. Auf dieser Basis wird im Folgenden zunächst eine Modelleinteilung vorgenommen, als Grundlage für die Einteilung der Werkzeuge und die anschließende Kombination dieser.

### 3.2.2 Modelleinteilung

Basierend auf den Inhalten des Stands der Forschung und Technik in Kapitel 2 sowie den vorherigen grundlegenden Beschreibungen des Ansatzes wird eine notwendige Modelleinteilung vorgenommen, welche die speziellen Anforderungen und Herausforderungen der nutzerzentrierten Produktentwicklung wie sie im Technischen Design beschrieben ist, aufgreift und umsetzt.

### 3.2.2.1 Untersuchung von Modellanwendungen

Um eine Einteilung der Produktmodelle für diese Arbeit vorzunehmen, werden die Modellanwendungen, wie sie in Kapitel 2.3 beschrieben sind, hinsichtlich ihrer Unterschiede und Überschneidungen untersucht. Es wird hierzu eine Trennung zwischen Gestalten und Darstellen vorgenommen, um diese Einsatzbereiche differenziert betrachten zu können. Insbesondere in Bezug auf die Modellstudie wird der Aspekt der Darstellung besonders fokussiert, der eine Bewertung anhand des Modells ermöglicht. Der Stand der Forschung und Technik wird hinsichtlich verschiedener Faktoren untersucht. Auf der ersten Ebene werden die Modelle differenziert nach ihrer Form und der Funktion betrachtet. Unter Form wird dabei die physische bis virtuelle Erscheinungsform des Modells verstanden. Die Funktion beschreibt den Einsatz des Modells innerhalb der Entwicklung aus der Anwendungssicht. Zwischen der Form, wie sie in Tabelle 3.2 aufgeschlüsselt wird, und der Funktion werden in der Literatur häufig Verknüpfungen erstellt bzw. die Modelle für eine bestimmte Funktion mit den Aspekten der Form beschrieben. Dies vereinfacht in der Anwendung die Handhabung von Modellen und ist allgemein betrachtet schlüssig, jedoch führt dies zu Einschränkungen, die im Rahmen dieser Betrachtung zunächst explizit aufgehoben werden, um eine unabhängige und nicht vorgeprägte Einteilung vornehmen zu können. In Tabelle 3.2 sind die Aspekte der Form und Funktion, anhand derer der Modelleinsatz in der Literatur untersucht wird, aufgeführt.

Form	Funktion
Modellbeschreibung hinsichtlich der Erscheinungsform: <b>Existenz</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• physisch (analog) / virtuell (digital)</li> </ul> <b>Dimension</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2D / 3D</li> </ul> <b>Detaillierungsgrad</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• niedrig bis hoch</li> </ul> <b>Funktionalitäten</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine bis alle</li> </ul> <b>Abstraktion</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• gering bis hoch</li> </ul>	Modellbeschreibung hinsichtlich des Einsatzzwecks im Entwicklungsprozess: <b>Prozessphase</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Planung</li> <li>• Konzeption</li> <li>• Entwurf</li> <li>• Ausarbeitung</li> </ul> <b>Einsatzbereich</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ergonomie</li> <li>• Design</li> <li>• Technik</li> </ul>

**Tabelle 3.2:** Kriterien der Modellbetrachtung bezüglich einer Einteilung

Eine Übersicht der Modelluntersuchung bezüglich der Beschreibung (Form oder Funktion) sowie des Einsatzbereichs und der Prozessphase ist in Tabelle 3.3 dargestellt. Entsprechend dieser Untersuchung wird im Rahmen dieser Arbeit die in Tabelle 3.4 dargestellte Modelleinteilung abgeleitet. Diese ist die Basis für die weiteren Untersuchungen bezüglich der Anwendung sowie für die durchgeführte Modell-Studie in Kapitel 5.

Die abgeleitete Modelleinteilung ist als Matrix der Faktoren Repräsentationsform und Modellinhalt dargestellt. Die Matrix baut sich aus umlaufenden Ringen mit den jeweiligen Benennungen, Definitionen und Beispielen auf vergleichbarem Niveau zwischen Repräsentationsform und Modellinhalt auf, die nach innen feingliedriger unterteilt werden.

Die Repräsentationsform ist eingeteilt von physisch bis virtuell über die Zwischenstufen der hybriden Darstellungsformen. Basierend auf der durchgeführten Analyse wird im Rahmen der Modelleinteilung eine siebenstufige Unterteilung vorgenommen, um alle Zwischenstufen auf oberster Unterscheidungsebene abzubilden, die in der Anwendung mit den passenden Werkzeugen weiter aufgeteilt werden kann.

Der Modellinhalt deckt zum einen die Teilgestalten der Produktgestalt Aufbau, Form, Oberfläche/Farbe und Grafik ab sowie die analysierten Aspekte der Detaillierung, der Abstraktion und der Funktionalitäten. Auf Ebene des Modellinhalts wird eine Einteilung in drei Stufen festgelegt, um sowohl eine detaillierte Differenzierung entsprechend der Recherche, aber auch eine gute Handhabung und Anwendung der Einteilung zu ermöglichen. Bei den ersten beiden Stufen des Modellinhalts wird weiter zwischen den Bereichen Technik, Ergonomie und Design unterschieden. Bei der letzten Stufe (Prototyp / Muster) wachsen diese Bereiche im Modell häufig zusammen, weshalb hier nicht mehr gesondert unterschieden wird. Sowohl die verschiedenen Repräsentationsformen, die Modelltypen bezüglich Modellinhalt als auch die jeweiligen Kombinationen der Matrix sind mit einer Definition und Anwendungsbeispielen detailliert beschrieben. Für eine eindeutige Bezeichnung der Kombinationen sind diese durch eine Notation, bestehend aus den jeweiligen Bestandteilen Repräsentationsform und Modellinhalt eindeutig benannt, beispielsweise R3.2\_M2.3 für ein digitales 3D Funktions-/Geometriemodell.



Quelle	Modell	Tätigkeit / Zweck / Beschreibung	Funktion		Einsatzbereich				Prozess-Phase					
			Form		T	E	D	P	K	E	A			
[VDI 2424-1 1986]	räumliche Skizze	schnelle, perspektivische Darstellung, leicht zu erlernen, Visualisierungs- und Entwurfs-Mittel	x		x		x		x		x		x	
	Technische Zeichnung	abstrakte Darstellung, für Laien schwer verständlich.	x											x
	Explosions-Zeichnung	Veranschaulichung von Funktionen durch Separierung der Bauteile	x		x									x
	Phantom-Zeichnung		x											
	Rendering	perfektionierte Darstellung, um schon früh realistischen Eindruck zu vermitteln hinsichtlich Entscheidungen und Vertrieb	x											x
	Pinwand / Diagramme / Photomontage		x											
	Vormodelle	schnell erstelltes Modell aus Bastelmaterialien, zur Veranschaulichung von schwierigen Aufgaben		x										x
	Funktions- und Versuchsmodelle	Modell zur Überprüfung von Bewegungsabläufen und Zusammenhang mit der Mensch-Maschine-Beteiligung, beim "Ausprobieren" auf Detaillierungsgrad achten		x										x
	Darstellungsmodelle	hohe Perfektionsgrad, daher final und nicht zur Entwürfsfindung		x										x
	Strichbild / Scribble / Schemazeichnung		x											
	Schaltplan / Projektzeichnung / Patentzeichnung		x											
	Vormodell			x										
	Prototyp / Funktionsmuster			x										
	Proportionsmodell / Designmodell			x										
Funktionsmodell			x											
Ergonomie Modell			x											
Prototyp			x											
Formlinienplan			x											
Appearance Model	physical size, shape and appearance		x											
Form and Fit Model	physical size and shape		x											
Pre-Production Prototype	Mock-up of manufactured product (size, shape, function)		x											
Production Prototype	'as-manufactured' materials and process		x											
Working Principles Prototype	key functions (but not size and shape)		x											
Test Prototype	specific functions (but not size and shape)		x											
Communication model	for stakeholders		x											
Design development model	developing design ideas working in 3D with models, especially during design for manufacture and assembly		x											
Design testing model	normal, extreme or lifetime operation		x											
Proportionsmodell	äußere Form und Proportionen, Kommunikationsmodell; schneller Austausch über Produkteigenschaften; schnelle und einfache Herstellung; hohe Abstraktion, geringe Detaillierung, keine Funktionalität		x											
Ergonomie Modell	Entscheid für Durchführbarkeit; Details für Bedien- und Benutzbarkeit, keine Funktionalität, mittlere Abstraktion, mittlere Detaillierung, einzelne Funktionalitäten		x											
Designmodell	äußerlich identisch zum Serienteil, Showroomqualität; unterstützt Entscheid zu Konstruktions- und Fertigungsmethoden, Präsentationsmodell gegenüber Dritten; geringe Abstraktion, hohe Detaillierung, einzelne Funktionalitäten		x											
Funktionsmodell	Überprüfung und Analyse von Funktionen, ggf. auch ohne äußere Form, Grundlage für Konstruktion, Formen- und Werkzeugbau etc. geringe Abstraktion, hohe Detaillierung, mehrere Funktionalitäten		x											
Prototyp	entspricht dem Serienmuster, Unterschied lediglich im Herstellungsverfahren, Überprüfung einzelner oder mehrerer Produkteigenschaften, Vorbereitung des Markteintritts; geringe Abstraktion, hohe Detaillierung, alle Funktionalitäten		x											
Muster	stammt aus der Serie, Nullserie; vollständiger Test der Produkteigenschaften; keine Abstraktion, hohe Detaillierung, alle Funktionalitäten		x											
Soft models	rough modelling, use to assess the overall size, proportion and shape of many proposed concepts; fast evaluation of basic sizes and proportions; reshaped / refined by hand to explore its tactile quality			x										
Hard models	technically nonfunctional close replicas of the final design; very realistic look and feel; have some working features such as button that push			x										
Presentation model	model that constructed and matched from CAD data; complete model / fully detailed composition of the product			x										
Prototypes	high quality model produced to realize a design solution; to test / evaluate before the product is produced			x										
Zielmodell	Erfassung, Strukturierung und Dokumentation von geforderten Systemmerkmalen			x										
Problemmodell	Darstellung von Schwachstellen und Optimierungspotenzialen			x										
Entwicklungsmodell	Spezifikation der Struktur sowie der geometrischen und stofflichen Beschaffenheit			x										
Verifikationsmodell	Erfassung und Analyse wesentlicher Eigenschaften			x										
grafische Darstellung	Zusammenhänge von Elementen und Funktionen eines Systems			x										
Handskizzen	Darstellung prinzipieller Lösungen und des Produktdesigns			x										
Geometriemodelle	digitale Geometriemodelle in 2D und 3D (CAD, VR)			x										
kinematische Modelle	Darstellung dynamischer Abläufe im Produkt			x										
Berechnungsmodelle	zum Beispiel FEM			x										
physische Modelle	orientierende Versuche oder Bewertung des Designs			x										

T = Technik | E = Ergonomie | D = Design | P = Planen | K = Konzipieren | E = Entwerfen | A = Ausarbeiten

Tabelle 3.3: Untersuchung von Produktmodellen, deren Eigenschaften und Einsatzbereich





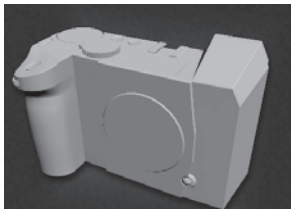

		Modellinhalt											
		Aufbau		Form			Oberfläche / Farbe			Grafik			
		Bezeichnung	Konzept- / Proportionsmodell			Funktions- / Geometriemodell				Prototyp / Muster			
Technik	Ergonomie		Design	Technik	Ergonomie	Design	Technik / Ergonomie / Design						
		Not.	M1.1	M1.2	M1.3	M2.1	M2.2	M2.3	M3				
Repräsentationsform	physisch	Physisches Modell	R1.1	Einfacher Aufbau aus abstrahierten Teilen oder Verknüpfung von bestehenden Teilen, beispielsweise Pappe, Metall, Clay, Referenzbauteile			Detailliertes Modell mit einzelnen Funktionalitäten des Einsatzbereiches mit Fokus auf die Teilgestalt Form, beispielsweise Clay, Modellbau, Additive Fertigung			Detaillgetreues, funktionsfähiges Modell mit verknüpften Eigenschaftenn der Einsatzbereiche, beispielsweise Realprodukt, Additive-/ Subtraktive-Fertigung / Guss mit Oberflächenbehandlung		R1	Körperliches und physisches Modell in unterschiedlichen Detaillierungsstufen und Funktionalitäten zum Gestalten und Darstellen der Teilgestalten, beispielsweise Realobjekt, Claymodell, AF-Modell
		Abbildung	R1.2	Einfache physische Skizze oder Zeichnung (evtl. perspektivisch) der Aufbauelemente, beispielsweise Bleistiftskizze, Finelinerzeichnung, Maßkonzept mit Konturzeichnung oder Karten			Detaillierte physische Zeichnung (perspektivisch) mit Darstellung von Formen und Oberflächen bzw. ersten Farben sowie Darstellung von Funktionalitäten, beispielsweise schattierte Bleistiftzeichnung, Fineliner und Copic Zeichnung			Fotorealistische Zeichnung / Rendering eines dreidimensionalen Modells oder physische Fotografie eines Realobjekts mit allen Details und Teilgestalten, beispielsweise Abbildung eines Rendering, Copic Rendering / Zeichnung, Fotografie			Physische Zeichnung oder Darstellung des zu gestaltenden und darstellenden Produkts und dessen Funktionalitäten in unterschiedlichen Ansichten und Detaillierungsstufen sowie Abstraktionsgraden, beispielsweise Bleistiftskizze, Copic- Rendering
		Hybrides Modell AR (Augmented Reality)	R2.1	Einfache physische Modelle mit überlagerten digitalen Inhalten hinsichtlich Aufbau und Anordnung, beispielsweise Pappmodell mit projizierten Konturen			Detaillierte digitales 3D Modelle (vgl. R3.2) in realer Umgebung oder Überlagerung auf realen Objekten, beispielsweise 'optical see-through' digitales Formmodell in realer Umgebung			Hinichtlich Teilgestalten ausdetailliertes digitales Modell dargestellt auf realem Grundmodell, beispielsweise virtueller funktionaler Prototyp per 'optical see through' projiziert auf realen nicht funktionalen Prototyp.			Digitales Modell oder Modellinhalte in verschiedenen Detaillierungsstufen oder deren Funktionalitäten virtuell projiziert in eine reale Umgebung oder auf ein reales Objekt, beispielsweise Projection Mapping
	virtuell	Hybrides Modell AV (Augmented Virtuality)	R2.2	Einfaches digitales Modell in virtueller Umgebung mit Darstellung realer Inhalte, beispielsweise virtuelle Platzierung von Grundkörpermodell in erfasster realer Umgebung.			Detailliertes digitales 3D Modell (vgl. R3.2) in virtueller Umgebung mit Verknüpfung realer Objekte, beispielsweise virtuelles Interfacemodell in VR-HMD dargestellt auf erfasster realer Oberfläche des Objekts.			Ausdetailliertes und vollständiges digitales Gesamtmodell in VR-Umgebung mit realen Modelleigenschaften, beispielsweise funktionsfähiges virtuelles Modell mit deckungsgleicher Haptik des Realobjekts		R2	Digitales Modell in unterschiedlichen Abstraktionen oder dessen Funktionalitäten in virtueller Umgebung mit in Echtzeit erfassten realen Objekten oder Umgebung, beispielsweise 'video-see through' HMD mit Umgebungserfassung
		Digitales Modell 2D	R3.1	Digitales 2D Modell aus Grundformen/Konturen, beispielsweise 2D Vektor- oder Pixelzeichnung			Digitales 2D Teilmodell / Zeichnung (Vektor/Pixel perspektivisch) hinsichtlich Oberfläche/Funktion, beispielsweise Photoshop/Illustrator-Zeichnung			Ausdetailliertes und hinsichtlich Teilgestalten vollständiges photorealistisches digitales 2D Modell perspektivisch, beispielsweise Photoshop Rendering		R3	Rein digital existentes gestaltetes oder dargestelltes Modell in zweidimensionaler Ausprägung in unterschiedlichen Detaillierungen/Abstraktionen und Funktionalitäten, beispielsweise Pixel/Vektor-Grafik
		Digitales Modell 3D	R3.2	Digitales 3D Modell aus Grundkörpern/Konturen, beispielsweise 3D Grundkörper- / Kantenmodell			Detailliertes, digitales 3D Teilmodell als Oberflächen-/Funktionsmodell, beispielsweise Polygonmodell			Ausdetailliertes und hinsichtlich Teilgestalten vollständiges digitales 3D Modell, beispielsweise CAD- / Gerendertes-Modell			Rein digital existentes gestaltetes oder dargestelltes Modell in dreidimensionaler Ausprägung in unterschiedlichen Detaillierungen/Abstraktionen und Funktionalitäten, beispielsweise CAD/Polygon/Gerendertes-Modell
		Immervives digitales Modell	R3.3	Vergleichbares 3D Grundmodell wie in R3.2 beschrieben in virtueller Umgebung, beispielsweise 3D Skizze in VR oder 3D Rastermodell in VR			Vergleichbares digitales 3D Teilmodell wie in R3.2 in virtueller Umgebung, beispielsweise CAD-Funktionsmodell / Flächenmodell in VR			Vergleichbares ausdetailliertes und vollständiges (Teilgestalten) 3D Modell wie R3.2 in VR Umgebung, beispielsweise gerendertes Modell in virtueller und immersiven Umgebung			Rein digital existentes gestaltetes oder dargestelltes Modell in dreidimensionaler Ausprägung in virtueller immersiver Umgebung, beispielsweise CAD/Polygon-Modell in VR-Umgebung
			M1			M2			M3				
			Stark abstrahiertes Modell ohne Funktionalitäten zur ersten Gestaltung und Überprüfung von Anordnung und Aufbau der Baugruppen und Teilen hinsichtlich technischer, ergonomischer und gestalterischer Aspekte			Detailliertes Teilmodell mit Funktionen hinsichtlich der Einsatzbereiche (Technik, Ergonomie, Design) und Gestaltung und Darstellung der Teilgestalt Form sowie erste Oberflächen/Farbgebung.			Ausdetailliertes gesamtheitliches Modell der Bereiche Technik, Ergonomie und Design einschließlich aller Teilgestalten und Aufbauelemente.				
			Abstraktion							Detaillierung und Funktionalität			

Tabelle 3.4: Modelleinteilung



### 3.2.2.2 Studie zur Wahrnehmung von Produktmodellen

Im Rahmen einer ersten Vorstudie wurden am Lehrstuhl für Technisches Design, betreut durch den Autor dieser Arbeit, eine Untersuchung zur Wahrnehmung von Modellen hinsichtlich ihrer Eignung für bewertende Aufgaben im Kontext der Produktgestaltung untersucht. Sie ist Teil mehrerer Untersuchungen, deren Zusammenhänge in Abbildung 3.4 dargestellt sind, mit dem Ziel der Überprüfung der grundlegenden Aspekte des Ansatzes. Die Modellauswahl basiert auf der in Tabelle 3.4 dargestellten Modelleinteilung und dient der Überprüfung dieser. In Tabelle 3.5 sind die untersuchten Modelle der Studie abgebildet.

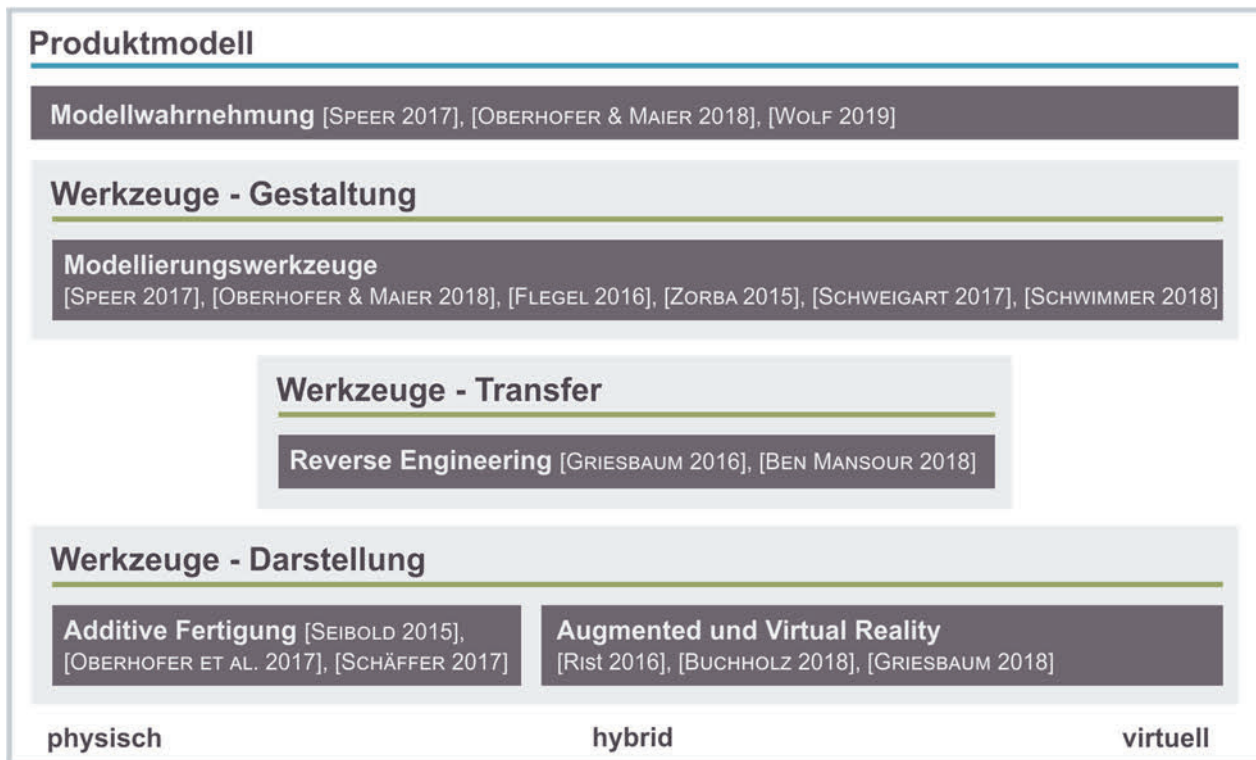
Clay-Modell	RP-Modell	Polygon-Modell	Rendering
			

**Tabelle 3.5:** Modelle der Vorstudie [SPEER 2017]

Bei der Studie wurden zwei Aspekte des Modell- und Werkzeugeinsatzes untersucht. Zum einen wurden Gestaltungswerkzeuge (vgl. Kapitel 3.2.1.2) hinsichtlich ihres Einsatzes im Kontext einer nutzerzentrierten Produktgestaltung untersucht. Dieser Teil der Studie dient als Voruntersuchung zur Werkzeugbetrachtung und -charakterisierung in Kapitel 3.2.3. Der zweite Teil der Studie fokussiert bewertende Aufgaben am Produktmodell. Hierfür wurde eine Untersuchung mit 25 Probanden durchgeführt, welche aus einer Befragung zu designrelevanten Aspekten der Produktgestalt und deren Bewertbarkeit anhand des Modells bestand [SPEER 2017]. SPEER [2017] und OBERHOFER & MAIER [2018] konnten mit der Studie zeigen, wie sich verschiedene Modelltypen (Clay-Modell, Rapid Prototyping Modell, Polygon-Modell und Rendering) aus Anwendersicht für die Bewertung von Produkteigenschaften unterscheiden. So hat sich bestätigt, dass anhand der physischen Modelle eine signifikant bessere Bewertung der Teilgestalten Aufbau (Komfort, Erreichbarkeit) und Form (Formgebung, Proportionen, Größe) möglich ist, wohingegen insbesondere in Bezug auf die Oberfläche und Farben, die virtuellen Modelle signifikant besser geeignet sind. Gleichzeitig wurde durch die Studie gezeigt, dass die Modellauswahl und -gestaltung eine differenzierte Bewertung der Produkteigenschaften hinsichtlich der Teilgestalten der Produktgestalt ermöglicht, was entscheidend für die Modell-Studie in Kapitel 4 und 5 ist.

### 3.2.3 Werkzeuge der Produktentwicklung

Basierend auf der Recherche im Stand der Forschung und Technik in Kapitel 2.2 wurde durch Vorstudien sowie mithilfe mehrerer studentischen Arbeiten, welche durch den Autor dieser Arbeit betreut wurden, Entwicklungswerkzeuge im Kontext der Anwendung im Technischen Design untersucht. Hierbei wurde entsprechend der in Kapitel 3.2.1.1 vorgestellten Klassifizierung in die Bereiche Gestaltung, Darstellung und Transfer sowie den verschiedenen Modellwelten von physisch bis virtuell vorgegangen. In Abbildung 3.4 sind die untersuchten Bereiche und deren Schwerpunkte dargestellt.



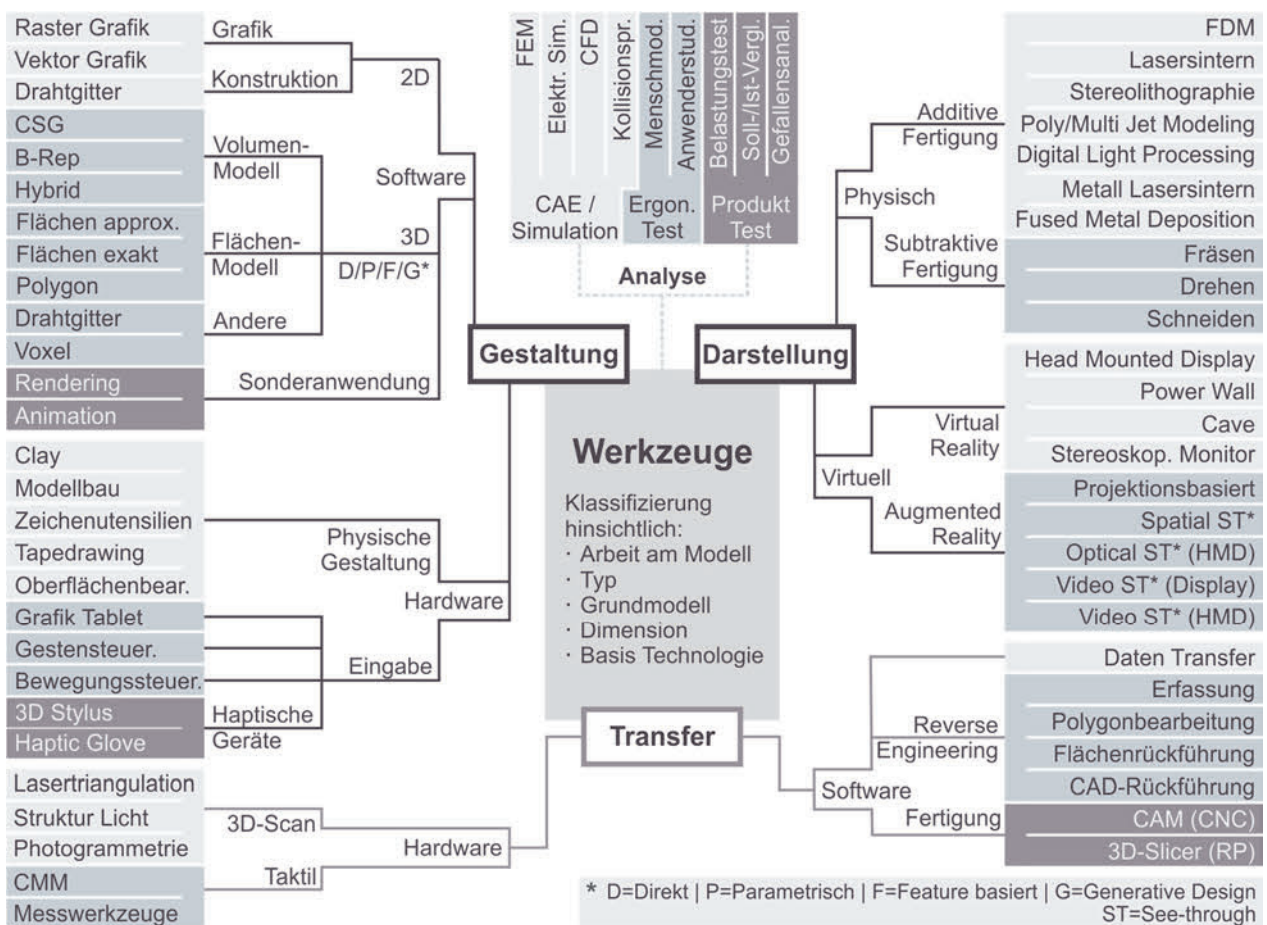
**Abbildung 3.4:** Untersuchte Bereiche hinsichtlich Modelle und Werkzeuge

Die Untersuchungen dienen als Grundlage für die Einteilung und Übersicht der Werkzeuge im folgenden Abschnitt.

#### 3.2.3.1 Bündelung der Werkzeuge

Für eine zielgerichtete Auswahl sowie einen Vergleich von Werkzeugen, ist eine Einteilung und Bündelung der in der Anwendung und Forschung verfügbaren Werkzeuge notwendig. Zentrales Element ist hierbei eine Abstraktion dieser auf die zugrundeliegende Basistechnologie. Dadurch wird zum einen eine Erweiterbarkeit des Ansatzes sichergestellt und zum anderen eine Unabhängigkeit von Anbietern erreicht. Das Niveau der Abstraktion der Werkzeuge orientiert sich an der Betrachtungsweise, wie sie häufig

in der Literatur, Normen und VDI Richtlinien herangezogen werden, um somit eine Kompatibilität zu weiterführenden Erklärungen und Beschreibungen zu ermöglichen. Anhand einer Übersichtsrecherche wurden Werkzeuge aus kontextnahen und -fernen Bereichen gesammelt und mit Kriterien zu Anwendung, Technologie, Einsatz, Modell und Umgebung klassifiziert sowie allgemein beschrieben und mit Beispielen versehen. Auf diese Weise konnten die Werkzeuge methodisch charakterisiert, sortiert und Doppelungen eliminiert werden. Das Ergebnis der Recherche und Auswahl ist in Tabelle 3.6 auf Seite 71 dargestellt. Für eine übersichtliche Darstellung der betrachteten Werkzeuge sind diese in Abbildung 3.5 anhand des Einsatzes, ihres Typs, des Modells sowie der Dimension strukturiert und anhand der Basistechnologie aufgelistet.



**Abbildung 3.5:** Einteilung der Werkzeuge nach Gestaltung, Darstellung und Transfer nach [OBERHOFER & MAIER 2018]

Die betrachteten Werkzeuge decken den aktuellen Stand der Anwendung und Forschung im Kontext des Technischen Designs ab. Die Vorgehensweise ermöglicht es jedoch, dass diese Auswahl ergänzt, angepasst und aktualisiert werden kann und somit eine allgemeingültige Grundlage für die Vorgehensweise zur Auswahl von Werkzeugen und Modellen in Kapitel 6 bietet.

### 3.2.3.2 Beschreibung der Werkzeuge

Die zuvor dargestellten Untersuchungen stellen die Basis für die Auswahl und Einteilung der Werkzeuge der Produktentwicklung dar. Die Basistechnologien der Werkzeuge sind über zwei Stufen geclustert. Auf oberster Ebene erfolgt die Einteilung anhand des grundsätzlichen Einsatzes Gestalten, Darstellen und Transfer. Hierbei wird zusätzlich zwischen der Umgebung physisch und virtuell sowie zwischen Software und Hardware unterschieden. Zusätzlich bilden Eingabegeräte eine weitere Kategorie, die zwingend für die Arbeit mit digitalen Werkzeugen notwendig sind. Auf der zweiten Ebene sind die Werkzeuge, entsprechend ihrer übergeordneten Kategorie sowie der Basistechnologie weiter geclustert. Grundsätzlich erlaubt die weitere Charakterisierung der Werkzeuge anhand der Kriterien ebenfalls andere Sortierungen. Die gewählte Sortierung ermöglicht jedoch eine Vergleichbarkeit und Handhabung der Werkzeuge, wie sie in relevanten Normen und Literatur zu finden ist. Neben einer Beschreibung und anwendungsbezogenen Beispielen der Basistechnologie, sind die Werkzeuge anhand folgender Kriterien beschrieben:

- Primäreinsatz,
- Sekundäreinsatz,
- Modelldimension,
- Modellart,
- Anwendungsumgebung,
- Zusatzbedarf,
- Ergebnismodell zur Weiterverarbeitung,
- Beispiel-Anbieter/-Tools.

Die Kriterien wurden anhand der zuvor beschriebenen Voruntersuchungen ausgewählt, mit den Anforderungen für den Ansatz der Werkzeugauswahl in Kapitel 3.1.2 abgeglichen sowie für die in Kapitel 3.2.4 folgenden Werkzeugkombinationen festgelegt, um eine notwendig vollständige Beschreibung und Kompatibilität zu gewährleisten. In Tabelle 3.6 sind die untersuchten, eingeteilten und beschriebenen Werkzeuge aufgelistet. Aufgrund der Notwendigkeit von Eingabegeräten bei digitalen Gestaltungswerkzeugen (siehe Kapitel 2.2.2.9) ist eine gesonderte Untersuchung zu deren Kombinationsfähigkeit notwendig, siehe Tabelle 3.7, die im Folgenden näher beschrieben wird.



Typ1	Not.	Typ2	Not.	Bezeichnung	Beschreibung	Primär-einsatz	Sekundär-einsatz	Modell-dimension	Modellart	Anwendungs-umgebung		Zusatzbedarf	Ergebnismodell zur Weiterverarbeitung	Beispiel-Anbieter/-Tools	
										Standard-Umgebung	VR/AR-Umgebung				
Gestaltung digital	GD1	Zeichensoftware	GD1.11	Pixel-Grafik 2D	Digitales Grafikprogramm, pixelbasiert zur Bildbearbeitung und -erstellung in 2D	Gestalten		2D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Pixel-Grafik	Adobe Photoshop, Autodesk Sketchbook, Gimp	
			GD1.12	Pixel-Grafik 3D	Digitales Grafikprogramm, pixelbasiert zur Bildbearbeitung und -erstellung in 3D	Gestalten		3D	digital	x	x	Eingabegerät Ausgabegerät	Polygonmodell	Adobe Photoshop, Gravity Sketch	
			GD1.21	Vector Grafik 2D	Digitales Grafikprogramm, vektorbasiert zur Grafikbearbeitung und -erstellung in 2D	Gestalten		2D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Vektor-Grafik	Adobe Illustrator, CorelDraw	
			GD1.22	Vector Grafik 3D	Digitales Grafikprogramm, vektorbasiert zur Grafikbearbeitung und -erstellung in 3D	Gestalten		3D	digital		x	Eingabegerät Ausgabegerät	Polygonmodell		
			GD1.3	2D Kantenmodell (Technische Zeichnung)	Software zur Erstellung von 2D Konstruktionszeichnungen	Gestalten		2D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Technische Zeichnung	AutoCAD	
	GD2	Modellierungssoftware	GD2.1	3D Kantenmodellierung	Rechnerunterstützte Gestaltungssoftware auf Basis einer Kantendarstellung des Modells	Gestalten		3D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Kantenmodell	Auto CAD	
			GD2.2	Polygonmodellierung direkt (CAS)	Rechnerunterstützte Modellierungssoftware auf Basis eines Polygonmodells	Gestalten		3D	digital	x	x	Eingabegerät Ausgabegerät	Polygonmodell	Blender, 3dsMax, Maya	
			GD2.3	Flächen approximiert direkt (CAS)	Rechnerunterstützte Gestaltungssoftware auf Flächenbasis (NURBS)	Gestalten		3D	digital	x	x	Eingabegerät Ausgabegerät	Flächenmodell	Blender, Autodesk 3dsMax, Autodesk Alias, Geomagic Studio	
			GD2.4	Flächen exakt direkt (CAS/Strak)	Rechnerunterstützte Konstruktionssoftware auf mathematisch exakt beschriebener Flächenbasis	Gestalten		3D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Flächenmodell	Autodesk Alias, ICEM Surf, Tebis	
			GD2.5	Flächen exakt parametrisch (CAS/Strak)	Rechnerunterstützte Konstruktionssoftware auf mathematisch exakt beschriebener Flächenbasis mit parametrischen Abhängigkeiten	Gestalten		3D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Flächenmodell	Catia ICEM Shape Design	
			GD2.6	Flächen generativ	Gestaltungssoftware auf Flächenbasis mit generativer Umsetzung mittels Algorithmen	Gestalten		3D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Flächenmodell	Rhino Grasshopper, Autodesk	
			GD2.7	CSG/B-Rep/Hybrid direkt (CAD)	Rechnerunterstützte Konstruktionssoftware basierend auf Volumenmodellen, Gestaltung mittels boolescher Operatoren	Gestalten		3D	digital	x	x	Eingabegerät Ausgabegerät	Volumenmodell	CATIA, Autodesk Inventor, PTC Creo, SolidWorks, Siemens NX	
			GD2.8	CSG/B-Rep/Hybrid parametrisch (CAD)	Rechnerunterstützte Konstruktionssoftware basierend auf Volumenmodellen mit zusätzlicher Parametrik der Variablen	Gestalten		3D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Volumenmodell	CATIA, Autodesk Inventor, PTC Creo, SolidWorks, Siemens NX	
			GD2.9	CSG/B-Rep/Hybrid feature (CAD)	Rechnerunterstützte Konstruktionssoftware basierend auf Volumenmodellen mit featuregestützter Gestaltung	Gestalten		3D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Volumenmodell	CATIA, Autodesk Inventor, PTC Creo, SolidWorks, Siemens NX,	
			GD2.10	Virtual Clay Modeling / Digital Sculpting (Voxel)	Rechnerunterstützte Modellierungssoftware auf Basis von Voxeln	Gestalten		3D	digital	x	x	Eingabegerät Ausgabegerät	Voxelmodell	Geomagic Sculpt/Freeform, Autodesk Mudbox	
GD3	Erweiterte Gestalt.	GD3.1	Rendering (Bildsynthese)	Visualisierungssoftware zur Erstellung von fotorealistischen Bildern auf Basis von 3D-Modellen	Gestalten	Darstellen	3D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Flächen-/Polygonmodell, Bild, Video	Autodesk VRED, Showcase, Keyshot, 3DEXITE DeltaGen,		
		GD3.2	Animation	Software zur Erstellung von Animationen und Simulationen zur Darstellung von Bewegungen und Abläufen	Gestalten		3D	digital	x		Eingabegerät Ausgabegerät	Video	Autodesk Maya / 3ds Max		
Gestaltung physisch	GP1	Zeichnen	GP1.1	Zeichnensutensilien	Gestaltung mittels Stift und Papier von Skizzen (Bleistift, Tusche, Fineliner, etc.) bis photorealistischen Zeichnungen (Copic)	Gestalten	Darstellen	2D	physisch			-	Zeichnung		
			GP1.2	Tapedrawing	Konturzeichnungen mit speziellem Klebeband (Tape) in unterschiedlichen Maßstäben	Gestalten	Darstellen	2D	physisch				-	Linienzeichnung	
	GP2	Modellieren	GP2.1	Clay-Modellierung	Gestaltung mittels speziellem Werkstoff (Industrieplastilin) auf Wachsbasis der bei Temperaturen um 60° leicht verformt werden kann und bei Raumtemperatur mechanisch bearbeitet/gefinished werden kann	Gestalten	Darstellen	3D	physisch				-	Körper	
			GP2.2	Modellbau / Prototypenbau	Direkte Umsetzung und Gestaltung von Modellen aus unterschiedlichen Materialien (Schaum, Styropor, Pappe, etc.) mit Hand (Cutter, Feile, Säge etc.) und Elektrowerkzeugen (Power Tools)	Gestalten	Darstellen	3D	physisch					-	Körper
		GP2.3	Oberflächenbehandlung	Gestaltung und Bearbeitung von Oberflächen (Glätten, Lackieren/Bemalen, Labeln, Beziehen, Strukturieren, etc.)	Gestalten	Darstellen	3D	physisch					-	Körper	
Eingabe Hardware	EH1	Eingabe / Cursorsteuerung	EH1.1	Standard-Eingabegeräte (Maus, Tastatur, Spacemouse, etc.)	Steuerung des Cursors sowie für die Eingabe von Informationen zur Erstellung und Gestaltung von Modellen	Gestalten		2D / 3D	digital	x		Ausgabegerät Software	-		
			EH1.2	Controler	Hangeführte Geräte zur Eingabe von Informationen und Steuerung von Bewegungen	Gestalten		3D	digital		x	Ausgabegerät Software	-	Flystick, VR Controller (HTC Vive), etc.	
			EH1.3	Grafik Tablet (Touch)	Stiftbasiertes Gerät zur Steuerung des Cursors für die Eingabe von Informationen zur Umsetzung der Vorstellungen bei der Gestaltung von Modellen oder Interaktion mit Modellen	Gestalten		2D / 3D	digital	x		Ausgabegerät Software	-	Wacom Intuos	
			EH1.4	Grafik Tablet Screen (Touch)	Entsprechend GH1.2 mit visueller Überlagerung und Deckungsgleichheit von Input und Output	Gestalten	Darstellen	2D / 3D	digital	x		Software	-	Wacom Cintiq	
	EH2	Motion Capturing	EH2.1	Gestensteuerung berührungslos (Leap Motion)	Kamera- und Infrarotgesteuerte Erfassung der Handbewegungen und Interpretation von Gestern zur direkten Steuerung und Interaktion	Gestalten		3D	digital	x	x	Ausgabegerät, Software	-	Leap Motion	
			EH2.2	VR Datenhandschuh	Handschuh zur Erfassung der Fingerbewegung zur direkten Übertragung der Hand/Fingerbewegung als Eingabeoperation	Gestalten	Darstellen	3D	digital		x	Ausgabegerät, Software	-	Sensoryx, Manus, Noitom	
			EH2.3	Body Tracking	Erfassung von Bewegungen des gesamten Körpers oder Teilabschnitten zur Übertragung in virtuelle Welten und Steuerung von Vorgängen	Darstellen		3D	digital		x	Ausgabegerät, Software	-	TEA Captive, Xsense	
			EH2.4	VR Treadmill	Eingabegerät zur Ermöglichung laufender oder laufähnlicher Bewegung für die Navigation in virtueller Umgebung	Darstellen		3D	digital		x	Ausgabegerät, Software	-	Cyberith, Virtuix	
	EH3	Haptic Device / Force Feedback	EH3.1	3D Stylus	Stiftbasierte Steuerung eines Eingabepunkts (Cursor) im Raum mit taktilem Rückkopplung	Gestalten		3D	digital	x	x	Ausgabegerät, Software	-	3D Systems Touch,	
EH3.2			Haptic Glove	Erfassung der Fingebewegungen zur Steuerung und Eingabe in virtueller Umgebung mit haptischer Rückkoppelung (Force Feedback)	Darstellen	Gestalten	3D	digital		x	Ausgabegerät, Software	-	Manus, haptx		
EH3.3			VR Suite / Exoskelet	Erfassung von Bewegungen des gesamten Körpers oder Teilabschnitten zur Übertragung in virtuelle Welten und Steuerung von Vorgängen mit haptischer Rückkopplung (Force Feedback)	Darstellen		3D	digital		x	Ausgabegerät, Software	-	Teslasuit, bhaptics		

Tabelle 3.6: Übersicht und Beschreibung der Werkzeuge

Typ1	Not.	Typ2	Not.	Bezeichnung	Beschreibung	Primär-einsatz	Sekundär-einsatz	Modell-dimension	Modellart	Anwendungs-umgebung		Zusatzbedarf	Ergebnismodell zur Weiterverarbeitung	Beispiel	
										Standard-Umgebung	VR/AR-Umgebung				
Darstellung virtuell	DV1	Monosk. Anzeige	DV1.1	Standard-Ausgabegerät (Monitor, Tablet, Display, etc.)	Anzeige zur Darstellung digitaler Inhalte als eigenständiges oder integriertes Gerät in Form eines Monitors, Displays, Beamer, etc.	Darstellen, Gestalten,		2D/3D	digital	x		Eingabegerät Software	-		
			DV2.1	Projektionsbasierte AR	Projektion virtueller Inhalte auf ein reales Objekt	Darstellen		3D	digital		x	Eingabegerät Software	-	Extend3D Werklicht	
	DV2	Mixed Reality	DV2.2	Optische See-through AR Display	Teiltransparentes Display zur Darstellung virtueller Inhalte in realer Umgebung bzw. Überlagerung realer, sich dahinter befindlicher Objekte (Head-Up Display)	Darstellen		3D	digital		x	Eingabegerät Software	-	Magic Holo	
			DV2.3	Video See-through AR Display	Ausgabe der in Echtzeit erfassten realen Umgebung mit perspektivisch korrekt überlagerten virtuellen Inhalten auf einem Handheld-Gerät oder einem Display/Monitor	Darstellen		3D	digital		x	Eingabegerät Software	-		
			DV2.4	Optische See-through AR HMD	Kopfgetragenes System mit teiltransparentem Display im direkten Sichtfeld zur Überlagerung virtueller Inhalte mit der realen Umgebung	Darstellen, Gestalten		3D	digital		x	Eingabegerät Software	-	Microsoft HoloLens, Magic Leap	
			DV2.5	Video See-through AR HMD	Siehe DV1.1 mit zusätzlicher Erfassung der realen Umgebung in Echtzeit und Darstellung mit überlagerten virtuellen Inhalten	Darstellen, Gestalten		3D	digital		x	Eingabegerät Software	-	Stereo Labs	
			DV3.1	Display (Stereoskopisch)	Handheld Displays und Monitore zur stereoskopischen oder quasiräumlichen Darstellung virtueller Inhalte	Darstellen, Gestalten		3D	digital		x	Eingabegerät Software	-		
	DV3	Virtual Reality	DV3.2	Power-Wall	Großformatige Projektionsfläche oder Display zur stereoskopischen Darstellung virtueller Inhalte	Darstellen		3D	digital		x	Eingabegerät Software	-		
			DV3.3	CAVE	Cave Automatic Virtual Environment - begehbare Raum dessen Wände zur räumlichen Projektion virtueller Inhalte dienen	Darstellen		3D	digital		x	Eingabegerät Software	-		
			DV3.4	VR Head Mounted Display (HMD)	Kopfgetragenes visuelles Ausgabesystem zur Darstellung virtueller Umgebungen und Modelle	Darstellen, Gestalten		3D	digital		x	Eingabegerät Software	-	HTC Vive, Oculus Rift, Pimax, Varjo	
			DP1	2D	DP1.1	Standard-Ausgabegerät (Drucker, Plotter, etc.)	Erstellung physischer Abbildungen digitaler Daten	Darstellen		2D	physisch			Software	Abbildung
	Darstellung physisch	DP2	Additive Fertigung	DP2.1	Binder Jetting / 3D-Printing (3DP)	Schichtweiser Bauprozess durch Punkt-für-Punkt-Auftragen von Binder oder Copolymerisierung von pulverförmigem Material	Darstellen		3D	physisch			3D-Slicer	Körper	3DSystem, ExOne
				DP2.2	Lasersintern (LS)	Schichtweiser Bauprozess durch lokales Sintern pulverförmiger Werkstoffe unter Einwirkung von Laserstrahlung	Darstellen		3D	physisch				3D-Slicer	Körper
DP2.3				Poly-/Multi-Jet Modelling (PJM/MJM)	Schichtweiser Bauprozess durch Linie-für-Linie-Auftragen von Fotopolymer-Flüssigharzen (Polymere mit Fotoaktivatoren) mit unmittelbarem Aushärten durch UV-Strahler	Darstellen		3D	physisch				3D-Slicer	Körper	Stratasys, 3DSystems
DP2.4				Stereolithographie (SL)	Schichtweiser Bauprozess durch lokales Verfestigen von Fotopolymeren-Kunsthharzen (Prepolymere mit Fotoaktivatoren) unter Einwirkung von Laserlicht	Darstellen		3D	physisch				3D-Slicer	Körper	Formlabs, 3DSystems
DP2.5				Digital Light Processing (DLP)	Schichtweiser Bauprozess durch lokales Verfestigen von Fotopolymer-Flüssigharzen (Polymere mit Fotoaktivatoren) unter Einwirkung einer Lichtmaske	Darstellen		3D	physisch				3D-Slicer	Körper	envisionTEC
DP2.6				Fused Deposition Modeling (FDM)	Schichtweiser Bauprozess durch Erweichen und lokales Auftragen thermoplastischen Materials mittels einer beheizten Düse oder eines Druckkopfs und unmittelbare Verfestigung des extrudierten Materials	Darstellen		3D	physisch				3D-Slicer	Körper	Stratasys, Ultimaker, MakerBot, Prusa
DP2.7				Layer Laminated Manufacturing (LLM)	Schichtweiser Bauprozess durch Ausschneiden der Schichtkontur mittels Laser, Messer oder Wasserstrahl sowie Verkleben der Folien oder Fügen durch Ultraschall	Darstellen		3D	physisch				3D-Slicer	Körper	envisionTec, Mcor
DP2.8				Laser-/Elektronen-Strahlschmelzen (LBM/EBM)	Mit dem LS eng verwandter Prozess zur Herstellung von Metallbauteilen bei vollständigem Aufschmelzen des Materials	Darstellen		3D	physisch				3D-Slicer	Körper	Optomec, Sciaky
DP2.9				Fused Metal Deposition	Dem FDM Verfahren ähnlicher Prozess zur Herstellung von Metallbauteilen durch verflüssigen des Materials	Darstellen		3D	physisch				3D-Slicer	Körper	
DP3		Trennende Verfahren	DP3.1	Fräsen	Werkzeugmaschine zur Umsetzung von frei gestalteten körperlichen Modellen auf Basis von Zeichnungen oder digitalen Modellen	Darstellen		3D	physisch				CAM	Körper	
			DP3.2	Drehen	Werkzeugmaschine zur Umsetzung rotationssymmetrischer körperlicher Modelle auf Basis von Zeichnungen oder digitalen Modellen	Darstellen		3D	physisch				CAM	Körper	
			DP3.3	Schneiden	Werkzeugmaschine zur Umsetzung von Teilen und Modellen mittels trennendem Verfahren durch unterschiedliche Medien (Laser, Water-Jet, Plasma, Electric-Wire, etc.)	Darstellen		3D	physisch				CAM	Körper	
DP4		Weitere Verfahren	DP4.1	Thermoformen	Umformendes Verfahren zur Erzeugung von körperlichen Modellen entsprechend der (digitalen) Modellvorgaben	Darstellen		3D	physisch				-	Körper	
	DP4.2		Guss	Urformendes Verfahren zur Umsetzung von digitalen Modellen nach Erzeugung einer Gussform	Darstellen		3D	physisch				-	Körper		
	DP4.3		Handarbeit	Manuelle Erstellung von physischen Modellen mittels diverser Werkzeuge auf Basis von Zeichnungen und digitalen Modellen	Darstellen		3D	physisch				-	Körper		

Tabelle 3.6: Übersicht und Beschreibung der Werkzeuge (Fortsetzung)



Typ1	Not.	Typ2	Not.	Bezeichnung	Beschreibung	Primär-einsatz	Sekundär-einsatz	Modell-dimension	Modellart	Anwendungs-umgebung		Zusatzbedarf	Ergebnismodell zur Weiterverarbeitung	Beispiel
										Standard-Umgebung	VR/AR-Umgebung			
Transfer-Software	TS1	Reverse Engineering	TS1.1	Scandaten Erfassung	Software zur Steuerung der Scan-Datenerfassung im Reverse Engineering Prozess	Transfer		3D	digital			Datenerfassung	Polygonmodell	
			TS1.2	Polygonbearbeitung	Software zur Vernetzung der erfassten Punktwolke zu einem Polygonnetz mit der Möglichkeit zur Aufbereitung und Optimierung des erzeugten Netzes für weiterführende Tätigkeiten	Transfer		3D	digital			Datenerfassung	Polygonmodell	
			TS1.3	nicht-parametrische Flächenrückführung	Software zur Erzeugung eines nicht-parametrischen Flächenmodells, wobei die Oberfläche des Polygonmodells mithilfe von mehreren mathematisch beschriebenen Flächen-Patches angenähert wird	Transfer		3D	digital			Datenerfassung	Flächenmodell	
			TS1.4	kurvenbasiert Flächenrückführung	Software zur Erzeugung eines auf kurven basierenden Flächenmodells, das an die Oberfläche des erfassten Objekts durch Wahl der Toleranz angenähert ist	Transfer		3D	digital			Datenerfassung	Flächenmodell	
			TS1.5	parametrische Rückführung mit Regelgeometrien (CAD)	Software zur Nachbildung von Scandaten mithilfe von Regelgeometrien und Konstruktionselementen zur vollständigen Integration und Weiterverarbeitung sowie Anpassung in CAD	Transfer		3D	digital			Datenerfassung	Volumenmodell	
	TS2	Fertigung	TS2.1	CAM (CNC)	Software zur Erstellung von NC-Codes zur Umsetzung von digitalen Modellen mittels spanender Werkzeugmaschinen	Transfer		3D	digital			-	-	
			TS2.2	3D-Slicer (RP)	Software zur Erstellung von Herstellungsprogrammen für Additive Fertigungsanlagen auf Basis digitaler Modelle	Transfer		3D	digital			-	-	
	TS3	Transfer	TS3.1	Formattransfer	Software zur Umwandlung von beispielsweise digitalen Modelldaten in unterschiedliche Dateiformate bei beibehaltung der enthaltenen Informationen bezüglich des dargestellten Modells	Transfer		3D	digital			-	-	
Transfer Hardware	TH1	Opt. Datenerfassung 2D	TH1.1	Standargeräte zur Datenerfassung (Scanner, Digitalkamera, etc.)	Hardware zur Erfassung zweidimensionaler, physischer Vorlagen und Wandlung in digitale Abbildung	Transfer		2D	digital			Software	Pixel-Grafik	
	TH2	Optische Datenerfassung / 3D Scan	TH2.1	Tomografie	Verfahren zur Erzeugung von Volumenmodellen des zu vermessenden Körpers mithilfe von (Röntgen-)Strahlung, wodurch sowohl Oberflächen als auch innere Strukturen erfasst werden können	Transfer		3D	digital			Software	Punktwolke	
			TH2.2	Lasertriangulation	Verfahren zur Digitalisierung von Oberflächen mittels Laser und Erfassung der Reflektion zur Bestimmung der Entfernung über Winkelfunktionen	Transfer		3D	digital			Software	Punktwolke	
			TH2.3	Photogrammetrie	Verfahren zur Erzeugung dreidimensionaler Modelle von Objekten berechnet aus mehreren Fotografien durch Triangulation relevanter und korrespondierender Objektpunkte	Transfer		3D	digital			Software	Punktwolke	
			TH2.4	Strukturiertes Licht / Streifenprojektion	Verfahren zur Erfassung von Oberflächen, welche aus Bildinformationen mehrerer Kameras von mit wechselnden Streifen projizierten Objekten durch Triangulation ermittelt werden.	Transfer		3D	digital			Software	Punktwolke	
			TH2.5	Laufzeitverfahren	Verfahren zur Rekonstruktion von Oberflächen durch Ermittlung der Entfernung zwischen Oberflächenpunkten und Messgerät über die Zeitdifferenz zwischen ausgesendetem Signal (Laser) und empfangenem	Transfer		3D	digital			Software	Punktwolke	Terrestrische Laser-Scanner
	TH3	Taktile Datenerfassung	TH3.1	Koordinatenmessmaschine	Verfahren zur Erfassung von Oberflächendaten durch punktwisen Abtasten und Festhalten der absoluten Position	Transfer		3D	digital			Software	Punktwolke	
			TH3.2	Messwerkzeuge	Klassische Werkzeuge zur Vermessung von Objekten	Transfer		3D	kein Modell			-	Messwerte	

Tabelle 3.6: Übersicht und Beschreibung der Werkzeuge (Fortsetzung)



Typ		Eingabe Hardware											
Notation	Bezeichnung	Standard-Umgebung					VR- / AR-Umgebung						
		DV1	EH1.1	EH1.3	EH1.4	EH2.1	EH3.1	DV3	EH1.2	EH1.4	EH2.1	EH2.2	EH3.1
		Standard-Eingabegeräte (Maus, Tastatur, Space mouse, etc.)	Grafik Tablet (Touch)	Grafik Tablet Screen (Touch)	Gestensteuerung berührungslos (Leap Motion)	3D Stylus	Controller	Grafik Tablet Screen (Touch)	Gestensteuerung berührungslos (Leap Motion)	VR Datenhandschuh	3D Stylus	Haptic Glove	
Gestaltung Software	GD1.11	Pixel-Grafik 2D	K	K	K	X	K	X	X	X	X	X	X
	GD1.12	Pixel-Grafik 3D	K	K	K	X	K	X	E / F	F	F	F	F
	GD1.21	Vector Grafik 2D	K	K	K	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD1.22	Vector Grafik 3D	K	K	K	X	X	K	X	F	F	F	F
	GD1.3	2D Kantenmodell (Technische Zeichnung)	K	P	P	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD2.1	3D Kantenmodellierung	K	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD2.2	Polygonmodellierung direkt (CAS)	K	X	P	E	P	K	X	E	E	E	E
	GD2.3	Flächen approximiert direkt (CAS)	K	X	X	E	P	K	F	F	F	E	E
	GD2.4	Flächen exakt direkt (CAS/Strak)	K	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD2.5	Flächen exakt parametrisch (CAS/Strak)	K	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD2.6	Flächen generativ	K	X	X	X	X	K	X	X	X	X	E
	GD2.7	CSG/B-Rep/Hybrid direkt (CAD)	K	X	P	X	X	K	F	F	X	X	X
	GD2.8	CSG/B-Rep/Hybrid parametrisch (CAD)	K	X	F	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD2.9	CSG/B-Rep/Hybrid feature (CAD)	K	X	F	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD2.10	Virtual Clay Modeling / Digital Sculpting (Voxel)	K	X	P	P	K	K	X	P / F	E	E	E
	GD3.1	Rendering (Bildsynthese)	K	X	K	X	X	K	X	K	X	X	X
	GD3.2	Animation	K	X	P	X	X	X	X	X	X	X	X

Abk.	Bezeichnung	Beschreibung	
K	eingesetzte Kombination	nutzbare / etablierte Lösung	[3D SYSTEMS 2017], [ARAÚJO ET AL. 2013], [AUTODESK 2020b], [AUTODESK 2020d], [AUTODESK 2020g], [AUTODESK 2020h], [BUTTERWORTH ET AL. 1992], [CHMELIK 2011], [CHMELIK 2013], [DIGITAL 2014], [DUDLEY ET AL. 2018], [FOUNDRY 2020], [FLEISCH ET AL. 2004], [FUGE ET AL. 2012], [GOOGLE 2020], [GRAVITY SKETCH 2020], [JERALD ET AL. 2013], [KAUFMANN & SCHMALSTIEG 2006], [KEEFE ET AL. 2008], [MINE ET AL. 2015], [MOI3D 2014], [PARK ET AL. 2017], [PIXOLOGIC 2020], [PONTO ET AL. 2013], [SHAPR3D 2020], [SIXENSE 2017], [TAKALA ET AL. 2013], [ULTRALEAP 2019], [ULTRALEAP 2020], [VINAYAK & RAMANI 2015], [WACOM 2020], [WESCHE & SEIDEL 2001]
P	nutzbare Kombination	technisch möglich und nutzbar, jedoch bisher nur bedingt eingesetzt	
E	Entwicklungsbedarf	potenziell interessante Lösung / im Entwicklungsstadium	
F	Forschungsbedarf	theoretisch mögliche, bisher (kommerziell) unbefriedigende Lösung   im Forschungsstadium	
X	keine Kombination	nicht mögliche, betrachtete oder vielversprechende Lösung	

Tabelle 3.7: Gestaltungswerkzeuge - Software-Hardware-Kombination



### 3.2.3.3 Digitale Gestaltungswerkzeuge und Eingabegeräte

Im Kontext des technischen Designs können in Hinblick auf die Gestaltung eine Vielzahl an digitalen Werkzeugen eingesetzt werden, die über die klassischen Ansätze der Konstruktionswerkzeuge hinaus gehen, da hierbei insbesondere die Formgebung fokussiert wird. Dies können beispielsweise Werkzeuge aus dem Bereich des Designs oder der Computeranimation sein, die in der Übersicht in Tabelle 3.6 berücksichtigt sind. Gemein ist diesen Werkzeugen die Notwendigkeit von Ein- und Ausgabegeräten, um die Modellierung vorzunehmen und zu bewerten. Anhand der untersuchten Werkzeuge ist eine Vielzahl an theoretischen Kombinationen möglich. Dies beginnt zunächst auf Basis der Umgebung. Diese kann zum einen die klassische 2D Computerumgebung sein. Hierbei etabliert sind Standard-Ein- und Ausgabegeräte wie Tastatur, Maus und 2D Monitor. Die zweite mögliche Umgebung ist die VR-Umgebung. Auch hier existiert eine Vielzahl an Ein- und Ausgabegeräten, wie der Übersicht zu entnehmen ist. Neben den Standard-Geräten existieren für beide Umgebungen zahlreiche Spezial-Ein- und Ausgabegeräte, die teils etabliert und sich teils noch im Stadium der Forschung befinden. In Tabelle 3.7 sind die verschiedenen Werkzeuge dargestellt. Anhand einer umfassenden Recherche zum Stand der Technik und Forschung wurden die möglichen Kombinationen hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit und des aktuellen Einsatzes in der Forschung und praktischen Anwendung untersucht. In den Zellen der Tabelle ist die Bezeichnung und Bewertung der Kombination aus Gestaltungssoftware (Zeilen) und Eingabehardware (Spalten) eingetragen, zum Beispiel die Kombination in virtueller Umgebung aus Flächenmodellierung approximiert direkt (CAS) und VR Datenhandschuhen (GD2.3\_DV3\_EH2.2). FUGE ET AL. [2012] untersuchen hierzu den Ansatz eines handschuhbasierten Eingabegeräts zur Gestaltung und Bewertung von Designideen auf Basis von Flächenmodellen in virtueller oder augmentierter Umgebung.

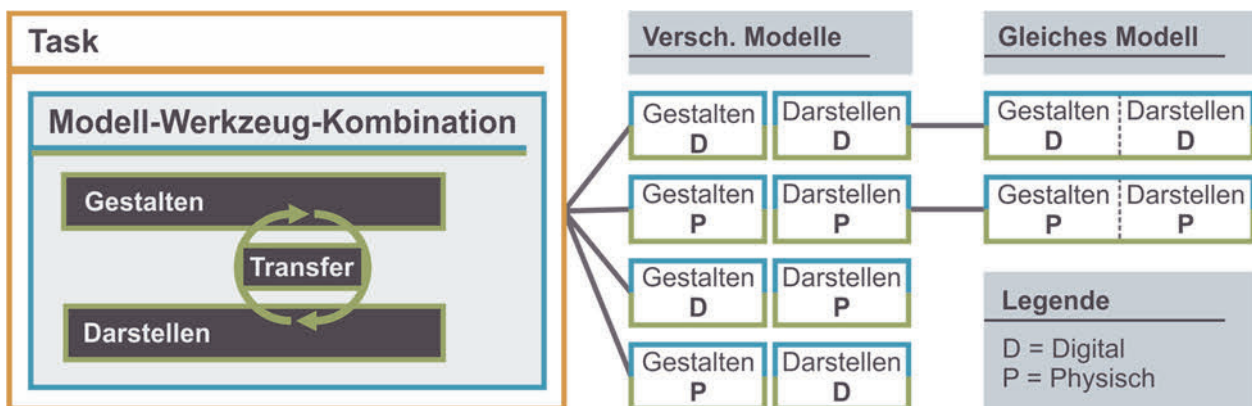
Diese Untersuchung und Übersicht dient als Grundlage und Ausgangsbasis für die Modell-Werkzeug-Auswahl für den entsprechenden Anwendungsfall, um passende und neue Möglichkeiten aufzuzeigen. Die Matrix kann sowohl anhand der Software als auch der Hardware betrachtet werden und liefert hierzu mithilfe der angegebenen Legende eine Einschätzung zur allgemeinen Nutzbarkeit der Kombination. Eine weitere Betrachtung der Kombinationen für den konkreten Anwendungsfall erfolgt im Rahmen der Vorgehensweise der Modell-Werkzeug-Auswahl in Kapitel 6.

### 3.2.4 Modell-Werkzeug-Kombinationen

Basierend auf den zuvor beschriebenen Untersuchungen zu Produktmodellen und Werkzeugen erfolgt in diesem Abschnitt die Betrachtung der notwendigen Zusammenführung dieser für die Anwendung. Hierfür kommen grundsätzlich Werkzeuge und Modelle in Kombination vor, da sie sich gegenseitig bedingen. Die Anwendung von Werkzeugen erfolgt grundsätzlich an Modellen und Modelle wiederum benötigen unterschiedliche Werkzeuge, um dargestellt und gestaltet zu werden. Um funktionsfähige Werkzeug-Modell-Kombinationen zu erhalten, ist es bei der Arbeit in unterschiedlichen Umgebungen (physisch oder virtuell), aber auch in der gleichen Umgebung notwendig, Module aus Einzelkombinationen bilden zu können, um spezifische Aufgaben am Modell vollständig abbilden und durchführen zu können. Diese Module können als kleinste nutzbare Einheit der Tätigkeiten 'Gestalten' und 'Darstellen' verstanden werden. Diese können dabei ein Direktmodul oder ein Modul mit Transferbaustein darstellen. Diese Module bilden die Grundlage für die Vorgehensweise zur Modell-Werkzeug-Auswahl in Kapitel 6. Hierzu werden zunächst die grundsätzlich möglichen Varianten ermittelt und anhand dieser die Werkzeuge zusammengeführt sowie deren Kombinationsmöglichkeit bewertet.

#### 3.2.4.1 Einteilung von Werkzeug-Modell-Kombinationen

Entsprechend der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Zusammenhängen von Werkzeugen und Modellen, erfolgt die Zusammenführung dieser auf oberster Ebene zwischen den Tätigkeiten Gestalten und Darstellen, da diese beiden Tätigkeiten immer in Kombination erfolgen. Die sich hieraus ergebenden möglichen Kombinationen hinsichtlich der verschiedenen Umgebungen (physisch oder virtuell) und der damit verbundenen Transfer-Notwendigkeit sind in Abbildung 3.6 dargestellt.



**Abbildung 3.6:** Kombinationsmöglichkeiten von Gestalten und Darstellen

Erfolgt die Darstellung und die Gestaltung in unterschiedlichen Modellwelten, ist ein Transfer notwendig, dessen Ausprägung im Folgenden weiter spezifiziert wird. Erfolgen die beiden Tätigkeiten in der gleichen Umgebung, kann dies entweder am gleichen Modell (rechte Spalte) erfolgen oder aber auch an unterschiedlichen Modellen (linke Spalte). Auch der hierfür notwendige Transfer wird im Folgenden beschrieben. Die sich hierbei bereits ergebende Frage hinsichtlich der richtigen Umgebung für die konkrete Aufgabe, der entsprechend Abbildung 3.6 die Modell-Werkzeug-Kombination umgibt, wird detailliert in Kapitel 3.2.5 beschrieben.

#### **3.2.4.2 Zusammenführen der Werkzeuge**

Hinsichtlich der Zusammenführung der Werkzeuge auf oberster Ebene wurden diese, basierend auf der Einteilung der Basistechnologien, systematisch gegenübergestellt und deren Kombinationsmöglichkeit untersucht und bewertet. Die Beurteilung der Kombinationsfähigkeit basiert auf den Voruntersuchungen zu den Werkzeugen und Modellen in Kapitel 3.2.2 und 3.2.3 sowie auf der Recherche zum Stand der Technik und Forschung in Kapitel 2. Dementsprechend wurde untersucht, welche Werkzeuge und Modell(umgebungen) kombinierbar sind und an welcher Stelle entsprechend der grundsätzlichen Einteilung in Abbildung 3.6 ein Transfer notwendig ist. Die entsprechende Übersicht ist der Matrix in Tabelle 3.8 zu entnehmen. Die Bewertung der Kombinationsfähigkeit erfolgt hierbei in vier Stufen. Eine direkte Kombination gibt an, dass die Gestaltung und Darstellung am gleichen Modell stattfinden kann bzw. dass das Modell der Gestaltung direkt für die entsprechend eingestufteten Darstellungs-Werkzeuge eingesetzt werden kann. Als Beispiel kann das mit dem Werkzeug GD2.2 erzeugte Polygonmodell direkt für die Darstellungs-Werkzeuge der Kategorie DV1 bis DV3 eingesetzt werden. Für eine eindeutige Benennung der Kombinationen für die weitere Anwendung setzt sich die Notation aus dem Werkzeug der Gestaltung und der Darstellung zusammen, beispielsweise GD2.2\_DV3.1 für die Gestaltung mittels Polygonmodellierung direkt und Darstellung mittels stereoskopischem Display. In Abgrenzung zur Definition des Transfers in Kapitel 3.2.1.4 wurde eine weitere Stufe, der Quasi-direkt Transfer, eingeführt, um eine differenziertere Beurteilung der Kombination vornehmen zu können. Hierbei ist eine Aufbereitung notwendig, jedoch kein eigenständiger Transfer mit zusätzlichem Hard- und Softwareeinsatz. Die Aufbereitung ist hierbei als Teil der Darstellung zu verstehen und kein eingeständiges Transfer-Werkzeug. Dies ist beispielsweise bei der Kombination GD2.7\_DP2.6 der Fall. Für die Darstellung des mittels CAD direkt gestalteten Volumenmodells als additiv gefertigtes physisches Modell zur Darstellung ist eine Aufbereitung

bzw. Überführung der Daten notwendig. Diese steht aber in direktem Zusammenhang mit dem Darstellungswerkzeug und ist kein eigenständiges Modul. Im Gegensatz dazu steht die Kombination GP2.1\_DV3.4 aus Clay-Modellierung und Darstellung mittels Head-Mounted-Displays. Hierfür ist ein Transfer des physischen in ein digitales Modell notwendig, wofür unabhängig vom Darstellungs-Werkzeug Transfer-Werkzeuge benötigt werden. Als indirekt werden Kombinationen eingestuft, wenn eine Kombination über die Stufe des Transfers hinaus nicht möglich ist, da beispielsweise Informationen der Gestaltbeschreibung fehlen oder zu generieren wären. Somit ist keine Gleichheit zwischen dem Modell der Gestaltung und der Darstellung gewährleistet. Dies ist beispielsweise bei der Kombination GD1.11\_DP2.2 der Fall. Die digitale Grafik in 2D beinhaltet nicht alle Informationen der Gestalt, die für die Umsetzung als physisches 3D Modell notwendig wären.

Auf Basis dieser Bewertung von Gestaltung und Darstellung erfolgt im nächsten Schritt die Bewertung des Transfers und des Quasi-direkt Transfers nach gleichem Muster. Die Matrix in Tabelle 3.9 beinhaltet als Eingangsgröße die lila umrandeten Transfer-Kombinationen aus Tabelle 3.8 sowie die untersuchten Transfer-Werkzeuge. Die Bewertung der Transfer-Kombinationen orientiert sich an der Bewertung der Soft- und Hardware-Kombinationen in Tabelle 3.7. Sie bietet somit nicht nur eine Bewertung der möglichen und etablierten Lösungen, sondern auch Ansätze mit Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die in Tabelle 3.8 und Tabelle 3.9 dargestellten Matrizen bieten somit eine Übersicht über die Kombinationsfähigkeit aller in dieser Arbeit betrachteten Werkzeuge und erfüllen dabei in gleicher Weise die Anforderungen an Erweiter- und Aktualisierbarkeit. Die hierin dargestellten Module sind als kleinste nutzbare Einheit, bestehend aus Gestaltung und Darstellung sowie teilweise Transfer, zu verstehen, um eine Aufgabe auszuführen. Diese Module können weiter ergänzt, kombiniert und zusammengeführt werden, um im Sinne eines übergeordneten Entwicklungsprozesses angewendet zu werden. Die Module bilden somit die Grundlage für die weitere Betrachtung der Anwendung.



Typ			Darstellung																										
Notation	Bezeichnung	DV1	DV2					DV3				DP1	DP2									DP3			DP4				
			DV1.1	DV2.1	DV2.2	DV2.3	DV2.4	DV2.5	DV3.1	DV3.2	DV3.3	DV3.4	DP1.1	DP2.1	DP2.2	DP2.3	DP2.4	DP2.5	DP2.6	DP2.7	DP2.8	DP2.9	DP3.1	DP3.2	DP3.3	DP4.1	DP4.2	DP4.3	
			Standard-Ausgabegerät (Monitor, Tablet, Display, etc.)	Projektionsbasierte AR	Optische See-through AR Display	Video See-through AR Display	Optische See-through AR HMD	Video See-through AR HMD	Display (Stereoskopisch)	Power-Wall	CAVE	VR Head Mounted Display (HMD)	Standard-Ausgabegerät (Drucker, Plotter, etc.)	Binder Jetting / 3D-Printing (3DP)	Lasersintern (LS)	Poly-/Multi-Jet Modelling (PJM/MJM)	Stereolithographie (SL)	Digital Light Processing (DLP)	Fused Deposition Modeling (FDM)	Layer Laminated Manufacturing (LLM)	Laser-/Elektronenstrahlschmelzen (LBM/EBM)	Fused Metal Deposition	Fräsen	Drehen	Schneiden	Thermoplasten	Guss	Handarbeit	
GD1	GD1.11	Pixel-Grafik 2D	D	D	X	X	X	X	X	X	X	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD1.12	Pixel-Grafik 3D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT
	GD1.21	Vector Grafik 2D	D	D	X	X	X	X	X	X	X	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD1.22	Vector Grafik 3D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT
	GD1.3	2D Kantenmodell (Technische Zeichnung)	D	D	X	X	X	X	X	X	X	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	D	D	D	T	T	T	D
GD2	GD2.1	3D Kantenmodellierung	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
	GD2.2	Polygonmodellierung direkt (CAS)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
	GD2.3	Flächen approximiert direkt (CAS)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
	GD2.4	Flächen exakt direkt (CAS/Strak)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
	GD2.5	Flächen exakt parametrisch (CAS/Strak)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
	GD2.6	Flächen generativ	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
	GD2.7	CSG/B-Rep/Hybrid direkt (CAD)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
	GD2.8	CSG/B-Rep/Hybrid parametrisch (CAD)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
	GD2.9	CSG/B-Rep/Hybrid feature (CAD)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
	GD2.10	Virtual Clay Modeling / Digital Sculpting (Voxel)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	QDT	T	T	T	T
GD3	GD3.1	Rendering (Bildsynthese)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	GD3.2	Animation	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
GP1	GP1.1	Zeichnutensilien	T3.1	X	X	X	X	X	X	X	X	T	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	GP1.2	Tapedrawing	T	X	X	X	X	X	X	X	X	T	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
GP2	GP2.1	Clay-Modellierung	T4.1	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
	GP2.2	Modellbau / Prototypenbau	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	
	GP2.3	Oberflächenbehandlung	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Tabelle 3.8: Werkzeugmodule und Bewertung der Gestaltungs-Darstellung-Kombinationen bezüglich Transfers sowie Bündelung der Transfer-elemente (lila Umrandung)

D Direkt direkte Darstellung ohne Zwischenschritte QDT Quasi-direkt Transfer direkte Darstellung mit Zwischenschritt / Aufbereitung T Transfer Darstellung durch Transfer Schritt mit zusätzlich Hard-/Software X Indirekt Darstellung nicht möglich / zusätzliche informationsgenerierende Schritte notwendig



Typ					Transfer																Anmerkungen	
					Transfer Software									Transfer Hardware								
					TS1					TS2		TS3	TH2					TH3				
Notation					TS1.1	TS1.2	TS1.3	TS1.4	TS1.5	TS2.1	TS2.2	TS3.1	TH1.1	TH2.1	TH2.2	TH2.3	TH2.4	TH2.5	TH3.1	TH3.2		
Bezeichnung					Scandaten Erfassung	Polygonbearbeitung	nicht-parametrische Flächenrückführung	kurvenbasiert Flächenrückführung	parametrische Rückführung mit Regelgeometrien (CAD)	CAM (CNC)	3D-Slicer (RP)	Formattransfer	Standgeräte zur Datenerfassung (Scanner, Digitalkamera, etc.)	Tomografie	Lasertriangulation	Photogrammetrie	Strukturiertes Licht / Streifenprojektion	Laufzeitverfahren	Koordinatenmessmaschine	Messwerkzeuge		
Gestaltung		Darstellung																				
G/D-Modul	T1.1	GD1	Zeichensoftware	DP2	Additive Fertigung	X	X	X	X	X	X	K	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Zeichensoftware 3D (GD1.12 und GD1.22)
	T1.2	GD1	Zeichensoftware	DP3	Trennende Verfahren	X	X	X	X	X	K	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Zeichensoftware 3D (GD1.12 und GD1.22)
	T1.3	GD1	Zeichensoftware	DP4	Weitere Verfahren	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Verfahrensspezifischer Transfer bzw. Aufbereitung
		GD1.3	2D Kantenmodell (Technische Zeichnung)	DP4	Weitere Verfahren	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Modellerstellung auf Basis einer vollständigen technischen Zeichnung
	T2.1	GD2	Modellierungssoftware	DP2	Additive Fertigung	X	X	X	X	X	X	K	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	T2.2	GD2	Modellierungssoftware	DP3	Trennende Verfahren	X	X	X	X	X	K	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	T2.3	GD2	Modellierungssoftware	DP4	Weitere Verfahren	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	Verfahrensspezifischer Transfer bzw. Aufbereitung
	T3.1	GP1	Zeichnen	DV1	Monoskopische Anzeige	X	X	X	X	X	X	X	X	K	X	X	X	X	X	X	X	
	T4.1	GP2	Modellieren	DV1	Monoskopische Anzeige	K	K	K	K	K	X	X	X	X	K	K	K	K	K	P	F	
	T4.2	GP2	Modellieren	DV2	Mixed Reality	K	K	K	K	K	X	X	X	X	K	K	K	K	K	F	X	
	T4.3	GP2	Modellieren	DV3	Virtual Reality	K	K	K	K	K	X	X	X	X	K	K	K	K	K	F	X	
	T4.4	GP2	Modellieren	DP2	Additive Fertigung	K	K	P	P	P	X	K	X	X	K	K	K	K	K	F	X	
	T4.5	GP2	Modellieren	DP3	Trennende Verfahren	K	K	P	P	P	X	K	X	X	K	K	K	K	K	F	X	
	T4.6	GP2	Modellieren	DP4	Weitere Verfahren	K	K	P	P	P	X	K	X	X	K	K	K	K	K	F	X	

<b>K</b>	Kombination	etablierte Lösung	<b>P</b>	Potentielle Kombination	technisch möglich und nutzbar, jedoch bisher nur teilweise eingesetzt	<b>E</b>	Entwicklungsbedarf	potentiell interessante Lösung / im Entwicklungsstadium
<b>F</b>	Eingeschränkte Nutzung			theoretisch mögliche, bisher unbefriedigende Lösung oder Forschungsstadium		<b>X</b>	ungeeignete Kombination	nicht mögliche, betrachtete oder vielversprechende Lösung

Tabelle 3.9: Werkzeugmodule bezüglich Transfer entsprechend der Gestaltungs-Darstellung-Kombination

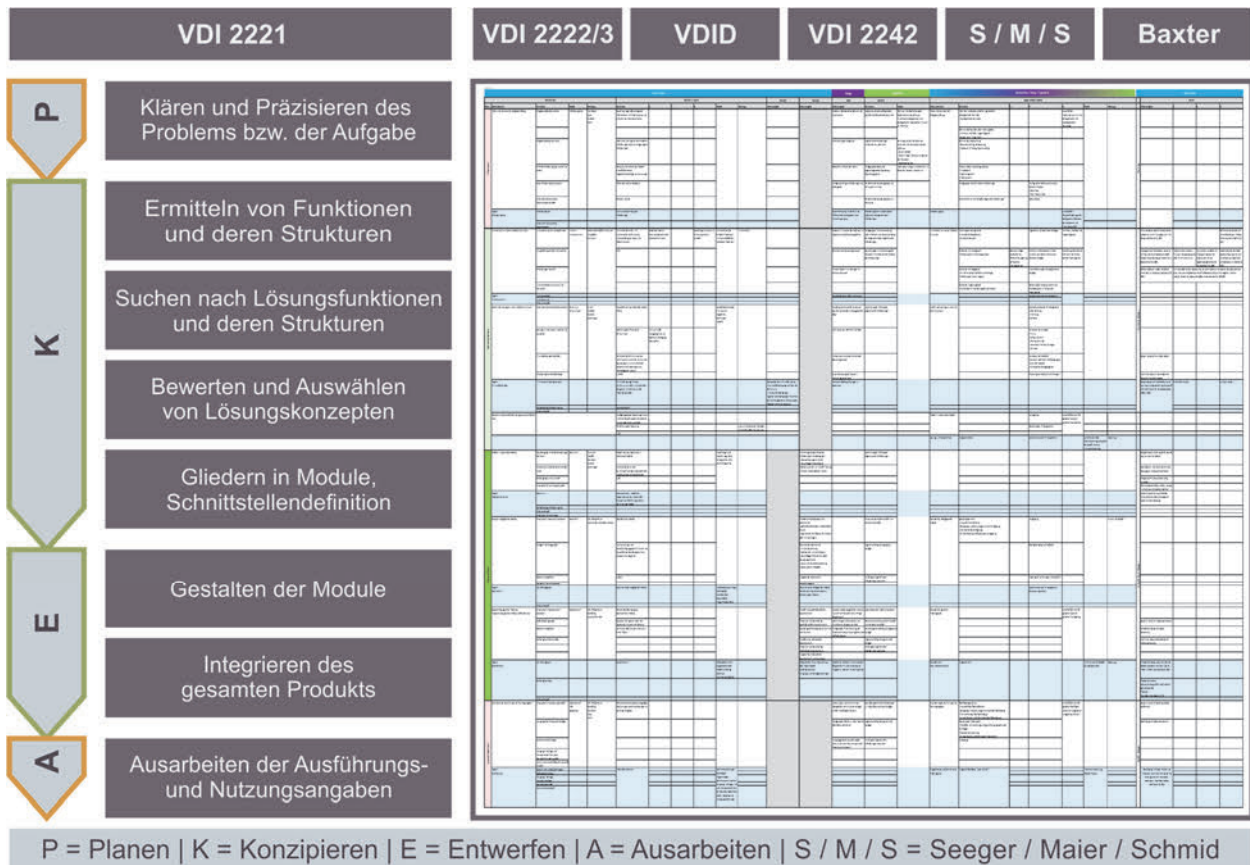
### **3.2.5 Tätigkeiten im Entwicklungsprozess**

Neben der Untersuchung der Modelle und der Werkzeuge sind die Tätigkeiten der wesentliche Aspekt hinsichtlich eines zielgerichteten Einsatzes. Anhand der Literatur und der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Grundlagen bezüglich der Produktentwicklung und den Tätigkeiten der Produktgestaltung, werden die verschiedenen Prozessansätze untersucht und grundlegende Tätigkeitsschritte zusammengetragen, um eine einheitliche Basis für eine anschließende Untersuchung der tatsächlichen Schritte und eingesetzten Werkzeuge und Modelle anhand realer Projekte im Technischen Design zu definieren.

#### **3.2.5.1 Teilaufgaben bei der Produktgestaltung**

Im Folgenden wird die Herleitung der Tätigkeitsschritte der in Kapitel 3.1.1 definierten Aufgaben bei der Produktgestaltung aufgezeigt, welche als Grundlage für die anschließende Analyse von relevanten Entwicklungsprojekten im Fachbereich Technisches Design dient. Das ermöglicht eine Validierung der untersuchten und definierten Tätigkeiten, der Modelle sowie der Werkzeuge. Ausgehend von den definierten Tätigkeiten der Richtlinien VDI 2221-1 [2019], VDI 2222-1 [1997] und VDI 2223 [2004] sowie den Tätigkeiten nach SEEGER [2005] und den Richtlinien DIN EN ISO 9241-11 [2018], VDI 2424-1 [1986] und VDI 2242 [2016] werden die Arbeitsinhalte der nutzerzentrierten Produktentwicklung, die sich über die Bereiche Technik, Ergonomie und Design erstrecken, mit Fokus auf den produktgestaltenden Tätigkeiten untersucht und definiert. Dies dient als Basis für die Untersuchung der Ist-Situation anhand repräsentativer Beispielprojekte sowie zur Ableitung von Anforderungen an die Modell- und Werkzeugwahl.

In Abbildung 3.7 sind die Phasen und Arbeitsschritte nach VDI 2221-1 [2019] als Grundeinteilung dargestellt. Die im Stand der Technik und Forschung untersuchten Entwicklungsprozesse nach SEEGER [2005], SCHMID & MAIER [2017], BAXTER [1995], VDI 2222-1 [2019], VDI 2223 [2004] und VDI 2242 [2016] werden hinsichtlich der Grundeinteilung analysiert und die hierin beschriebenen Tätigkeitsschritte verglichen und zugeordnet. Auf diese Art und Weise werden zu den Phasen und Arbeitsschritten konkrete Teilschritte definiert. Darüber hinaus werden neben den beschriebenen Arbeitsinhalten die definierten Ergebnisse gegenübergestellt. Diese Beschreibung dient als Grundlage für die folgende Analyse der Projekte hinsichtlich der durchgeführten Teilschritte und eingesetzten Werkzeuge und Modelle und ist Bestandteil der ausführlichen Beschreibung der Projekte in Tabelle A1.1 bis Tabelle A1.3 im Anhang.



**Abbildung 3.7:** Entwicklungstätigkeiten der Entwicklungsprozesse

### 3.2.5.2 Analyse von Entwicklungsprojekten

Basierend auf der zuvor beschriebenen Einteilung und Zuordnung der Teilschritte aus den Bereichen Technik, Ergonomie und Design zu den Phasen und Arbeitsschritten nach VDI 2221-1 [2019], werden mehrere durchgeführte Entwicklungsprojekte im Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design hinsichtlich der durchgeführten Teilschritte sowie den dabei eingesetzten Modellen und Werkzeugen analysiert. Ziel dieser Untersuchung ist zum einen die Einschätzung und Bewertung des aktuellen Modell- und Werkzeugeinsatzes und das Aufzeigen möglicher Potentiale sowie die Schaffung einer Vergleichsgrundlage für die Validierung der Vorgehensweise der Modell-Werkzeug-Auswahl in Kapitel 6. Die Projekte werden hierzu in anonymisierter Weise betrachtet. Anhand der Grundeinteilung werden die durchgeführten Teilschritte festgehalten und beschrieben und darauf aufbauend der Bereich (Technik, Ergonomie und Design) sowie die eingesetzten Modelle und dafür angewendeten Werkzeuge ermittelt. Die Zuordnung der Modelle basiert auf der Einteilung in Tabelle 3.4 und ist differenziert nach Modellinhalt und Repräsentationsform. Die Zuordnung der Werkzeuge basiert auf der Einteilung in Tabelle 3.6. Die Auswertung der Analyse ist für die Projekte 1 bis 3 zusammengefasst in Abbildung 3.8 dargestellt.



Projekt 1		Aktivitäten	Anzahl Teilschritte		Bereich			Modell									Werkzeuge																							
Phase	Arbeitsabschnitt	Σ	Σ	Modellbezogen	T	E	De	M1	M2	M3	R1.1	R1.2	R2.1	R2.2	R3.1	R3.2	R3.3	GD1	GD2	GD3	GP1	GP2	EH1	EH2	EH3	DV1	DV2	DV3	DP1	DP2	DP3	DP4	TS1	TS2	TS3	TH1	TH2	TH3	Σ	
Planen	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	4	6	1	■	■	■	1								1			.33							.33														3
Konzipieren	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	1	1	-	■																																			3
	Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	1	6	3	■	■	■	3				3										3																		9
	Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts	2	6	4	■	■	■	4				4							.11	.11	.11	2		2			2													27
Entwerfen	Gliedern in realisierbare Module	2	3	1	■	■	■	1								1			.33							1														3
	Gestalten maßgebender Module	2	9	7	■	■	■	5	.71	2		1				4	2		2	3						6		5		1	1									18
	Gestalten / Integrieren des gesamten Produktes	2	14	9	■	■	■	2	.22	7	1	1			6	1		5	3						8		6		1	1	1				2					19
Ausarbeiten	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangab.	3	14	9	■	■	■	1	.11	7	3	2			4			2	1	1	2				4		4		2			3								82
		Σ	17	59	34	Σ			10	8	16	4	10		17	3		4	10	8	7		22		19	2	4	1	3			2								
								Σ: 100 %									Σ: 100 %									Σ: 100 %														

Projekt 2		Aktivitäten	Anzahl Teilschritte		Bereich			Modell									Werkzeuge																								
Phase	Arbeitsabschnitt	Σ	Σ	Modellbezogen	T	E	De	M1	M2	M3	R1.1	R1.2	R2.1	R2.2	R3.1	R3.2	R3.3	GD1	GD2	GD3	GP1	GP2	EH1	EH2	EH3	DV1	DV2	DV3	DP1	DP2	DP3	DP4	TS1	TS2	TS3	TH1	TH2	TH3	Σ		
Planen	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	4	6	-	■	■	■																																		
Konzipieren	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	1	1	-	■	■																																			
	Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	1	5	2	■	■	■	2				2										2																		2	
	Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts	2	7	5	■	■	■	5				4	.80		1	.20						1							1							1				3	
Entwerfen	Gliedern in realisierbare Module	1	1	-	■	■	■																																		
	Gestalten maßgebender Module	7	48	40	■	■	■	1	.03	.39	.97	.14	.35	.03	5	.12	.20		5	.08	.10	1	.02	.07	.11		.11		5				6	.10	.08	2	.03	.05	.03	61	
	Gestalten / Integrieren des gesamten Produktes	5	5	5	■	■	■				5					5			5	.31						5		5		1										16	
Ausarbeiten	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangab.	15	36	26	■	■	■	6	.23	.20	.77	.15	.58		5	.19	.23	6	.16		.13				5		6		1	.03	.13	5	.13	5						38	
		Σ	36	109	78	Σ			8	.10	.45	.25	.29	.37	.09	11	.14	.40	11	.09	.09	.04	.03	.03	.21		22	.18	3	.03	.08	5	.04	6	.05	.08	3	.03	.03	.02	120
								Σ: 100 %									Σ: 100 %									Σ: 100 %															

Abbildung 3.8: Ergebnisse der Projektanalyse hinsichtlich der Verteilung der Arbeitsschritte und Bereiche sowie prozentuellem Einsatz von Werkzeugen und Modellen

Projekt 3		Aktivitäten	Anzahl Teilschritte		Bereich			Modell									Werkzeuge																								
Phase	Arbeitsabschnitt	Σ	Σ	Modellbezogen	T	E	De	M1	M2	M3	R1.1	R1.2	R2.1	R2.2	R3.1	R3.2	R3.3	GD1	GD2	GD3	GP1	GP2	EH1	EH2	EH3	DV1	DV2	DV3	DP1	DP2	DP3	DP4	TS1	TS2	TS3	TH1	TH2	TH3	Σ		
Planen	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	2	4	-	■	■																																			
Konzipieren	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	2	3	-	■	■	■																																		
	Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	2	9	5	■			5 1			1 .20	3 .60			1 .20			1 .14			3 .44	1 .14	1 .14				1 .14														7
	Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts	2	7	5	■			5 1				4 .80			1 .20						1 .33								1 .33								1 .33				3
Entwerfen	Gliedern in realisierbare Module	1	1	-	■	■																																			
	Gestalten maßgebender Module	8	29	26	■	■	■	15 .58	11 .42		1 .04	3 .12			12 .46	10 .38		7 .15	5 .11		3 .07		12 .26				13 .28		1 .02						4 .09	1 .02				46	
	Gestalten / Integrieren des gesamten Produktes	9	16	16	■			1 .06	15 .94		9 .56					7 .44			5 .25				4 .20				5 .25			2 .10		2 .10		2 .10						20	
Ausarbeiten	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangab.	5	9	9	■	■	■		4	5	3			3	3			3 .20	2 .13			5 .33				5 .33														15	
		Σ	31	78	61			Σ	26 .43	30 .49	5 .08	14 .23	10 .16		17 .28	20 .33		11 .12	12 .13		7 .08	1 .01	22 .24			24 .26		2 .02	2 .02		2 .02		2 .02	4 .04	2 .02				91		
									Σ: 100 %			Σ: 100 %						Σ: 100 %																							

Abbildung 3.8: Ergebnisse der Projektanalyse hinsichtlich der Verteilung der Arbeitsschritte und Bereiche sowie prozentuellem Einsatz von Werkzeugen und Modellen (Fortsetzung)

Die ausführliche Beschreibung der jeweiligen Teilschritte und der Ergebnisse ist der Tabelle A1.1 bis Tabelle A1.3 im Anhang zu entnehmen. Darüber hinaus wurde bei der Analyse differenziert betrachtet, welcher Teilschritt mithilfe eines Modells durchgeführt wurde und welches Ziel das Modell hierbei besaß. Diese sind in den Tabellen im Anhang grau markiert. Die Auswertung der Anzahl und Verteilung der modellbezogenen Teilschritte ist in Abbildung 3.8 in Form der grünen Balken dargestellt. Die prozentuale Auswertung (Wert rechts unten je Kästchen) des spezifischen Modell- und Werkzeugsinsatzes basiert auf der Häufigkeit des Einsatzes (Wert links oben je Kästchen) innerhalb des jeweiligen Arbeitsschrittes und ist unterteilt nach Modellinhalt, Repräsentationsform und Werkzeug. Bei Projekt 1 wurden beispielsweise innerhalb des Arbeitsschrittes 'Klären und präzisieren der Aufgabenstellung' der Phase 'Planen' vier Aktivitäten mit sechs Teilschritten aus den Bereichen Technik, Ergonomie und Design durchgeführt. Davon war ein Teilschritt modellbezogen. Hierfür wurde ein 'Konzept-/Proportionsmodell' (M1) als 'Digitales Modell 3D' (R3.2) genutzt, was jeweils 100 % Einsatz je Kategorie (Modellinhalt und Repräsentationsform) entspricht. Bezüglich der Kategorie Werkzeuge wurden drei unterschiedliche Werkzeuge (GD2, EH1 und DV2) jeweils einmal eingesetzt, was einem Einsatz von 33 % je Werkzeug, bezogen auf alle eingesetzten Werkzeuge dieses Arbeitsschrittes, entspricht. Bezogen auf das Gesamtprojekt ist die Anzahl an Einsätzen und der prozentuale Anteil in der untersten Zeile je Spalte summiert angegeben. Das ermöglicht einen Überblick über die Anzahl und Verteilung aller eingesetzten Modelle (Modellinhalt und Repräsentationsform) und Werkzeuge im Projekt.

Bezüglich des Modelleinsatzes zeigt sich eine typische Verteilung eines steigenden Modellinhalts mit den Phasen der Entwicklung über alle Projekte. Insbesondere in der Phase Entwerfen steigt der Anteil modellbezogener Teilschritte deutlich an. Die Analyse der Repräsentationsform zeigt bei allen Projekten eine starke Neigung zu bekannten und etablierten Formen in Kombination mit dem Modellinhalt. Die ermittelten Schwierigkeiten der Teilschritte deutet an, dass hierin Potentiale für eine zielgerichtetere Auswahl mit Hilfe des Ansatzes liegen. Dies bezieht sich sowohl auf die Bewertung anhand der Modelle mit unterschiedlichen Entscheidungsträgern als auch auf die gestaltenden Tätigkeiten am Modell. Entsprechend der Repräsentationsform zeigt sich auch bei der Wahl der Gestaltungswerkzeuge ein hoher Anteil an klassischen, physischen Werkzeugen, beispielsweise zum Festhalten erster Ideen, aber auch an digitalen Werkzeugen zum Umsetzen dreidimensionaler Modelle, wie beispielsweise CAD, was insbesondere in frühen Phasen zu einem gesteigerten Aufwand und Schwierigkeiten bei schnellen

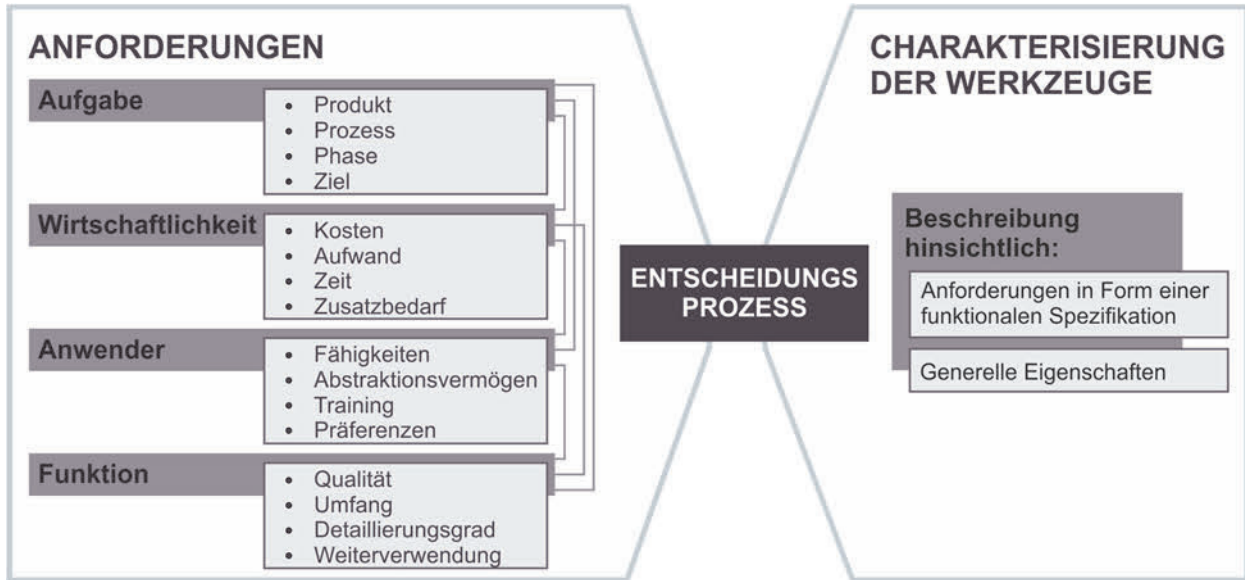
Änderungen führt. Die Bewertung und Weiterverwendung der Modelle haben sich an mehreren Stellen in den Projekten als herausfordernd und nicht optimal gezeigt. Dies wird zusätzlich durch die geringe Verwendung von Transferwerkzeugen gestützt, was zeigt, dass sowohl die Gestaltung als auch die Darstellung häufig am gleichen Modell durchgeführt wurde. Dies legt die Annahme nahe, dass für die jeweilige Tätigkeit nicht die ideale Modellumgebung gewählt wurde. Basierend auf diesen Voruntersuchungen zur Aufgabe, den Modellen und den Werkzeugen wird im folgenden Abschnitt die Zusammenführung dieser Bereiche beschrieben.

### **3.2.6 Entscheidungsprozess zur Modell-Werkzeug-Auswahl**

Basierend auf den Grundlagen und dem Aufbau des Ansatzes zur Modell-Werkzeug-Auswahl in Kapitel 3.1 sowie den Untersuchungen zu Produktmodellen, Werkzeugen und deren Kombination in den vorherigen Abschnitten, erfolgt nun die Beschreibung des Vorgehens zur zielgerichteten Verbindung der Werkzeugmodule mit den Aufgaben aus Prozesssicht. Dieses Vorgehen orientiert sich an den Voruntersuchungen nach OBERHOFER & MAIER [2018]. Um eine Entscheidung über Werkzeuge und Modelle zu treffen, müssen verschiedenen Perspektiven, die sich in der Anwendung ergeben, berücksichtigt werden. Auf der einen Seite stellt der definierte Prozess Anforderungen an die zu erledigenden Aufgaben. Dies ist entscheidend für die Wahl des entsprechenden Modells. Um das gewünschte Ergebnis zu erzielen, gibt es dafür nicht nur ein geeignetes Werkzeug, sondern eine Reihe von verschiedenen Möglichkeiten. Es handelt sich also um ein Zusammenspiel verschiedener Randbedingungen, die in aufgaben- und prozessbasierte, ökonomische, nutzer- und funktionsbasierte Faktoren zusammengefasst werden können. Diese Anforderungen beeinflussen sich oft gegenseitig, z. B. hängt der Faktor Zeit vom Ziel der Entwicklungsaufgabe sowie von den Fähigkeiten und Präferenzen des Benutzers ab, was es unmöglich macht, eine einheitliche und allgemeine Bewertung von Werkzeugen vorzunehmen. Auf der anderen Seite dieser Anforderungen stehen die Werkzeuge mit ihren spezifischen Eigenschaften, die in vielerlei Hinsicht übereinstimmen oder nicht übereinstimmen können. Abbildung 3.9 zeigt dieses Zusammenwirken und dessen Einflussfaktoren. Um ein gezieltes Zusammenwirken von Aufgaben, Werkzeugen und Modellen zu erreichen, ist eine Charakterisierung im Sinne einer anforderungsgerechten, funktionalen Spezifikation der Werkzeuge notwendig. Diese basiert in ihrem Grundsatz auf der bereits getroffenen Einteilung und Beschreibung in Kapitel 3.2.3. Wie der grundlegende Entscheidungsprozess in Abbildung 3.9 verdeutlicht,



ist darüber hinaus eine detailliertere Charakterisierung anhand der Anforderungen in Bezug auf die jeweilige individuelle und konkrete Fragestellung notwendig. Da diese in Abhängigkeit zur Aufgabe variieren können und somit eine durchgängig einheitliche Bewertung nicht zielführend ist, sind die Kriterien als Leitfaden zur Klärung der wesentlichen Eigenschaften definiert.



**Abbildung 3.9:** Grundlegender Entscheidungsprozess der Modell-Werkzeug-Auswahl in Anlehnung an [OBERHOFER & MAIER 2018]

Im Rahmen der Voruntersuchung, welche durch den Autor durchgeführt wurde [OBERHOFER & MAIER 2018], ist eine Bewertung von Modellierungswerkzeugen auf Grundlage der beschriebenen Kriterien des Aspektes Funktion durchgeführt worden (siehe Tabelle 3.10).

	Kategorie	Kriterium	Charakterisierung	
			Clay-Modellierung	Polygon-Modellierung
Funktion Gestaltung	Anwendung	Intuitivität	Hohe Intuitivität durch direkte Modellierung, erste Ergebnisse direkt umsetzbar	Einarbeitung in Software notwendig, einfache Ergebnisse via Drag and Drop realisierbar
		Erlernbarkeit	Handwerkliche/künstlerische Fähigkeiten für hochklassige Ergebnisse notwendig (teilweise erlernbar)	Erlernbarkeit für professionellen Einsatz durch Schulungen
		Abstraktionsgrad	Direkte Umsetzung der vorgestellten Formen, keine Abstraktion notwendig	Abstraktion der gewünschten Ergebnisse in Bezug auf die durchzuführenden Schritte notwendig
		Begleitende Bewertung	Vereinfachte visuelle / haptische (ohne Kraffteinleitung) Bewertung während der Modellierung	Vereinfachte, visuelle Bewertung während des Modellierens möglich

**Tabelle 3.10:** Charakterisierung von Werkzeugen am Beispiel der Clay- und Polygon-Modellierung in Anlehnung an [OBERHOFER & MAIER 2018]

Kategorie	Kriterium	Charakterisierung	
		Clay-Modellierung	Polygon-Modellierung
Umsetzung	Teilgestalten	Hauptsächlich für Formen und Oberflächen passend Aufbau nur teilweise umsetzbar	Vorzugsweise für Aufbau, Form und Oberfläche passend Farbe und Grafik vereinfacht
	Aufbauelemente	Tragwerksgestalt aus Steifigkeitsgründen nicht umsetzbar, Funktionsgestalt limitiert auf Design und Ergonomie	Alle Aufbauelemente hinsichtlich Darstellung umsetzbar, jedoch keine Funktionalität
	Genauigkeit	Hauptsächlich Konzept-Qualität (visueller Eindruck) oder hoher zusätzlicher Aufwand	Begrenzt auf Konzept-Qualität (visuelle Abschätzung / Überprüfung schwierig)
	Detaillierungsgrad	Hohes Maß an formalen Details / Filigranität begrenzt	Hoher Grad an formalen Details, Scharfkantigkeit begrenzt
	Geometrie / Dimension	Steigender Aufwand mit der Größe / Optimum Handbetätigt bis Auto	Keine Einschränkungen bezüglich Größe
	Komplexität	Zusammenbauten kaum möglich, lediglich wenige Teile	Zusammenbauten möglich, keine Beschränkung hinsichtlich der Teile
Vorgehen	Dokumentation	Keine Dokumentation der durchgeführten Schritte oder von Metainformationen	Dokumentation der durchgeführten Schritte und von Meta-Informationen
	Variantenableitung	Zusätzlicher Aufwand notwendig (RE/Fräsen)	Direkte Ableitung von Varianten / Kopien
	Undo (rückgängig machen)	Kein Widerrufen von Schritten aufgrund des manuellen Prozesses	Chronologisches Zurückkehren zu vorherigen Ständen
Weiterverwendung	Direkte Nutzung	Detaillierung, Visualisierung und Analyse basierend auf dem physischen Modell	Detaillierung, Visualisierung und Analyse auf Basis des STL Modells
	Transfer	Vollständiger Reverse Engineering Prozess für weitere Verwendung notwendig	Nachbau notwendig aufgrund der limitierten Weiterentwicklung des vereinfachten Oberflächenmodells

**Tabelle 3.10:** Charakterisierung von Werkzeugen am Beispiel der Clay- und Polygon-Modellierung in Anlehnung an [OBERHOFER & MAIER 2018] (Fortsetzung)

Der beschriebene Ansatz der Modell-Werkzeug-Auswahl sowie die durchgeführten Untersuchungen zu den Produktmodellen, den Werkzeugen sowie den Aufgaben und Randbedingungen innerhalb des Entwicklungsprozesses betätigen das Modell als zentralen Ausgangspunkt des Entscheidungsprozesses. Die Recherche zum Stand der Technik und Forschung sowie die durchgeführten Voruntersuchungen zeigen, dass auf Basis der verfügbaren Informationen in Bezug auf die Tätigkeiten im Bereich der nutzerzentrierten Produktentwicklung, die sich durch ein enges Zusammenspiel der Aspekte Technik, Ergonomie und Design auszeichnet, noch keine fundierte Entscheidung zur Modellauswahl getroffen werden kann. Insbesondere hinsichtlich der Wahrnehmung aus Anwendersicht, differenziert nach den Teilgestalten des Produkts und den daraus resultierenden Besonderheiten, liefern derzeitige Ansätze keine ausreichend genaue Aussage bezüglich einer Modellwahl und den dafür notwendigen Werkzeugen zur Gestaltung und Darstellung. Die Vielzahl an Werkzeugen zur Darstellung von Modellen aus unterschiedlichen Welten wird nicht hinreichend gegeneinander abgewogen und direkt miteinander

---

verglichen. Dementsprechend werden auch mögliche Unterschiede bezüglich der Detaillierung der Modelle nicht im Kontext der verschiedenen Repräsentationsformen untersucht. Die Detaillierung hat einen erheblichen Einfluss auf den Aufwand zur Gestaltung und Darstellung von Modellen sowie auf die Bewertbarkeit von Produkteigenschaften (siehe Kapitel 2.3.2) und ist somit ein wesentliches Kriterium bei der Wahl von Modellen. Die Frage nach der geeigneten Repräsentationsform und der für die Aufgabe notwendigen Detaillierung des Modells bezüglich der beschriebenen Randbedingungen bleibt derzeit unbeantwortet. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine Studie zur Modellwahrnehmung durchgeführt, die diese notwendigen Fragestellungen untersucht, mit dem Ziel die Modellauswahl des beschriebenen Auswahlprozesses zu konkretisieren.

## 4 Studienplanung und Modellerstellung

Auf Basis der theoretischen Überlegungen zum Modell- und Werkzeugeinsatz in der Produktentwicklung sowie deren Zusammenhang erfolgt in Kapitel 4 die Planung der empirischen Untersuchung zum Einsatz von Produktmodellen und deren Eignung für bewertende Aufgaben. Die Studie begründet sich somit auf der vorherigen Entwicklung des Ansatzes und die Ergebnisse dienen als Grundlage für die weitere Vorgehensweise zur Modell-Werkzeug-Auswahl. Die empirische Untersuchung der Modelle, im Folgenden Modell-Studie genannt, wird durchgeführt, um eine anwendungsbezogene Betrachtung von Modellen und deren Repräsentationsformen zu schaffen und damit die Erkenntnisse der theoretischen Untersuchung zu stützen. Es wird eine experimentelle Versuchsplanung mit wiederholten Messungen gewählt, womit es sich um eine Querschnittsstudie handelt. Dabei können Störeinflüsse gezielt kontrolliert werden und die benötigte Stichprobengröße erweist sich als ökonomisch [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007, S. 25 f]. Der Versuchsplan schafft die Verbindung zwischen der Problemstellung, dem Versuchsaufbau, der Versuchsdurchführung sowie der anschließenden statistischen Auswertung [SARRIS 1992, S. 4]. Ziel ist die Spezifizierung von Eigenschaften und Bewertung der Eignung physischer bis virtueller Modelle und deren Detaillierung für unterschiedliche bewertende Aufgaben. Dazu erfolgt zunächst die Beschreibung des Versuchsplans und des Versuchsdesigns in Kapitel 4.1. Anschließend werden in Kapitel 4.2 die Untersuchungsmodelle hergeleitet und deren Umsetzung beschrieben.

### 4.1 Versuchsplanung und -design

Im Rahmen des Versuchsplans wird der Aufbau der Modell-Studie beschrieben und die Beziehung zwischen der abhängigen und der unabhängigen Variable hergestellt [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007, S. 20]. Es erfolgt die Einordnung und Festlegung der Studie hinsichtlich ihres Aufbaus. Dieser richtet sich grundsätzlich nach dem Trichtermodell der wissenschaftlichen Forschung [SEDLMEIER 2002, S. 45 ff]. Hierzu werden zunächst die Forschungsfragen (vgl. Kapitel 4.1.1) aufgestellt und diskutiert, die sich aus der Theorie des Ansatzes in Kapitel 3 ableiten. Diese bilden die Grundlage für die Studie bzw. das Experiment. Durch die folgende Studienplanung und die Operationalisierung der unabhängigen und abhängigen Variablen werden die operationalen Hypothesen abgeleitet. Diese beschreiben den vorausgesagten Ausgang der Untersuchung aus Sicht des Forschers in Bezug auf die zuvor definierte Forschungshypothese [BORTZ & DÖRING 2006,



S. 492]. Die statistischen Hypothesen (vgl. Kapitel 5.2.1.3, 5.3.1.1, 5.4.1.1 und 5.5.1) resultieren aus der konkreten Planung der statistischen Auswertung und den dafür geplanten Verfahren in Kapitel 5.2.1, 5.3.1, 5.4.1 und 5.5.1 [BORTZ & DÖRING 2006, S. 492]. Die operationalen oder statistischen Hypothesen beschreiben somit, wie die Forschungshypothesen in der Untersuchung konkret überprüft werden. Hierzu wird das Versuchsdesign hinsichtlich Art und Größe der Stichprobe, die Durchführung sowie die Inhalte der Befragung definiert (vgl. Kapitel 4.1.2) [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007, S. 17].

#### 4.1.1 Forschungsfragen und Forschungshypothesen

Bei den Forschungsfragen oder auch Forschungshypothesen (FH) handelt es sich um „aus Voruntersuchungen, eigenen Beobachtungen, Überlegungen und wissenschaftlichen Theorien abgeleitete Vermutungen bezüglich des in Frage stehenden Untersuchungsgegenstands“ [BORTZ & DÖRING 2006, S. 491]. Der in Kapitel 3 hergeleitete und beschriebene Ansatz zu Modell- und Werkzeugauswahl innerhalb der Produktentwicklung, basierend auf den Grundlagen in Kapitel 2, führt zu Fragestellungen bezüglich des der Entwicklung und Gestaltung zugrundeliegenden Modells, die im Rahmen der Modell-Studie untersucht werden sollen. Wie sich durch die Herleitung des Ansatzes gezeigt hat, ist der Dreh- und Angelpunkt bei der Werkzeugauswahl, in Bezug auf die Tätigkeit Bewerten, das Modell in seiner spezifischen Ausprägung. Darauf aufbauend werden die drei folgenden Forschungshypothesen definiert:

- FH 1: Die verschiedenen Möglichkeiten ein Modell zu präsentieren unterscheiden sich in ihrer Eignung für die verschiedenen bewertenden Aufgaben und Fragestellungen in Bezug auf die Produktgestalt.
- FH 2: Der Modellinhalt bzw. der Detaillierungsgrad wirkt sich auf die Bewertungsmöglichkeiten am Modell aus.
- FH 3: Bei der Bewertung anhand von Modellen gibt es unterschiedliche Präferenzen bezüglich der Modellausprägungen in ihrer Repräsentationsform und dem Modellinhalt aus der Sicht des Anwenders.

Die Recherche zu diesen Fragestellungen in Kapitel 2.3. zeigt, dass es insbesondere bezüglich einer ganzheitlichen Betrachtung der Produktgestalt im Spannungsfeld von Technik, Ergonomie und Design unter Berücksichtigung und im direkten Vergleich neuartiger Technologien im Bereich der physischen und virtuellen Modelle keine ausreichenden Studien und Basis gibt, um eine repräsentative und konkrete Entscheidung bezüglich spezifischer bewertender Fragestellungen zu treffen. Auf dieser

Grundlage und den beschriebenen Forschungshypothesen werden im Folgenden die unabhängigen und abhängigen Variablen definiert und die operationalisierten Hypothesen durch Herleitung des Studienplans abgeleitet.

#### 4.1.2 Versuchsplan

Entsprechend der vorherigen Überlegungen erfolgt die Festlegung und Beschreibung der empirischen Datenerhebung. Um die relevanten Faktoren gezielt zu untersuchen, eignet sich im Rahmen dieser Arbeit ein Experiment als Datenerhebungsform. Laut der Definition nach SARRIS [1990, S. 129] handelt es sich bei einem Experiment um „*einen systematischen Beobachtungsvorgang, auf Grund dessen der Untersucher das jeweils interessierende Phänomen erzeugt sowie variiert und dabei gleichzeitig systematische und/oder unsystematische Störfaktoren durch hierfür geeignete Techniken ausschaltet bzw. kontrolliert*“. Um die Störeinflüsse bestmöglich kontrollieren zu können und somit die interne Validität bzw. die Güte des Experiments zu erhöhen [BORTZ & DÖRING 2006, S. 57], [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007, S. 22] und die relevanten Parameter gezielt zu variieren, eignet sich für die geplante Studie besonders ein Labor-Experiment. Da die natürliche Umgebung für die untersuchten Fragestellungen nicht verallgemeinert werden können und für die Untersuchung nicht ausschlaggebend sind, wird kein Feld-Experiment durchgeführt. Aufgrund der Erkenntnisse der Projektanalyse (vgl. Kapitel 3.2.5.2) sind, wie in den Forschungsfragen beschrieben, unterschiedliche Anwenderkreise bei der Studie zu berücksichtigen. Aus diesem Grund handelt es sich bei dem Experiment sowohl um ein Within-Design als auch ein Between-Design. Es werden dabei Unterschiede sowohl innerhalb der Gruppe als auch zwischen den Gruppen beobachtet. Die Datenerhebung erfolgt daher mit zwei Versuchsgruppen. Diese unterscheiden sich in ihrem Hintergrundwissen und ihrer Erfahrung im Bereich Technisches Design. Hierbei handelt es sich somit um eine gezielte Stichprobenbildung. Innerhalb der Gruppen wird auf eine möglichst zufällige, aber zwischen den Gruppen vergleichbare Stichprobenbildung geachtet, um eine größtmögliche Übertragbarkeit zu gewährleisten. Die genaue Beschreibung der Stichprobe hinsichtlich Zusammensetzung, Größe und Akquise erfolgt in Kapitel 4.1.2.1.

Entsprechend der Forschungsfragen leiten sich als unabhängige Variablen (uV) der Studie die Repräsentationsform und die Detaillierung ab. Bei der unabhängigen Variablen handelt es sich um die durch den Versuchsleiter systematisch beeinflusste und variierte Größe der Studie [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007, S. 19]. Die abhängige Variable (aV) ist

dagegen das auftretende Ereignis, das der Versuchsleiter bei der Manipulation der unabhängigen Variable als Ergebnis beobachtet [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007, S. 19]. Im Rahmen dieser Studie erfolgt die Ermittlung der aV durch eine Befragung, die in Form eines Fragebogens durchgeführt wird. Die hierbei erhobenen Daten werden in Kapitel 4.1.2.3 beschrieben. Die Stufen der uV werden in Kapitel 4.2.1 anhand der Untersuchungsmodelle erläutert. Der Zusammenhang zwischen uV und aV kann neben einer direkten Kausalbeziehung 'Wenn-Dann' durch weitere uV oder sogenannte Störvariablen beeinflusst werden. Diese können dabei sowohl bekannt als auch unbekannt sein [BORTZ & DÖRING 2006, S. 12f]. Um eine möglichst hohe interne Validität und damit die Rückführbarkeit der Veränderung der aV auf die uV [RAAB-STEINER & BENESCH 2010, S. 39] zu gewährleisten, gilt es mögliche Störvariablen bestmöglich aufzudecken und zu kontrollieren. Diese können, beeinflusst durch den Versuchsleiter, die Umgebung, die Probanden oder auch die Modelle sein. Probate Mittel der Kontrolle sind dabei die Standardisierung von Abläufen, die Randomisierung von Probanden oder das Ausbalancieren der Modelle. Die jeweils getroffenen Maßnahmen werden im Weiteren an entsprechender Stelle beschrieben.

#### 4.1.2.1 Stichprobe

Wie beschrieben erfolgt die Datenerhebung in zwei Versuchsgruppen, die sich bezüglich ihrer Kenntnisse und Erfahrung im Bereich TD unterscheiden. Es werden dazu für die Versuchsgruppe 1 (VG1) gezielt Mitarbeiter und ehemalige Mitarbeiter des Forschungs- und Lehrgebiets Technisches Design sowie Studierende mit expliziter Fortbildung in diesem Bereich akquiriert. Als Schwellenwert für den Faktor *Kenntnisse im Bereich Technisches Design* wird dabei die erfolgreiche Teilnahme an den Lehrveranstaltungen Technisches Design sowie eine der Vertiefungen Interface- oder Fahrzeug-Design festgelegt. Wie sich in der Analyse in Kapitel 3.2.5.2 gezeigt hat, sind für die zweite Versuchsgruppe (VG2) Teilnehmende aus unterschiedlichen Bereichen, jedoch vorzugsweise mit technischem Hintergrund, von Interesse. Aufgrund der eingeschränkten Auswahl an relevanten Teilnehmenden für VG1 und der vorherrschenden Geschlechterstruktur in MINT-Fächern kann keine ausgewogene Geschlechterverteilung realisiert werden. Insgesamt wird bei der Probandenauswahl jedoch darauf geachtet, dass neben dem Hauptunterscheidungsmerkmal eine zwischen den Gruppen gleiche und innerhalb der Gruppen repräsentative Verteilung der individuellen Merkmale der Probanden vorliegt, um im späteren sowohl zwischen den Versuchsgruppen als auch innerhalb der Gesamtstichprobe zu untersuchen.

Auch wenn in Bezug auf die Stichprobengröße keine allgemeingültige exakte Vorgabe getroffen werden kann [BORTZ & DÖRING 2006, S. 71], wird eine Größe der Stichprobe je Versuchsgruppe von 25 bis 30 Probanden definiert, um die für die Auswertung relevanten statistischen Verfahren anwenden zu können [RAAB-STEINER & BENESCH 2010, S. 20] und von einer Übereinstimmung mit der Standardnormalverteilung der Daten ausgehen zu können [KÄHLER 2004, S. 309]. Für die Gesamtstichprobe sind damit ebenfalls die notwendigen Schwellen in jedem Fall erfüllt.

Aufgrund der örtlichen Gebundenheit des Labor-Experiments an die Räumlichkeiten des Forschungs- und Lehrgebiets Technisches Design erfolgt die Akquise der Probanden größtenteils im universitären Umfeld. Die Ansprache potentieller Probanden erfolgt dabei über direkte Ansprache, Aushänge, Verteiler der Fachschaften sowie soziale Medien. Für die Teilnahme an der Studie erhalten die Probanden am Ende des Versuchs 10 Euro Aufwandsentschädigung.

#### **4.1.2.2 Versuchseinführung**

Für den Ablauf des Versuchs wird ein standardisiertes Vorgehen für alle Probanden entwickelt, um mögliche Störeinflüsse aufgrund unterschiedlicher Erklärungen und Wissensstände zu vermeiden. Insbesondere der Versuchsleitereffekt, der durch variierendes Verhalten des Versuchsleiters zu einer Verzerrung der internen Validität führen kann, wird hierdurch reduziert [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007, S. 28]. Nach der Begrüßung und Erklärung der Räumlichkeit werden die Probanden entsprechend BORTZ & DÖRING [2006, S. 44 f] hinsichtlich der Freiwilligkeit der Teilnahme, des Rahmens der Studie sowie den Datenschutzbestimmungen und der Anonymität der Ergebnisse aufgeklärt. Der Aufbau der Räumlichkeit wird in Kapitel 4.3 beschrieben.

Der Einstieg in den Versuch stellt der Test '3D Räumliches Orientierungsvermögen' von Schuhfried [BRATFISCH & HAGMAN 2014] dar, welcher mithilfe des Wiener Testsystems (WTS) durchgeführt wird. Dabei handelt es sich um ein standardisiertes Testverfahren zur Messung psychomotorischer Eigenschaften, das für die psychologische Diagnostik vor allem in den Bereichen Personal-, Neuro-, Sport-, und Verkehrspsychologie eingesetzt wird [SCHUHFRIED 2020]. Der Vorzug dieses Systems ist, dass für jeden Test eine validierte Normstichprobe vorhanden ist, anhand welcher das untersuchte Probandenkollektiv eingeordnet werden kann. Der angewendete Test untersucht die Fähigkeit dreidimensionale Objekte mental im Raum bewegen zu können. Dies ermöglicht die Messung der Leistungsfähigkeit der Probanden anhand eines standardisierten Tests, der in

direktem Zusammenhang mit der Bewertung von Eigenschaften bezüglich der Produktgestalt anhand eines Modells steht. Nach der Durchführung des Einstiegstests erfolgt die Beschreibung der Aufgabe des Probanden, der genaue Ablauf sowie die Erklärung grundlegender Begriffe, um einen einheitlichen Wissensstand der Probanden bezüglich der zu bewertenden Faktoren zu gewährleisten. Die Beschreibung der Aufgabe erfolgt in Form eines vorbereiteten Texts, den die Probanden am Befragungs-Computer lesen. Für die Versuchsgruppe 1 ist die Einleitungsseite in Abbildung 4.1 dargestellt.

## Einleitung

Bevor wir mit der Bewertung des ersten Modells beginnen, möchte ich Sie mit Ihrer Rolle und Aufgabe vertraut machen



Sie sind als Produkt-Entwickler/in bei einem innovativen Unternehmen tätig, das sich auf die Gestaltung nutzerzentrierter Produkte mit einem **Höchstmaß an Ergonomie, Design und Funktionalität** spezialisiert hat. In diesem Umfeld ist es Ihre Aufgabe eine neue Produktserie an Garten-Elektrogeräten zu gestalten. Während Ihrer Entwicklungstätigkeit müssen Sie immer wieder den **aktuellen Stand ihrer Gestaltung** dahin gehend überprüfen, ob Sie die **ideale Ausprägung** der geforderten Anforderungen erreicht haben. Um dies zu tun, stehen Ihnen **verschiedene Modelle** zur Verfügung.

Mithilfe der Modelle, die Ihnen im Folgenden der Reihe nach in die Hand gegeben werden, möchten Sie nun bewerten, wie gut Sie die Anforderungen an Ergonomie und Design für die neuen Produkte umgesetzt haben. Das heißt, sie **bewerten zunächst nicht das Modell, sondern das spätere Produkt** mithilfe des Modells. Die Anforderungen sind dabei in die Teilgestalten Aufbau, Form und Oberfläche/Farbe unterteilt. Zur Erklärung können Sie gerne jederzeit die Hinweistafel zu Rate ziehen.

**Dann beginnen wir mit dem ersten Modell.**

Bitte schauen Sie sich dieses an, nehmen es wenn möglich in die Hand und versuchen sich ein Bild davon zu machen, wie gut die Anforderungen an eine optimale Ergonomie und ein ansprechendes Design erfüllt sind.

Sobald Sie bereit für die Beantwortung der Fragen sind, klicken Sie bitte auf "**Weiter**".

Sie können gerne jederzeit während der Beantwortung der Fragen **das aktuelle Modell begutachten**.

**Abbildung 4.1:** Einleitungsseite der Modell-Studie für VG 1

Die Beschreibung der Aufgabe im Einleitungstext für VG 2 ist nahezu identisch zu diesem Text und unterscheidet sich nur in der Rollenbezeichnung des Probanden. Die Probanden von VG 2 werden darin als Produkt-Tester/in angesprochen, die dabei die bewertende Aufgabe im Rahmen einer Entwicklung durchführen sollen.

Die weiteren Schritte und das Gesamtverfahren der Versuchseinführung gliedern sich in die beschriebenen Punkte in Abbildung 4.2. Um ein einheitliches Verständnis der Probanden für die Begrifflichkeiten zu schaffen, werden die Teilgestalten (Aufbau, Form und Oberfläche/Farbe) anhand von Abbildungen auf Handkarten standardisiert erklärt, siehe

Anhang A2. Ebenfalls werden die verschiedenen Modelltypen in ihrer Repräsentationsform und Detaillierung, wie sie in Kapitel 4.2.1 beschrieben sind, anhand einer neutralen Übersicht ohne Modellabbildungen erläutert. Des Weiteren werden für die Probanden Moodboards aufgestellt, die die zugrundeliegenden Produkte der Modelle in der Anwendung zeigen, damit die Probanden das Arbeiten mit den Produkten auf eine einheitliche Art und Weise simulieren können, siehe Anhang A2. Die Erklärungstafeln und die Moodboards sind während des gesamten Versuchs sichtbar und zugänglich.

1. Begrüßung	Erklärung des Rahmens, der Dauer, mögliche Pausen und Getränke	Erklärung durch Versuchsleiter
2. Einwilligung und Datenschutz	Erklärung zur Freiwilligkeit und Datenschutz	Erklärung durch Versuchsleiter
	Einwilligung und Bestätigung durch Probanden	Durchführung durch Probanden
3. Wiener Testsystem	Erklärung und Einführung	Erklärung durch Versuchsleiter
	Durchführung des Tests <i>3D Räumliches Orientierungsvermögen</i>	Durchführung durch Probanden
4. Fragebogen allgemein	Angabe individueller Merkmale der Probanden	Durchführung durch Probanden
5. Erklärung der Aufgabe	Lesen des Einführungstext	Durchführung durch Probanden
	Erklärungen (standardisiert) zu:	Erklärung durch Versuchsleiter
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aufbau / Form / Oberfläche/Farbe</li> <li>· Modelleinteilung</li> <li>· Moodboards</li> <li>· Simulieren des Arbeitens mit den Produkten</li> </ul>	
X. Einweisung VR / 3D Modell (bei entsprechendem Modell)	Erklärungen (standardisiert) zu:	Erklärung durch Versuchsleiter
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Steuerung</li> <li>· Hinweise auf Unterbrechung bei Übelkeit</li> </ul>	
6. Durchführung Modelle	Begutachtung und Bewertung der 14 Modelle	Durchführung durch Probanden
7. Durchführung Produkte	Begutachtung und Bewertung der 3 Produkte	Durchführung durch Probanden
8. System Usability Scale	Hinweis auf Bewertung der Repräsentationsform	Erklärung durch Versuchsleiter
	Durchführung der 4 Bewertungen	Durchführung durch Probanden
9. Teilnahmevergütung	Aushändigen und Bestätigen der 10 EUR	Erklärung durch Versuchsleiter
		<span style="color: #0070C0;">■</span> Erklärung durch Versuchsleiter <span style="color: #709A47;">■</span> Durchführung durch Probanden

**Abbildung 4.2:** Versuchsablauf der Modell-Studie

Entsprechend BORTZ & DÖRING [2006] werden so durch das standardisierte Vorgehen und die einheitlichen Beschreibungen und Erklärungen mögliche Störfaktoren reduziert, um die interne Validität zu steigern. Die Entwicklung der Items und die Vorstellung der Befragung erfolgt im Folgenden.

#### 4.1.2.3 Befragung

Die Datenerhebung im Rahmen der Modell-Studie gliedert sich in zwei Teile. Zu Beginn erfolgt die Erhebung allgemeiner individueller Merkmale des Probanden. Die Angaben gliedern sich in die Punkte:



- Alter, Körpergröße, Geschlecht,
- Ausbildung, aktuelle Tätigkeit, Studium (falls zutreffend) und Studienrichtung sowie Vorlesungen am IKTD,
- Erfahrung im Umgang mit Werkzeugen und Technologien und
- visuelle Einschränkungen.

Die Auswahl basiert dabei auf relevanten Eigenschaften, die bei bewertenden Aufgaben von Interesse sind, wie Größenangabe für die Ableitung von Perzentilen, die aktuelle Tätigkeit zur Gruppenbildung, Erfahrungen im Umgang mit den untersuchten Methoden und Werkzeugen sowie eventuelle visuelle Einschränkungen, die für die Auswertung zu berücksichtigen sind. Der gesamte Fragebogen, wie er den Probanden am Befragungs-Computer dargeboten wird, ist dem Anhang A2 zu entnehmen.

Die Erhebung der abhängigen Variablen erfolgt für die Studie mittels einer Befragung. Es werden hierzu auf Basis der Forschungsfragen in Kapitel 4.1.1 relevante Items für die Befragung abgeleitet. Hierbei wird zunächst in zwei Kategorien unterschieden, die im Rahmen der Studie von Interesse sind.

- Die Abweichung zwischen einer Bewertung von Produkteigenschaften anhand eines Modells und am realen Produkt anhand überprüfbarer Werte.
- Die subjektive Bewertung des Modells bezüglich der Eignung und Anwendung aus Anwendersicht.

Die Herleitung und Festlegung der Items sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Erhebung der ersten Kategorie erfolgt dabei in zwei Aspekten. Der erste Aspekt umfasst Items, die aus der Projektanalyse in Kapitel 3.2.5.2 sowie den theoretischen Grundlagen in Kapitel 2.3 und 2.4 abgeleitet werden. Dabei handelt es sich um bewertende Eigenschaften in Bezug auf die Produktgestalt. Dementsprechend werden die Items in Bezug auf die Teilgestalten Aufbau, Form und Oberfläche/Farbe (Ob/Fa) erhoben. Die Auswahl der relevanten Fragestellungen bezüglich der Produktgestalt wurden durch Reduktion der häufig vorkommenden Bewertungsaspekte vorgenommen und in Rahmen einer Vorstudie auf Eindeutigkeit, Verständlichkeit und Relevanz überprüft [OBERHOFER & MAIER 2018], [SPEER 2017]. Bei der Formulierung der Items wurden einschlägige Richtlinien [PORST 2014, S. 99 ff] berücksichtigt, um ein hohes semantisches und pragmatisches Verständnis bei den Probanden zu erzielen. Da es sich um keine tatsächlichen Fragen, sondern Beschreibungen der Produktparameter handelt, sind nicht alle Kriterien nach PORST [2014] von Relevanz. Wesentlich ist das Verständnis der genutzten Begriffe sowie

eine kurze, prägnante und eindeutige Beschreibung der Items. Aus diesem Grund werden relevante Begriffe zu Beginn erläutert. Die Items werden zusätzlich im Rahmen eines Pretests (vgl. Kapitel 4.4) hinsichtlich dieser Kriterien überprüft und eventuelle Anpassungen vorgenommen.



**Abbildung 4.3:** Zusammenhänge der Items der Modell-Produkt-Abweichung

Nach BORTZ & DÖRING [2006, S. 176] ist die Rating-Skala eine der am häufigsten eingesetzten Skalen, mithilfe der auf einfache Art und Weise Urteile erzeugt werden können, die dabei unter gewissen Voraussetzung als intervallskaliert ausgewertet werden können. Damit eignet sich die Rating-Skala im Besonderen für die Anwendung in der Modell-Studie für die Bewertung der Produktgestaltausprägungen. Zahlreiche Studien belegen, dass eine Skalengröße von 7 +/- 2 die zuverlässigsten Ergebnisse liefern kann [FRANZEN 2014, S. 705]. Ein häufig diskutiertes Problem von Rating-Skalen ist dabei die Frage bezüglich der geradzahlgigen oder ungeradzahlgigen Stufenanzahl. Um unvollständige Ergebnisse zu vermeiden, die bei einer 'weiß nicht' Option entstehen können, aber dennoch bei Unentschlossenheit die Wahl der Mittelposition zu vermeiden [FRANZEN 2014, S. 706], wird im Rahmen der Studie eine sechsstufige Rating-Skala gewählt [PORST 2014, S. 83f]. Nach MOORS [2008] konnte darüber hinaus kein bedeutender Unterschied zwischen der Verwendung einer 5-stufigen und einer 6-stufigen Antwortskala ermittelt werden. Um somit insgesamt die Einschränkung zu verhindern, eine Rating-Skala als nicht intervallskaliert behandeln zu können, wird eine bipolare, positiv bezifferte Skala [SCHWARZ ET AL. 1991] mit verbalisierten Endpunkten festgelegt [PORST 2014, S. 94]. Die Skala zur Bewertung der Items in Abbildung 4.3 reicht von sehr schlecht (1) bis sehr gut (6). Dies führt insgesamt zu einem gleichverteilten Abstand zwischen den Skalenwerten

und ermöglicht somit eine Erfüllung aller relevanten Kriterien, um ein Intervallskalenniveau annehmen zu können und ist damit die ideale Wahl für die Modell-Studie. Dies kann zusätzlich im Rahmen der statistischen Auswertung durch die Anwendung sowohl parametrischer als auch nicht-parametrischer Tests überprüft und bestätigt werden [BORTZ & DÖRING 2006, S. 181f].

Die Bewertung der Produkteigenschaften anhand des Modells stellt somit einen Hauptaspekt der Modell-Studie dar. Von Interesse ist dabei der Unterschied der Bewertung eines Probanden, die am Modell vorgenommen wird, zu der Bewertung, welche am Referenz-Produkt erfolgt. Diese Differenz wird der betrachtete Wert für die Auswertung (vgl. Kapitel 5.2) sein. Hierfür erfolgt nach der Bewertung der Modelle eine Bewertung der zugrundeliegenden Produkte, um die Referenz für die jeweilige Bewertung zu definieren. Durch diese Differenzbildung wird die Bewertung losgelöst von der subjektiven Wahrnehmung und Wertevorstellung der Produkteigenschaften durch den Probanden und somit objektiv vergleichbar. Als weiterer objektiv überprüf- und vergleichbarer Faktor erfolgt die Einschätzung der Hauptabmessungen der Modelle. Dem Probanden stehen dabei keine Hilfsmittel zu Verfügung. Die Werte sind für die maximale Länge, Breite und Höhe des Produkts in Zentimeter anzugeben. Dabei handelt es sich um einen untergeordneten Parameter, der insbesondere bei Bewertungen bezüglich der Teilgestalt Aufbau sowie bei ergonomischen Bewertungen zum Tragen kommt.

Die zweite Kategorie an erhobenen Items betrifft die subjektive Einschätzung der Modelle aus Probandensicht. Auch diese Bewertung wird in zwei Blöcken erhoben. Die erste Bewertung orientiert sich an der Gebrauchstauglichkeit nach der VDI Richtlinie Ergonomie der Mensch-System-Interaktion [DIN EN ISO 9241-11 2018] und den dafür relevanten Maßen Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit. Es werden für die Erhebung folgende Maße für die Aspekte abgeleitet und definiert:

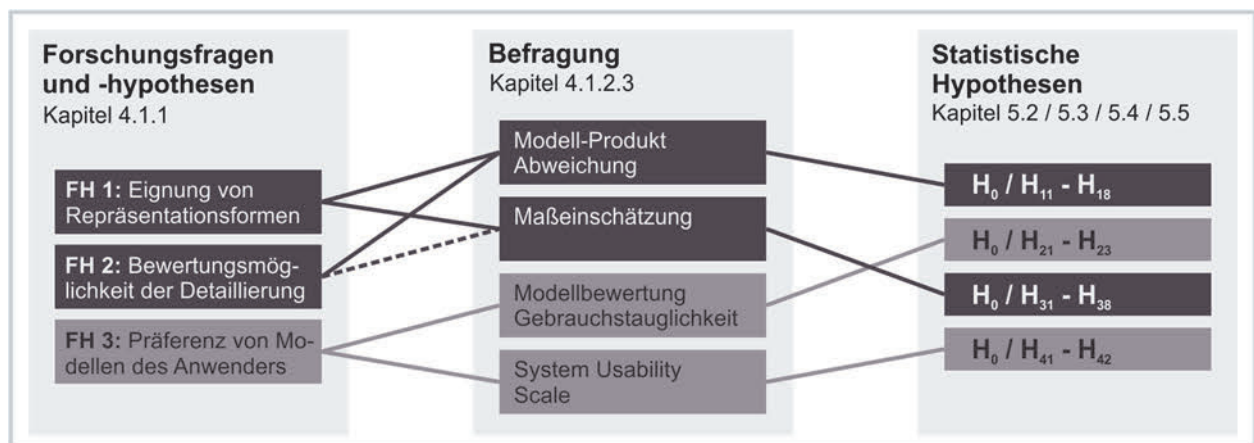
- Schwierigkeit der Bewertung für die Effizienz,
- Genauigkeit der Bewertung für die Effektivität,
- Zufriedenheit mit dem Modell für die Zufriedenstellung.

Auch wenn ein einzelnes Maß je Aspekt nicht ausreichend ist, um die Gebrauchstauglichkeit vollumfänglich zu beschreiben [DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 36], ermöglicht die Bewertung eine erste und aussagekräftige Einschätzung, um einen Vergleich der Modelle bezüglich der Gebrauchstauglichkeit aus Anwendersicht vorzunehmen. Die Bewertung der Aspekte erfolgt differenziert nach den Teilgestalten Aufbau, Form und Oberfläche / Farbe mittels der zuvor beschriebenen Rating-Skala, um ein verständliches und

durchgängiges Bewertungssystem für die Probanden bereitzustellen. Es gelten hierbei die gleichen Ansprüche an die Skala hinsichtlich Befragung und Auswertung, weshalb die identische Skala ohne Einschränkungen angewendet werden kann.

Neben diesem Hauptaspekt der subjektiven Modelleinschätzung wird der System Usability Scale (SUS) für die vier Repräsentationsformen erhoben. Dabei handelt es sich um eine einfache und schnelle Methode für eine verlässliche und robuste Usability Bewertung von Systemen [BROOKE 1996]. Es ist eine weitverbreitete und etablierte Methode, die 1996 von John Brooke entwickelt wurde, um Systeme im Anschluss an die Nutzung zu bewerten und allgemeine Usability-Probleme aufzudecken und Vergleiche zwischen Systemen durchzuführen [BANGOR ET AL. 2008]. Da hier das System der Repräsentationsform im Fokus ist, erfolgt die Erhebung zusammengefasst über die Detaillierungsstufen am Ende der Bewertung aller Modelle und Produkte. Der Umgang mit physischen Modellen und Abbildungen ist ein quasi lebenslang erprobter und natürlicher Vorgang. Daher ist im Vergleich insbesondere die Einschätzung des Umgangs mit den digitalen sowie virtuellen Modellen aus Sicht der Probanden von Interesse. Die Erhebung des SUS erfolgt mittels des standardisierten Vorgehens nach BROOKE [1996] und den deutschen Übersetzungen der Items nach RAUER [2011]. Der Vorteil der Durchführung einer solchen standardisierten und etablierten Methode ist die Erweiterbarkeit der Studie und Vergleichbarkeit mit weiteren und zukünftigen Systemen.

Der vollständige Fragebogen, wie er in der Studie am Befragungs-Computer angezeigt wird ist zusammengefasst in einmaliger Ausführung (für ein Modell bzw. eine Repräsentationsform) im Anhang in Abbildung A3 dargestellt. Abschließend sind in Abbildung 4.4 die Zusammenhänge der Forschungsfragen, der entwickelten Befragung sowie den abgeleiteten statistischen Hypothesen dargestellt.



**Abbildung 4.4:** Zusammenhänge der Hypothesen und der Befragung

#### 4.1.2.4 Zeitlicher Ablauf der Studie

Um die Belastung für die Probanden so gering wie möglich zu gestalten und dennoch die relevanten Parameter, die im vorherigen Abschnitt hergeleitet wurden, vollständig und in hoher Güte zu erfassen, wird die Versuchsdurchführung zeitlich ausgelegt und im Vorfeld in einem Pretest (vgl. Kapitel 4.4) überprüft. Untersuchungen zeigen, dass die Dauer für konzentriertes und effektives Arbeiten begrenzt ist und individuellen Schwankungen unterliegt sowie durch äußere Einflüsse bedingt wird [WESTHOFF & HAGEMEISTER 2005, S. 22 ff]. Dies ist für die Studie von großem Interesse und hinsichtlich der äußeren Einflüsse bei der Planung der Versuchsumgebung (vgl. Kapitel 4.3) zu berücksichtigen. Die mögliche Dauer schwankt dabei von Person zu Person, jedoch kann von einer Zeitspanne von bis zu zwei Stunden für durchgängiges konzentriertes Arbeiten ausgegangen werden [WESTHOFF & HAGEMEISTER 2005, S. 143]. Die zeitliche Planung des Versuchs orientiert sich an diesem Gesamtrahmen und ist im Detail in Abbildung 4.5 dargestellt.

1. Einführung	Begrüßung, Datenschutz, WTS, Fragen Allgemein, Erklärung	15 Min.
2. Modellbewertung	Erklärung Modellsteuerung, Begutachtung / Bewertung der 14 Modelle	90 Min.
3. Produktbewertung	Begutachtung / Bewertung der 3 Referenzprodukte	10 Min.
4. SUS	System Usability Bewertung der Repräsentationsformen	5 Min.
Gesamt Versuchsdauer		120 Min.

**Abbildung 4.5:** Zeitplanung der Modell-Studie

## 4.2 Untersuchungsmodelle

Das zentrale Element der Studie sind die Produktmodelle, anhand derer eine Bewertung erfolgt. Die Auswahl passender Modelle gliedert sich dabei zum einen in das zugrundeliegende Produkt sowie in die Zusammensetzung des Modells aus Repräsentationsform und Detaillierung. Bezüglich jedem dieser Bereiche ergeben sich Anforderungen, die für die Modellumsetzung zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus gilt es Anforderungen hinsichtlich einer wissenschaftlichen empirischen Untersuchung zu berücksichtigen. Die Einflussfaktoren auf die Anforderungsdefinition bezüglich der Modellfestlegung sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Anforderungen an das zugrundeliegende Produkt leiten sich aus dem grundsätzlichen Betrachtungsumfang dieser Arbeit sowie der Projektanalyse in Kapitel 3.2.5.2 ab. Diese Ausrichtung beeinflusst somit das tatsächliche Produkt, aber auch die zu untersuchenden Fragestellungen der Bewertung im Rahmen der Studie. Durch die Studieninhalte werden darauf aufbauend die Repräsentationsformen sowie die

Detailierung definiert. Der Zusammenhang dieser beiden Faktoren ist in der Modelleinteilung in Kapitel 3.2.2 beschrieben und die Anforderungen orientieren sich an dieser grundsätzlichen Einteilung. Die Anforderungen bezüglich einer wissenschaftlichen empirischen Untersuchung beziehen sich beispielsweise auf die Differenzierung der Modelle sowie deren Umsetzung und somit auf die Gesamtheit aus Produkt, Repräsentationsform und Detailierung.



**Abbildung 4.6:** Zusammenhänge der Anforderungen und der Modellauswahl

In Tabelle 4.1 sind die Anforderungen an die Modellauswahl aufgeführt.

Kat.	Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
Betrachtungsumfang / Projekt	1.1	Produktart	Greifbares, mobiles (Consumer-) Produkt mit großer Bekanntheit
	1.2	Produktumfang	Produktsystem mit mehreren Einzelprodukten vergleichbarer Handhabung und Corporate Design (siehe Kap. 4.2.1)
	1.3	Arbeitsweise	Handgeführt, möglichst zwei-Hand und bekannte Anwendung
	1.4	Nutzerschnittstellen	Vorhandensein von Griffstellen und Stellteilen
	1.5	Freiheitsgrade	Ergonomische und gestalterische Freiheitsgrade bei der Entwicklung
	1.6	Verfügbarkeit	Verfügbarkeit und Zugänglichkeit der Produkte
Studieninhalte	2.1	Modellart	Umsetzbarkeit in allen Repräsentationsformen
	2.2	Teilgestalten	Umsetzbarkeit der befragten Teilgestalten Aufbau, Form und Oberfläche/Farbe
	2.3	Modellinhalt	Differenzierungsmöglichkeit der Detailierung / des Modellinhalts bzgl. Ergonomie und Design
Emp. Untersuchung	3.1	Eindeutigkeit	Klare Differenzierbarkeit der Untersuchungsparameter
	3.2	Konstanz	Gleichbleibende und nicht verändernde Untersuchungsparameter über die Dauer der Modell-Studie
	3.3	Barrierefreiheit	Einschränkungsfreie Nutzung für alle Teilnehmenden der Studie

**Tabelle 4.1:** Anforderungen an die Modelle der Studie

Basierend auf den Anforderungen, die sich auf das Produkt beziehen, werden zunächst mögliche Produktsysteme auf ihre Eignung für die Modell-Studie untersucht. In Abbildung



4.7 sind mögliche Produkte und deren Bewertung dargestellt. Entsprechend der Überprüfung der Anforderungen wird für die weitere Durchführung der Studie das Produktsystem 3 als Grundlage herangezogen. Dabei handelt es sich um drei Produkte einer Gartengeräte-Linie (ein Blasgerät, eine Heckenschere und ein Rasentrimmer) eines Herstellers. Die Produkte erfüllen dabei die aufgestellten Anforderungen in allen Punkten. Bei den Geräten handelt es sich um am Markt verfügbare Geräte, die aber aus Gründen der Neutralität für die Studie hinsichtlich der Teilgestalten Farbe und Grafik verändert wurden, um bei den Probanden eine Beeinflussung durch eine mögliche Markenerkennung zu verhindern.

Produktsystem 1	Produktsystem 2	Produktsystem 3
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Produktsystem</li> <li>+ Produktgröße</li> <li>+ Zwei-Hand Bedienung</li> <li>+ Corporate Design</li> <li>- Wenig bekannte Produkte</li> <li>- Unklare Handhabung</li> <li>- Teils geringe Ergonomie- und Design-Freiheitsgrade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Produktsystem</li> <li>+ Produktgröße und -art</li> <li>+ Corporate Design</li> <li>+ Anzeigen, Stellteile und Griffe</li> <li>- Wechselnde Handhabung</li> <li>- Unklare Handhabung</li> <li>- Geringe Ergonomie- und Design-Freiheitsgrade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Produktsystem</li> <li>+ Produktgröße und -art</li> <li>+ Corporate Design</li> <li>+ Anzeigen, Stellteile und Griffe</li> <li>+ Eindeutige und vergleichbare Handhabung</li> <li>+ Ausreichend Ergonomie- und Design-Freiheitsgrade</li> </ul>

**Abbildung 4.7:** Vergleich der möglichen Produkt-Systeme

Basierend auf der Auswahl des zugrundeliegenden Produkts folgt die Modelleinteilung und -zuordnung, die Beschreibung der Modellumsetzung und deren Besonderheiten.

#### 4.2.1 Modelleinteilung

Auf Basis der Modelle werden die in Kapitel 4.1.1 aufgestellten Forschungshypothesen untersucht, die sich aus der Projektanalyse in Kapitel 3.2.5.2 ableiten. Dementsprechend dient die Modelleinteilung in Tabelle 3.4 als Grundlage bezüglich der relevanten Repräsentationsformen und Detaillierungsstufen. Im Fokus dieser Studie stehen die neuen Technologien der gegensätzlichen Bereiche des physischen Modells und des virtuellen Modells in Abgrenzung zu den grundlegenden Modellen der Abbildung und den dreidimensionalen, digitalen Modellen. Entsprechend der zuvor beschriebenen Versuchsplanung ist die Gesamtversuchsdauer zu berücksichtigen. Diese ist direkt mit der Anzahl an zu bewertenden Modellen verknüpft. Aus diesem Grund ist die Auswahl an relevanten

Modellen gezielt vorzunehmen. Die Modell-Matrix der Studie spannt sich über die Detaillierung und die Repräsentationsform auf, siehe Abbildung 4.8. Entsprechend der Versuchsplanung werden dabei Unterschiede zwischen den Repräsentationsformen und zwischen den Detaillierungsstufen untersucht. Demensprechend sind die zu untersuchenden Parameter zwischen den Stufen möglichst gleich zu halten, um mögliche Störeinflüsse [BORTZ & DÖRING 2006] gering zu halten. Auch müssen alle Eigenschaften, welche über die Items ermittelt werden, an allen Modellen umgesetzt und vorhanden sein.

		Detaillierung		
		Geringe Detaillierung D1	Mittlere Detaillierung D2	Hohe Detaillierung D3
Repräsentationsform	Phys. Modell R1	R1_D1 	R1_D2 	R1_D3 
	Abbildung R2	R2_D1 	R2_D2 	R2_D3 
	3D-Modell R3	R3_D1 	R3_D2 	R3_D3 
	VR-Modell R4	R4_D1 	R4_D2 	R4_D3 

**Abbildung 4.8:** Modelleinteilung mit dargestellten Modellen

Die Einteilung der Detaillierung orientiert sich an der Modelleinteilung bezüglich Modellinhalt in Kapitel 3.2.2 und soll das gesamte Spektrum von einer groben bis hin zu einer fein ausgestalteten Produktgestalt umfassen. Um die Unterschiede dabei möglichst differenziert abzubilden und gleichzeitig einen für die Probanden angemessenen Untersuchungsumfang zu gewährleisten, werden drei Stufen der Detaillierung gewählt. Die erste Stufe (D1) orientiert sich an einem Konzept-/Proportionsmodell mit einer geringen Detaillierung und hohen Abstraktion. Die untersuchten Eigenschaften bezüglich ergonomischer und gestalterischer Aspekte der Studie und somit auch die Formgebung und funktionale Farbgestaltung sind hierin umgesetzt, jedoch in grober und abstrakter Ausprägung. Das Modell ermöglicht zudem eine Variabilität des Aufbaus, um Anordnungsthemen zu untersuchen. Die mittlere Detaillierungsstufe (D2) leitet sich vom Funktions- und Geometriemodell der Modelleinteilung in Tabelle 3.4 ab. Hierin ist die

Qualität der Formgebung weiter ausgearbeitet und entspricht auch im Detail dem späteren Produkt. Die höchste Detaillierung (D3) leitet sich von einem Prototyp / Muster ab und entspricht auch hinsichtlich Farbgebung und ergonomischer Funktionalität, wie Beweglichkeit der Stellteile, dem späteren Produkt. Auch die Oberflächenqualität ist hier weiter ausgearbeitet und ein Produktkontext wird hergestellt. Wie beschrieben sind die Ausprägungen der befragten Items in allen Detaillierungsstufen gleichermaßen vorhanden, um Vergleiche anstellen zu können. Aufgrund des Umfangs an Modellen besteht jedoch die Gefahr des Einprägens der Bewertung und spätere Modelle werden nicht auf Basis der tatsächlichen Eigenschaften, sondern aufgrund von Vorwissen durch die vorherigen Modelle bewertet. Um diesen Störeinfluss auszugleichen wird zum einen eine Randomisierung der Modelle vorgenommen, siehe Kapitel 4.2.3. Als weitere Maßnahme unterscheiden sich die zugrundeliegenden Produkte der Modelle nach den Detaillierungsstufen. Um einen Einfluss des Produktes auszuschließen, werden die Produkte so ausgewählt, dass sie in ihrer Handhabung und Anmutung vergleichbar sind. Die Überprüfung der Vergleichbarkeit wird durch zwei Kontrollmodelle vorgenommen. Hierfür wird ein Produkt in einer Repräsentationsform in allen Detaillierungsstufen ausgearbeitet und in die randomisierte Modellreihenfolge eingefügt. Somit sind zwei Felder der Modellmatrix doppelt belegt, zwischen denen bei der Auswertung ein direkter Vergleich vorgenommen werden kann.

Die zu untersuchenden Repräsentationsformen orientieren sich ebenfalls an der Modelleinteilung in Kapitel 3.2.2. Die Grenzen setzen dabei das physische Modell und das immersive virtuelle Modell. Da sich die Unterscheidung zwischen einer Abbildung (R1.2) und einem digitalen 2D Modell (R3.1) hauptsächlich in Bezug auf gestaltende Tätigkeiten auswirkt und bei bewertenden Aufgaben identisch sein können, werden im Rahmen der Studie diese Repräsentationsformen zusammengefasst betrachtet. Aufgrund der noch eingeschränkten Umsetzbarkeit und Nutzbarkeit hybrider Modelle sowie der hohen Ähnlichkeit des zugrundeliegenden Modells mit den weiteren Repräsentationsformen, werden im Rahmen der Studie keine hybriden Modelle (R2.1 und R2.2) betrachtet. Wie im Stand der Technik erläutert, liegt dem hybriden Modell ein physisches Modell (Augmented Reality) oder ein virtuelles Modell (Augmented Virtuality) zugrunde, die durch weitere Inhalte der jeweils entgegengesetzten Welt erweitert werden. Da diese Grenzen im Rahmen der Studie untersucht werden, können mögliche Rückschlüsse auf eine Kombination gezogen werden und die Anzahl an untersuchten Modellen damit sinnvoll begrenzt werden. Darüber hinaus befinden sich die derzeitigen Systeme teilweise noch

im Entwicklungsstadium und besitzen Einschränkungen bezüglich Sichtfeld, Überlagerung und Objekttracking [DÖRNER ET AL. 2019, S. 353]. Somit wäre kein gleichwertiger Vergleich mit den übrigen Modellen und Systemen möglich und würde sich auf eine Abschätzung bzw. einen Ausblick beschränken. Andere Systeme, insbesondere aus dem Bereich der Augmented Reality eignen sich weniger für handgeführte Produkte bzw. zeigen hier noch große Einschränkungen (beispielsweise Microsoft HoloLens), weshalb diese Repräsentationsform (R2.1) aufgrund der Randbedingungen der Studie nur bedingt einsetzbar ist. Aus diesen Gründen wird die Repräsentationsform in den vier Abstufungen physisches Modell (R1), Abbildung (R2), digitales Modell (R3) sowie virtuelles Modell (R4) untersucht. Da sich die Modelle der Studie an der Modelleinteilung in Kapitel 3.2.2 orientieren, aber nicht in allen Ausprägungen identisch sind bzw. Überschneidungen aufweisen, wird für die Studie eine eigenständige Notation der Modelle verwendet, siehe Abbildung 4.8. Die Modellspezifikation und Umsetzung der Modelle nach Repräsentationsformen und Detaillierungsstufen wird im folgenden Abschnitt vorgenommen.

#### 4.2.2 Modellbeschreibung und -umsetzung

Ein wesentlicher Aspekt der Modellumsetzung ist die Durchgängigkeit der zu bewertenden Produkteigenschaften über alle Modelle und Produkte hinweg. Differenziert aufgelöste Ergebnisse bezüglich der unabhängigen Variablen Repräsentationsform und Detaillierungsstufe können nur erhoben werden, wenn die Ausprägungen der Produkteigenschaften konstant gehalten werden. Das umschließt den Aufbau und die Anordnung, die Abmessungen sowie die detaillierte Formgebung. Um dies sicherzustellen werden die Modelle auf Basis der zugrundeliegenden Produkte abgeleitet. Da es keine frei zugänglichen CAD Daten der ausgewählten Produkte gibt, werden die realen Produkte zunächst mittels 3D Scan digitalisiert. Es wird dazu der 3D Scanner *Artec Eva* eingesetzt. Dieser basiert auf dem Verfahren des strukturierten Lichts und ermöglicht eine Genauigkeit von 0,1 mm und einer Auflösung von 0,5 mm [ARTEC 2020]. Damit können auch feine Details der Produkte aufgenommen und eine für die Studie ausreichende Genauigkeit erzielt werden. Für die Erfassung der Messdaten und Erstellung des Polygonmodells wird die Software *Artec Studio* in der Version 13 eingesetzt. Die Datenaufbereitung und Ableitung eines Grundmodells als Volumenmodell (CAD) erfolgt mittels der Software *Geomagic Wrap 2017* [3D SYSTEMS 2020]. Auf Basis des Scan-Modells wird für jedes Produkt ein Grundmodell mit *SolidWorks 2019* [DASSAULT 2017] erstellt. Dabei handelt es sich um ein CAD Volumenmodell, das als Baugruppe aus mehreren Einzelbauteilen zusammengefügt ist. Dies erfolgt für den Rasentrimmer als Neukonstruktion, die an das Scan-Modell

approximiert ist. Ebenfalls als approximierte Neukonstruktion werden die Stellteile, Hilfstteile, das Rohr des Laubblasgeräts und die Schneide der Heckenschere ausgeführt. Die übrigen Teile, insbesondere die Gehäuse, werden aus dem Scan-Modell durch hauptsächlich Boolesche Operatoren abgeleitet. Diese Grundmodelle sind somit deckungsgleich mit den Produkten und dienen als einheitliche Grundlage für die Modelle. Der Gesamtprozess, die durchgeführten Schritte und die Zusammenhänge der Modellerstellung sind in Abbildung 4.9 dargestellt.



**Abbildung 4.9:** Ablauf der Modellerstellung

Die detaillierte Beschreibung der Erstellung der einzelnen Repräsentationsformen wird im Folgenden beschrieben.

#### 4.2.2.1 Physische Modelle

Die Umsetzung der physischen Modelle (R1) für die Studie erfolgt mittels des additiven Fertigungsverfahrens Fused Deposition Modeling. Dabei handelt es sich um ein extrusionsbasiertes Verfahren, das ein Kunststofffilament aufschmilzt und über eine Düse Schicht für Schicht aufbaut [GEBHARDT 2016], siehe Kapitel 2.2.3.1. Die Auswahl der Additiven Fertigung für die Erstellung des physischen Modells basiert zum einen auf dem Untersuchungsschwerpunkt der Studie bezüglich neuer Technologien der Modellerstellung und zum anderen auf den Anforderungen an die Modelle in Tabelle 4.1. Clay-Modelle eignen sich aufgrund der Verformbarkeit nicht für längere haptische Untersuchungen mit mehreren Probanden und mittels subtraktiver Fertigung könnte, neben den hohen wirtschaftlichen Aspekten, nicht die gleiche Materialität erzielt werden. Das FDM-Verfahren eignet sich insbesondere durch die schnelle und kostengünstige Erstellung der Modelle. Darüber hinaus ermöglicht es durch Variation der entsprechenden Parameter die Umsetzung der geforderten Genauigkeit und Detaillierung. Des Weiteren besitzen die verwendeten Materialien eine ähnliche Haptik wie das zugrundeliegende Produkt. Die



Durchgeführten Einzelschritte der Modell-Gestaltung und -Umsetzung sowie die Unterscheidung zwischen den Detaillierungsstufen sind in Abbildung 4.10 beschrieben.



**Abbildung 4.10:** Umsetzung der physischen Modelle (R1)

#### 4.2.2.2 Abbildungen

Um auch bei den Abbildungen (R2) eine Deckungsgleichheit der zu bewertenden Produkteigenschaften mit dem Produkt zu gewährleisten, werden keine direkten Zeichnungen erstellt, sondern auf Basis des Grundmodells Renderings in den gewünschten Ansichten erstellt und Zeichnungen mittels diverser *Adobe Photoshop* [ADOBE 2020] Filtern erzeugt, die den Stil von Handzeichnungen repräsentieren. Die Durchgeführten Einzelschritte der Modell-Gestaltung und -Umsetzung sowie die Unterschiede zwischen den Detaillierungsstufen sind in Abbildung 4.11 beschrieben.



**Abbildung 4.11:** Umsetzung der Abbildungen (R2)



Für die höchste Detaillierungsstufe wird das Grundmodell mit der Software *Autodesk VREDPro 2020* [AUTODESK 2020e] aufbereitet und Renderings mit realistischem Licht und Schattenwurf berechnet. Die Modelle werden in je sieben Ansichten sowie einer Gesamtansicht dargestellt und mit der Software *Adobe InDesign* als Poster gelayoutet. So wird sichergestellt, dass alle Details der Produkte in der jeweils gleichen Ansicht abgebildet sind und ein Vergleich zwischen den Detaillierungsstufen möglich ist. Die Poster werden mit dem Großformatplotter *Canon Pro 4000-S* in der Größe 900 x 636 mm gedruckt. Die Poster in größerer Darstellung können dem Anhang A4 entnommen werden.

#### 4.2.2.3 Digitale Modelle

Für die Umsetzung der digitalen Modelle (R3) sind nur wenige Anpassungen der Grundmodelle notwendig. Die durchgeführten Einzelschritte der Modellgestaltung und -darstellung, die vorgenommenen Einstellungen sowie die Unterschiede zwischen den Detaillierungsstufen sind in Abbildung 4.12 beschrieben.



**Abbildung 4.12:** Umsetzung der digitalen Modelle (R3)

Bei den Detaillierungsstufen D1 und D2 wird das Grundmodell mit der Software *SolidWorks 2020* hinsichtlich der Anordnung und Farbgebung angepasst. Für die Detaillierungsstufe D3 wird das für die Abbildung mit der Renderingsoftware *Autodesk VREDPro 2020* aufbereitete Modell eingesetzt. Die Darstellung der Modelle erfolgt an einem 27" Monitor mit einer 4k Auflösung, um eine ausreichend große und detaillierte Darstellung zu ermöglichen. Da nicht alle Probanden Erfahrung im Umgang mit einer CAD-Software haben, wird ein reduzierter und einfach zu bedienender CAD-Viewer für die Detaillierungsstufen D1 und D2 eingesetzt. Dabei handelt es sich um den Viewer *eDrawings Pro* in der Version 2019 [DASSAULT 2020]. Da es keinen durchgängigen Viewer auch für gerenderte Modelle gibt, erfolgt die Begutachtung der Detaillierungsstufe D3 in

Autodesk VRED, das auf einen reduzierten Betrachtungsmodus umgestellt wird. Die Steuerung der Modelle erfolgt mittels Maus und Tastatur und wird den Probanden entsprechend erklärt, um gleiche Voraussetzungen zu schaffen.

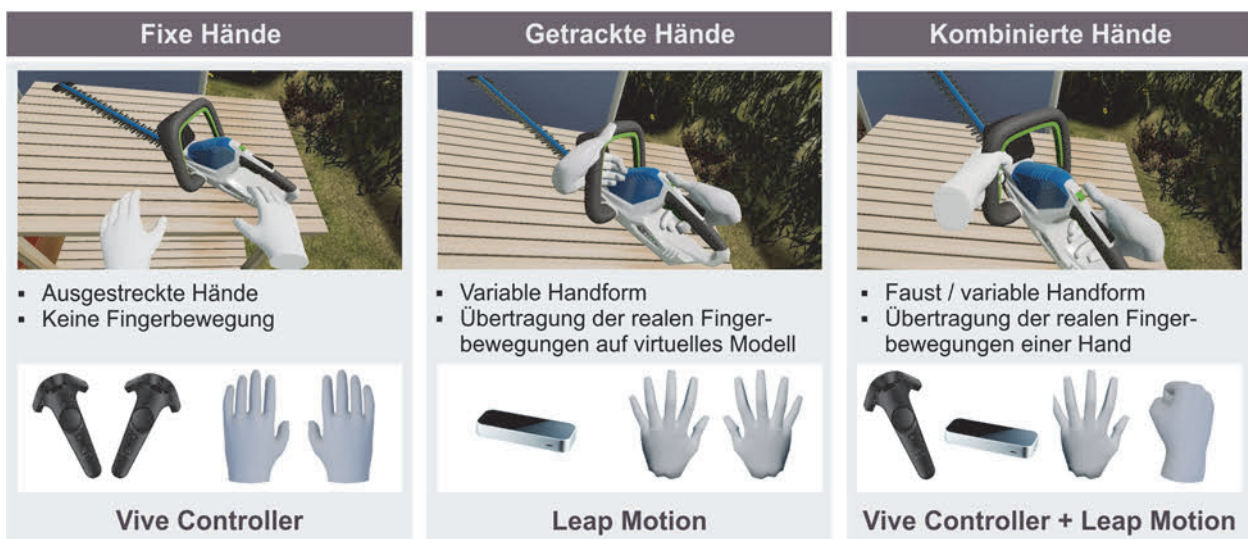
#### 4.2.2.4 Virtuelle Modelle

Die Umsetzung der virtuellen Modelle (R4) basiert auf den aufbereiteten Daten der digitalen Modelle (R3). Für die virtuelle Darstellung der Modelle wird ein VR-System benötigt, das im Rahmen der Studie zuverlässig und konsistent angewendet werden kann. Bezüglich der Darstellung eignet sich besonders ein Head Mounted Display, da dieses eine hohe Immersion ermöglicht (vgl. Kapitel 2.2.3.3). Die kommerziell am weitest verbreiteten Systeme sind dabei die Oculus Rift von Facebook sowie die HTC Vive. Da beide Systeme ähnliche Eigenschaften und Darstellungsleistungen besitzen, kann die am Lehrstuhl vorhandene HTC Vive für die Studie eingesetzt werden. Damit wird ein breites und anwendungsnahes Spektrum von VR-Systemen repräsentiert. Die Steuerung der Systeme erfolgt für gewöhnlich mit den dazugehörigen Controllern, die in der Hand gehalten werden. Dies spiegelt jedoch keine reale Handhabung von Geräten, wie sie beispielsweise bei physischen ergonomischen Analysen üblich ist, wider und würde somit zu einer systembedingten Einschränkung führen. Um den Probanden eine realitätsnahe Handhabung mit den Modellen zu ermöglichen wird das System Leap Motion, siehe Kapitel 2.2.2.9, zur Gestensteuerung integriert. Dieses erfasst die Bewegung der Hände und überträgt diese auf virtuelle Hände. Somit können die Modelle realitätsnah gegriffen, angehoben und bewegt werden. Insgesamt stellen sich die folgenden Anforderungen an eine Software zur Anzeige der virtuellen Modelle (R4):

- Ausgabe mittels Head Mounted Displays (HTC Vive),
- Einbindung von CAD Modellen,
- Umsetzung der Detaillierungsstufen und Umgebungsgestaltung,
- Interaktion mit den Modellen (Anheben, Bewegen, Greifen etc.) und
- Steuerung mittels Gesten und realen Handbewegungen (Leap Motion).

Mögliche Systeme sind dabei eDrawings Pro 2019 [DASSAULT 2019], Mindesk [MINDESK 2020], Virtualis [VIRTUALIS 2020], TechViz [TECHVIZ 2020] und Autodesk VREDPro 2020 [AUTODESK 2020e]. Die Recherche zu möglichen Systemen zeigt, dass keines der kommerziellen Systeme direkt eingesetzt werden kann, da nicht alle Anforderungen erfüllt werden. Meist erfolgt keine Unterstützung einer gestenbasierten Steuerung oder freien Interaktion mit den Modellen. Aus diesem Grund wird mit der Unreal Engine 4.22.1

eine VR-Anwendung programmiert, die die notwendigen Anforderungen für die Modell-Studie erfüllt. Dabei handelt es sich um eine Game-Engine zur Entwicklung von Konsolen- und Computerspielen, die mittlerweile auch vielfältig im industriellen Umfeld für Computeranwendungen eingesetzt wird [EPIC 2020]. Unreal bietet dabei diverse Plugins für die Einbindung der HTC Vive, dem Leap Motion System sowie von CAD-Daten an. Dennoch muss das Gesamtsystem mit den entsprechenden Umgebungen, den Modellen sowie der speziellen Steuerung von Grund auf neu programmiert werden. Auch wenn es prinzipiell möglich ist die Modell-Handhabung (Greifen, Bewegen etc.) vollständig per Gesten vorzunehmen und dies auch umgesetzt wurde, kann es für die Studie nicht eingesetzt werden, da die Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei Vortests als nicht ausreichend eingestuft wurde. Aus diesem Grund wird eine Kombination aus Gesten- und Controller-Steuerung umgesetzt. Dabei greift der Proband das Modell mithilfe der Controller, sieht aber in der virtuellen Umgebung die Darstellung von Händen. Sobald der Proband das Modell mit einer Hand greift, werden auf die zweite virtuelle Hand die realen Handbewegungen des Probanden übertragen. Zusätzlich kann der Proband zwischen seinen realen getrackten Handbewegungen und fixen Händen, die durch die Controller gesteuert werden, umschalten. In Abbildung 4.13 sind die Varianten der Hände, wie für den Probanden sichtbar, und deren Erfassung dargestellt.



**Abbildung 4.13:** Varianten der virtuellen Hände der Modell-Studie

Die Handgröße ist auf einen 50-Perzentil Mann festgelegt und passt sich nicht auf den Probanden an. Die genaue Steuerung in der virtuellen Umgebung wird dem Probanden zu Beginn erläutert. Um einen häufigen Wechsel zwischen virtueller und realer Umgebung bei der Bewertung zu vermeiden, kann sich der Proband die Items der Befragung virtuell anzeigen lassen. Die Eintragung der Bewertungspunkte erfolgt jedoch durch den

Versuchsleiter am Befragungs-Computer, um ein durchgängiges Befragungssystem sicherzustellen. Die finale Umsetzung des VR-Systems wird als eigenständige Anwendung an einem VR-Rechner ausgeführt. Über ein Hauptmenü können die drei Modelle in ihrer jeweiligen Umgebung geladen werden. Die Auswahl wird durch den Versuchsleiter an einem zusätzlichen Monitor vorgenommen und dem Probanden mittels des HMD angezeigt. Während der Anzeige des Modells und der Versuchsumgebung über das HMD für den Probanden, wird das gleiche Bild am Versuchsleiter-Monitor dargestellt. Die eingesetzten Systeme, die vorgenommenen Einstellungen sowie die Unterschiede zwischen den Detaillierungsstufen sind in Abbildung 4.14 beschrieben.



**Abbildung 4.14:** Umsetzung der virtuellen Modelle R4

Die vollständige Programmierung des VR-Systems kann an dieser Stelle aufgrund des Umfangs nicht weiter detailliert beschrieben und dargestellt werden. Die finale Anwendung ist am Lehrstuhl für Technisches Design des IKTD einsehbar.

### 4.2.3 Festlegung der Modellreihenfolge

Ein wesentlicher Aspekt zur Reduzierung der Störeinflüsse auf die Untersuchung bedingt durch einen Lerneffekte ist, neben der Umsetzung verschiedener zugrundeliegender Produkte, die Ausbalancierung der Modelle [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007, S. 29]. Dabei wird die Reihenfolge der Modelle für jeden Probanden zum einen randomisiert, um zu verhindern, dass Erkenntnisse von frühen Modellen auf später bewertete Modelle übertragen werden und sich somit ein Lern- und Reihungseffekt auf die Bewertung auswirkt. Des Weiteren ist zu verhindern, dass Erkenntnisse von einem Modell bzw. einem Produkt und einer Darbietungsform direkt auf das nachfolgende Modell übertragen werden. Da hierfür eine reine Randomisierung nicht ausreichend ist, werden folgende zusätzlichen Randbedingungen definiert:

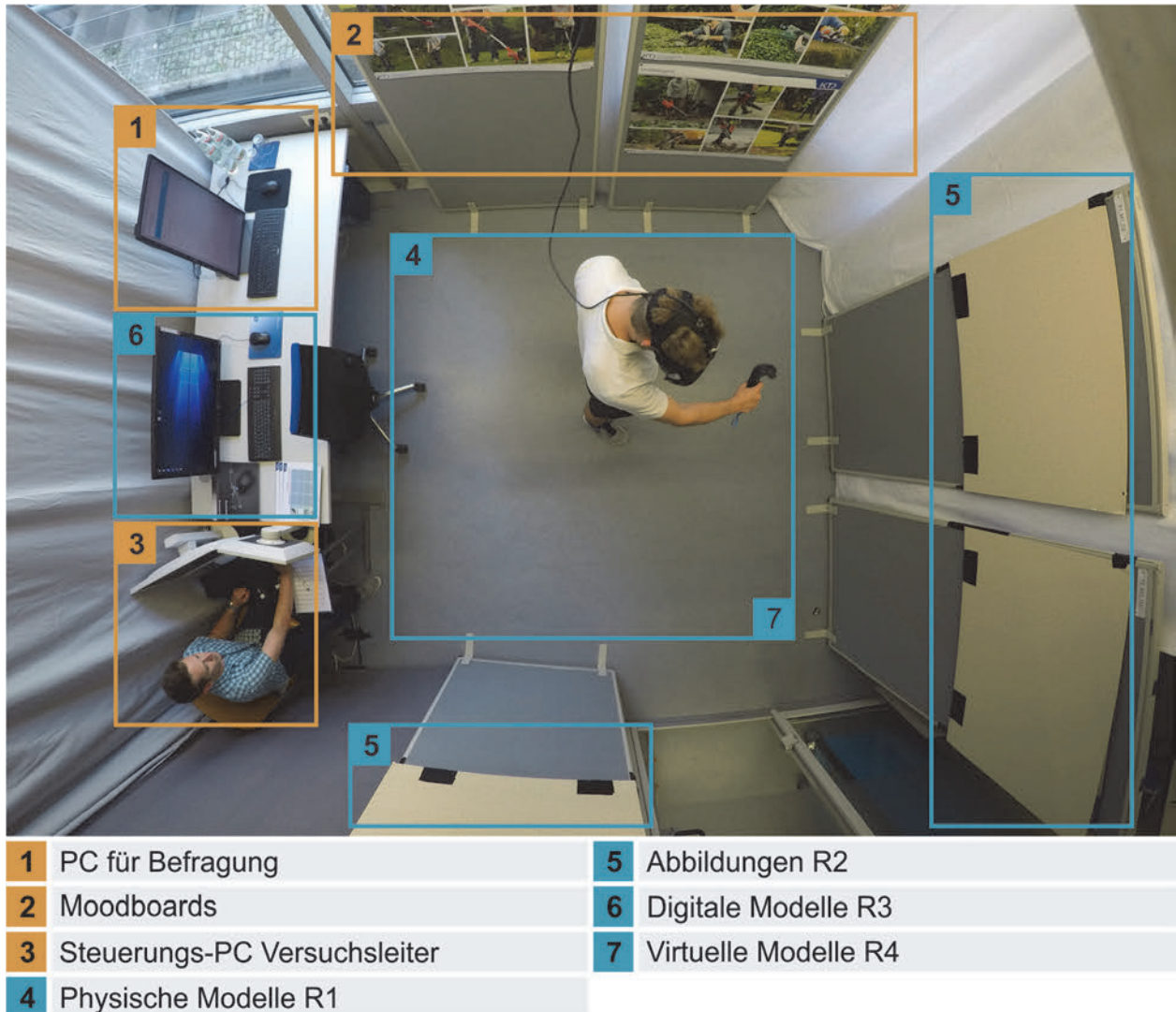
- keine identischen Repräsentationsformen in Folge und
- keine identischen Detaillierungsstufen in Folge.

Damit wird verhindert, dass zwei Modelle mit gleichem zugrundeliegendem Produkt oder in der gleichen Umgebung in Folge bewertet werden. Aufgrund der Vielzahl an Modellen kann trotz der Einschränkungen nicht jede mögliche Modellreihenfolge untersucht werden. Es handelt sich somit um eine unvollständige Ausbalancierung, die bei angemessenem Aufwand und Umfang eine adäquate Kontrolle von Störeinflüssen bietet [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007, S. 29 f]. Die Erstellung der individuellen Modellreihenfolgen für die Probanden wird durch ein Python Skript [JENKE 2019] unter Einhaltung der getroffenen Randbedingungen umgesetzt. Die ausgewählten Modellreihenfolgen sind der Tabelle A4.1 im Anhang zu entnehmen.

### 4.3 Versuchsaufbau

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, handelt es sich bei der Studie um ein Labor-Experiment. Um jedoch ein möglichst anwendungsnahes Umfeld unter größtmöglicher Vermeidung von Störeinflüssen zu schaffen, wurde eine neutrale und reduzierte Büroumgebung mit gleichmäßiger Beleuchtung aufgebaut. Die Ansicht des Versuchsraums von oben ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Die Bewertung der Modelle und die Beantwortung der Fragen erfolgt an einem separat dafür eingerichteten Computer (1). Jederzeit für den Probanden sichtbar und zugänglich sind die beschriebenen Moodboards (2), die die Anwendung der zugrundeliegenden Produkte der Modelle illustrieren. Der Versuchsleiter- und Steuerungs-Computer (3) ist seitlich zum Arbeitsplatz des Probanden angeordnet und somit im direkten Sicht- und Kontaktbereich für eventuelle Fragen. Die Begutachtung der Modelle erfolgt je Repräsentationsform in separaten Zonen in unmittelbarer Nähe zum Bewertungs-Computer, um eine begleitende Bewertung zu ermöglichen. Die Zone für das physische Modell (4) und das virtuelle Modell (7) ist hinsichtlich der Abmessungen an den maximalen Tracking-Raum des VR-Systems von 2,5 x 2,5 m angepasst und für beide Repräsentationsformen identisch. Die Abbildungen (5) sind an Stellwänden um diesen Bereich angeordnet, mit einer speziellen Vorrichtung abgedeckt und werden nur zur jeweiligen Modellbewertung gezeigt. Die Begutachtung der digitalen Modelle (6) erfolgt an einem eigenständigen Computer, der sich auf dem Schreibtisch neben dem Bewertungs-Computer befindet. Auf diese Art und Weise ist ein uneingeschränkter Wechsel zwischen Modell und Bewertung sowie ein gleichzeitiges Anzeigen sichergestellt.





**Abbildung 4.15:** Versuchsaufbau

#### 4.4 Vorversuch und Pretest

Die Durchführung eines Pretests ist in der empirischen Forschung üblich, um im Vorfeld der eigentlichen Datenerhebung diese zu optimieren, da nach Versuchsstart keine Änderungen mehr am Versuchsdesign und Fragebogen vorgenommen werden können, ohne dabei die Standardisierung der Erhebung zu gefährden [WEICHBOLD 2014, S. 299]. Es werden dabei nicht nur die einzelnen Fragen auf deren Formulierung und Antwortmöglichkeiten untersucht, sondern das gesamte Fragebogen- bzw. Erhebungskonstrukt bis hin zur technischen Umsetzung.

Im Rahmen der Studie wird im Vorfeld ein Pretest mit relevanten Probanden durchgeführt, um die durchgängige Eignung und Konstanz der Modelle, die Verständlichkeit der Erklärungen und der Fragen, die insgesamt Belastung für den Probanden sowie die Zuverlässigkeit der technischen Systeme zu überprüfen. Dabei hat sich gezeigt, dass das



---

geplante Vorgehen in seiner Gesamtheit realisierbar ist. Die Belastung der Versuchsdauer und die Anzahl an Modellen wurden dabei als angemessen eingestuft. Trotz der Vielzahl an Modellen ist aufgrund des Wechsels eine differenzierte Bewertung aus Probandensicht möglich. Auch die Durchsicht der Bewertung bestätigt diesen Eindruck. Ebenfalls bestätigt sich die in Kapitel 4.1.2.4 beschriebene zeitliche Planung. Geringfügige Anpassungen der Formulierungen sowie der Erklärungen hinsichtlich der Modellsteuerung und den Begrifflichkeiten werden vorgenommen. Bei der Durchführung des Pretests hat sich bezüglich des virtuellen Modells gezeigt, dass die Eintragung der Bewertung idealerweise durch den Versuchsleiter durchzuführen ist. Dies ist in der Versuchsplanung bzw. der Beschreibung des virtuellen Modells (vgl. Kapitel 4.2.2.4) bereits berücksichtigt. Aufgrund der Ergebnisse des Pretests kann die Studie entsprechend der zuvor beschriebenen Planung vorgenommen werden. Die Durchführung und Ergebnisse der Studie werden im Folgenden beschrieben und differenziert diskutiert.

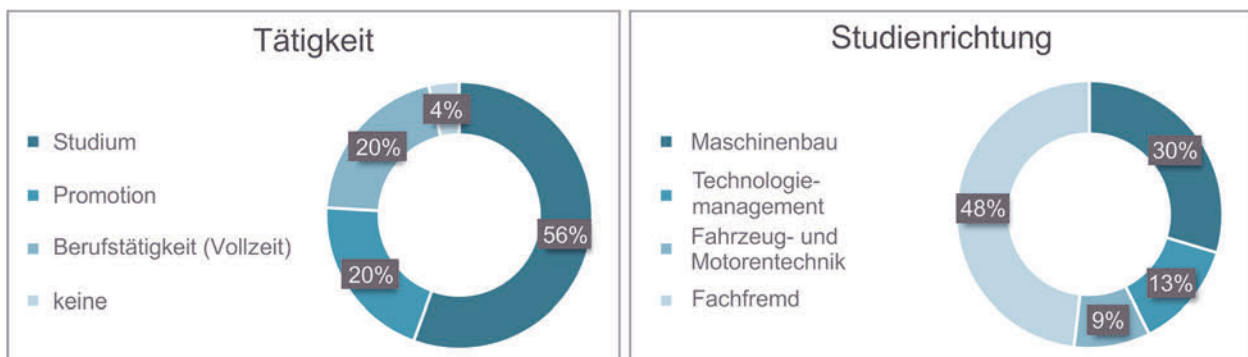
## **5 Studie zur Wahrnehmung von Produktmodellen**

Auf Grundlage der in Kapitel 4.1 beschriebenen Versuchsplanung und der in Kapitel 4.2 erstellten Modelle werden in diesem Kapitel die Durchführung und die Ergebnisse der Modell-Studie dargestellt, beschrieben und diskutiert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt untergliedert nach den Untersuchungsschwerpunkten. Hierzu wird zunächst die allgemeine Versuchsdurchführung beschrieben und anschließend je Schwerpunkt das Vorgehen der Auswertung vorgestellt, die Ergebnisse deskriptiv beschrieben und abschließend die parametrische Auswertung vorgestellt.

### **5.1 Versuchsdurchführung und Probandenkollektiv**

Die Durchführung der Studie erfolgte im Future Lab des Forschungs- und Lehrgebiets Technisches Design am IKTD. Die Versuchsumgebung wurde entsprechend der in Kapitel 4.3 erarbeiteten Vorgaben aufgebaut. Nach der Durchführung des Tests '3D Räumliches Orientierungsvermögen' des Wiener Testsystems von Schuhfried [BRATFISCH & HAGMAN 2014] zur Einordnung des Probandenkollektivs wurden die Teilnehmer mit Versuchsaufgabe und -ablauf vertraut gemacht. Hierzu wurden, nach dem Durchlesen der Aufgabe, der Fragebogen sowie Begrifflichkeiten der Teilgestalten und der Modelle besprochen, um für alle Probanden gleiche Voraussetzungen zu schaffen. Anschließend wurden den Teilnehmern die Modelle entsprechend der in Kapitel 4.2.3 festgelegten Randomisierung vorgelegt. Die Dauer der Begutachtung je Modell und die Zeit zum Beantworten der Fragen, war den Probanden frei überlassen. Die Teilnehmer konnten beliebig zwischen Begutachtung und Beantwortung der Fragen je Modell wechseln. Im Durchschnitt wurden für die Begutachtung des Modells und Beantwortung der Fragen 4:55 Minuten benötigt. Insgesamt lag die durchschnittliche Versuchsdauer für die Bewertung der 14 Modelle und 3 Produkte, zusammen mit der Einführung, dem Wechsel zwischen den Modellen und der abschließenden Befragung bei 75 Minuten. An der Studie haben 54 Probanden teilgenommen. Da keine Versuchsabbrüche, Komplikationen oder Fehler bei der Befragung vorkamen, konnten alle Teilnehmer für die Versuchsauswertung herangezogen werden. Das durchschnittliche Alter der Teilnehmer bei Versuchsdurchführung beträgt 28,4 Jahre mit einer Spanne von 20 bis 63 Jahren. Die Verteilung der Geschlechter ist bei 39 männlichen (72 %) und 15 weiblichen (28 %) Teilnehmern. Damit liegt der Anteil an weiblichen Teilnehmern leicht über dem Anteil an Frauen in MINT-Fächern [STATISTA 2016], was den größten fachlichen Hintergrund des Teilnehmerkreises repräsentiert. Die Auswahl der Teilnehmer erfolgte gezielt in zwei Gruppen. Für Gruppe 1

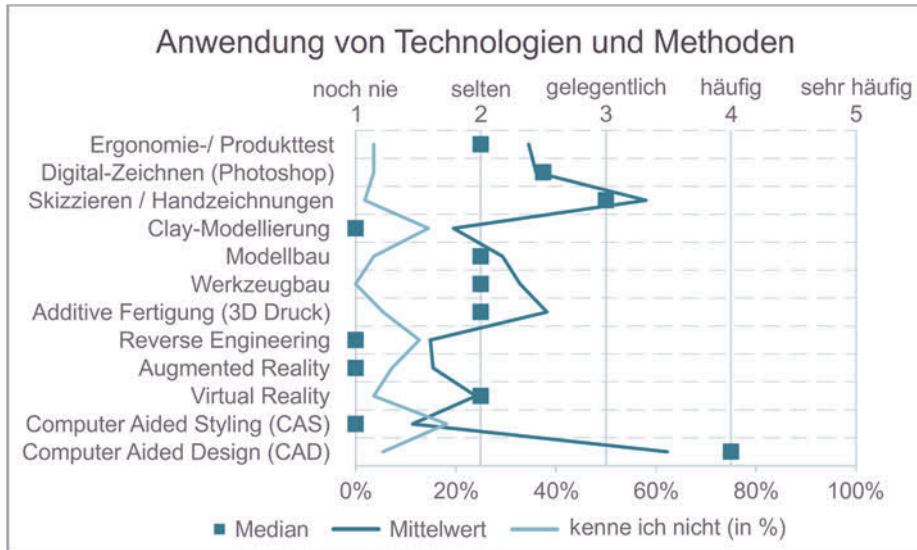
wurden Probanden ausgewählt, die Vorkenntnisse und -erfahrung im Bereich Technisches Design haben. Dies kann sowohl die fachliche Ausrichtung im Studium oder die berufliche Erfahrung betreffen. Gruppe 2 umfasst Teilnehmer aus verschiedenen relevanten Fachbereichen, jedoch ohne Erfahrung im Bereich Technisches Design oder Vergleichbarem. Hierdurch soll untersucht werden, inwieweit sich die fachliche Vorprägung auf die Bewertung anhand von Modellen auswirkt und ob dies bei der späteren Wahl des Modells zu berücksichtigen ist. Um eine aussagekräftige statistische Auswertung zu gewährleisten wurde auf eine Mindestgruppengröße von 25 Personen geachtet, siehe Kapitel 4.1.2.1. Aufgrund versuchsökonomischer Aspekte und der räumlichen Gebundenheit entstammen die Probanden zu einem Großteil dem universitären Umfeld. Die Verteilung der Probanden bezüglich der Tätigkeit und der Studienrichtung ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die größte Kategorie der Studienrichtung ist Fachfremd mit 48 %. Das beinhaltet Studienrichtungen wie Medizintechnik, Luft- und Raumfahrttechnik, Immobilitäts-technik, Informatik oder Psychologie. Entsprechend der Vorüberlegungen und der Projektanalyse in Kapitel 3.2.5.2 wurde somit bei der Probandenauswahl darauf geachtet, dass die Stichprobe möglichst repräsentativ das Anwendungsumfeld der untersuchten Modelle widerspiegelt.



**Abbildung 5.1:** Tätigkeit und Studienrichtung der Probanden

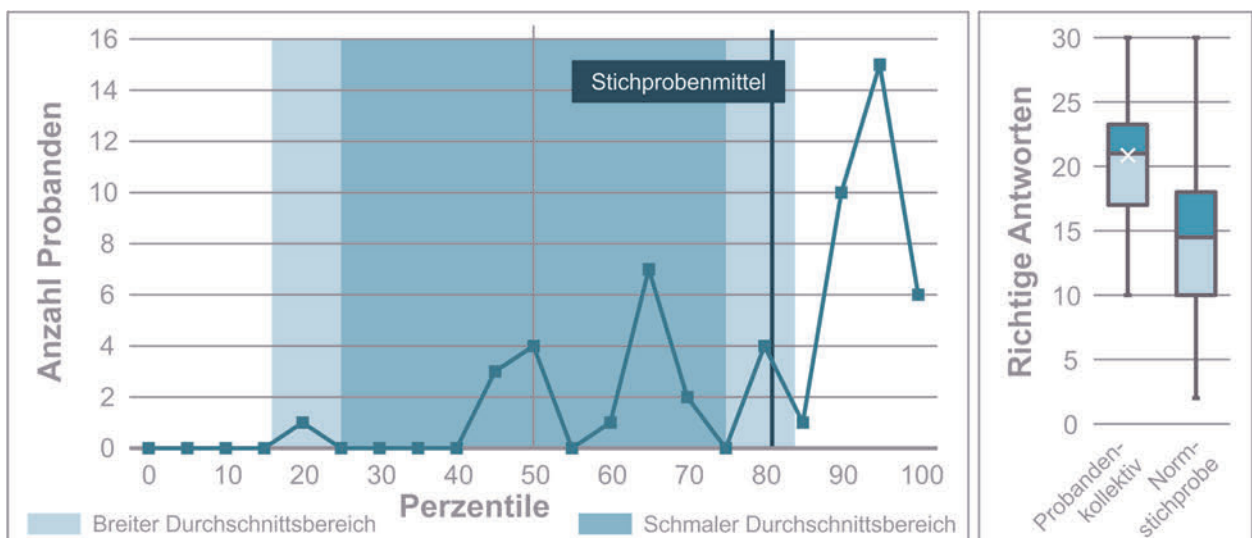
Für die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen der Erfahrung der Probanden mit verschiedenen Werkzeugen und der Bewertung anhand der Modelle, wurde die Häufigkeit der Anwendung verschiedener Technologien und Methoden erhoben. Die Werkzeuge wurden entsprechend der Modelle und Werkzeuge in Kapitel 3.2 ausgewählt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Probanden sollten dabei angeben, wie häufig sie mit den Werkzeugen arbeiten oder gearbeitet haben. Zusätzlich stand die Option 'kenne ich nicht' zur Verfügung. Hier zeigt sich entsprechend des Probandenkollektivs mit gelegentlicher bis häufiger Anwendung die verbreitete Arbeit mit CAD und Skizziertechniken. Auch die Additive Fertigung ist mit 'selten' bis 'gelegentlich' eines der

vermehrt angewendeten Werkzeuge. Insbesondere Spezialwerkzeuge wie das Computer Aided Styling, das Reverse Engineering oder die Clay-Modellierung sind bei den Teilnehmern nicht bekannt. Die Zusammenhänge der Erfahrung mit der Bewertung anhand der Modelle werden in den folgenden Kapiteln bei der Auswertung der Ergebnisse diskutiert.



**Abbildung 5.2:** Erfahrung der Probanden mit Technologien und Methoden

Für die Einstufung des Probandenkollektivs anhand eines standardisierten Verfahrens wurde, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, zu Beginn der Studie von jedem Teilnehmer der Test '3D Räumliches Orientierungsvermögen' des Wiener Testsystems von Schuhfried [BRATFISCH & HAGMAN 2014] durchgeführt. Die Ergebnisse des Probandenkollektivs (N=54) sind in Abbildung 5.3 dargestellt.



**Abbildung 5.3:** Ergebnisse des Tests 3D Räumliches Orientierungsvermögen

Das linke Diagramm zeigt die Zuordnung der Probanden zu den Perzentilen auf Basis der Normstichprobe und deren Häufigkeit. Die erreichten Prozentränge wurden auf 5 %-Schritte gerundet. Das tatsächliche Stichprobenmittel ist als Linie dargestellt. Das rechte Diagramm zeigt die Box-Plots der richtigen gegebenen Antworten des Probandenkollektivs und der Normstichprobe. Anhand des linken Diagramms ist zu erkennen, dass das Probandenkollektiv im oberen Bereich des breiten Durchschnittsbereichs einzuordnen ist, bezüglich des schmalen Durchschnittsbereichs ist das Probandenkollektiv als überdurchschnittlich einzustufen. Insgesamt ist das Probandenkollektiv als leicht überdurchschnittlich leistungsfähig in Bezug auf das räumliche Wahrnehmungsvermögen einzuordnen. Die Auswirkungen dieser Verschiebung werden in Kapitel 5.2.1.4 untersucht.

## 5.2 Studienergebnisse der Modell-Produkt Abweichung

Der Hauptfokus der Untersuchung ist die Ermittlung der Abweichung zwischen der Bewertung anhand eines Modells und der tatsächlichen Ausprägung von Eigenschaften eines Produkts. Die Befragung erfolgt nach und während der Begutachtung des Modells anhand des in Kapitel 4.1.2.3 beschriebenen Vorgehens. Die Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben und diskutiert. Zunächst wird in Kapitel 5.2.1 das allgemeine Vorgehen der Auswertung beschrieben. Dieses Vorgehen der Auswertung ist in Abbildung 5.4 zusammengefasst dargestellt.

1. Vorbereitung	
<b>Datenaufbereitung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bildung der Modell-Produkt-Abweichung</li> <li>• Umrechnung auf prozentuale Abweichung</li> </ul>
<b>Zusammenhänge und Gruppenunterschiede</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gruppenbildung und t-Test für unabhängige Stichproben</li> <li>• Levene-Test auf Varianzhomogenität (<math>p &gt; .05</math>)</li> <li>• Spearman Test auf Rangkorrelation</li> </ul>
<b>Kontrolle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überprüfung der Kontrollmodelle auf den Produkteinfluss</li> <li>• t-Test für verbundenen Stichproben</li> <li>• Morgan-Pitman-Test</li> </ul>
2. Deskriptive Statistik	
<b>Darstellung und Beschreibung der Daten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Box-Whisker-Plots</li> <li>• Säulen-Linien-Diagramm</li> </ul>
3. Inferentielle Statistik	
<b>Genauigkeit / Richtigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung, Signifikanzniveau <math>p &lt; .05</math> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauchly-Test auf Sphärizität (<math>p &gt; .05</math>)</li> <li>• evtl. Greenhouse-Geisser Korrektur</li> <li>• Post-hoc Paarvergleiche mit Bonferroni-Korrektur</li> </ul> </li> <li>• Einstichproben t-Test (nur Richtigkeit)</li> </ul>
<b>Präzision</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Morgan-Pitman-Test</li> <li>• Paarweise ausgeführt mit Bonferroni-Holm Korrektur</li> </ul>

**Abbildung 5.4:** Vorgehen der Auswertung der Modell-Produkt-Abweichung

### 5.2.1 Vorgehen bei der Auswertung

Die Bewertung der Produkteigenschaften durch die Probanden erfolgte anhand einer Rating Skala von 'sehr schlecht' (1) bis 'sehr gut' (6). Für die Auswertung relevant ist jedoch die Abweichung zwischen der Bewertung der Eigenschaft anhand eines Modells und anhand des Produkts. Die Bewertung des Produkts ist der absolute Maßstab, da diese nicht durch Einschränkungen der Wahrnehmung oder durch vereinfachte Repräsentationen beeinflusst wird. Aus diesen beiden Werten wird die Bewertungsdifferenz durch Subtraktion der Produktbewertung von der Modellbewertung für jedes Modell ermittelt. Ein negatives Ergebnis bedeutet, dass die Eigenschaft anhand des Modells schlechter bewertet wurde als anhand des Produkts und somit eine Unterbewertung der Eigenschaft zeigt. Ein positives Ergebnis bedeutet, dass die Bewertung am Modell besser als die Bewertung am Produkt ausgefallen ist und somit eine Überbewertung der Eigenschaft darstellt. Auf Basis der Punktabweichung wird eine Umrechnung auf eine prozentuale Abweichung zwischen Modell- und Produktbewertung vorgenommen, siehe Tabelle 5.1.

Bewertungs- differenz	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Prozentuale Abweichung in %	- 100	- 80	- 60	- 40	- 20	0	20	40	60	80	100
Prozentuale Abweichung dez.	- 1	- 0,8	- 0,6	- 0,4	- 0,2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1

**Tabelle 5.1:** Umrechnung der Modell-Produkt Abweichung

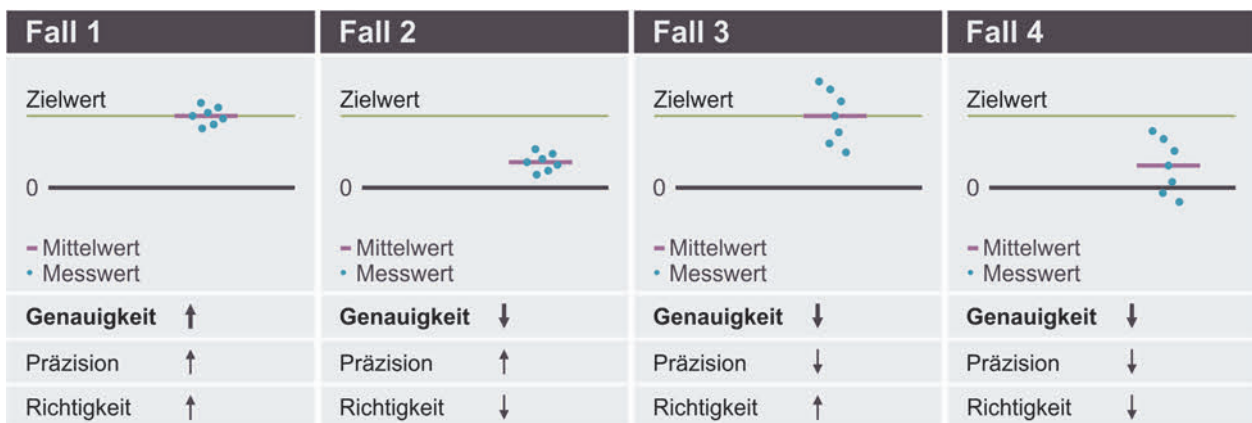
Die Grenzen ergeben sich durch die Subtraktion der höchsten möglichen und der niedrigsten möglichen Bewertung, die umgerechnet als +/- 100 % Abweichung definiert werden. Für die weiteren Berechnungen werden die Dezimalwerte der prozentualen Abweichung herangezogen. Der Abgleich der Modellbewertung mit der Produktbewertung ist vergleichbar mit der Auswertung von Messabweichungen in der Messtechnik [DIN 1319-1 1995]. Hierbei wird ein Messwert, in dieser Arbeit die Modellbewertung, mit einem Referenzwert, in diesem Fall die Produktbewertung, verglichen. Die hierfür relevanten Größen sind die Genauigkeit, die Richtigkeit sowie die Präzision [DIN ISO 5725-1 1997], die im Folgenden genauer beschrieben werden.

#### 5.2.1.1 Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision

Die Genauigkeit beschreibt den Umfang der Annäherung eines Ermittlungsergebnisses an einen definierten Referenzwert [DIN ISO 5725-1 1997]. Bei der Betrachtung einer Reihe an Messwerten kann die Genauigkeit als Obergriff für die Kombination von Präzision und Richtigkeit beschrieben werden und es ist somit die Kombination der



systematischen und der zufälligen Abweichung [HEDDERICH & SACHS 2012, S. 92]. In der Statistik wird die Genauigkeit eines Schätzers meistens durch die mittlere quadratische Abweichung (MSE) beschrieben (siehe Formel 5.3), die sich additiv aus der systematischen Abweichung (Verzerrung, Bias) und der Varianz (Streuung) zusammensetzt [SACHS 2002, S. 128 f.]. Die Zusammenhänge von Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision sind in Abbildung 5.5 dargestellt.



**Abbildung 5.5:** Zusammenhang von Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision

Die Richtigkeit ist ein Maß für die Übereinstimmung zwischen dem Mittelwert einer großen Serie an Messwerten und dem anerkannten oder definierten Referenzwert [DIN ISO 5725-1 1997], siehe Formel 5.1. Das bedeutet, es liegt kein systematischer Fehler vor. Übertragen auf diese Studie wäre dies ein Maß für den Einfluss des Modells in seiner Repräsentationsform und Detaillierung. Das relevante Maß ist der Mittelwert der ermittelten prozentualen Abweichung je Modell. Für die Berechnung der Verzerrung gilt

$$Bias = |\bar{x}_A - x_{Ref}| \quad (5.1)$$

$\bar{x}_A$  = Mittelwert der Abweichung

$x_{Ref}$  = Referenzwert

Ziel einer hohen Richtigkeit der Ergebnisse ist demnach eine möglichst geringe Verzerrung, wie sie in Abbildung 5.5 bei Fall 1 und 3 vorliegt. Bei beiden Fällen liegt der Mittelwert der einzelnen Messwerte nah am Zielwert. Im Rahmen dieser Studie ist der Zielwert 0. Das bedeutet die Modellbewertung und die Produktbewertung sind identisch. Die Präzision ist ein Maß für die gegenseitige Annäherung von unabhängigen Messergebnissen unter festen Bedingungen [DIN ISO 5725-1 1997]. Es handelt sich demnach um die Streuung der Messwerte. Berechnet wird die Präzision durch die Varianz oder Standardabweichung der Messwerte, siehe Formel 5.2. Es handelt sich dabei um einen

zufälligen Fehler und steht nicht in Beziehung zum Referenzwert, wie bei Fall 2 in Abbildung 5.5 zu sehen ist. Die einzelnen Messwerte liegen nah beisammen, es besteht somit eine hohe Präzision. Der Mittelwert ist jedoch weit vom Zielwert entfernt und hat somit in diesem Fall eine geringe Richtigkeit. Dementsprechend ist die Genauigkeit als Maß bei der Faktoren gering. Für die Berechnung der Varianz als Maß der Streuung gilt:

$$Var = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.2)$$

$n$  = Anzahl an Messwerten

$x_i$  = Messwerte der Stichprobe

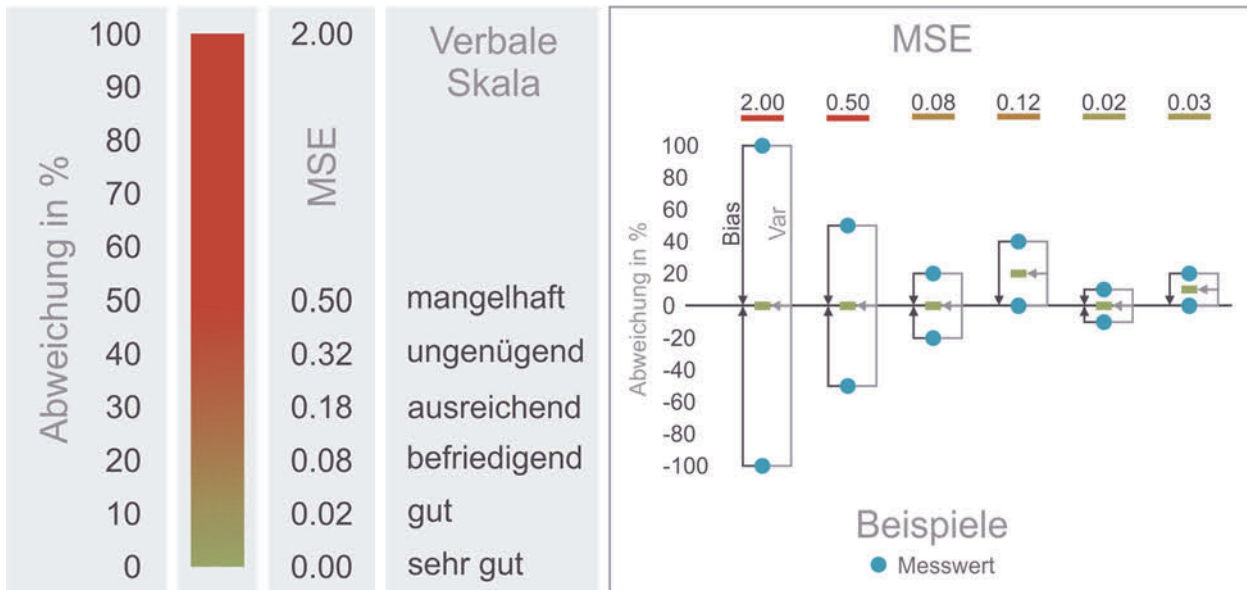
$\bar{x}$  = Mittelwert der Messwerte

Zusammenfassend ist die Voraussetzung für eine hohe Genauigkeit eine geringe Verzerrung und Streuung der Messergebnisse, wie bei Fall 1 in Abbildung 5.5 zu sehen ist. Der Mittelwert der Messwerte deckt sich mit dem Zielwert, im Falle der Auswertung der Modell-Produkt-Abweichung wäre dies der Wert 0. Die Streuung der Einzelwerte ist zudem gering. Das Gegenteil ist bei Fall 4 zu sehen. Hier liegen der Mittelwert und der Zielwert weit auseinander und die Einzelwerte streuen stark. Für die Berechnung der Genauigkeit gilt

$$MSE = (Bias)^2 + Var \quad (5.3)$$

Die mittlere quadratische Abweichung ist invers zur Genauigkeit und besitzt ihr Optimum bei 0, sprich die höchstmögliche Genauigkeit. Der MSE-Wert lässt keinen direkten Rückschluss auf die Abweichung zu, ermöglicht jedoch einen Vergleich von Genauigkeiten [HEDDERICH & SACHS 2012, S. 298]. Der MSE wird zunächst für jede Einzelbeobachtung  $x_i$  ermittelt und anschließend der Mittelwert als Vergleichsgrundlage der Modelle gebildet. Für die Werte der Genauigkeit gibt es demnach keine standardisierte Skala zur absoluten Einordnung und Bewertung. Es wurde daher im Rahmen dieser Arbeit eine Bewertungsskala entwickelt, die auf der bei dieser Untersuchung maximal möglichen Abweichung und dessen MSE basiert. Ziel der Skala ist eine absolute Einordnung des MSE-Werts zu ermöglichen und somit die Vergleichbarkeit zu verbessern. In Abbildung 5.6 ist die Skala mit Beispielen dargestellt. Die Grenze von 50 % basiert auf der Annahme, dass bei der vorliegenden Skala mit den Grenzen sehr schlecht bis sehr gut bei einer Abweichung von 50 % der Bereich zwischen gut und schlecht überschritten wird. Die weiteren Werte wurden für die jeweiligen Abweichungen durch Berechnung des MSE bei maximaler Streuung (+ x % / - x %) ermittelt. Die Beispiele der Abbildung 5.6 verdeutlichen diese Vorgehensweise und zeigen den Einfluss der Abweichung und der Streuung. Bei gleicher

Varianz besitzt das Beispiel mit geringerer Abweichung den besseren MSE-Wert (0.02 zu 0.03) und bei gleicher Abweichung das Beispiel mit geringerer Varianz (0.02 zu 0.08).



**Abbildung 5.6:** Bewertungsskala der mittleren quadratischen Abweichung (MSE)

Die Vorgehensweise der statistischen Auswertung der Genauigkeit, Präzision und Richtigkeit wird im Folgenden beschrieben.

### 5.2.1.2 Deskriptive und inferentielle Statistik

Die statistische Auswertung der Ergebnisse gliedert sich in die deskriptive und die inferentielle Statistik. Die deskriptive Statistik umfasst eine erste Beschreibung und Visualisierung der erhobenen Daten [ALBERT & MARX 2014, S. 115], mit dem Ziel einen Überblick zu erhalten und wesentliche Informationen zu ermitteln [RAAB-STEINER & BENE-SCH 2010, S. 82]. Dabei erfolgt meist eine Reduktion der Daten und die Ableitung wichtiger Hauptaussagen. Es werden hierzu die Daten der Studie in Kapitel 5.2.2 aufbereitet und in Form von Box-Plots visualisiert. Wie zuvor beschrieben wird für die Einzelergebnisse die Differenz zwischen der Modellbewertung und Produktbewertung gebildet und eine prozentuale Abweichung abgeleitet. Die neun erhobenen Items sind den Teilgestalten Aufbau, Form und Oberfläche / Farbe zugeordnet, wie in Kapitel 2.1 beschrieben. Für die Teilgestalten wird aus den Einzelitems der Mittelwert gebildet. Dabei sind die Einzelitems gleichgewichtet. Aus den Teilgestalten wiederum wird ebenfalls gleichgewichtet der Mittelwert für die Gesamt-Modell-Produkt-Abweichung gebildet. Die weitere Betrachtung der Ergebnisse erfolgt auf Basis der Gesamtabweichung. Die Ergebnisse der Teilgestalten sowie Einzelitems sind dem Anhang A5 zu entnehmen.

Die Darstellung der Daten mittels Box-Plots ermöglicht eine schnelle und übersichtliche Erfassung der Daten und deren Verteilung [RAAB-STEINER & BENESCH 2010, S. 90 ff]. Wie in Kapitel 4.1.2.3 beschrieben erfolgte die Erhebung der Daten mittels einer Intervallskala. Aufgrund der Verwendung der Modell-Produkt-Abweichung liegen metrisch skalierte Daten vor. Die Boxplots umfassen daher neben dem Median auch den Mittelwert. Die Länge der Whisker ist gemäß LEWANDOWSKI & BOLT [2010] auf das 1.5-fache des Interquartilsabstands definiert. Die dargestellten Ausreißer liegen dementsprechend über oder unter diesen Grenzen.

Nach der deskriptiven Statistik erfolgt im nächsten Schritt die inferentielle Statistik mit Überprüfung der Hypothesen. Dazu werden die zuvor aufbereiteten Daten mittels statistischer Verfahren untersucht. Für die in Kapitel 5.2.1.1 beschriebenen relevanten Größen der Untersuchung Genauigkeit, Präzision und Richtigkeit werden verschiedenen statistische Tests angewendet. Die Richtigkeit der Bewertung wird zum einen mittels einer zweifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung auf Unterschiede geprüft. Die Innersubjektfaktoren sind die Repräsentationsform und die Detaillierung. Zum Ausgleich der Alphafehler-Kumulierung erfolgt bei den anschließenden paarweise ausgeführten Post-hoc Tests eine Korrektur des Signifikanzniveaus nach Bonferroni. Der Gesamtvergleich der Mittelwerte bezüglich der Abweichung von Modell- und Produktbewertung lässt jedoch nur Schlüsse zu, ob es Unterschiede zwischen zwei Werten gibt, jedoch nicht welcher Wert in Bezug auf den Referenzwert (keine Abweichung zwischen Modell- und Produktbewertung) besser ist. Dazu wird zusätzlich ein Einstichproben t-Test für jeden Wert durchgeführt, zum Vergleich des Mittelwerts der Abweichung  $\bar{x}_{A;r;d}$  mit dem Referenzwert  $x_{Ref} = 0$  auf signifikante Unterschiede [HEDDERICH & SACHS 2012, S. 438 ff]. Für die Anwendung der ANOVA gelten die Voraussetzungen [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018]:

- intervallskalierte Daten der abhängigen Variable,
- Normalverteilung der abhängigen Variable und
- Sphärizität gegeben.

Bezüglich der Voraussetzung der Normalverteilung zeigt die Literatur [SALKIND 2010] auf, dass die ANOVA robust gegenüber Verletzungen ist. Darüber hinaus kann bei einer ausreichend großen Stichprobe ( $n \geq 30$ ), wie im vorliegenden Fall ( $n = 54$ ), von einer annähernden Normalverteilung ausgegangen werden [KÄHLER 2004], [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018]. Die Überprüfung der Sphärizität erfolgt mittels des Mauchly-Tests. Bei einer Verletzung der Sphärizität ( $p < .05$ ) wird eine Korrektur nach Greenhouse-Geisser

oder Huynh-Feldt [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018] durchgeführt. Die statistische Auswertung der Daten wird mit der Software SPSS 24.0 von IBM vorgenommen.

Die Überprüfung der relevanten Größe Präzision erfolgt mittels des Morgan-Pitman-Tests [GARDNER 2001, S. 57]. Hierbei werden die Varianzen paariger Stichproben auf Gleichheit geprüft. Diese Vorgehensweise kann beispielsweise beim Präzisionsvergleich von Instrumenten oder Verfahren eingesetzt werden. Gegenüber den Verfahren nach Cochran, Hartley oder Barlett [SACHS 2002, S. 614-619] können jedoch die Varianzen abhängiger Gruppen verglichen werden, wie es im Anwendungsfall dieser Arbeit der Fall ist, da die Bewertungen der gleichen Gruppe verglichen werden. Der Test wird paarweise ausgeführt und zur Vermeidung einer Alphafehler-Kumulierung erfolgt eine Bonferroni-Holm-Korrektur. Diese ist weniger konservativ als eine Bonferroni Korrektur und aufgrund der Anzahl an Paarvergleichen bevorzugt [ABDI 2010]. Der Morgan-Pitman-Test wird von der eingesetzten Software SPSS 24.0 nicht unterstützt und daher auf Basis der Formeln 5.4 bis 5.6 [SACHS 2002, S. 410], [GARDNER 2001, S. 57] in Microsoft Excel berechnet:

$$\hat{t} = \frac{|(Q_x - Q_y) \cdot \sqrt{n - 2}|}{2\sqrt{Q_x Q_y - (Q_{xy})^2}} \quad (5.4)$$

$$Q_{x;y} = (n - 1)s^2 \quad (5.5)$$

$$Q_{xy} = \sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n} \quad (5.6)$$

$n$	=	Stichprobenumfang	$s$	=	Varianz
$Q$	=	Q-Symbolik (Summe der Abweichungsquadrate/-produkte	$\hat{t}$	=	t-Wert
			$x; y$	=	Merkmalsausprägung

Die inferenzstatistische Auswertung der Genauigkeit erfolgt ebenfalls durch eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung. Die Voraussetzung und das Vorgehen sind identisch zur Beschreibung der Bewertung der Richtigkeit. Die zu überprüfenden Hypothesen werden im Folgenden vorgestellt.

### 5.2.1.3 Forschungshypothesen

Entsprechend der in Kapitel 4 beschriebenen Studie dient die im vorherigen Abschnitt erläuterte Vorgehensweise der Überprüfung der Alternativhypothesen  $H_x$  bzw. der korrespondierenden Nullhypothesen  $H_{0x}$  bezüglich der Modell-Produkt-Abweichung in Tabelle 5.2. Die Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen werden in Kapitel 5.2.3 vorgestellt und diskutiert.

Richtigkeit	
H <sub>11</sub>	Es gibt einen Unterschied der mittleren Abweichung von Modell- und Produktbewertungen bedingt durch die Repräsentationsform $H_{11}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
H <sub>12</sub>	Es gibt einen Unterschied der mittleren Abweichung von Modell- und Produktbewertungen bedingt durch die Detaillierung $H_{12}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$
H <sub>13</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Mittelwerten der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen hinsichtlich der Expertise $H_{13}: \mu_1 \neq \mu_2$
H <sub>14</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen der mittleren Abweichung von Modell- und Produktbewertung und dem Referenzwert $H_{14}: \mu_i \neq 0$
Präzision	
H <sub>15</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Varianzen der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen bedingt durch die Repräsentationsform $H_{15}: s_1^2 \neq s_2^2 \neq s_3^2 \neq s_4^2$
H <sub>16</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Varianzen der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen bedingt durch die Detaillierung $H_{16}: s_1^2 \neq s_2^2 \neq s_3^2$
Genauigkeit	
H <sub>17</sub>	Es gibt einen Unterschied des mittleren quadratischen Fehlers der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen hinsichtlich der Repräsentationsform $H_{17}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
H <sub>18</sub>	Es gibt einen Unterschied des mittleren quadratischen Fehlers der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen hinsichtlich der Detaillierung $H_{18}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

H<sub>x</sub> = Alternativhypothese |  $\mu_x$  = Erwartungswert des Testergebnisses (mittlere Abweichung / MSE) |  
s<sub>x</sub> = Erwartungswert des Testergebnisses (Varianz)

**Tabelle 5.2:** Alternativhypothesen Produkt-Modell-Abweichung

#### 5.2.1.4 Zusammenhangsprüfung und Gruppenunterschiede

Im Rahmen der Studie wurden zu Beginn Daten bezüglich der Vorerfahrung und Expertise der Probanden erhoben. Im Folgenden werden die Daten auf Zusammenhänge mit der Modell-Produkt-Abweichung und Unterschiede durch Gruppenzugehörigkeit untersucht. Die Überprüfung wird am Parameter Genauigkeit vorgenommen. Hierzu werden auf Basis des Skalenniveaus der zugrundeliegenden Daten unterschiedliche Vorgehensweisen und Verfahren angewendet. Des Weiteren wird ermittelt, ob die Reihenfolge der Modelldarbietung, insbesondere das Physische als Erstmodell, Einfluss auf die Modell-Produkt-Abweichung hat. Für die Überprüfung werden folgenden Verfahren angewendet:

- Gruppenbildung (TD-Hintergrund, Modellreihenfolge, Geschlecht, Fehlsichtigkeit) und Auswertung mittels t-Test für unabhängige Stichproben mit Levene-Test auf Varianzhomogenität ( $p > .05$ ) bei Nominal-/Intervallskalen-Paarung,
- Spearman-Test auf Rangkorrelationen bei Ordinal-/Intervallskalen-Paarung.

Wie in Kapitel 4 beschrieben, soll mit der Studie auch überprüft werden, ob sich Personen mit Vorerfahrung und Kenntnissen im Bereich Technisches Design bei der Bewertung von Modellen bezüglich der Abweichung von Personen ohne dieses Wissen unterscheiden. Neben der Überprüfung mittels t-Test auf Basis der Gruppenbildung wird als umfangreiche Untersuchung eine mixed ANOVA durchgeführt, um den Haupteffekt der



Gruppenzugehörigkeit zu ermitteln. Hier hat sich in Bezug auf die Modell-Produkt-Abweichung des Gesamtprodukts (gemittelt über alle Items) kein Effekt der Gruppe gezeigt ( $p > .05$ ). Im Folgenden wird bei der Auswertung daher nicht zwischen den beiden Gruppen (TD-Hintergrund) unterschieden und die Auswertung auf Basis der Gesamtstichprobe ( $N = 54$ ) vorgenommen. In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der Prüfung auf Zusammenhänge und Gruppenunterschiede mit Angabe des jeweiligen Tests dargestellt.

Untersuchungsparameter	Test	Beschreibung Ergebnis	Sig.	Varianzhomogenität
TD-Hintergrund	T/A	keine Unterschiede erkennbar	$p > .05$	$p > .05$
R1 vor R2-4	T	keine Unterschiede erkennbar	$p > .05$	$p > .05$
R1_D1 zuerst	T	keine Unterschiede erkennbar	$p > .05$	$p > .05$
R1_D2 zuerst	T	keine Unterschiede erkennbar	$p > .05$	$p > .05$
R1_D3 zuerst	T	keine Unterschiede erkennbar	$p > .05$	$p > .05$
Alter	S	keine Zusammenhänge erkennbar	$p > .05$	
CAD Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	$p > .05$	
VR Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	$p > .05$	
Skizzier- Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	$p > .05$	
Ergonomie-Test Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	$p > .05$	
WTS	S	Je höher WTS desto höher die Genauigkeit bei R1 und R2	$p < .05$	
Fehlsichtigkeit	T	Höhere Ungenauigkeit bei Personen mit Fehlsichtigkeit, insbesondere bzgl. der TG Form und Oberfläche bei R2	$p < .05$	$p > .05$
Brille	A	Höhere Ungenauigkeit bei Brillenträgern gegenüber nicht Brillenträgern, insbesondere bei R2 und R3 bzgl. der TG Form und Oberfläche	$p < .05$	$p > .05$

T: t-Test S: Spearman Korrelation A: ANOVA

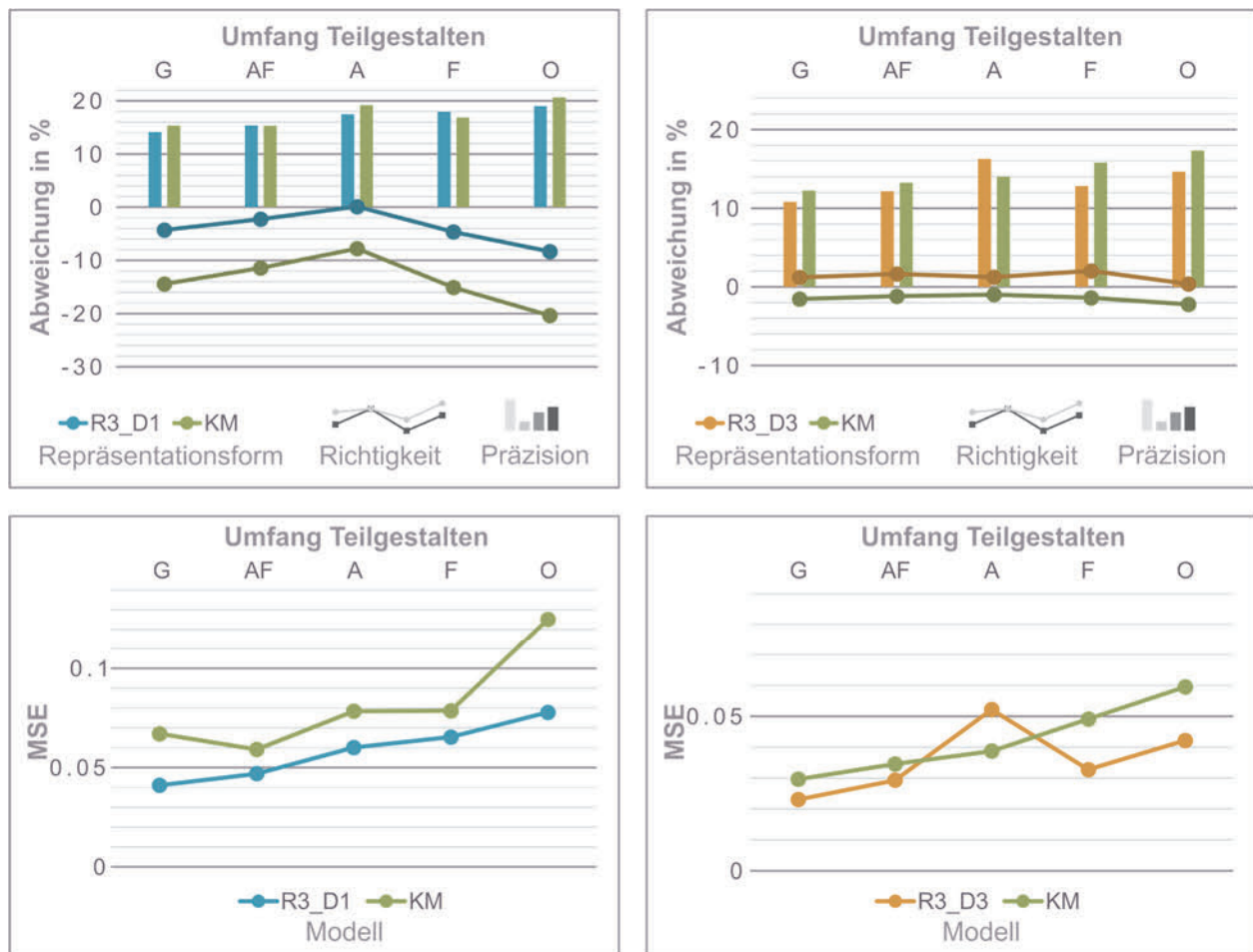
**Tabelle 5.3:** Zusammenhänge und Gruppenunterschiede

Die Überprüfung der Modellreihenfolge zeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied gibt, ob ein physisches Modell (R1) zuerst bewertet wurde oder ein anderes Modell. Dies lässt darauf schließen, dass die Randomisierung der Modelle passend gewählt wurde und die Daten diesbezüglich ohne Einschränkungen interpretiert werden können. Zwischen den Parametern der Erfahrung und der Genauigkeit der Bewertung konnten keine Zusammenhänge festgestellt werden. Dies zeigt, zusammen mit dem nicht vorhandenen Unterschied bedingt durch den TD-Hintergrund, dass die Erfahrung im Umgang mit den Werkzeugen und Modellen nicht zwangsläufig zu einem genaueren Ergebnis der Bewertung führt. Dies ist bei der späteren Auswahl von Modellen in Kapitel 6.1.2 zu berücksichtigen. Leichte Unterschiede zeigen sich bei der Überprüfung des Geschlechts, der Fehlsichtigkeit und bei Brillenträger. Jedoch nur in sehr begrenztem Ausmaß in Bezug auf einzelne Teilgestalten oder Repräsentationsformen. Ein Zusammenhang zeigt

sich zwischen dem erreichten Wert beim Eingangstest mit dem Wiener Testsystem und der Genauigkeit der Bewertung der Repräsentationsform R1 und R2. Mögliche Auswirkungen dieses Zusammenhangs werden in Kapitel 5.6.1 diskutiert.

### 5.2.1.5 Überprüfung der Kontrollmodelle

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wurden im Rahmen der Studie neben den zwölf Modellen zwei Kontrollmodelle (KM) untersucht. Die Modelle R3\_D1 und R3\_D3 waren doppelt vorhanden, aber unterschieden sich im dargestellten Produkt. Hiermit soll überprüft werden, ob das Produkt Einfluss auf die Bewertung hat oder allein die Repräsentationsform und die Detaillierung. Die Auswertung der beiden Kontrollmodelle erfolgt entsprechend des in Kapitel 5.2.1.2 beschriebenen Vorgehens für die Richtigkeit, die Präzision und die Genauigkeit. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 5.7 dargestellt.



**Abbildung 5.7:** Überprüfung der Kontrollmodelle bezüglich Richtigkeit, Präzision und Genauigkeit

Von links nach rechts sind die Daten je Diagramm, gebildet aus den Einzelitems, für das Gesamtprodukt (G), die Kombination Aufbau-Form (AF) sowie die Teilgestalten Aufbau

(A), Form (F) und Oberfläche/Farbe (O) angeordnet. Der MSE-Wert ist invers zur Genauigkeit. Ein niedriger MSE-Wert bedeutet eine höhere Genauigkeit. Die ähnlichen Verläufe der Richtigkeit und Genauigkeit sowie die ähnlichen Werte der Präzision deuten darauf hin, dass das Produkt nicht ausschlaggebend ist, sondern die jeweilige Detaillierung und Repräsentationsform. Die inferenzstatistische Auswertung zeigt nur bezüglich der Richtigkeit einen signifikanten Unterschied zwischen R3\_D1 und dem Kontrollmodell ( $t = -3.990$ ,  $p = .000$ ,  $N = 54$ ). Dieser kann jedoch auf geringe Unterschiede der Detaillierung zurückgeführt werden, wie sich den Notizen der Probanden entnehmen lässt. Aufgrund des parallelen Verlaufs über alle Teilgestalten kann auch hier der Einfluss des Produkts ausgeschlossen werden. Es zeigen sich keine weiteren signifikanten Unterschiede zwischen Produkt 1 und Produkt 2 sowie Produkt 2 und Produkt 3 bezüglich der Präzision, Richtigkeit und Genauigkeit. Die Werte der Überprüfung der Stichprobe ( $n = 54$ ) auf Basis des Gesamtprodukts können Tabelle 5.4 entnommen werden.

Paarung	Genauigkeit			Richtigkeit			Präzision
	MD	SD		MD	SD		
R3_D1 - KM	.04	.05	$t = 1.55$	.04	.14	$t = -3.99$	$t = .61$
	.07	.12	$p = .128$	-.14	.15	$p = .000$	$p = .545$
R3_D3 - KM	.02	.04	$t = .93$	.01	.12	$t = -1.66$	$t = 1.01$
	.03	.04	$p = .356$	-.02	.11	$p = .103$	$p = .316$

**Tabelle 5.4:** Inferenzstatistische Angaben der Überprüfung der Kontrollmodelle

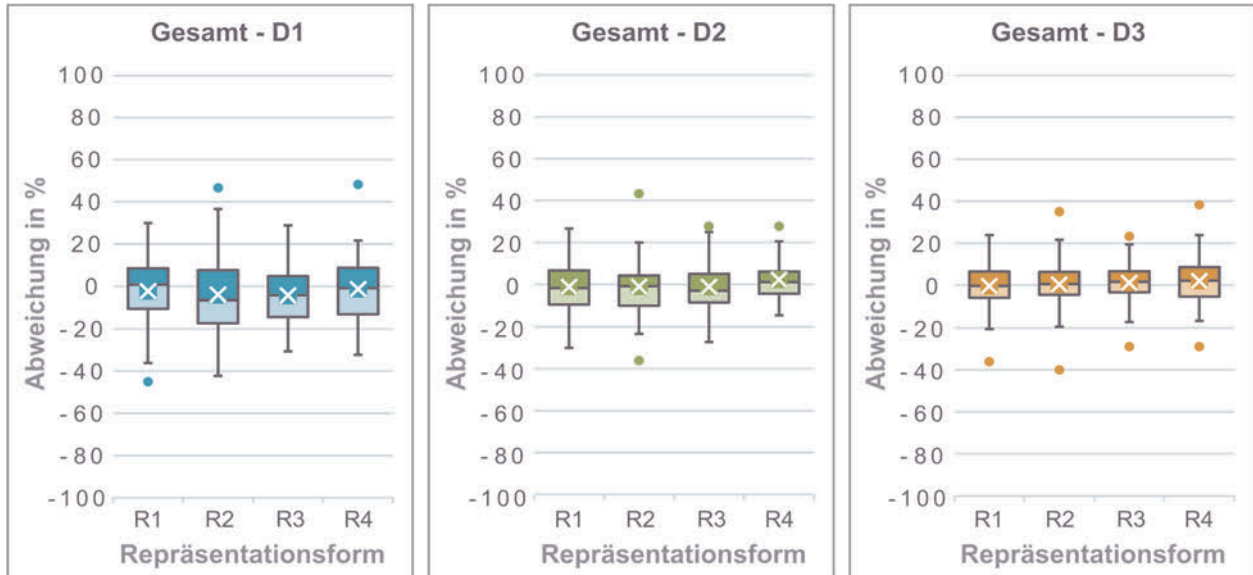
Aufgrund dieses Ergebnisses der Kontrollmodelle können im Folgenden Schlüsse zwischen den Detaillierungsstufen gezogen werden, auch wenn sich das dem Modell zugrundeliegende Produkt unterscheidet.

### 5.2.2 Darstellung der Modell-Produkt Abweichung

Entsprechend der in Kapitel 5.2.1.2 beschriebenen Vorgehensweise erfolgt zunächst die deskriptive Beschreibung der Modell-Produkt Abweichung. Die Darstellung der Rohdaten erfolgt mittels Box-Plots. In Abbildung 5.8 sind Daten der Modell-Produkt-Abweichung für das Gesamtprodukt dargestellt. Die Detaillierungsstufen sind farblich kodiert in eigenen Diagrammen aufsteigend von links nach rechts angeordnet.

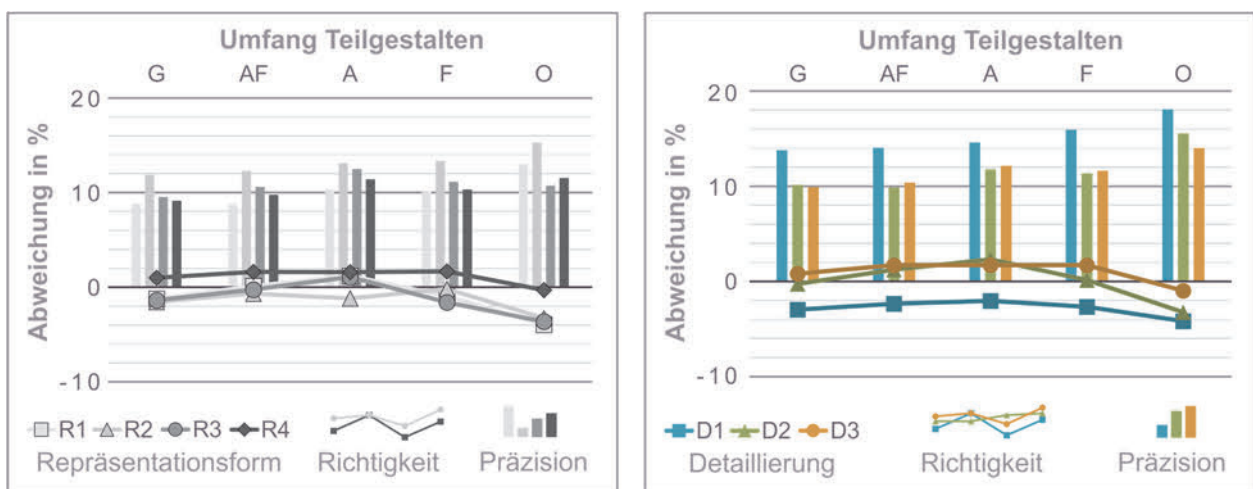
Die Visualisierung der Daten zeigt über die Repräsentationsformen hinweg eine geringer werdende Streuung mit zunehmender Detaillierung. Insbesondere die Abbildung (R1) zeigt bei D1 eine große Streuung und auch bei zunehmender Detaillierung zeigt diese Repräsentationsform weit außenliegende Ausreißer. Insgesamt zeigen sich nur sehr geringe Mittelwertunterschiede, sowohl zwischen den Repräsentationsformen als auch zwischen den Detaillierungsstufen. Auch hier fällt insbesondere die Abbildung der ersten

Detailierung mit einer hohen Abweichung auf. Mit zunehmender Detailierung wechseln die Mittelwerte und der Median von einer Unterbewertung, die Items werden am Modell schlechter als am Produkt bewertet, zu einer Überbewertung. Die Box-Plot-Darstellungen aller Rohdaten je Item sind dem Anhang A5 zu entnehmen.

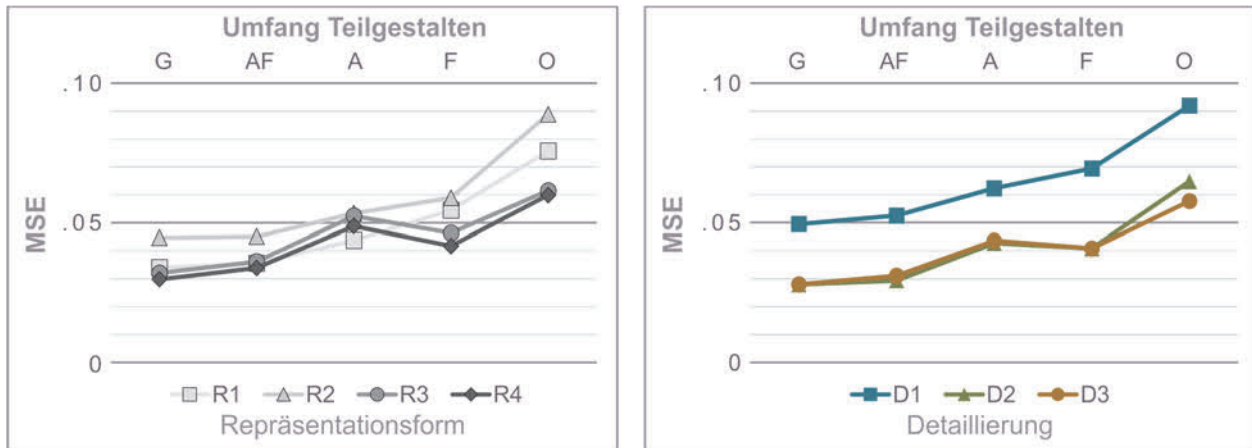


**Abbildung 5.8:** Boxplot der Produkt-Modellabweichung des Gesamtprodukts

Zur weiteren Aufschlüsselung der Daten werden, wie in Kapitel 5.2.1.2 beschrieben, die Präzision, die Richtigkeit und die Genauigkeit abgeleitet und in Form von Balken- und Liniendiagrammen dargestellt. In der Abbildung 5.9 sind die Richtigkeit und die Präzision sowie in Abbildung 5.10 die mittlere quadratische Abweichung als Maß der Genauigkeit der Bewertung der Produkt-Modell-Abweichung der Repräsentationsformen gemittelt über die Detaillierungsstufen (links) und der Detaillierungsstufen gemittelt über die Repräsentationsformen (rechts) aufgeführt.

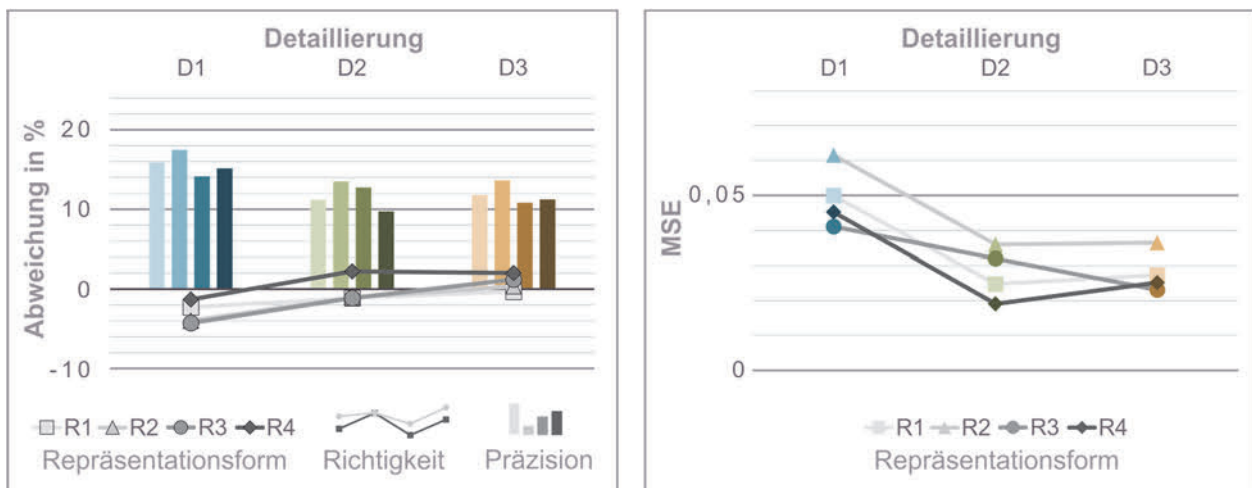


**Abbildung 5.9:** Richtigkeit und Präzision der Produkt-Modell Abweichung dargestellt über die Teilgestalten



**Abbildung 5.10:** Mittlere quadratische Abweichung (MSE) als Maß der Genauigkeit der Produkt-Modell Abweichung

In Abbildung 5.11 ist die Richtigkeit und Präzision (links) sowie die Genauigkeit (rechts) in Form der mittleren quadratischen Abweichung (MSE) für das Gesamtprodukt für alle zwölf untersuchten Modelle dargestellt. Die Darstellung der Daten der Einzelitems ist dem Anhang A5 zu entnehmen.



**Abbildung 5.11:** Richtigkeit und Präzision (links) sowie Genauigkeit (rechts) der Produkt-Modell Abweichung des Gesamtprodukts

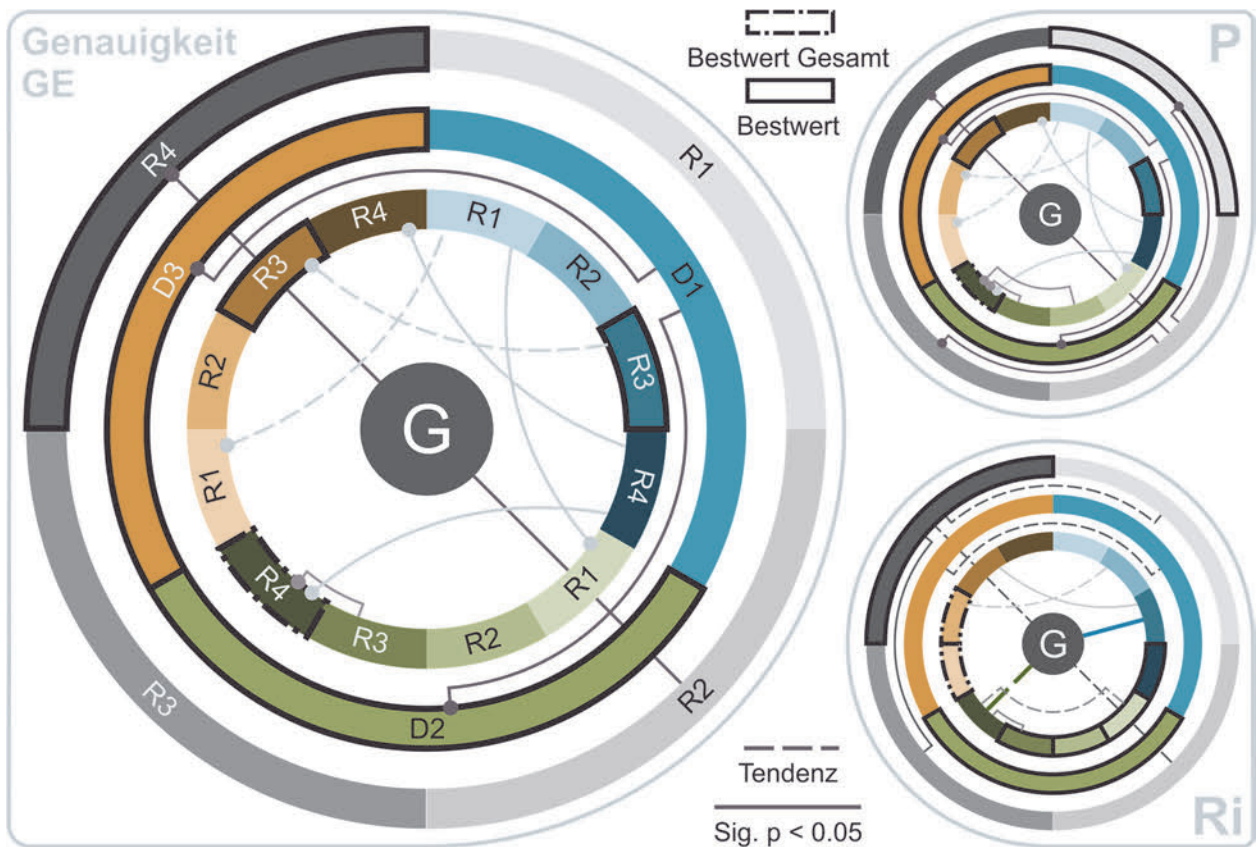
Anhand dieser Darstellungen verdeutlicht sich die Beobachtung auf Basis der Box-Plots der Überbewertung bei einer höheren Detaillierung und der Unterbewertung bei einer niedrigeren Detaillierung. Insbesondere das virtuelle Modell (R4) neigt mehr zur Überbewertung als die anderen Repräsentationsformen. Insgesamt wirkt sich die Repräsentationsform stärker auf die Präzision als auf die Richtigkeit aus. Eine höhere Detaillierung verbessert die Präzision, jedoch nur bis zur mittleren Detaillierungsstufe. Dementsprechend führt eine geringere Detaillierung zu einer höheren Ungenauigkeit, siehe rechts in Abbildung 5.11. Zwischen den Detaillierungsstufen D2 und D3 ist kein

Zugewinn an Genauigkeit ersichtlich. Bezüglich der Repräsentationsformen bietet das virtuelle Modell (R4) über alle Detaillierungsstufen mit die höchste Genauigkeit, die Unterschiede zu den anderen Repräsentationsformen sind jedoch teils gering. Die Betrachtung der Präzision allein zeigt ein ähnliches Niveau des virtuellen Modells (R4) wie des physischen Modells (R1). Das virtuelle Modell besitzt bei D2 die höchste Genauigkeit aller Kombinationen. Die hier auf Basis der Box-Plots und Balken-Linien-Diagrammen beschriebenen Daten werden nun inferenzstatistisch ausgewertet.

### 5.2.3 Parametrische Auswertung der Modell-Produkt Abweichung

Die parametrische Auswertung der Modell-Produkt-Abweichung erfolgt entsprechend des in Kapitel 5.2.1.2 beschriebenen Vorgehens. Die signifikanten Paarungen zwischen den Repräsentationsformen und zwischen den Detaillierungsstufen sind als Kreisdiagramme abgebildet, siehe Abbildung 5.12. Die vollständigen Ergebnisse der Auswertung, einschließlich der Untersuchung der Haupteffekte, können den Tabellen A6.1 bis A6.3 im Anhang entnommen werden. Das linke Kreisdiagramm stellt die Signifikanzen der Genauigkeit ( $G_e$ ) dar, das Diagramm rechts oben die der Präzision ( $P$ ) und das Diagramm rechts unten die der Richtigkeit ( $R_i$ ). Die Notation des großen Kreisdiagramms ist auf die kleinen Diagramme zu übertragen. Der äußere Ring stellt die Genauigkeit der Repräsentationsformen gemittelt über die Detaillierungsstufen dar, was dem Haupteffekt der Repräsentationsform entspricht. Der mittlere Ring steht für den Haupteffekt der Detaillierung und der innere Ring zeigt die vier Repräsentationsformen in den drei Detaillierungsstufen. Eine Verbindungslinie kennzeichnet einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden verbundenen Ausprägungen an. Bei der Richtigkeit zeigt eine Verbindungslinie zur Mitte eine signifikante Paarung zum Referenzwert an. Das Signifikanzniveau ist auf  $p < .05$  (durchgezogene Linie) als signifikant festgelegt. Schwach signifikante Paarungen mit  $p < .10$  (gestrichelte Linie) werden ebenfalls gekennzeichnet, um mögliche Tendenzen aufzuzeigen. Bei signifikanten Paarungen ist der bessere Wert jeweils mit einem Punkt markiert. Bei den Paarungen der Richtigkeit können nur Unterschiede ermittelt werden und es ist daher kein besserer Wert markiert. Zusätzlich ist das beste Ergebnis pro Ring durch eine durchgängige Umrandung dargestellt. Im inneren Ring ist neben dem besten Ergebnis pro Detaillierungsstufe der Bestwert gesamt aller Einzelmodelle durch eine Strichpunkt-Umrandung gekennzeichnet. Zur besseren Verständlichkeit wird, im Anschluss an die Beschreibung der Haupteffekte, anhand der wesentlichen Erkenntnissen zu signifikanten Unterschieden, welche im Kreisdiagramm dargestellt sind, beispielhaft das Vorgehen beschrieben.





	Paarung	MD	SD	p	Paarung	MD/df*	SD/t*	p
GE	R2 - R4	.015	.005	.036	R3_D1 - R3_D3	.018	.008	.066
	D1 - D2	.021	.007	.011	R4_D1 - R4_D2	.026	.010	.044
	D1 - D3	.021	.007	.007	R4_D1 - R4_D3	.020	.007	.028
	R1_D1 - R1_D2	.025	.009	.025	R3_D2 - R4_D2	.013	.005	.049
	R1 - R4	.023	.009	.073	R3_D1 - R3_D3	.055	.019	.015
Ri	R2 - R4	-.026	.010	.069	R1_D2 - R3_D2	-.034	.013	.057
	R3 - R4	-.024	.008	.019	R3_D2 - R4_D2	-.034	.010	.013
	D1 - D3	-.038	.016	.072	R3_D1 - Ref	53*	-2.224*	.030
	R2_D1 - R2_D3	-.044	.019	.083	R4_D2 - Ref	53*	1.686*	.098
	Paarung	df	t	p / p kor.	Paarung	df	t	p / p kor.
P	R1 - R2	52	2.956	.005 / .028	R1_D1 - R1_D3	52	2.223	.031 / .061
	R2 - R3		2.760	.008 / .032	R2_D1 - R2_D3		2.282	.027 / .080
	R2 - R4		2.895	.006 / .027	R4_D1 - R4_D2		3.482	.001 / .003
	D1 - D2		2.442	.018 / .036	R4_D1 - R4_D3		2.440	.018 / .036
	D1 - D3		2.888	.006 / .017	R2_D2 - R4_D2		3.255	.002 / .012
	R1_D1 - R1_D2		2.606	.012 / .036	R3_D2 - R4_D2		3.235	.002 / .011

**Abbildung 5.12:** Signifikante Paarungen der Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision

Die durchgeführte Varianzanalyse zeigt bezüglich der Genauigkeit einen signifikanten Haupteffekt der Repräsentationsform, Greenhouse-Geisser  $F(2.62, 138.77) = 2.87$ ,  $p < .05$ , partielles  $\eta^2 = .05$ . Ebenfalls tritt ein signifikanter Haupteffekt der Detaillierung auf,  $F(2, 106) = 7.39$ ,  $p < .01$ , partielles  $\eta^2 = .12$ . Es zeigt sich keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Repräsentationsform und der Detaillierung, Greenhouse-Geisser  $F(3.41, 180.84) = 0.62$ ,  $p > .05$ , partielles  $\eta^2 = .01$ . Bezüglich der Richtigkeit zeigt die durchgeführte Varianzanalyse einen signifikanten Haupteffekt der Repräsentationsform, Greenhouse-Geisser  $F(2.48, 128.93) = 3.37$ ,  $p < .05$ , partielles  $\eta^2 = .01$ . Die Detaillierung

hat dagegen keinen signifikanten Einfluss,  $F(2, 104) = 2.68$ ,  $p > .05$ , partielles  $\eta^2 = .05$ . Auch existiert keine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Repräsentationsform und der Detaillierung, Greenhouse-Geisser  $F(4.85, 252.13) = 0.76$ ,  $p > .05$ , partielles  $\eta^2 = .01$ . Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Wahl der Detaillierungsstufe signifikant auf die Genauigkeit auswirkt. Die Wahl der Repräsentationsform wirkt sich sowohl auf die Genauigkeit als auch auf die Richtigkeit signifikant aus. Die Auswertung der Präzision mittels des Morgan-Pitman-Test lässt keine Schlüsse auf mögliche Haupteffekte zu, jedoch zeigen sich sowohl zwischen den Detaillierungsstufen als auch den Repräsentationsformen signifikante Unterschiede.

Die paarweisen Vergleiche der Post-hoc Tests zeigen, dass hinsichtlich der Gesamtgenauigkeit das virtuelle Modell (R4) mit einem signifikanten Unterschied ( $p = .036$ ) gegenüber der Abbildung (R2), gemittelt über die Detaillierungsstufen, zu bevorzugen ist. Diese signifikante Paarung ist beispielsweise im linken Kreisdiagramm am äußeren Ring durch eine durchgezogene Linie zwischen den Repräsentationsformen R4 und R2 dargestellt. Der bessere Wert ist durch einen Punkt an der Verbindungslinie, in diesem Fall bei R4, markiert. Dieses Vorgehen zur Ermittlung signifikanter Paarungen wird bei den folgenden Beschreibungen wiederholt. Gemittelt über alle Repräsentationsformen, das dem mittleren Ring zu entnehmen ist, unterscheiden sich die Detaillierungsstufen D2 ( $p = .011$ ) und D3 ( $p = .007$ ) signifikant von D1 in Bezug auf die Genauigkeit. Hinsichtlich der Gesamtgenauigkeit, abgebildet im inneren Ring, zeigt die Kombination R4\_D2 den besten Wert (Strichpunkt-Umrandung) mit einem signifikanten Unterschied zu R4\_D1 ( $p = .044$ ) und gegenüber R3\_D2 ( $p = .049$ ). Das digitale Modell (R3) unterscheidet sich bei D1 hinsichtlich der Richtigkeit (Kreisdiagramm rechts unten) signifikant vom Referenzwert ( $p = .030$ ), dargestellt durch die Verbindungslinie zur Mitte, hat jedoch die höchste Präzision (Umrandung im Kreisdiagramm rechts oben), wodurch es dennoch bei der Gesamtgenauigkeit (Kreisdiagramm links) in D1 den besten Wert zeigt, allerdings ohne signifikanten Unterschied zu den anderen Repräsentationsformen. Die abschließende Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.6.1. Die signifikanten Paarungen, ausgewertet nach den Teilgestalten Aufbau, Form, Oberfläche/Farbe sowie der Kombination Aufbau-Form, können dem Anhang A5 entnommen werden.

### 5.3 Studienergebnisse der Modellbewertung

Neben der Untersuchung der Modell-Produkt-Abweichung ist die subjektive Bewertung der Modelle der zweite Schwerpunkt der durchgeführten Modell-Studie. Hierzu haben die

Probanden nach der Begutachtung und der Bewertung der Eigenschaften, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, das jeweilige Modell in seiner Repräsentationsform und Detaillierung bewertet. Die Bewertung orientiert sich entsprechend der Beschreibung in Kapitel 2.1 an der Gebrauchstauglichkeit (GT) nach der VDI Richtlinie 9241 [DIN EN ISO 9241-11 2018] und den dafür relevanten Maßen Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit und erfolgt auf Basis einer Rating-Skala von 'sehr schlecht' (1) bis 'sehr gut' (6). Zunächst wird das Vorgehen der Auswertung beschrieben und anschließend die Ergebnisse dargestellt und beschrieben, vgl. Kapitel 5.3.2, sowie in Kapitel 5.3.3 inferenzstatistisch ausgewertet. Das Gesamte Vorgehen ist in Abbildung 5.13 zusammengefasst dargestellt.

1. Vorbereitung	
Datenaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daten liegen passend vor</li> </ul>
Zusammenhänge und Gruppenunterschiede	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gruppenbildung und t-Test für unabhängige Stichproben               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Levene-Test auf Varianzhomogenität (<math>p &gt; .05</math>)</li> </ul> </li> <li>• Spearman Test auf Rangkorrelation</li> </ul>
Kontrolle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überprüfung der Kontrollmodelle auf den Produkteinfluss</li> <li>• t-Test für verbundenen Stichproben</li> <li>• Morgan-Pitman-Test</li> </ul>
2. Deskriptive Statistik	
Darstellung und Beschreibung der Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Box-Whisker-Plots</li> <li>• Linien-Diagramm</li> </ul>
3. Inferentielle Statistik	
Subjektive Modellbewertung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung, Signifikanzniveau <math>p &lt; .05</math> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauchly-Test auf Sphärizität (<math>p &gt; .05</math>)</li> <li>• evtl. Greenhouse-Geisser Korrektur</li> <li>• Post-hoc Paarvergleiche mit Bonferroni-Korrektur</li> </ul> </li> </ul>

**Abbildung 5.13:** Vorgehen der Auswertung der subjektiven Modellbewertung

### 5.3.1 Vorgehen bei der Auswertung

Die Auswertung der subjektiven Modellbewertung orientiert sich am Vorgehen der Modell-Produktabweichung wie in Kapitel 5.2.1. Die Messwerte der Einzelitems werden sowohl hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit durch die Maße Schwierigkeit (Sk), Genauigkeit (Ge) und Zufriedenheit (Zu) als auch zu den Teilgestalten Aufbau (A), Form (F), Oberfläche/Farbe (O) sowie zur Kombination Aufbau-Form (AF) und zum Gesamtprodukt zusammengefasst. Im Vorfeld der deskriptiv- und inferenzstatistischen Auswertung werden die Daten auf Zusammenhänge und Gruppenunterschiede untersucht sowie die Kontrollmodelle überprüft. Im Rahmen der deskriptiven Statistik werden die Daten in Kapitel 5.3.2 in Form von Box-Whisker-Plots visualisiert und beschrieben, um erste Erkenntnisse über die erhobenen Daten abzuleiten.

Die Daten können bei einer sechsstufigen Skala mit verbalisierten Endpunkten als quasi intervallskaliert angenommen werden, siehe Kapitel 4.1.2.3, und erfüllen damit diese Voraussetzung für die Anwendung parametrischer Verfahren. Zusätzlich werden die Daten dennoch mittels nichtparametrischer Verfahren, in diesem Fall der Friedmann-Test, ausgewertet und mit den Ergebnissen des parametrischen Verfahrens verglichen. Hierbei haben sich keine wesentlichen Unterschiede gezeigt, weshalb im Weiteren die parametrischen Verfahren und deren Ergebnisse betrachtet werden. Es wird eine zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung zum Vergleich der Mittelwerte angewendet [RASCH ET AL. 2014, S. 85 ff]. Die Innersubjektfaktoren sind dabei ebenfalls die Repräsentationsform und die Detaillierung. Die anschließenden Post-hoc Tests werden paarweise durchgeführt und es erfolgt eine Bonferroni-Korrektur zum Ausgleich der Alphafehler-Kumulierung. Die Voraussetzungen für die Durchführung der ANOVA sind entsprechend der Beschreibung in Kapitel 5.2.1.2. Die Daten werden dahingehend im Vorfeld überprüft und gegebenenfalls Anpassungen vorgenommen. Die entsprechend dieses Vorgehens zu überprüfenden Forschungshypothesen werden im Folgenden vorgestellt.

### 5.3.1.1 Forschungshypothesen

Die beschriebene statistische Auswertung der subjektiven Modellbewertung dient der Überprüfung der in Tabelle 5.5 dargestellten Alternativhypothesen  $H_x$  bzw. der korrespondierenden Nullhypothesen  $H_{0x}$ .

$H_{21}$	Es gibt einen Unterschied bei der Modellbewertung bedingt durch die Repräsentationsform $H_{21}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
$H_{22}$	Es gibt einen Unterschied bei der Modellbewertung bedingt durch die Detaillierung $H_{22}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$
$H_{23}$	Es gibt einen Unterschied bei der Modellbewertung hinsichtlich der Expertise $H_{23}: \mu_1 \neq \mu_2$
$H_x$ = Alternativhypothese   $\mu_x$ = Erwartungswert des Testergebnisses (Mittelwert Modellbewertung)	

**Tabelle 5.5:** Forschungshypothesen bezüglich der subjektiven Modellbewertung

Die Ergebnisse der Überprüfung der Alternativhypothesen zur subjektiven Modellbewertung werden in Kapitel 5.3.3 vorgestellt und diskutiert.

### 5.3.1.2 Zusammenhangsprüfung und Gruppenunterschiede

Wie in Kapitel 5.2.1.4 bezüglich der Auswertung der Modell-Produkt-Abweichung werden die Daten vorab auf Zusammenhänge und Gruppenunterschieden zwischen der Erfahrung, dem TD-Hintergrund, Probandeneigenschaften sowie der Modellreihenfolge

untersucht. Die angewendeten statistischen Tests sind dabei identisch zu den vorherigen, vgl. Kapitel 5.2.1.4. In Tabelle 5.6 sind die Ergebnisse der Prüfung dargestellt. Die Überprüfung der subjektiven Modellbewertung auf Gruppenunterschiede mittels t-Test zeigt kein signifikantes Ergebnis. Zusätzlich werden die Daten mittels einer mixed ANOVA überprüft [VERMA 2016, S. 125 ff]. Hier zeigt sich kein Haupteffekt durch die Gruppenzugehörigkeit, die Gleichheit der Kovarianzen und der Fehlervarianzen war dabei gegeben. Diesbezüglich erfolgt die weitere Auswertung nicht differenziert nach zwei Gruppen, sondern als Gesamtstichprobe. Die Prüfung auf den Einfluss der Modellreihenfolge zeigt ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse, wodurch die Qualität der Randomisierung bestätigt ist. Auch die Vorerfahrung der Probanden und Kenntnisse über Werkzeuge beeinflusst die Modellbewertung weder positiv noch negativ. Auch bezüglich dieses Aspekts ist die Auswertung als Gesamtstichprobe ohne Einschränkungen möglich. Geringe Unterschiede und Zusammenhänge zeigen sich bei den Probandeneigenschaften wie Brille, Fehlsichtigkeit und Alter.

Untersuchungsparameter	Test	Beschreibung Ergebnis	Sig.	Varianzhomogenität
TD-Hintergrund	T/A	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > .05
R1 vor R2-4	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > .05
R1_D1 zuerst	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > .05
R1_D2 zuerst	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > .05
R1_D3 zuerst	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > .05
WTS	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	
Geschlecht	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > .05
CAD Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	
VR Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	
Skizzieren Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	
Ergonomie-Test Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	
Brille	T	Tendenz zu geringerer Gebrauchstauglichkeit bei R3 (p = .060), sig. bzgl. Form (p = .032) bei R1 und Tendenz bei R3 (p = .068)	p > .05	p > .05
Fehlsichtigkeit	T	Tendenz bei R2 hinsichtlich der Teilgestalt Form zu geringerer Gebrauchstauglichkeit (p = .058)	p > .05	p > .05
Alter	S	Je älter desto niedriger die subjektive Genauigkeit der Bewertung bei D2 und D3 sowie R1 und R3	p < .05	

T: t-Test S: Spearman Korrelation A: ANOVA

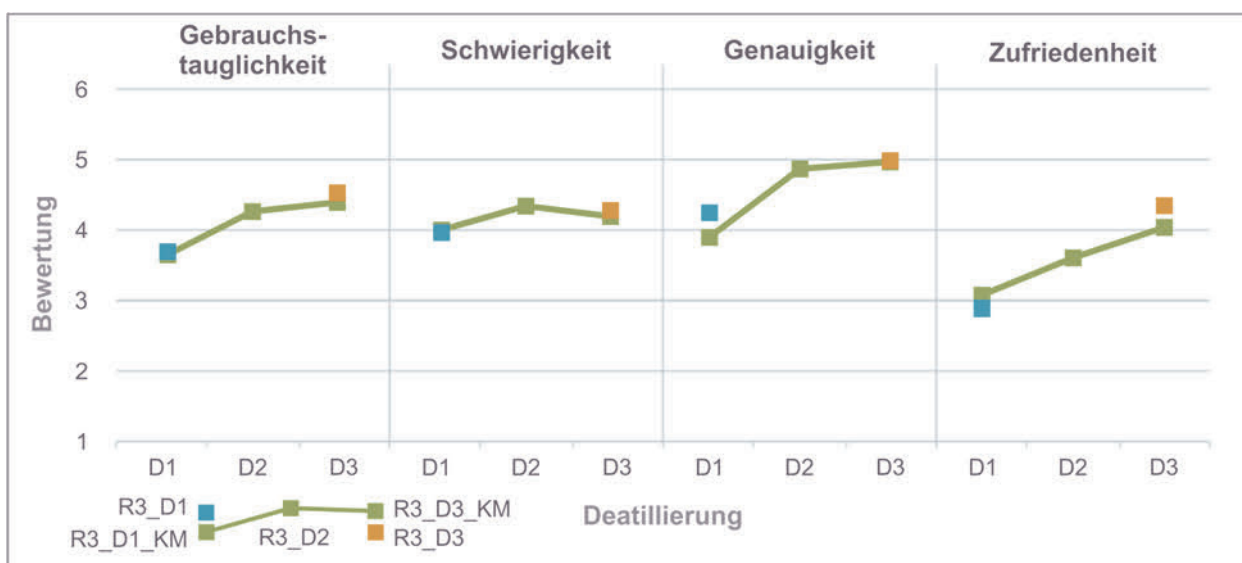
**Tabelle 5.6:** Ergebnisse der Prüfung auf Zusammenhänge und Gruppenunterschiede bezüglich der subjektiven Modellbewertung

Da die Unterschiede sich nur begrenzt auf einzelne Modelle beziehen, können hier keine allgemeinen Schlüsse gezogen werden. Es erfolgt daher im Weiteren keine Betrachtung dieser Aspekte bei der Auswertung.

### 5.3.1.3 Überprüfung der Kontrollmodelle

Für die Auswertung der subjektiven Modellbewertung erfolgt ebenfalls eine Überprüfung der beiden Kontrollmodelle, die neben den zwölf Hauptmodellen erhoben wurden. Anhand des digitalen Modells (R3) soll überprüft werden, ob das Produkt bei gleicher Detaillierung und Repräsentationsform Auswirkungen auf die Bewertung hat. Die Ergebnisse der Überprüfung sind in Abbildung 5.14 dargestellt.

Die ähnlichen Werte bezüglich Schwierigkeit, Genauigkeit und Zufriedenheit deuten auf eine hohe Übereinstimmung der Kontrollmodelle und des tatsächlichen Modells hin. Auch der Verlauf der Kurven lässt einen Einfluss der Detaillierung und nicht des Produkts vermuten. Die inferenzstatistische Auswertung mittels t-Test für verbundene Stichproben ergibt bei der Genauigkeit zwischen R3\_D1 und dem Kontrollmodell sowie bei der Zufriedenheit zwischen R3\_D3 und dem Kontrollmodell einen signifikanten Unterschied. Bei den weiteren Paarungen und bezüglich der Gesamtgebrauchstauglichkeit zeigen sich keine signifikanten Unterschiede.



**Abbildung 5.14:** Daten der Kontrollmodelle der subjektiven Modellbewertung

Die Ergebnisse der Überprüfung sind in Tabelle 5.7 dargestellt.

Paa- rung	Gebrauchs- tauglichkeit			Schwierigkeit			Genauigkeit			Zufriedenheit		
	MD	SD		MD	SD		MD	SD		MD	SD	
R3_D1 KM	3.70	.64	t = .462	3.96	1.00	t = .269	4.24	.97	t = 2.570	2.89	.95	t = 1.568
	3.65	.81	p = .646	4.00	1.14	p = .789	3.89	1.22	p = .013	3.07	1.02	p = .123
R3_D3 KM	4.53	.67	t = 1.98	4.27	1.12	t = .844	4.98	.77	t = .189	4.35	.88	t = 2.280
	4.40	.70	p = .053	4.19	1.06	p = .402	4.96	.75	p = .851	4.04	1.08	p = .027

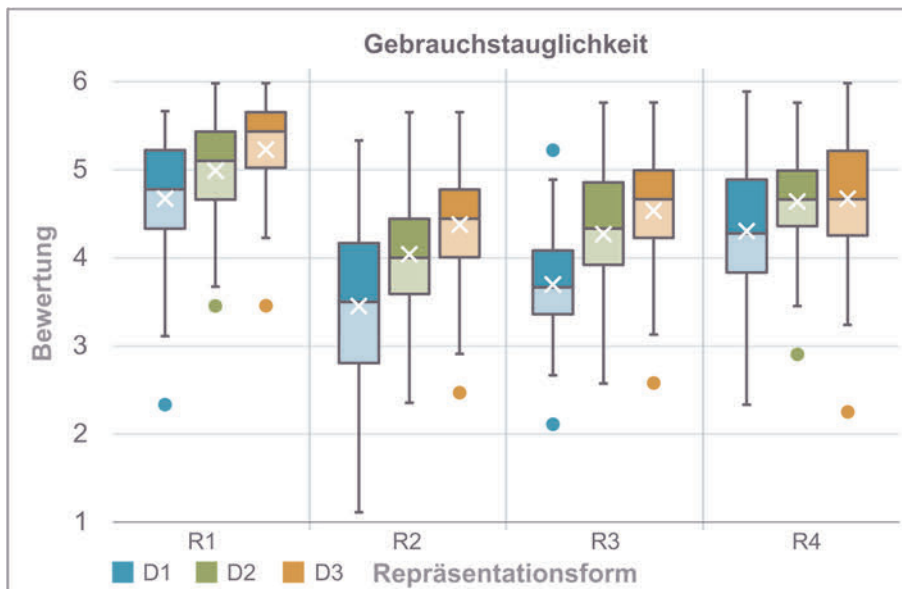
**Tabelle 5.7:** Inferenzstatistische Angaben der Überprüfung der Kontrollmodelle



Aufgrund dieses Ergebnisses und der Verläufe der Diagramme kann ein Einfluss des Produkts nicht durchgängig festgestellt werden und ermöglicht somit eine Auswertung und Vergleich zwischen den Detaillierungsstufen trotz unterschiedlicher zugrundeliegender Produkte.

### 5.3.2 Darstellung der Modellbewertung

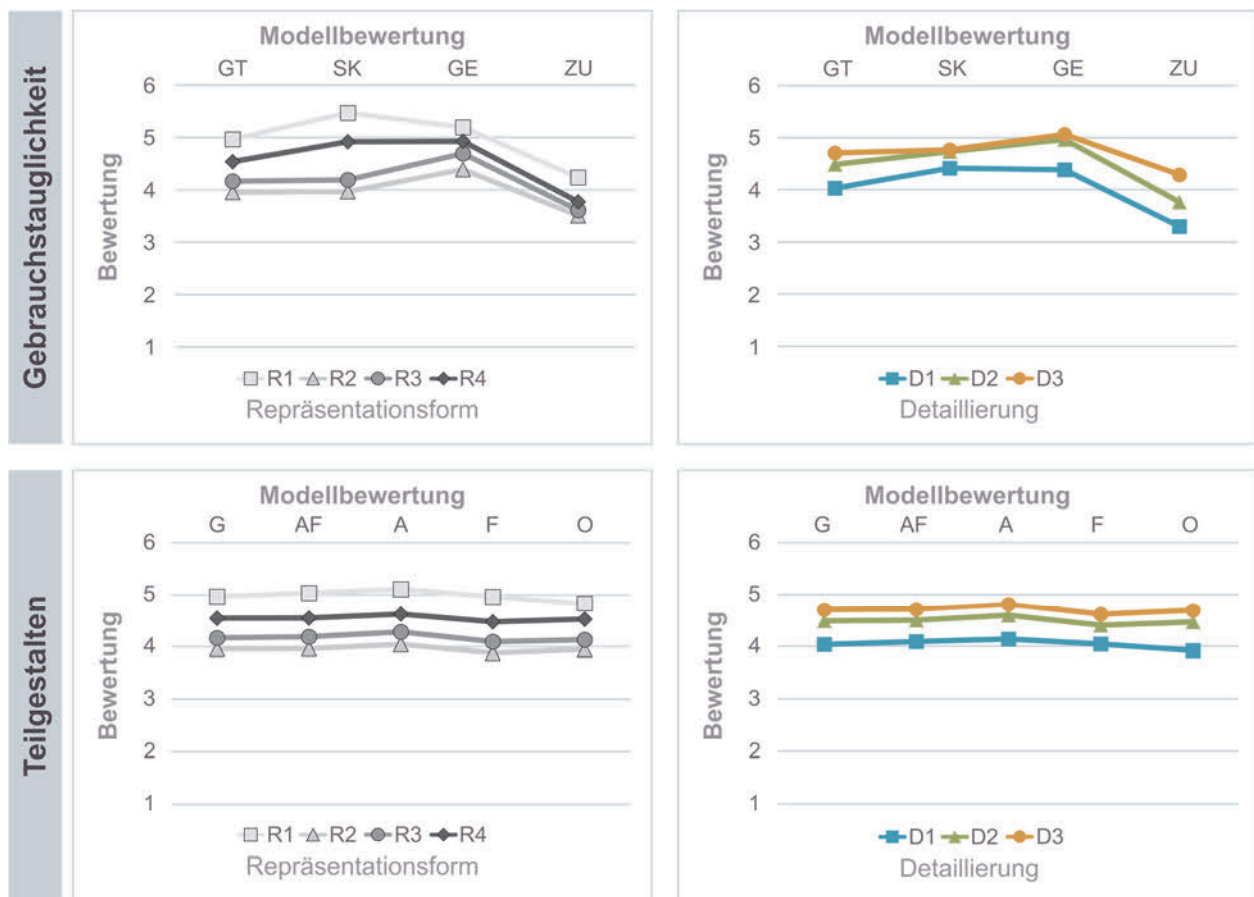
Die deskriptivstatistische Auswertung der Daten bezüglich der subjektiven Modellbewertung erfolgt, wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, mittels Box-Whisker-Plots, siehe Abbildung 5.15. Die Diagramme zeigen die Gebrauchstauglichkeit, gleichgewichtet gemittelt über die Schwierigkeit, Genauigkeit sowie Zufriedenheit, von links nach rechts die vier Repräsentationsformen mit aufsteigender Detaillierung in der bekannten farblichen Kodierung.



**Abbildung 5.15:** Box-Whisker-Plots der Modellbewertung als Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit zeigt bei allen Repräsentationsformen einen ähnlichen Verlauf über die Detaillierungsstufen. Die Abbildung (R2) und das digitale Modell (R3) zeigen bei der jeweiligen Detaillierung einen geringeren Mittelwert gegenüber dem virtuellen Modell (R4) und dem physischen Modell (R1). Insbesondere zwischen R2 und R1 zeigt sich ein großer Abstand. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Detaillierung die Gebrauchstauglichkeit steigt, wobei allgemein der Abstand zwischen den Detaillierungsstufen D1 und D2 größer ist, als zwischen D2 und D3. Die größte Streuung der Messwerte zeigt jeweils die Abbildung (R2), die geringste Streuung dagegen das physische Modell (R1), was für eine eindeutigere Bewertung spricht. Die Streuung des virtuellen Modells (R4) ist bei D2 am geringsten. Insgesamt liegen die Messwerte bei Detaillierung D3 nahe zusammen, es zeigen sich jedoch bei jeder Repräsentationsform Ausreißer nach unten.

Neben der Darstellung der Rohdaten in Form von Box-Whisker-Plots, zeigt Abbildung 5.16 die Mittelwerte der Bewertung für die Repräsentationsformen gemittelt über die Detaillierungsstufen sowie die Bewertung der Detaillierungsstufen gemittelt über die Repräsentationsformen. Die Diagramme zeigen von links nach rechts die Gebrauchstauglichkeit, berechnet aus der Schwierigkeit, der Genauigkeit und der Zufriedenheit, sowie die jeweiligen Einzelaspekte. Bezüglich der Schwierigkeit der Bewertung zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den Repräsentationsformen größer sind als bei der Bewertung der Genauigkeit und der Zufriedenheit. Insbesondere die Abbildung (R2) und das digitale Modell (R3) zeigen einen größeren Abstand zum physischen Modell (R1) und zum virtuellen Modell (R4). Die Bewertung der Zufriedenheit mit dem Modell liegt sowohl bezüglich der Repräsentationsform als auch der Detaillierungsstufe unterhalb der Bewertungen der Genauigkeit und Schwierigkeit.

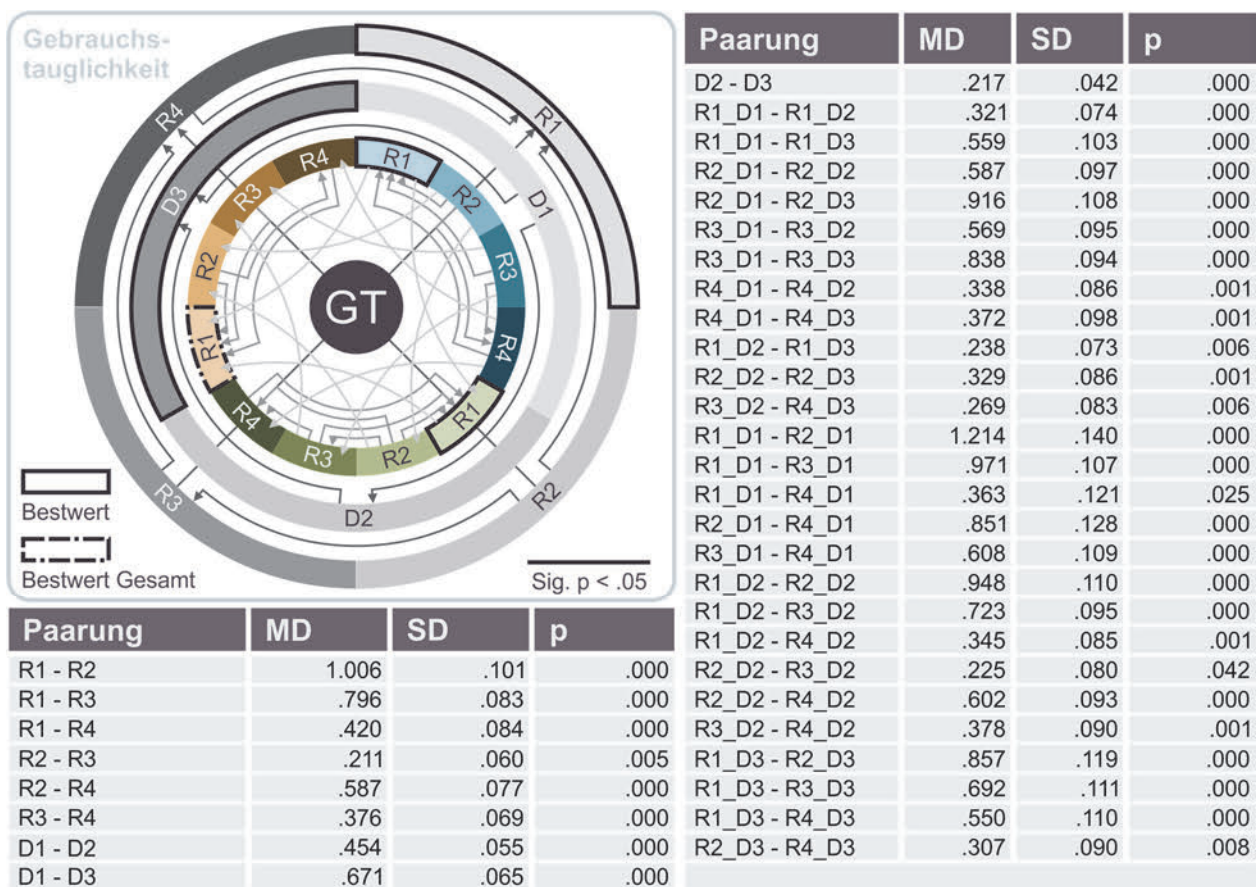


**Abbildung 5.16:** Modellbewertung nach Repräsentationsform und Detaillierung

Die Auswertung nach den Teilgestalten zeigt keine offensichtlichen Unterschiede, weshalb die weitere Auswertung der subjektiven Modellbewertung im Weiteren für das Gesamtprodukt und nicht gesondert für die Teilgestalten erfolgt.

### 5.3.3 Parametrische Auswertung der Modellbewertung

Die parametrische Auswertung der Modellbewertung erfolgt entsprechend des in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Vorgehens. Die Darstellung der signifikanten Paarungen ist identisch mit den in Kapitel 5.2.3 beschriebenen Kreisdiagrammen. Der äußere Ring deckt dabei die Repräsentationsformen ab, der mittlere Ring stellt die Detaillierungsstufen dar und der innere Ring die zwölf Einzelmodelle. In Abbildung 5.17 sind die signifikanten Paarungen der subjektiven Modellbewertung, berechnet für die Gebrauchstauglichkeit dargestellt. Die vollständigen Ergebnisse der Auswertung, einschließlich der Untersuchung der Haupteffekte, können dem Anhang A6 entnommen werden. Das Signifikanz-Niveau ist auf  $p < .05$  als signifikant festgelegt.



**Abbildung 5.17:** Signifikante Paarungen der subjektiven Modellbewertung

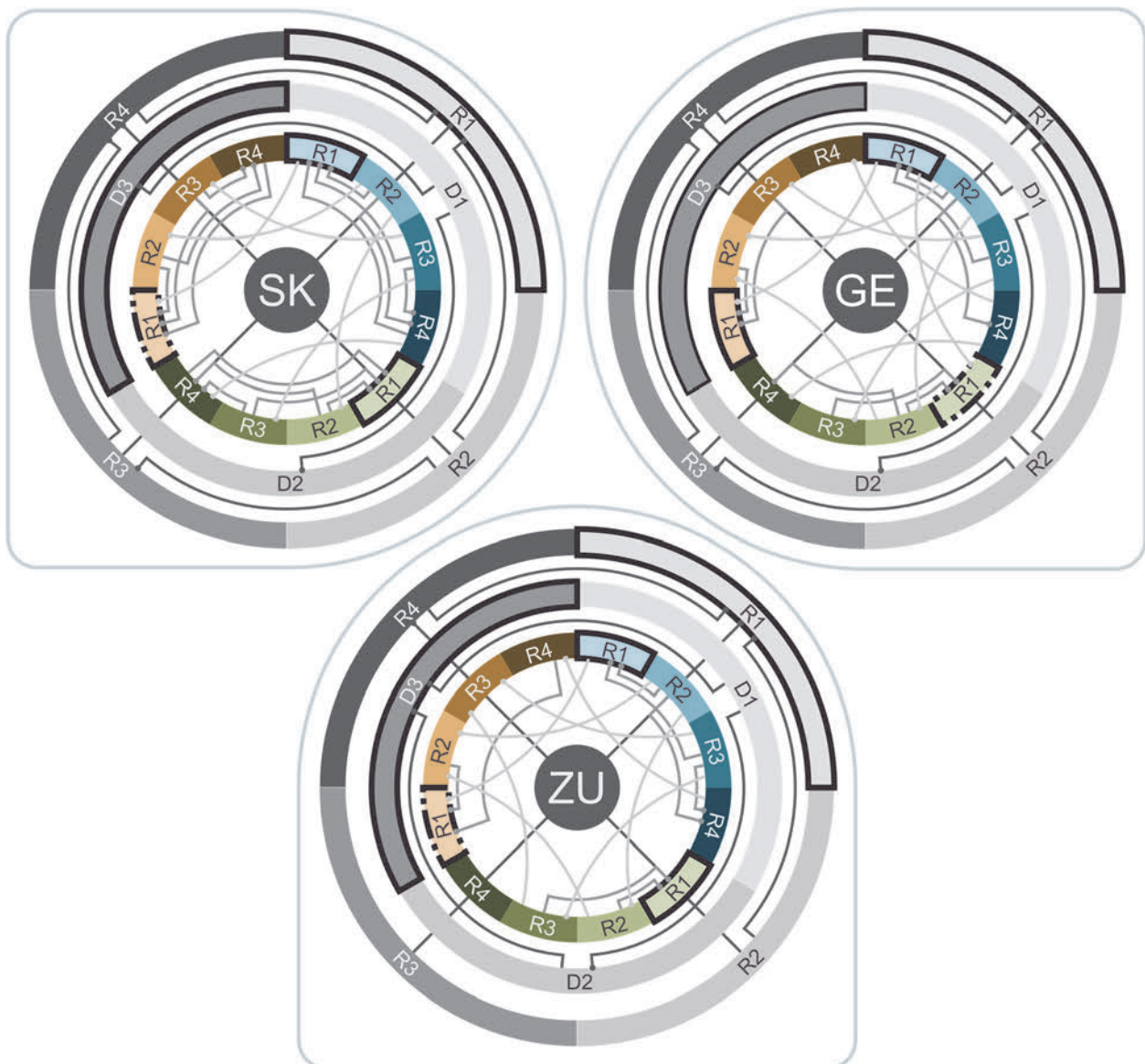
Die Auswertung der Daten mittels der zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigt einen signifikanten Haupteffekt der Repräsentationsform, Greenhouse-Geisser  $F(2.41, 125.16) = 61.38, p < .001$ , partielles  $\eta^2 = .54$ . Ebenfalls tritt ein signifikanter Haupteffekt der Detaillierung auf, Greenhouse-Geisser  $F(1.63, 84.56) = 77.81, p < .001$ , partielles  $\eta^2 = .60$ . Zwischen der Repräsentationsform und der Detaillierung existiert eine statistisch signifikante Interaktion,  $F(6, 312) = 4.95, p < .001$ , partielles

$\eta^2 = .09$ . Bezüglich der Interaktion werden die Profilplots auf Interpretierbarkeit geprüft. Es handelt sich dabei um eine ordinale Interaktion zwischen der Repräsentationsform und der Detaillierung. Dementsprechend können die Haupteffekte interpretiert werden, da die Interaktion den Haupteffekt nicht stört [BÜHNER & ZIEGLER 2009, S. 417 f]. Somit besitzen sowohl die Repräsentationsform als auch die Detaillierung einen signifikanten Effekt auf die Gebrauchstauglichkeit. Zwischen allen Repräsentationsformen und Detaillierungsstufen, jeweils über den anderen Faktor gemittelt, zeigen sich signifikante Unterschiede. Sowohl das physische (R1) als auch das virtuelle Modell (R4) unterscheiden sich bei allen Detaillierungsstufen signifikant von den anderen Repräsentationsformen. Zwischen diesen beiden Repräsentationsformen bestehen aber auch signifikante Unterschiede. Die bestbewertete Kombination R1\_D3 unterscheidet sich signifikant von den anderen Repräsentationsformen und Detaillierungsstufen. Die signifikanten Paarungen differenziert nach der Schwierigkeit der Bewertung, Genauigkeit der Bewertung und Zufriedenheit mit dem Modell sind in Abbildung 5.18 durch Verbindungslinien dargestellt und werden im Folgenden näher beschrieben.

Für die Auswahl passender Modelle in Kapitel 6.1.2 sind die befragten Einzelaspekte von Interesse. Daher erfolgt die Auswertung zusätzlich differenziert nach diesen. Bezüglich der Schwierigkeit der Bewertung tritt ein signifikanter Haupteffekt der Repräsentationsform (Greenhouse-Geisser  $F(1.93, 100.21) = 65.44, p < .001$ , partielles  $\eta^2 = .56$ ) sowie ein signifikanter Haupteffekte der Detaillierung ( $F(2, 104) = 21.22, p < .001$ , partielles  $\eta^2 = .29$ ) auf. Ebenfalls zeigt die Auswertung eine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Repräsentationsform und der Detaillierung ( $F(6, 312) = 1.09, p > .05$ , partielles  $\eta^2 = .02$ ). Es bestätigen sich die Erkenntnisse der deskriptiven Statistik, zwischen den Detaillierungsstufen D2 und D3 zeigt sich kein signifikanter Unterschied, zwischen den Repräsentationsformen sind die Unterschiede signifikant. Die beste Kombination R1\_D3 ist nur gegenüber D1, aber zu allen Repräsentationsformen signifikant unterschiedlich. Sowohl mit der Abbildung (R2) als auch dem digitalen Modell (R3) ist aus Sicht der Probanden die Bewertung bei allen Detaillierungsstufen signifikant schwieriger als mit dem virtuellen (R4) und physischen Modell (R1), wobei die Bewertung anhand des virtuellen Modells wiederum signifikant schwieriger als anhand des physischen Modells ist und anhand der Abbildung (R2) signifikant schwieriger als anhand des digitalen Modells (R3). Die Auswertung nach der Genauigkeit zeigt einen signifikanten Haupteffekt der Repräsentationsform ( $F(3, 156) = 24.97, p < .001$ , partielles  $\eta^2 = .32$ ). Es zeigt sich ebenfalls ein signifikanter Haupteffekte der Detaillierung (Greenhouse-Geisser  $F(1.37,$



71.17) = 40.30,  $p < .001$ , partielles  $\eta^2 = .44$ ) sowie eine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Repräsentationsform und der Detaillierung ( $F(6, 312) = 2.17$ ,  $p < .05$ , partielles  $\eta^2 = .04$ ). Bei der Bewertung der Genauigkeit liegen die Repräsentationsformen näher beisammen, unterscheiden sich aber alle auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = .05$ . Innerhalb der Detaillierungsstufen bestätigt sich der Eindruck der geringeren Unterschiede zwischen den Repräsentationsformen R2 und R3 zu R1 und R4. Über die Repräsentationsformen gemittelt sind zwischen den Detaillierungsstufen D2 und D3 keine signifikanten Unterschiede messbar, jeweils aber zu D1. Entsprechend der Abstände zwischen den Bewertungen in Abbildung 5.16 und anhand der Anzahl der signifikanten Paarungen bestätigt sich, dass aus Sicht der Probanden die Schwierigkeit der Bewertung mehr von der Repräsentationsform beeinflusst wird und die Genauigkeit eher durch die Detaillierung.



**Abbildung 5.18:** Signifikante Paarungen nach Teilgebieten

Bezüglich der Zufriedenheit zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt der Repräsentationsform (Greenhouse-Geisser  $F(2.26, 117.36) = 18.78, p < .001, \text{partielles } \eta^2 = .27$ ), der Detaillierung ( $F(2, 104) = 81.88, p < .001, \text{partielles } \eta^2 = .61$ ) sowie eine statistisch signifikante Interaktion zwischen der Repräsentationsform und der Detaillierung ( $F(6, 312) = 6.64, p < .001, \text{partielles } \eta^2 = .11$ ). Bei der Zufriedenheit mit den Modellen zeigen sich weniger signifikante Unterschiede zwischen den Repräsentationsformen. Das bevorzugte physische Modell (R1) unterscheidet sich signifikant von allen anderen Repräsentationsformen, gemittelt über alle Detaillierungsstufen. Die Detaillierung wirkt sich zwischen allen Stufen signifikant auf die Zufriedenheit aus. Bei geringer Detaillierung unterschieden sich die Repräsentationsformen R2 und R3 jeweils zu R1 und R4. Bei den Detaillierungsstufen D2 und D3 bestehen diese Unterschiede bezüglich der Zufriedenheit nicht mehr. Bei D3 verliert das virtuelle Modell (R4) gegenüber dem physischen Modell (R1) an Zufriedenheit und unterscheidet sich hier signifikant. Beim virtuellen Modell hat die Detaillierung nur eine geringe Auswirkung auf die Zufriedenheit. Nur zwischen D1 und D3 zeigt sich ein geringer, aber signifikanter Unterschied. Die abschließende Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.6.2.

## 5.4 Studienergebnisse der Maßabweichung

Neben den Hauptaspekten der Modell-Produkt-Abweichung sowie der subjektiven Modellbewertung wurde zusätzlich bei der Studie die Einschätzung von Maßen anhand der Modelle in ihrer Repräsentationsform und Detaillierung erhoben. Dabei mussten die Probanden nach der Begutachtung und der Bewertung ohne weitere Hilfsmittel die Maße (Länge, Breite und Höhe) des repräsentierten Produkts angeben. Im Folgenden wird das Vorgehen der Auswertung vorgestellt, die Daten beschrieben und die Ergebnisse vorgestellt.

### 5.4.1 Vorgehen bei der Auswertung

Die Auswertung der Maßabweichung erfolgt entsprechend der in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Vorgehensweise der Auswertung der Modell-Produkt-Abweichung. Die Vorgehensweise sowie die verwendeten statistischen Verfahren sind in Abbildung 5.19 zusammengefasst. Es wird dabei zwischen Richtigkeit, Präzision und Genauigkeit unterschieden. Die Einschätzung der Maße durch die Probanden erfolgte als absolute Bewertung und wurde in cm angegeben. Neben den zwölf Modellen und den zwei Kontrollmodellen, wurden ebenfalls die drei Produkte berücksichtigt.



1. Vorbereitung	
Datenaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bildung der Maßabweichung</li> <li>• Umrechnung auf prozentuale Abweichung</li> </ul>
Zusammenhänge und Gruppenunterschiede	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gruppenbildung und t-Test für unabhängige Stichproben                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Levene-Test auf Varianzhomogenität (<math>p &gt; .05</math>)</li> </ul> </li> <li>• Spearman Test auf Rangkorrelation</li> </ul>
Kontrolle	Überprüfung der Kontrollmodelle auf den Produkteinfluss <ul style="list-style-type: none"> <li>• t-Test für verbundenen Stichproben</li> <li>• Morgan-Pitman-Test</li> </ul>
2. Deskriptive Statistik	
Darstellung und Beschreibung der Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Box-Whisker-Plots</li> <li>• Säulen-Linien-Diagramm</li> </ul>
3. Inferentielle Statistik	
Genauigkeit / Richtigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung, Signifikanzniveau <math>p &lt; .05</math> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauchly-Test auf Sphärität (<math>p &gt; .05</math>)</li> <li>• evtl. Greenhouse-Geisser Korrektur</li> <li>• Post-hoc Paarvergleiche mit Bonferroni-Korrektur</li> </ul> </li> <li>• Einstichproben t-Test (nur Richtigkeit)</li> </ul>
Präzision	Morgan-Pitman-Test <ul style="list-style-type: none"> <li>• Paarweise ausgeführt mit Bonferroni-Holm Korrektur</li> </ul>

**Abbildung 5.19:** Vorgehen der Auswertung der Maßabweichung

Die Innersubjektfaktoren der angewendeten zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung sind für die Detaillierung 4-stufig und für die Repräsentationsform 5-stufig. Die Abweichung wird in diesem Fall nicht zwischen dem Modell und dem Produkt ermittelt, sondern zwischen dem geschätzten Maß und dem tatsächlich zugrundeliegenden Maß. Daraus wird eine prozentuale Abweichung gegenüber dem Referenzmaß ermittelt. Für die Bewertung der Genauigkeit wird ebenfalls das Maß der mittleren quadratischen Abweichung (MSE) gebildet, vgl. Kapitel 5.2.1.1.

### 5.4.1.1 Forschungshypothesen

Die beschriebene Vorgehensweise bezüglich der Maßabweichung dient der Überprüfung der Alternativhypothesen  $H_x$  bzw. der korrespondierenden Nullhypothesen  $H_{0x}$  bezüglich der Maßabweichung in Tabelle 5.8.

Richtigkeit	
$H_{31}$	Es gibt einen Unterschied der mittleren Abweichung der Maßeinschätzung bedingt durch die Repräsentationsform $H_{31}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
$H_{32}$	Es gibt einen Unterschied der mittleren Abweichung der Maßeinschätzung bedingt durch die Detaillierung $H_{32}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$
$H_{33}$	Es gibt einen Unterschied bei der mittleren Abweichung der Maßeinschätzung hinsichtlich der Expertise $H_{33}: \mu_1 \neq \mu_2$
$H_{34}$	Es gibt einen Unterschied zwischen der mittleren Abweichung der Maßeinschätzung und dem Referenzwert $H_{34}: \mu_i \neq 0$

**Tabelle 5.8:** Alternativhypothesen Maßabweichung

Präzision	
H <sub>35</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Varianzen der Maßeinschätzung bedingt durch die Repräsentationsform $H_{35}: s_1^2 \neq s_2^2 \neq s_3^2 \neq s_4^2$
H <sub>36</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Varianzen der Maßeinschätzung bedingt durch die Detaillierung $H_{36}: s_1^2 \neq s_2^2 \neq s_3^2$
Genauigkeit	
H <sub>37</sub>	Es gibt einen Unterschied des mittleren quadratischen Fehlers der Maßeinschätzung hinsichtlich der Repräsentationsform $H_{37}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
H <sub>38</sub>	Es gibt einen Unterschied des mittleren quadratischen Fehlers der Maßeinschätzung hinsichtlich der Detaillierung $H_{38}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

H<sub>x</sub> = Alternativhypothese |  $\mu_x$  = Erwartungswert des Testergebnisses (mittlere Abweichung / MSE) |  
 $s_x$  = Erwartungswert des Testergebnisses (Varianz)

**Tabelle 5.8:** Alternativhypothesen Maßabweichung (Fortsetzung)

#### 5.4.1.2 Zusammenhangsprüfung und Gruppenunterschiede

Vor der Auswertung der Maßabweichung erfolgt eine Überprüfung auf Zusammenhänge und Gruppenunterschiede, bedingt durch Erfahrung im Bereich Technisches Design, Vorerfahrungen, Probandeneigenschaften oder der Modellreihenfolge. Die Ergebnisse der Überprüfung sind in Tabelle 5.9 dargestellt.

Untersuchungsparameter	Test	Beschreibung Ergebnis	Sig.	Varianzhomogenität
TD-Hintergrund	T/A	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > .05
R1 vor R2-4	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > .05
R1_D1 zuerst	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > 0.05
R1_D2 zuerst	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > 0.05
R1_D3 zuerst	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > 0.05
Alter	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	
WTS	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	
Brille	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > 0.05
Fehlsichtigkeit	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > 0.05
Geschlecht	T	keine Unterschiede erkennbar	p > .05	p > 0.05
CAD Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	
VR Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	
Skizzieren Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	p > .05	

T: t-Test S: Spearman Korrelation A: ANOVA

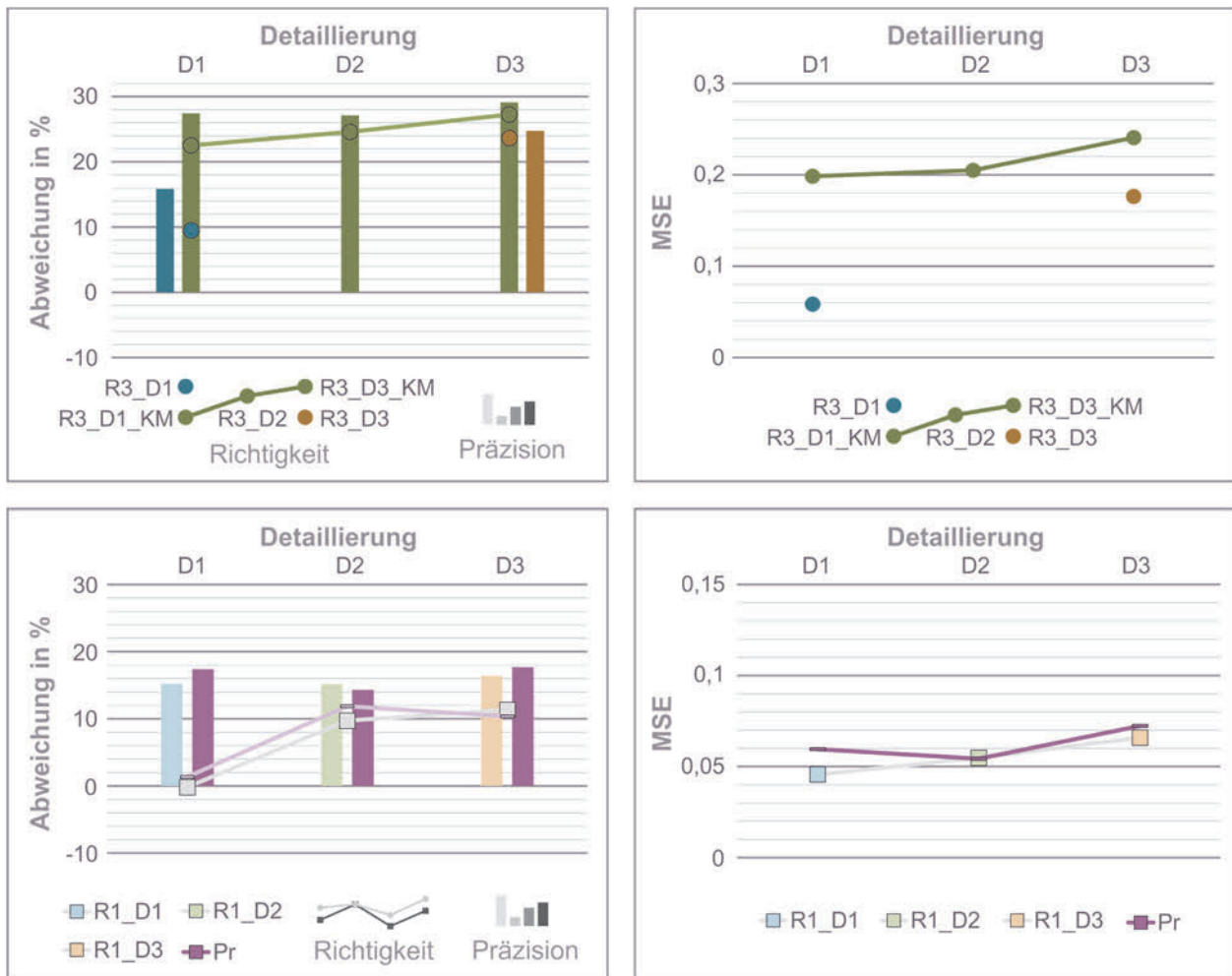
**Tabelle 5.9:** Zusammenhänge und Gruppenunterschiede der Maßabweichung

Die Überprüfung erfolgt dabei entweder mittels t-Test für unabhängige Stichproben mit Levene-Test auf Varianzhomogenität und vorangegangener Gruppenbildung oder einen Spearman-Test auf Rangkorrelation. Insgesamt sind bei der Überprüfung keine Zusammenhänge oder Gruppenunterschiede bezüglich der untersuchten Faktoren feststellbar. Die Überprüfung der Gruppenunterschiede bedingt durch den TD-Hintergrund erfolgt ebenfalls zusätzlich mittels einer mixed ANOVA. Es zeigt sich hier kein Haupteffekt der Gruppenzugehörigkeit. Auch die Überprüfung des Einflusses der Modellreihenfolge ergibt

keine signifikanten Unterschiede und die Daten können ohne Einschränkungen ausgewertet werden.

### 5.4.1.3 Überprüfung der Kontrollmodelle

Vor der Auswertung der Maßabweichung erfolgt eine Überprüfung der zwei Kontrollmodelle, die für die Repräsentationsform R3 mit erhoben wurden. Die Daten der Überprüfung sind in Form von Balken-Linien-Diagrammen in Abbildung 5.20 dargestellt.



**Abbildung 5.20:** Kontrollmodelle der Maßeinschätzung

Es wird hierbei der Einfluss des Produkts oder der Detaillierung auf die Maßeinschätzung untersucht. Zusätzlich kann die Überprüfung bei der Maßeinschätzung anhand des physischen Modells und des realen Modells erfolgen, da die Abweichung zum tatsächlichen Maß und nicht zum Produkt herangezogen wird.

Die deskriptive Auswertung der Kontrollmodelle der oberen Diagramme zeigt große Unterschiede zwischen dem Kontrollmodell und dem jeweilig korrespondierenden Untersuchungsmodell bei D1 und D3 bezüglich der Richtigkeit, der Präzision und der

Genauigkeit (MSE-Wert). Innerhalb des gleichen Produkts sind zwischen den Detaillierungsstufen D1 bis D3 nur sehr geringe Unterschiede erkennbar. Dies ist den oberen Diagrammen durch den Vergleich der grün kodierten Messwerte über die Detaillierungsstufen zu entnehmen. Ebenfalls sind zwischen den Maßeinschätzungen anhand des physischen Modells (R1) und den dazugehörigen realen Produkten (Pr) sehr geringe Unterschiede bezüglich der Richtigkeit, der Präzision und der Genauigkeit (MSE-Wert), dargestellt in den unteren Diagrammen, ersichtlich. Dies spricht, entgegen den Überprüfungen in vorherigen Kapiteln, für einen Einfluss des zugrundeliegenden Produkts und nicht der Detaillierung. Die inferenzstatistische Überprüfung bestätigt diese Annahme, siehe Tabelle 5.10. Zwischen den physischen Modellen (R1) und den dazugehörigen realen Produkten (Pr) zeigen sich keine signifikanten Unterschiede. Die Maßeinschätzung anhand des digitalen Modells (R3) unterscheidet sich dagegen bei unterschiedlichen zugrundeliegenden Produkten (R3\_D1 zu R3\_D1\_KM) signifikant.

Paarung	Genauigkeit			Richtigkeit			Präzision
	MD	SD		MD	SD		
R3_D1 - R3_D1_KM	.06 .20	.07 .37	t = 2.98 p = .004	.23 .09	.27 .16	t = 4.16 p = .000	t = 5.005 p = .000
R3_D3 - R3_D3_KM	.18 .24	.24 .47	t = .96 p = .341	.24 .26	.25 .31	t = .55 p = .588	t = 1.323 p = .191
R1_D1 - Pr	.05 .06	.07 .08	t = -1.08 p = .284	.00 .01	.15 .17	t = -.66 p = .509	t = 1.093 p = .838
R1_D2 - Pr	.05 .05	.08 .07	t = .049 p = .961	.10 .12	.15 .14	t = -1.16 p = .251	t = .540 p = .592
R1_D3 - Pr	.07 .07	.12 .13	t = -.39 p = .700	.11 .10	.16 .18	t = .56 p = .575	t = .797 p = .429

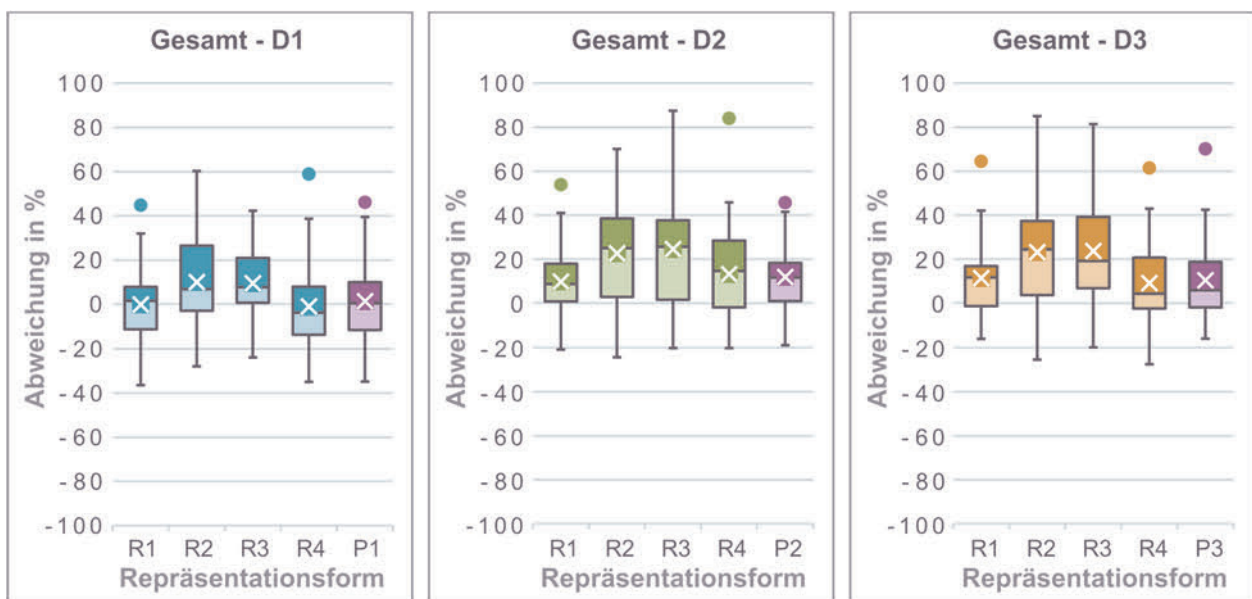
**Tabelle 5.10:** Inferenzstatistische Angaben der Überprüfung der Kontrollmodelle

Aus diesem Grund sind in der weiteren Betrachtung insbesondere die gemittelten Werte der Repräsentationsform über die Detaillierungsstufen bzw. Produkte von großem Interesse, um die produktbedingten Unterschiede auszugleichen.

#### 5.4.2 Darstellung der Maßabweichung

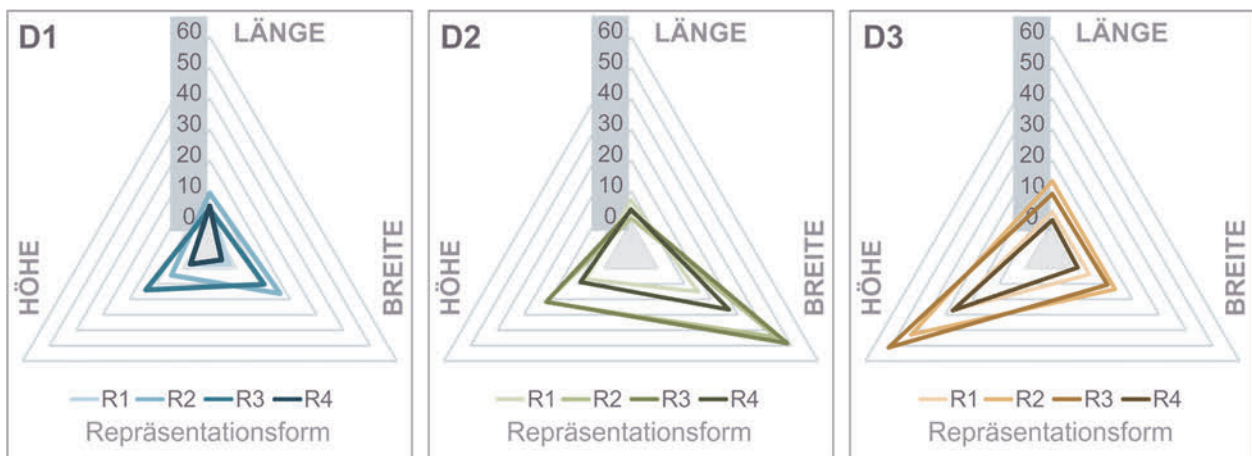
Die deskriptive Auswertung der Daten der Maßabweichung erfolgt entsprechend der in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Vorgehensweise. In Abbildung 5.21 sind die Daten in Form von Box-Whisker-Plots dargestellt. Die Diagramme stellen die Daten der Repräsentationsformen für die jeweilige Detaillierungsstufe bzw. für das Produkt dar. Zusätzlich sind in jedem Diagramm die Daten des jeweiligen Produkts abgebildet, die bei der Auswertung entsprechend Kapitel 5.4.1 mitberücksichtigt werden.

Grundsätzlich tendieren die Probanden zu einer Überbewertung der Maße. Das Modell wird größer eingeschätzt als das Produkt tatsächlich ist. Darauf deuten die nach oben verschobenen Quartile und die Ausreißer nach oben hin. Die Streuung der Messwerte ist beim physischen Modell (R1) und dem virtuellen Modell (R4) vergleichbar mit der Maßeinschätzung der Produkte, was für eine eindeutige Bewertung spricht. Bei der Abbildung (R2) und dem digitalen Modell (R3) ist die Streuung größer, was der Erwartung entspricht, da eine Maßeinschätzung bei diesen Repräsentationsformen als schwieriger angenommen wird. Insgesamt zeigen die Daten über die Repräsentationsformen hinweg einen ähnlichen Verlauf zwischen den Detaillierungsstufen bzw. Produkten. Bei der Detaillierung D2 und D3 sind die Werte insgesamt leicht nach oben verschoben.



**Abbildung 5.21:** Box-Whisker-Plots der Maßabweichung

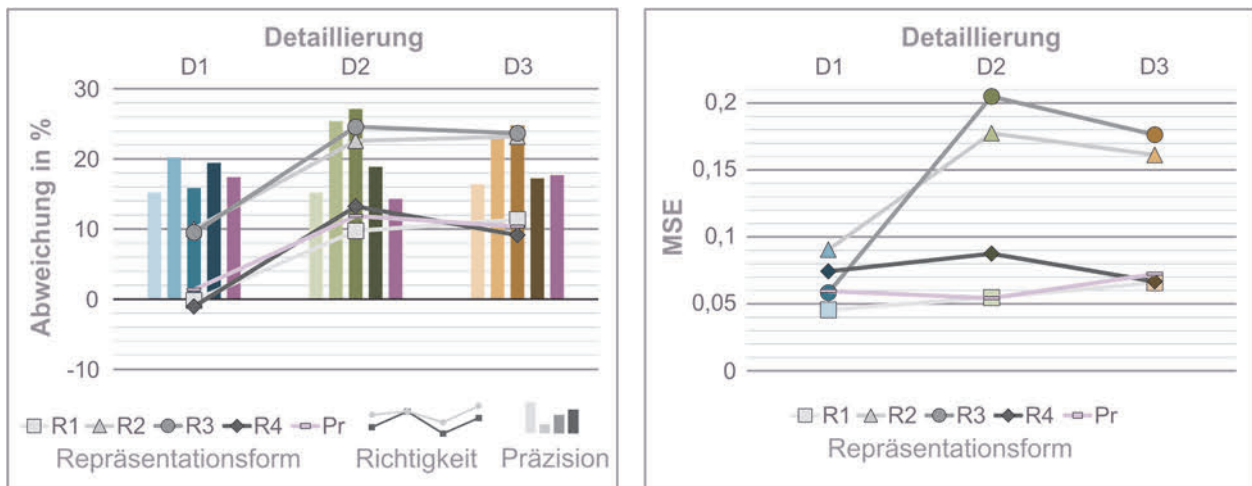
In der nachstehenden Abbildung 5.22 ist die Aufteilung der Abweichungen nach den drei bewerteten Maßen Länge, Breite und Höhe dargestellt.



**Abbildung 5.22:** Maßabweichung dargestellt nach den Einzelmaßen

Wie bei der Überprüfung der Kontrollmodelle in Kapitel 5.4.1.3 gezeigt, ist die Bewertung tendenziell vom Produkt und nicht der Detaillierung abhängig. Bei Produkt 1 (P1) können die einzelnen Maße ähnlich eingeschätzt werden, bei Produkt 2 (P2) zeigt sich eine Verzerrung bezüglich der Breite und bei Produkt 3 (P3) hinsichtlich der Höhe.

In der folgenden Abbildung 5.23 ist die Präzision und Richtigkeit der Maßeinschätzung anhand der verschiedenen Modelle dargestellt. Auf der rechten Seite ist die Genauigkeit, berechnet aus der Richtigkeit und Präzision dargestellt.



**Abbildung 5.23:** Darstellung der Richtigkeit und Präzision (links) sowie der Genauigkeit der Maßeinschätzung

Die Werte der Richtigkeit zeigen zwischen den Detaillierungsstufen bzw. Produkten einen ähnlichen Verlauf, sind jedoch bei D2 und D3 um etwa 10 % Abweichung nach oben verschoben. Es zeigt sich dabei ein deutlicher aber über die Detaillierungen einheitlicher Abstand zwischen der Abbildung (R2) und dem digitalen Modell (R3) von den anderen Repräsentationsformen (R1, R4 und Pr). Erwartungsgemäß zeigt das physische Modell ähnliche Werte wie das Produkt hinsichtlich Präzision und Richtigkeit, allerdings zeigt auch das virtuelle Modell (R4) diesbezüglich ähnliche Werte. Die Werte der Präzision zeigen über alle Detaillierungsstufen hinweg einen ähnlichen Verlauf zwischen den Repräsentationsformen, nur das digitale Modell (R3) fällt bei D1 durch eine vergleichsweise gute Präzision auf. Die Werte der Genauigkeit bekräftigen die Erkenntnisse der Richtigkeit und Präzision. Das physische Modell und das reale Produkt haben ähnliche Werte, das virtuelle Modell zeigt einen ähnlichen Verlauf und liegt nur geringfügig darüber. Insgesamt ist die Genauigkeit der Maßeinschätzung mithilfe der Abbildung (R2) und dem digitalen Modell (R3) stark abhängig von der Produktausprägung, beim physischen und virtuellen Modell ist sie konstant. Bei der höchsten Detaillierung bzw. Produkt 3 sind das



physische Modell, das reale Produkt und das virtuelle Modell bezüglich Genauigkeit auf ähnlichem Niveau. Die Werte der Genauigkeit deuten darauf hin, dass am virtuellen Modell eine ähnliche Größeneinschätzung möglich ist, wie am physischen Modell bzw. am realen Produkt. Die Daten und Erkenntnisse der deskriptiven Statistik werden im Folgenden inferenzstatistisch ausgewertet und überprüft.

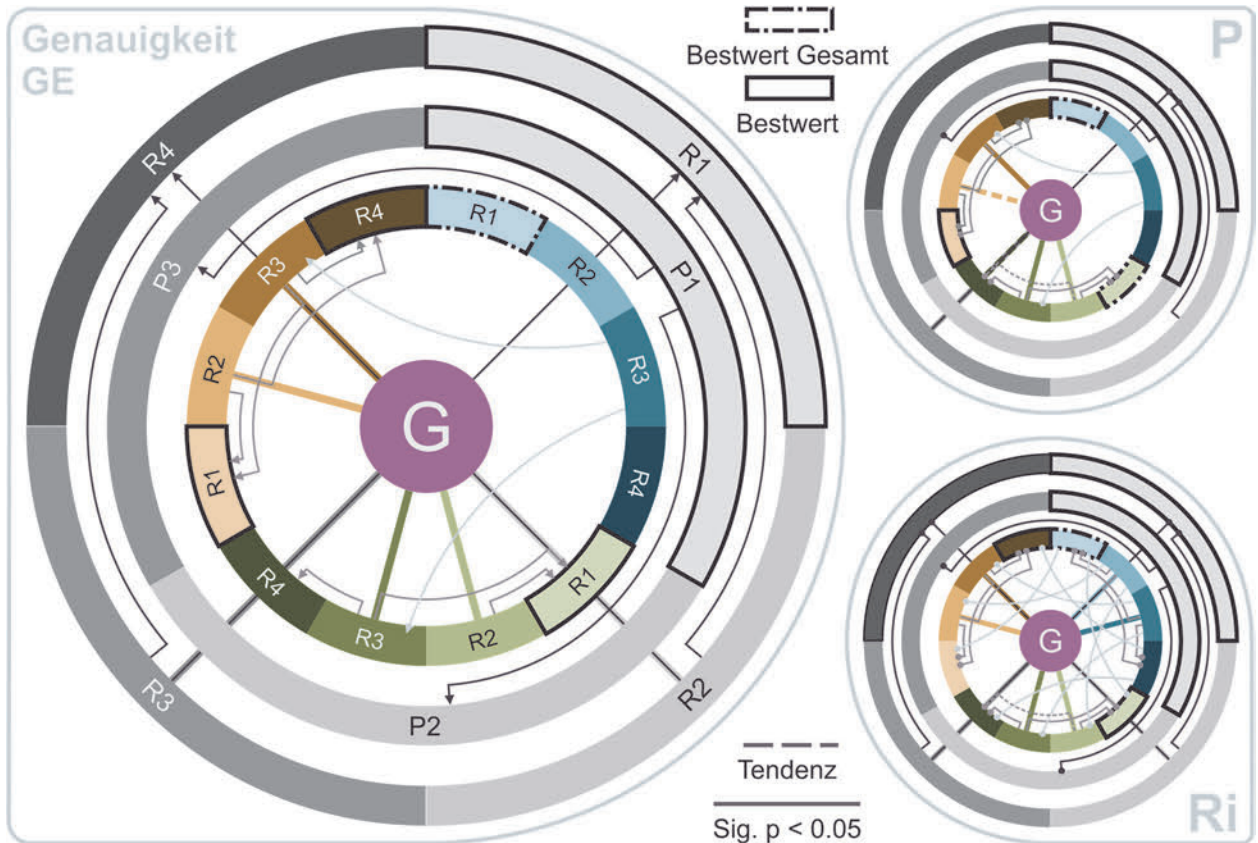
### 5.4.3 Parametrische Auswertung der Maßabweichung

Die inferenzstatistische Auswertung der Maßabweichung erfolgt entsprechend des in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Vorgehens, differenziert nach der Richtigkeit, der Präzision und der Genauigkeit der Maßeinschätzung. Die angewendeten statistischen Verfahren können Abbildung 5.19 entnommen werden. Die Darstellung der signifikanten Paarungen erfolgt mittels des bekannten Kreisdiagramms, siehe Abbildung 5.24, und werden auf Basis dieser Darstellung im Folgenden näher beschrieben. Die vollständigen Ergebnisse der Auswertung, einschließlich der Untersuchung der Haupteffekte, können dem Anhang A6 entnommen werden.

Die Paarungen zum inneren Kreis zeigen signifikante Unterschiede zum Produkt bezüglich der Genauigkeit und Präzision sowie zum Referenzwert 0 bezüglich der Richtigkeit. Bezüglich der Genauigkeit tritt ein signifikanter Haupteffekt der Repräsentationsform (Greenhouse-Geisser  $F(2.67, 138.67) = 14.16, p < .001, \text{partielles } \eta^2 = .21$ ) sowie der Detaillierung bzw. des Produkts ( $F(2, 104) = 5.00, p < .01, \text{partielles } \eta^2 = .09$ ) auf. Wie zuvor beschrieben, unterscheiden sich die Repräsentationsformen, gemittelt über die Detaillierungsstufen bzw. Produkte, R2 und R3 jeweils signifikant von R1 und R4 sowie vom realen Produkt. Zwischen diesen Repräsentationsform-Paaren existieren keine signifikanten Unterschiede. Innerhalb der einzelnen Produkte zeigen sich bei P2 und P3 ähnliche signifikante Paarungen. Bei P1 sind zwischen den einzelnen Repräsentationsformen keine signifikanten Unterschiede vorhanden. Gemittelt über die Repräsentationsformen unterscheiden sich das Produkte P1 mit dem Produkt P2 und P3 signifikant, zwischen P2 und P3 sind keine signifikanten Unterschiede vorhanden.

Die Auswertung der Richtigkeit zeigt einen signifikanten Haupteffekt der Repräsentationsform (Greenhouse-Geisser  $F(3.05, 158.35) = 29.32, p < .001, \text{partielles } \eta^2 = .36$ ) sowie der Detaillierung bzw. des Produkts ( $F(2, 104) = 33.10, p < .001, \text{partielles } \eta^2 = .39$ ). Zwischen der Repräsentationsform und der Detaillierung (Greenhouse-Geisser  $F(6.17, 320.88) = 0.97, p > .05, \text{partielles } \eta^2 = .02$ ) gibt es keine statistisch signifikante Interaktion. Bezüglich der Richtigkeit der Maßeinschätzung zeigt das virtuelle Modell (R4) gleich gute

Ergebnisse wie das physische Modell (R1), beide unterscheiden sich signifikant von der Abbildung (R2) und dem digitalen Modell (R3). Zwischen diesen Paarungen (R1-R4 und R2-R3) bestehen keine signifikanten Unterschiede. Zwischen dem realen Produkt und R2 sowie R3 bestehen jeweils signifikante Unterschiede. Diese signifikanten Unterschiede bestehen in gleicher Weise bei jeder Detaillierung bzw. jedem Produkt. Zwischen den Produkten bzw. Detaillierungsstufen besteht zwischen P1 zu P2 und zu P3 ein signifikanter Unterschied, P2 und P3 unterscheiden sich nicht signifikant.



	Paarung	MD	SD	p	Paarung	MD/df*	SD/t*	p
Genauigkeit	R1 - R2	.087	.016	.000	R1_D3 - R2_D3	.096	.025	.003
	R1 - R3	.091	.018	.000	R1_D3 - R3_D3	.111	.024	.000
	R2 - R4	.067	.020	.013	R2_D3 - R4_D3	.095	.027	.010
	R3 - R4	.070	.018	.002	R3_D3 - R4_D3	.110	.028	.003
	D1 - D2	.049	.019	.037	R2 - Pr	.080	.017	.000
	D1 - D3	.043	.016	.035	R3 - Pr	.084	.019	.000
	R3_D1 - R3_D2	.021	.007	.007	R2_D2 - Pr	.122	.041	.044
	R3_D1 - R3_D3	.025	.009	.025	R3_D2 - Pr	.150	.038	.003
	R1_D2 - R2_D2	.121	.041	.045	R2_D3 - Pr	.089	.023	.004
	R1_D2 - R3_D2	.149	.036	.001	R3_D3 - Pr	.104	.025	.001
	R3_D2 - R4_D2	.117	.031	.004				

**Abbildung 5.24:** Signifikante Paarungen der Maß-Abweichung bezüglich Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision

Die Auswertung der Präzision ergibt weniger signifikante Unterschiede zwischen den Repräsentationsformen als bei der Richtigkeit der Maßeinschätzung. Das präziseste Modell

R1 weist über die Produkte bzw. Detaillierungsstufen gemittelt signifikante Unterschiede zur Abbildung (R2) und dem digitalen Modell (R3) auf, das virtuelle Modell (R4) unterscheidet sich weder zu R1 noch zu R2 oder R3 signifikant. Das Produkt bzw. die Detaillierung führt gemittelt über die Repräsentationsformen nur zwischen P1 und P3 zu einem signifikanten Unterschied, innerhalb der Repräsentationsformen besteht dieser signifikante Unterschied nur bei R3.

Insgesamt spielt die Maßeinschätzung für die spätere Modellauswahl im MWEF, wie in Kapitel 6 erläutert, nur eine untergeordnete Rolle, da dies nur bei wenigen Aspekten der Bewertung, wie beispielsweise bezüglich Aufbau- oder Technikaspekten, von Interesse ist. Zusammenfassend ist jedoch festzuhalten, dass die Maßeinschätzung des virtuellen Modells über alle Produkte und geschätzten Maße hinweg keinen signifikanten Unterschied zu den Werten des realen Produkts bzw. des physischen Modells aufweist. Dies ist insbesondere für die Verwendung von virtuellen Modellen in Kombination mit den diskutierten Inhalten bezüglich Modell-Produkt-Abweichung in Kapitel 5.6.1 und der subjektiven Modellbewertung in Kapitel 5.6.2 von Interesse und zu berücksichtigen. Erwartungsgemäß zeigen sich abschließend CAD-Modelle und Abbildungen ohne Referenzen als nicht repräsentativ für die Einschätzung von Maßen.

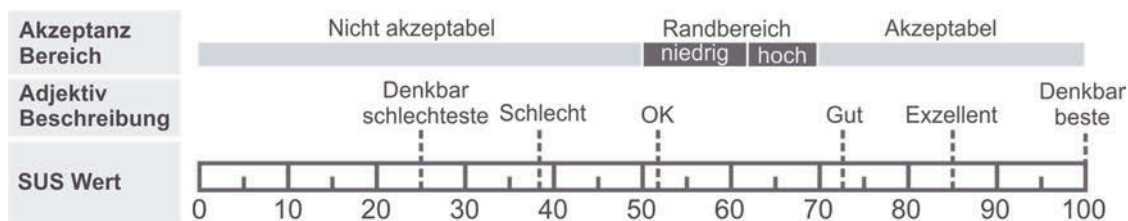
## **5.5 System Usability Scale (SUS)**

Im Rahmen der Modell-Studie wurde abschließend nach der Bewertung aller Modelle und Produkte eine standardisierte Usability Bewertung der Repräsentationsformen erhoben. Dabei waren die Handhabung und der Umgang mit den Repräsentationsformen unabhängig von der Detaillierung zu bewerten. Die Bewertung erfolgte nach dem standardisierten Verfahren des System Usability Scales nach BROOKE [1996] mittels einer Rating-Skala von 1 bis 5. Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Auswertung vorgestellt und die deskriptiv- und inferenzstatistische Auswertung vorgenommen.

### **5.5.1 Vorgehen bei der Auswertung**

Für die statistische Auswertung des SUS der Repräsentationsformen wurde zunächst der SUS-Wert nach BROOKE [1996] für jede Form aus den Einzelwertungen der Probanden berechnet. Dazu werden die Einzelwerte auf eine einheitliche Skala von 0 bis 4 umgerechnet, da die Fragen teils positiv und teils negativ formuliert sind. Die Umgerechneten Werte werden addiert und mit dem Wert 2,5 multipliziert. Der SUS-Wert reicht damit von 0 bis 100. Eine Einschätzung der SUS-Werte kann Abbildung 5.25 entnommen werden. Im Rahmen der deskriptiven Auswertung des SUS erfolgt die Darstellung der Daten des

Mittelwerts in Form eines Balken-Diagramm mit Angabe der Standardabweichung. Diese werden in Kapitel 5.5.2 vorgestellt und beschrieben. Die inferenzstatistische Auswertung der Daten des SUS erfolgt mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018]. Der Innersubjektfaktor ist dabei die Repräsentationsform in vier Stufen. Bei den anschließend durchgeführten Post-Hoc-Tests im paarweisen Vergleich wird eine Bonferroni-Korrektur zum Ausgleich der Alpha-fehler-Kumulierung vorgenommen. Die parametrische Auswertung des SUS wird in Kapitel 5.5.3 vorgestellt und diskutiert.



**Abbildung 5.25:** Einschätzung des System Usability Scale nach [BANGOR ET AL. 2008]

Die beschriebene statistische Vorgehensweise dient der Überprüfung der Alternativhypothesen  $H_x$  bzw. der korrespondierenden Nullhypothesen  $H_{0x}$  bezüglich des System Usability Scales in Tabelle 5.11.

$H_{41}$	Es gibt einen Unterschied des System Usability Scales bedingt durch die Repräsentationsform $H_{41}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$
$H_{42}$	Es gibt einen Unterschied des System Usability Scales hinsichtlich der Expertise $H_{42}: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

**Tabelle 5.11:** Forschungshypothesen bezüglich des System Usability Scales

Im Vorfeld der Auswertung wurden die Daten auf Zusammenhänge und Gruppenunterschiede bezüglich des TD-Hintergrunds, Vorerfahrungen und Probandeneigenschaften untersucht. Die Ergebnisse der Überprüfung sind in Tabelle 5.12 dargestellt.

Untersuchungsparameter	Test	Beschreibung Ergebnis	Sig.	Varianzhomogenität
TD-Hintergrund	A	keine Unterschiede erkennbar	$p > .05$	$p > 0.05$
WTS	S	keine Zusammenhänge erkennbar	$p > .05$	
Geschlecht	T	keine Unterschiede erkennbar	$p > .05$	$p > 0.05$
Fehlsichtigkeit	T	keine Unterschiede erkennbar	$p > .05$	$p > 0.05$
CAD Erfahrung	S	Tendenz zu positiver Rangkorrelation bei R3 (.06)	$p > .05$	
VR Erfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	$p > .05$	
Skizziererfahrung	S	keine Zusammenhänge erkennbar	$p > .05$	

T: t-Test S: Spearman Korrelation A: ANOVA

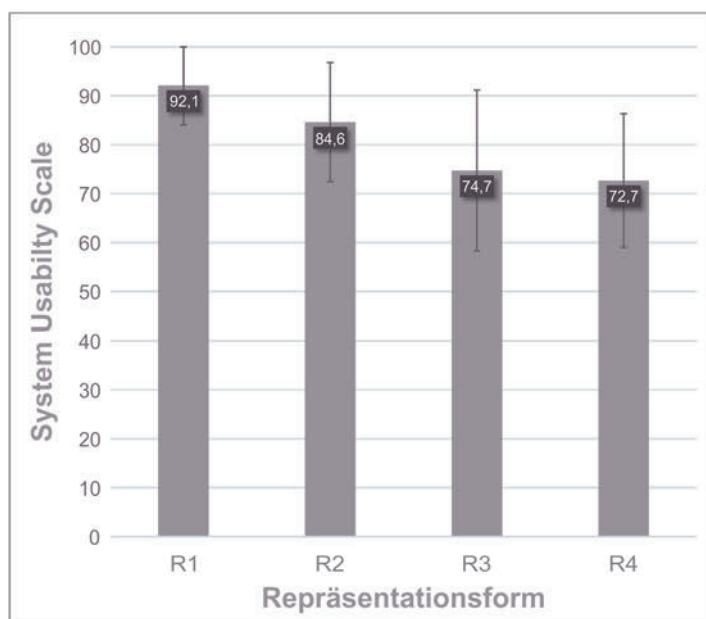
**Tabelle 5.12:** Zusammenhänge und Gruppenunterschiede der Maßabweichung

Die Überprüfung erfolgt zum einen mittels Gruppenbildung und anschließendem t-Test für unabhängige Stichproben mit Levene-Test auf Varianzhomogenität sowie einem

Spearman-Test auf Rangkorrelationen. Es zeigen sich keine Zusammenhänge oder Gruppenunterschiede bedingt durch die untersuchten Faktoren. Bezüglich des TD-Hintergrunds wird ebenfalls eine mixed ANOVA durchgeführt. Auch hier zeigt sich kein Haupteffekt der Gruppe ( $F(1, 52) = .04, p > .05, \text{partielles } \eta^2 = .00$ ). Aufgrund dieser Ergebnisse wird auch der SUS als Gesamtstichprobe ausgewertet und es gibt darüber hinaus keine Einschränkungen zu berücksichtigen.

### 5.5.2 Darstellung des SUS

Entsprechend dem beschriebenen Vorgehen in Kapitel 5.5.1 erfolgt die deskriptiv-statistische Auswertung der erhobenen Daten bezüglich des System Usability Scales der Repräsentationsformen. Die Daten sind in Form des Balken-Diagramms in Abbildung 5.26 dargestellt. Das Diagramm zeigt für die Repräsentationsform physisches Modell (R1) und die Abbildung (R2) erwartungsgemäß hohe Werte von 92,1 und 84,6 Punkten. Entsprechend der Skala in Abbildung 5.25 handelt es sich dabei um Werte in einem exzellenten Bereich. Die Werte des physischen Modells zeigen dabei noch eine geringere Standardabweichung gegenüber der Abbildung (R2). Die SUS-Werte des digitalen Modells (R3) und des virtuellen Modells (R4) zeigen sich mit 74,7 und 72,7 auf einem ähnlichen Niveau, wobei die Standardabweichung des digitalen Modells hier die größten Werte aller Repräsentationsformen zeigt. Die Werte liegen somit für diese beiden Repräsentationsformen auch im guten Bereich.

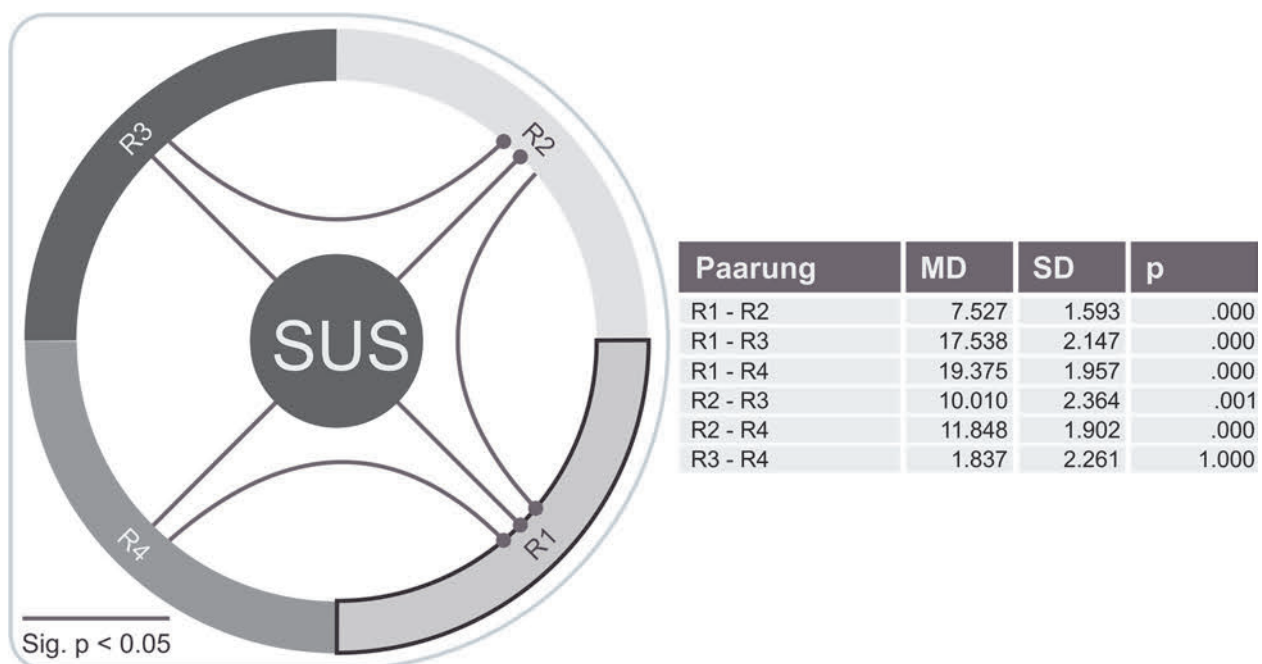


**Abbildung 5.26:** System Usability Scale

Die inferenzstatistische Auswertung der Daten und Diskussion der Ergebnisse erfolgt im folgenden Abschnitt.

### 5.5.3 Parametrische Auswertung des SUS

Die Auswertung der Daten des System Usability Scales mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigt einen signifikanten Haupteffekte der Repräsentationsform ( $F(3, 156) = 40.43, p < .001, \text{partielles } \eta^2 = .43$ ). Der paarweise durchgeführte Post-Hoc Test zeigt signifikante Unterschiede zwischen der am besten bewerteten Repräsentationsform, dem physischen Modell (R1), und den anderen Repräsentationsformen auf. Auch die Abbildung unterscheidet sich bezüglich der Usability signifikant von den anderen Formen. Zwischen dem digitalen Modell (R3) und dem virtuellen Modell (R4) besteht kein signifikanter Unterschied. Die inferenzstatistischen Angaben können der Tabelle in Abbildung 5.27 entnommen werden.



**Abbildung 5.27:** Signifikante Paarungen des SUS

Insbesondere die Werte des virtuellen Modells sind als verhältnismäßig neues und für die Probanden ungewohntes Medium von großem Interesse. Aufgrund des quasi natürlichen Umgangs mit physischen Modellen und Abbildungen sind die signifikanten Unterschiede nicht überraschend. Der dennoch hohe Wert des VR-HMD-Systems im guten Bereich und der geringe Abstand zu einem digitalen Modell am PC spricht für eine hohe Akzeptanz und Potential für den Einsatz bezüglich bewertender Aufgaben. Da die vorangegangene Überprüfung keine Korrelation mit dem Alter des Probanden aufgezeigt hat, ermöglicht dies ein breites Einsatzspektrum. Das ist insbesondere hinsichtlich des Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozesses in Kapitel 6.1 von großer Relevanz.



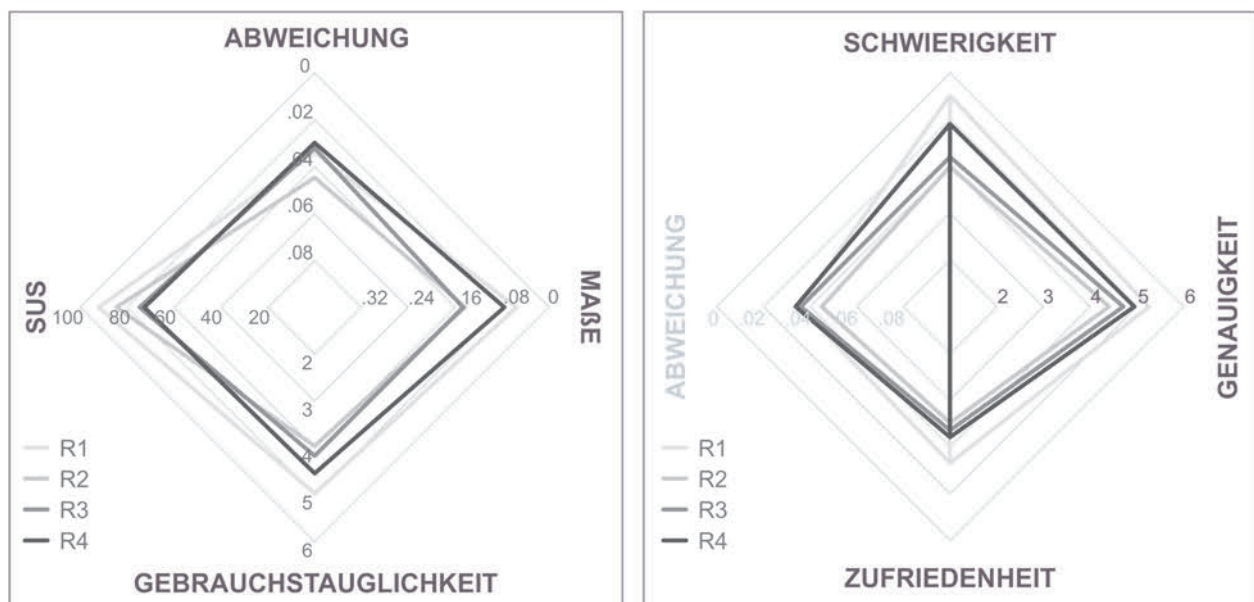
## 5.6 Diskussion der Ergebnisse

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Modell-Studie hat zum Ziel verschiedene Modelltypen hinsichtlich ihrer Eignung für bewertende Aufgaben innerhalb der Produktentwicklung zu untersuchen. Die abschließende Übersicht der Überprüfung der aufgestellten Hypothesen ist in Tabelle 5.13 dargestellt.

	Nr	Hypothese	Erg.
Modell-Produkt-Abweichung	H <sub>11</sub>	Es gibt einen Unterschied der mittleren Abweichung von Modell- und Produktbewertungen bedingt durch die Repräsentationsform	JA
	H <sub>12</sub>	Es gibt einen Unterschied der mittleren Abweichung von Modell- und Produktbewertungen bedingt durch die Detaillierung	JA
	H <sub>13</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Mittelwerten der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen hinsichtlich der Expertise	NEIN
	H <sub>14</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen der mittleren Abweichung von Modell- und Produktbewertung und dem Referenzwert	JA
	H <sub>15</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Varianzen der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen bedingt durch die Repräsentationsform	JA
	H <sub>16</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Varianzen der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen bedingt durch die Detaillierung	JA
	H <sub>17</sub>	Es gibt einen Unterschied des mittleren Quadratischen Fehlers der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen hinsichtlich der Repräsentationsform	JA
	H <sub>18</sub>	Es gibt einen Unterschied des mittleren Quadratischen Fehlers der Abweichung von Modell- und Produktbewertungen hinsichtlich der Detaillierung	JA
Modell-bewertung	H <sub>21</sub>	Es gibt einen Unterschied bei der Modellbewertung bedingt durch die Repräsentationsform	JA
	H <sub>22</sub>	Es gibt einen Unterschied bei der Modellbewertung bedingt durch die Detaillierung	JA
	H <sub>23</sub>	Es gibt einen Unterschied bei der Modellbewertung hinsichtlich der Expertise	NEIN
Maßabweichung	H <sub>31</sub>	Es gibt einen Unterschied der mittleren Abweichung der Maßeinschätzung bedingt durch die Repräsentationsform	JA
	H <sub>32</sub>	Es gibt einen Unterschied der mittleren Abweichung der Maßeinschätzung bedingt durch die Detaillierung	JA
	H <sub>33</sub>	Es gibt einen Unterschied der mittleren Abweichung der Maßeinschätzung hinsichtlich der Expertise	NEIN
	H <sub>34</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen der mittleren Abweichung der Maßeinschätzung und dem Referenzwert	JA
	H <sub>35</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Varianzen der Maßeinschätzung bedingt durch die Repräsentationsform	JA
	H <sub>36</sub>	Es gibt einen Unterschied zwischen den Varianzen der Maßeinschätzung bedingt durch die Detaillierung	JA
	H <sub>37</sub>	Es gibt einen Unterschied des mittleren Quadratischen Fehlers der Maßeinschätzung hinsichtlich der Repräsentationsform	JA
	H <sub>38</sub>	Es gibt einen Unterschied des mittleren Quadratischen Fehlers der Maßeinschätzung hinsichtlich der Detaillierung	JA
SUS	H <sub>41</sub>	Es gibt einen Unterschied des SUS bedingt durch die Repräsentationsform	JA
	H <sub>42</sub>	Es gibt einen Unterschied des SUS hinsichtlich der Expertise	NEIN

**Tabelle 5.13:** Gesamtergebnis der Überprüfung der Hypothesen

Untersucht wurden zum einen objektiv erfass- und vergleichbare Werte der Abweichung zwischen einer Bewertung am Modell und den tatsächlichen Eigenschaften des Produkts und zum anderen eine subjektive Beurteilung der Modelle aus Anwendersicht. Die erhobenen Daten wurden in den Kapiteln 5.2 bis 5.5 bezüglich der jeweils aufgestellten Alternativhypothesen  $H_x$  beziehungsweise der korrespondierenden Nullhypothesen  $H_{0x}$  untersucht. Die Überprüfung der Hauptaspekte der Studie, die Modell-Produkt-Abweichung sowie die subjektive Modellbewertung, zeigt, dass sich sowohl die Repräsentationsform als auch die Detaillierung auf die erhobenen Aspekte auswirken. Die diesbezüglichen Nullhypothesen müssen daher abgelehnt und die Alternativhypothesen angenommen werden. Bei keinem der beiden Hauptaspekte konnte bezüglich der erhobenen Faktoren ein Einfluss des TD-Hintergrunds festgestellt werden. Dementsprechend sind die Nullhypothesen der Expertise beizubehalten. Die Überprüfung der beiden Nebenaspekte der Studie, die Maßabweichung sowie der System Usability Scale, führen ebenfalls zur Ablehnung der Nullhypothesen bezüglich der Repräsentationsform sowie zusätzlich der Detaillierung bei der Maßabweichung und Annahme der Alternativhypothesen. Auch hier zeigt sich kein Einfluss der Expertise und die Nullhypothesen müssen beibehalten werden. In Abbildung 5.28 sind die Gesamtergebnisse der untersuchten Aspekte, differenziert nach den Repräsentationsformen und gemittelt über die Detaillierungsstufen dargestellt.



**Abbildung 5.28:** Übersicht der Gesamtergebnisse (links) und der Modell-Produkt-Abweichung sowie Gebrauchstauglichkeit detailliert (rechts)

Im Folgenden werden die Erkenntnisse in Hinblick auf den Modell-Werkzeug-Entscheidungsprozess diskutiert. Hierbei liegt der Fokus auf den in Kapitel 4.1 beschriebenen

Hauptaspekten der Studie. Sowohl die Modell-Produkt Abweichung als auch die Modellbewertung aus Anwendersicht sind für den MWEF von zentraler Bedeutung, da sie die Grundlage für die Auswahl bilden und werden daher gesondert betrachtet.

### **5.6.1 Modell-Produkt Abweichung**

Bei der Modell-Produkt Abweichung handelt es sich, neben der subjektiven Modellbewertung, um einen elementaren Aspekt bei der Auswahl eines passenden Modells für bewertende Aufgaben. Dementsprechend sind die Erkenntnisse der Studie bezüglich des Einflusses der Repräsentationsform und der Detaillierung von großer Bedeutung. Es hat sich gezeigt, dass die Detaillierung eines Modells einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Bewertung von Produkteigenschaften hat. Mit zunehmender Detaillierung steigt die Genauigkeit, auch wenn nur Aspekte der Teilgestalten Aufbau und Form bzw. der Technik oder Makroergonomie bewertet werden. Dies spricht, trotz erhöhtem Aufwand bei der Umsetzung, für eine stärkere Fokussierung auf die Detaillierung der Modelle. Insbesondere bei physischen Modellen zeigt sich hier ein erhöhter Aufwand, dem jedoch ein konkreter Nutzen gegenübersteht. Die Detaillierung ist aber im Zusammenspiel mit der Repräsentationsform abzuwägen. Eine sehr feine Ausdetaillierung virtueller und physischer Modelle, beispielsweise bezüglich der Oberflächengüte, sowie die Aufbereitung der Umgebung des virtuellen Modells führt zu keiner signifikanten Verbesserung der Einschätzung von Produkteigenschaften im Allgemeinen. Dies gilt jedoch nicht hinsichtlich spezifischer Fragestellungen bezüglich der Haptik. Hier ist eine höchste Detaillierung vorteilhaft. Bezüglich der Repräsentationsformen hat sich das Potential virtueller Modelle gezeigt. Die Studie belegt, dass mithilfe virtueller Modelle Produkteigenschaften vergleichbar präzise und genau bewertet werden können wie mit physischen Modellen. Insbesondere im Hinblick auf die Gegenpole additive Fertigung und Virtual Reality bedeutet dies einen vergleichbaren Einsatz und somit die Verlagerung der Entscheidungskriterien entsprechend Kapitel 3.2.6 auf andere Aspekte wie Integrationsfähigkeit, ökonomische Gesichtspunkte oder Folgeprozesse. Die Anwendung von Abbildungen dagegen führt bei der Bewertung der untersuchten Produkteigenschaften zu signifikant ungenaueren Ergebnissen im Vergleich zum Einsatz von virtuellen Modellen. Dementsprechend ist der Einsatzbereich von Zeichnungen und Skizzen eingeschränkter und gezielt abzuwägen.

Die Auswertung der Ergebnisse der Studie in Kapitel 5.2 bezüglich der Modell-Produkt-Abweichung zeigt messbare Unterschiede zwischen der Bewertung am Modell und am

Produkt. Insgesamt handelt es sich um Abweichungen im unteren Prozentbereich, die bei kritischen und wichtigen Entscheidungen eine hohe Relevanz besitzen, jedoch im Zusammenspiel mit anderen Entscheidungsfaktoren, wie die Einschätzung der Modelle aus Anwendersicht, im MWEF nicht alleine ausschlaggebend sind.

### **5.6.2 Modellbewertung**

Der weitere zentrale Aspekt bei der Auswahl eines passenden Modells im Rahmen des MWEF in Kapitel 6 ist die subjektive Modellbewertung, die mithilfe der Modell-Studie in Form einer Gebrauchstauglichkeitsbewertung bezüglich der Aspekte Effizienz, Effektivität und Zufriedenheit erhoben wurde. Entgegen der messbaren und objektiven Abweichung zwischen Modell- und Produktbewertung zeigen sich bei der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit aus Probandensicht stärkere Unterschiede zwischen den Repräsentationsformen. Die bevorzugte Repräsentationsform R1, das physische Modell, unterscheidet sich gemittelt über die Detaillierung signifikant von den anderen Repräsentationsformen, jedoch zeigen sich zum virtuellen Modell innerhalb der Detaillierungsstufen hinsichtlich Genauigkeit (Effektivität) und Zufriedenheit keine signifikanten Unterschiede. Dies bestätigt die Erkenntnisse der Modell-Produkt-Abweichung bezüglich des virtuellen Modells und deutet im Zusammenspiel dieser beiden Aspekte auf ein hohes Einsatzpotential des virtuellen Modells hin. Auch bestätigt sich der Verlauf der Detaillierung. Mit zunehmender Detaillierung steigt die Gebrauchstauglichkeit, jedoch nähert sie sich bei der Detaillierungsstufe D2 zu D3 an und unterscheidet sich nur hinsichtlich der Zufriedenheit noch signifikant. Bei einem virtuellen Modell führt eine höhere Ausdetaillierung nicht in gleichem Maße zu einer höheren subjektiven Genauigkeit, Zufriedenheit und geringeren Schwierigkeit wie beim physischen Modell. Das führt beispielsweise bei AF-Modellen zu einem gesteigerten Aufwand bei der Umsetzung einer höheren Detaillierung oder ermöglicht im Gegenzug Einsparungen beim virtuellen Modell durch eine reduzierte Detaillierung. Der Aufwand ist ein weiterer Aspekt, der bei einer möglichen Modellauswahl von Interesse sein kann. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Detaillierung die Unterschiede zwischen den Repräsentationsformen geringer werden und sich annähern. Insgesamt verdeutlicht die Auswertung der Ergebnisse der Modell-Studie bezüglich der subjektiven Modellbewertung starke Unterschiede zwischen den Repräsentationsformen und den Detaillierungsstufen. Jedoch ist der Einfluss und die Priorität der Gebrauchstauglichkeit nicht über alle Anwendungsfelder konstant. Insbesondere zwischen möglichen

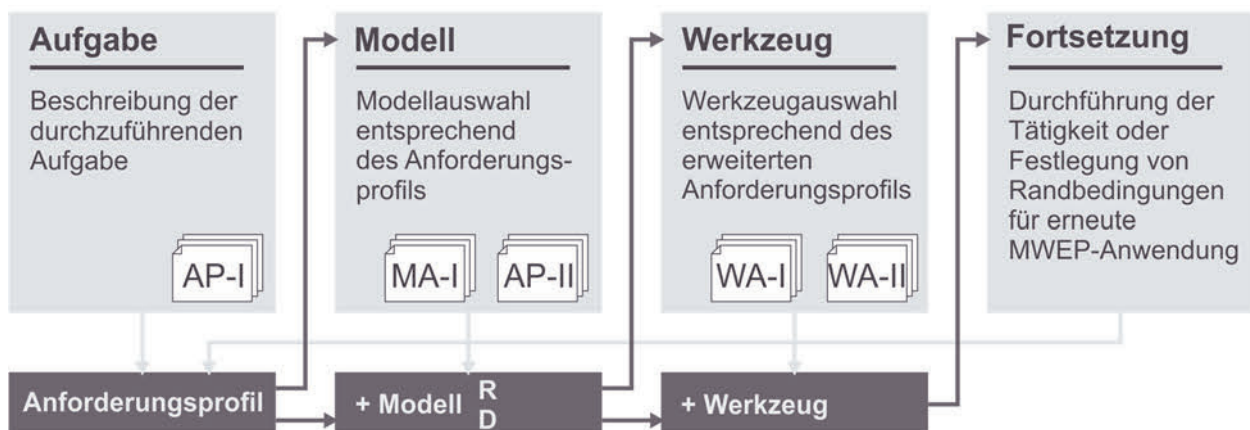
Bewertungsgruppen ist die Wichtigkeit dieses Faktors anzupassen. Es ist davon auszugehen, dass bei bestimmten Bewertern, wie beispielsweise der mit der Entwicklung vertraute Konstrukteur, der Einfluss einer geringeren Gebrauchstauglichkeit zu vernachlässigen ist und hier eine möglichst genaue Bewertung von größerem Interesse ist. Dementsprechend ist eine Gewichtung dieser beiden Kernaspekte der Modell-Studie bei der Umsetzung des MWEF in Kapitel 6 vorzunehmen.

## 6 Vorgehensweise bei der Modell-Werkzeug-Auswahl

Um bei der Entwicklung von Produkten gezielt bei der Auswahl von Modellen und passenden Werkzeugen zu unterstützen, wird im Folgenden ein Vorgehen entwickelt, das in Teilschritten bei einzelnen Aufgaben angewendet werden kann. Die Vorgehensweise basiert auf den Voruntersuchungen zu Modellen und Werkzeugen in Kapitel 3 sowie grundlegend auf den Ergebnissen aus der Studie zur Modellwahrnehmung in Kapitel 5. Ziel ist es, den Anwender bei der Wahl eines passenden Modells für bewertende Aufgaben während der Entwicklung zu unterstützen und Möglichkeiten zur Umsetzung und Gestaltung der Modelle aufzuzeigen. Im ersten Schritt wird der entwickelte Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozess vorgestellt und anschließend anhand mehrerer Beispiele auf Basis der Projektanalyse in Kapitel 3.2.5.2 exemplarisch durchgeführt und validiert.

### 6.1 Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozess (MWEPE)

Die Anforderungen an die Methode und grundlegenden Untersuchungen zu Modellen und Werkzeugen wurden in Kapitel 3 behandelt. Zusammengeführt mit den Ergebnissen der Studie in Kapitel 5 gliedert sich das Vorgehen in drei Abschnitte, siehe Abbildung 6.1. Durch die Beschreibung der durchzuführenden Aufgabe wird das Anforderungsprofil für die weiteren Schritte definiert. Mit diesen Vorgaben kann das passende Modell ausgewählt und das Anforderungsprofil erweitert werden. Die für das Modell geeigneten Werkzeuge zum Gestalten und Darstellen werden mithilfe der Werkzeugauswahl festgelegt. Abschließend ist die Modell-Werkzeug-Auswahl definiert und die weiteren Schritte oder ein weiterer Auswahl-Prozess mit neuen Randbedingungen kann durchgeführt werden.



**Abbildung 6.1:** Übersicht und Grundschritte des MWEPE

Die Teilschritte des MWEPE werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Die Zusammenhänge der Tabellen und Matrizen sind in Abbildung 6.2 dargestellt.



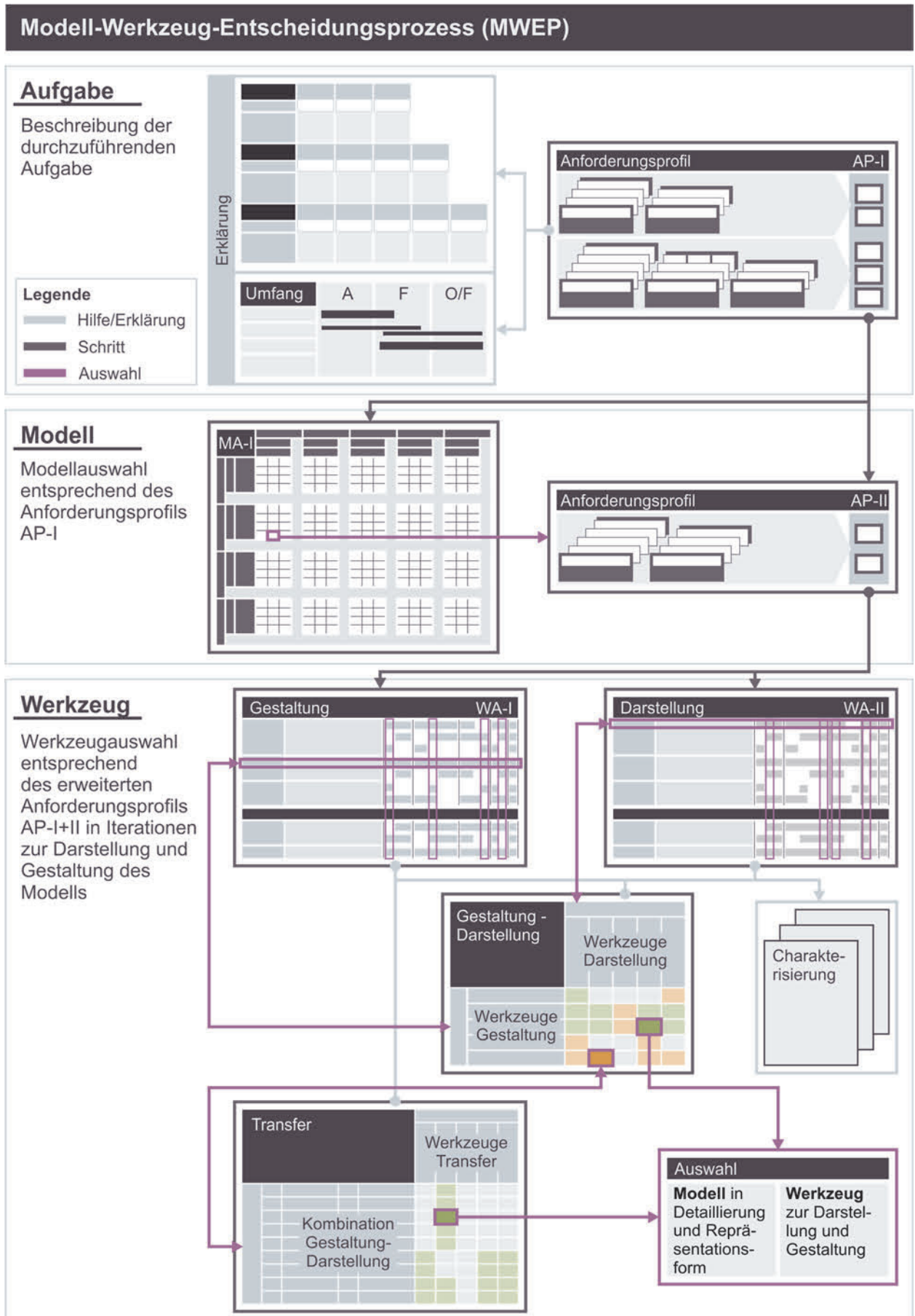
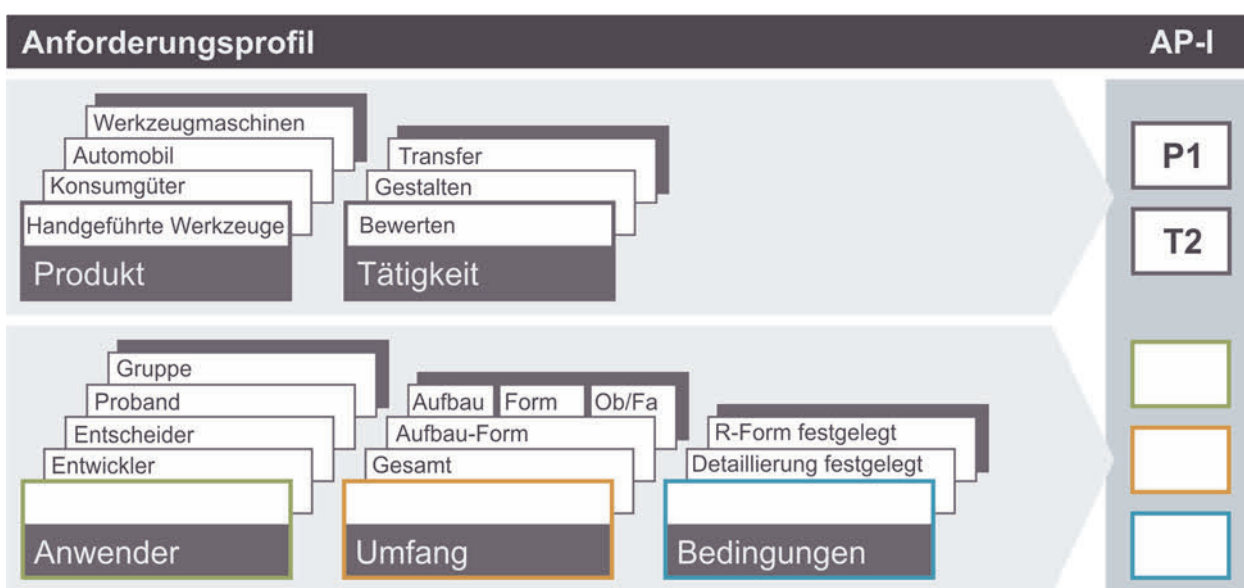


Abbildung 6.2: Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozess (MWEP)

### 6.1.1 Beschreibung der Aufgabe

Der Einstieg in den MWEF umfasst die Festlegung der Eigenschaften der auszuführenden Aufgabe zur Auswahl des passenden Modells und Werkzeugs. Entsprechend der Anforderungen in Kapitel 3.1.2 und dem Betrachtungsumfang der Modell-Studie sind der Produktumfang auf handgeführte Werkzeuge P1 und die Tätigkeit Bewerten T2 als Prozess-Einstieg festgelegt. Der Übertrag auf weitere Produktkategorien und Tätigkeiten bedarf weiterer Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnten. Die wählbaren Kriterien des Anforderungsprofils I (AP-I) umfassen den Anwender, den betrachteten Umfang des Produkts sowie etwaige Randbedingungen, die sich aus vorherigen Schritten im Entwicklungsprozess ergeben können, siehe Abbildung 6.3.



**Abbildung 6.3:** Anforderungsprofil AP-I zur Modellauswahl

Als Grundlage für die Festlegung der Inhalte der Kriterien dienen die Erklärungen in Abbildung 6.4. Mit dem Kriterium Anwender wird festgelegt, welche Person oder welcher Personenkreis die Bewertung anhand des Modells durchführt. Die Festlegung des Anwenders ist grundlegend, da dies Auswirkungen auf die Gewichtung von Genauigkeit, Präzision und Richtigkeit, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, sowie die subjektive Gebrauchstauglichkeit bei der Bewertung hat. Für den Anwender Entwickler ist beispielsweise die Wichtigkeit der subjektiven Gebrauchstauglichkeit des Modells weniger entscheidend, da er grundlegend mit der Aufgabe und dem Modell vertraut ist und eventuelle Schwierigkeiten und Modelleinschränkungen besser ausblenden oder berücksichtigen kann als beispielsweise die Gruppe der Entscheider. Diese müssen nach einer kurzen Phase der Inspizierung und Eingewöhnung mit dem Modell Entscheidungen treffen, wofür eine möglichst einfache und intuitive Anwendung vorteilhaft ist.

Bei einer durchzuführenden Studie sind beispielsweise die subjektive Gebrauchstauglichkeit sowie die Richtigkeit der Bewertung ebenfalls höher gewichtet. Die Streuung der Bewertung einzelner Probanden kann hierbei durch die Anzahl an Teilnehmern besser ausgeglichen werden als bei einer Person oder wenigen Personen. Bei Letztgenannten ist die Präzision der einzelnen Bewertung von höherer Wichtigkeit.

<b>Tätigkeit</b>	<b>Gestalten</b>	<b>Bewerten</b>	<b>Transfer</b>		
<b>Notation</b>	P1.T1.x.x.x	P1.T2.x.x.x	P1.T3.x.x.x		
<b>Beschreibung</b>	Formfindung und Umsetzung von Ideen am Modell	Darstellung der Formfindung und Ideen zur Bewertung hinsichtlich der Anforderungen	Wechsel der Modellumgebung als Zwischenschritt		
<b>Anwender</b>	<b>Entwickler</b>	<b>Entscheider</b>	<b>Proband</b>	<b>Stichprobe</b>	
<b>Notation</b>	P1.T2.1.x.x	P1.T2.2.x.x	P1.T2.3.x.x	P1.T2.4.x.x	
<b>Beschreibung</b>	Einzelperson die mit der Gestaltung direkt vertraut ist und die Umsetzung bewertet	Wenige Personen die auf Basis der Modelle Entscheidungen bzgl. Weiterverfolgung treffen	Eine oder wenige Zielnutzer die mit dem Entwickler die Umsetzung bewerten	Repräsentative Zielgruppe, die Produkteigenschaften bewerten	
<b>Umfang</b>	<b>Gesamt</b>	<b>Au - Fo</b>	<b>Aufbau</b>	<b>Form</b>	<b>Ob / Fa</b>
<b>Notation</b>	P1.T2.x.1.x	P1.T2.x.2.x	P1.T2.x.3.x	P1.T2.x.4.x	P1.T2.x.5.x
<b>Beschreibung</b>	Bewertung des Gesamtprodukts in Bezug auf funktionale, ergonomische und gestalterische Aspekte	Vornehmlich funktionale und ergonomische Aspekte, wie Positionierung, Funktionsweisen, Formgebung	Funktionale und makro-ergonomische Aspekte, wie Handhabung, Anordnung, Sichtbarkeiten	Vornehmlich ergonomische und gestalterische Aspekte der Formgebung, Größe, Proportionen	Vornehmlich ergonomische und gestalterische Aspekte bzgl. Oberflächenbeschaffenheit und Farbgebung

**Abbildung 6.4:** Erklärung und Hilfestellung für AP-I

Über das Kriterium Umfang wird der Schwerpunkt der Bewertung festgelegt. Die am Modell zu bewertenden Produkteigenschaften orientieren sich an den Teilgestalten Aufbau, Form und Oberfläche / Farbe sowie an den Entwicklungsschwerpunkten Technik, Ergonomie und Design, siehe Kapitel 2.1. Die Übergänge zwischen diesen Bereichen können Überschneidungen aufweisen sowie die Bewertungsaufgabe mehrere Bereiche tangieren. Neben der Beschreibung in Abbildung 6.4 ermöglicht es die Grafik in Abbildung 6.5 den Umfang zu definieren. Über die Eingrenzung der Entwicklungsschwerpunkte und die Beschreibung bezüglich der Bewertungsthemen, kann der Umfang von einzelnen Teilgestalten, über die Verbindung von Aufbau und Form bis hin zum Gesamtprodukt definiert werden. Da der MWEP an verschiedenen Stellen und wiederholt im Entwicklungsprozess angewendet werden kann, sind bei der Definition des Anforderungsprofils eventuelle

Randbedingungen bezüglich der Repräsentationsform oder dem Modellinhalt zu berücksichtigen. Dies erfolgt über das Kriterium Bedingungen. Das definierte Anforderungsprofil dient als Grundlage für die Modellauswahl im nächsten Schritt.

Umfang	Aufbau	Form	Ob / Fa
	Au - Fo		
	Gesamt		
Technik			
Ergonomie			
Design			
Beschreibung	Handhabung Position Sichtbarkeit	Formgebung Proportionen Größen	Oberflächen- beschaffenheit Farbgebung

Abbildung 6.5: Festlegung des betrachteten Produkt-Umfangs

### 6.1.2 Auswahl des Modells

Für die Auswahl eines passenden Modells für die zuvor definierte Bewertungsaufgabe wird eine Modellauswahl-Matrix entwickelt, siehe Abbildung 6.7. Diese bietet eine Orientierung für die Eignung von Modellen im direkten Vergleich und zeigt somit für die verschiedenen Randbedingungen auf, welche Repräsentationsformen (R) und Modellinhalte (M), entsprechend der Modelleinteilung in Tabelle 3.4, empfohlen (+/++), eine Alternative (o) oder nicht empfohlen (-) sind. Diese Einstufung basiert auf den Ergebnissen der Modellstudie in Kapitel 5.2 zur Modell-Produkt-Abweichung, der Gebrauchstauglichkeit sowie der Maßeinschätzung. Je nach Randbedingungen sind diese Bestandteile von unterschiedlicher Wichtigkeit und dementsprechend berücksichtigt. Über das Kriterium Anwender (Zeilen) wird definiert wie stark die einzelnen Ergebnisse der Studie berücksichtigt werden und über das Kriterium Umfang (Spalten) welche Ergebnisse herangezogen wurden. Die für die Erstellung der Matrix in Abbildung 6.7 zugrundeliegende Gewichtung der Ergebnisse des Kriteriums Anwender ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

	Produkt-Modell-Abweichung		Gebrauchstauglichkeit		
	Richtigkeit	Präzision	Genauigkeit	Schwierigkeit	Zufriedenheit
Entwickler	●	●	○	○	
Entscheider	●	●	●	●	●
Proband	●	●	●	○	
Stichprobe	●	●	●	●	

Abbildung 6.6: Gewichtung der Ergebnisse für das Kriterium Anwender



Hierbei wird zwischen Hauptfokus, Nebenfokus und einer untergeordneten Bedeutung unterschieden. Für den Anwender Entwickler liegt, wie in Kapitel 6.1.1 beschrieben, beispielsweise der Hauptfokus auf den Ergebnissen der Produkt-Modell-Abweichung und im Besonderen auf der Präzision. Die Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeit werden nur untergeordnet betrachtet.

Bewerten P1.T2.		Gesamt   x.1.x				Au - Fo   x.2.x				Aufbau   x.3.x				Form   x.4.x				Ob / Fa   x.5.x			
		x.x.Mx			M <sub>0</sub> ↓	x.x.Mx			M <sub>0</sub> ↓	x.x.Mx			M <sub>0</sub> ↓	x.x.Mx			M <sub>0</sub> ↓	x.x.Mx			M <sub>0</sub> ↓
		M1↓	M2↓	M3↓		M1↓	M2↓	M3↓		M1↓	M2↓	M3↓		M1↓	M2↓	M3↓		M1↓	M2↓	M3↓	
Entwickler   1.x.x x.x.Rx	R1.1 →	-	++	+	+	o	++	+	+	++	+	++	o	++	+	+	o	-	+	++	o
	R1.2 →	o	++	+	-	-	++	+	o	o	+	+	o	-	++	+	o	-	+	+	-
	R3.1	o	-	o	-	o	o	o	o	o	+	o	o	o	+	o	o	-	o	-	-
	R3.2 →	o	+	++	+	+	+	++	+	+	++	+	o	-	+	++	+	-	+	++	+
	R3.3 →	-	++	+	++	-	++	+	++	-	+	++	+	+	++	+	+	o	+	+	++
R <sub>0</sub> →	-	++	+		-	++	+		+	++	+		-	++	+		o	+	++		
Entscheider   2.x.x x.x.Rx	R1.1 →	-	+	++	++	-	+	++	++	o	+	++	++	-	+	++	+	o	+	++	o
	R1.2 →	-	+	++	++	-	+	++	++	-	-	+	++	-	-	+	++	-	-	+	++
	R3.1	-	o	o	-	-	-	o	o	-	-	o	o	-	-	-	-	-	-	o	-
	R3.2 →	o	+	++	+	-	+	++	+	o	-	+	+	o	-	+	++	o	-	+	++
	R3.3 →	o	++	+	+	-	+	+	+	o	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+
R <sub>0</sub> →	-	+	++		-	+	++		o	+	++		-	+	++		-	o	++		
Proband   3.x.x x.x.Rx	R1.1 →	-	+	+	+	-	+	+	++	o	+	+	++	o	+	+	+	o	+	+	o
	R1.2 →	o	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	o	-	+	+	-	-	+	+	-
	R3.1	-	-	o	-	-	o	o	-	o	o	o	o	-	-	o	-	-	o	o	o
	R3.2 →	-	+	++	o	o	+	+	o	o	o	+	o	o	-	+	++	o	-	+	++
	R3.3 →	o	++	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	+	o	+	+	++	o	+	+
R <sub>0</sub> →	-	+	+		-	+	+		o	+	+		-	+	+		-	o	++		
Stichprobe   4.x.x x.x.Rx	R1.1 →	o	+	++	++	o	+	++	++	+	+	++	++	o	+	+	++	o	o	++	o
	R1.2 →	-	+	++	-	-	+	++	-	o	+	+	-	o	++	+	o	-	o	++	o
	R3.1	-	o	o	-	-	o	o	-	-	o	o	-	-	o	-	o	-	o	+	o
	R3.2 →	-	+	++	o	-	+	+	o	o	+	+	+	-	-	+	++	o	-	o	++
	R3.3 →	+	+	++	+	o	+	+	+	+	o	+	+	+	o	+	++	+	o	+	++
R <sub>0</sub> →	-	+	+		-	+	++		o	+	++		-	+	+		-	o	++		

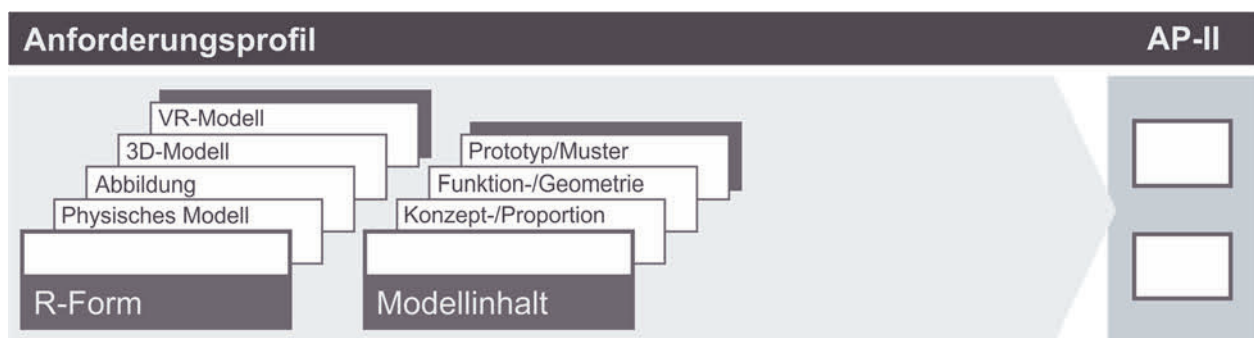
++ Gesamtempfehlung (je Zeile oder Spalte) | + Empfehlung | o Alternative | - keine Empfehlung

**Abbildung 6.7:** Modellauswahl-Matrix für die Kriterien Anwender (Zeilen) und Umfang (Spalten)

Häufig stehen dem Anwender entsprechend der Modellauswahl-Matrix auch mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. In diesem Fall ist eine Entscheidung individuell auf Grundlage der in Kapitel 3.2.6 beschriebenen Charakterisierungskriterien zu treffen. Unter Berücksichtigung dieser Anhaltspunkte, die beispielsweise entsprechend der Verfügbarkeit, interner Vorgaben und Abläufe, Vorkenntnissen der Anwender oder persönlicher

Präferenzen zu beantworten sind, ist eine Entscheidung für eine Modellkombination zu treffen. An dieser Stelle können auch mehrere Modell-Varianten weiterverfolgt und an späterer Stelle bei der Werkzeugauswahl eine Entscheidung getroffen werden.

Das Vorgehen anhand der Modellauswahl-Matrix gliedert sich in mehrere Schritte. Zunächst ist anhand des AP-I die Zeile für den Anwender sowie die Spalte für den betrachteten Umfang auszuwählen. Zur besseren Verständlichkeit wird als Beispiel die Zeile Entwickler und die Spalte Gesamt gewählt. Liegen Randbedingungen bezüglich einer Repräsentationsform (R) oder eines Modellinhalts (M) vor, kann direkt in die entsprechende Unterzeile oder -spalte gewechselt werden. Liegen keine Randbedingungen vor, zeigen die Spalte  $M_G$  sowie die Zeile  $R_G$  einen ersten Überblick über die grundsätzliche Eignung der Repräsentationsformen und Modellinhalte. Im Fall des Beispiels sind dies der Modellinhalt M2 und die Repräsentationsform R3.3. Durch iteratives Vorgehen kann nun eine weitere Eingrenzung der Repräsentationsform sowie des Modellinhalts vorgenommen werden. Die spaltenweise Betrachtung zeigt die Eignung der einzelnen Repräsentationsformen innerhalb eines Modellinhalts. Die zeilenweise Betrachtung dagegen die Eignung der unterschiedlichen Modellinhalte bei der jeweiligen Repräsentationsform. Für das Beispiel ergeben sich verschiedene Kombinationsmöglichkeiten als Empfehlung, die, wie zuvor beschrieben, auch an späterer Stelle im MWEF final ausgewählt werden können. Bei persönlicher Präferenz, beispielsweise für ein physisches Modell (R1.1), das ebenfalls empfohlen (+) ist, sollte der Modellinhalt M2 (++) gewählt werden. Die getroffene Auswahl an Repräsentationsform und Modellinhalt wird für die weiteren Schritte im erweiterten Anforderungsprofil AP-II notiert, siehe Abbildung 6.8. Auf dieser Basis werden Werkzeuge für die Darstellung und Gestaltung des Modells ausgewählt. Dieses Vorgehen wird in Kapitel 6.2 anhand weiterer Anwendungsfälle exemplarisch durchgeführt.



**Abbildung 6.8:** Erweitertes Anforderungsprofil AP-II



### 6.1.3 Werkzeugauswahl

Eine pauschale Wahl eines passenden Werkzeugs zeigt sich als grundsätzlich schwierig, da unterschiedlichste Anforderungen zu berücksichtigen sind, wie in Kapitel 3.2.6 beschrieben. Die Werkzeug-Auswahl innerhalb des MWEP berücksichtigt die im AP-I+II definierten Kriterien und umfasst damit einen Teil der beschriebenen Charakterisierungsmerkmale von Werkzeugen. Eine allumfassende Berücksichtigung dieser Kriterien ist im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen, da dies zum einen weiterer Untersuchungen entsprechend der Modell-Studie übertragen auf Werkzeuge bedarf und zum anderen relevante Kriterien in Bezug auf den Anwender oder Unternehmensaspekte nicht verallgemeinert werden können. Die im Rahmen des MWEP beschriebene Werkzeug-Auswahl dient daher vielmehr als erste Grundauswahl und Sondierung passender Werkzeuge, die es individuell anhand der weiteren Kriterien zu detaillieren gilt. Für diese Auswahl wird eine Übersicht entwickelt, die, basierend auf den Untersuchungen in Kapitel 3.2.3, eine Auswahl an passenden Werkzeugen entsprechend der Kriterien des MWEP ermöglicht. Diese gliedert sich in die Matrizen WA-I für Darstellungswerkzeuge, siehe Abbildung 6.10, sowie WA-II für Gestaltungswerkzeuge, siehe Abbildung 6.11. Die Matrix WA-I ist unterteilt nach den Repräsentationsformen der Modelle, die Matrix WA-II nach der Gestaltungsumgebung. Der für die Auswahl relevante Bereich ist dem AP-II zu entnehmen. Die Auswahlkriterien sind in den Spalten dargestellt und umfassen den Modellinhalt, den Umfang, den Entwicklungsschwerpunkt sowie die Bewertung. Die entsprechenden Erklärungen sind in Abbildung 6.9 dargestellt.

Modellinhalt	M1	Konzept- / Proportionsmodell	Beschreibt Aspekte wie realisierbare Qualität oder Detaillierungsgrad
	M2	Funktions- / Geometriemodell	
	M3	Prototyp / Muster	
Umfang	G	Gesamtprodukt	Berücksichtigt die Fragestellungen der Bewertung sowie die Umsetzbarkeit der Teilgestalten kombiniert oder einzeln
	AF	Aufbau und Form	
	A	Aufbau - Anordnung, Positionierung	
	F	Form - Formgebung, Proportionen	
	O	Oberfläche / Farbe - Oberflächenbeschaffenheit, Farbgebung	
Entwicklungsschwerpunkt	T	Technik - Funktionsweisen, Maßhaltigkeit	Entwicklungsschwerpunkt und daraus resultierende Eigenschaften
	E	Ergonomie - Makro- bis Mikroergonomie	
	De	Design - Gestaltung, Design	
Bewertung	Ü	Überprüfung durch Entwickler oder einzelne Probanden	Berücksichtigt Themen wie Aufwand, Zeit oder Haltbarkeit
	S	Studie oder Entscheidung durch Entscheider oder Stichprobe	

**Abbildung 6.9:** Erklärung der Auswahlkriterien für WA-I+II

Der Modellinhalt berücksichtigt die Themen Detaillierungsmöglichkeit und Qualität. Der Umfang beinhaltet die Fragestellungen und Umsetzung der Teilgestalten. Über den Entwicklungsschwerpunkt wird die Nutzung für die Bereiche Technik, Ergonomie und Design beurteilt. Die Bewertung beschreibt die Art und Weise sowie die beteiligten Personen der

Bewertung. Die Kriterien können sich in einzelnen Aspekten überschneiden, ermöglichen durch die Aufschlüsselung jedoch eine gezieltere Entscheidungsgrundlage.

Die Balken je Zeile in Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 zeigen an, ob die jeweilige Ausprägung der Repräsentationsform grundsätzlich für das Kriterium geeignet ist. Füllt der Balken den Abschnitt nur teilweise aus, ist die Anwendung eventuell mit Einschränkungen verbunden. Auch eine Leerstelle bedeutet nicht zwangsläufig, dass ein Werkzeug nicht möglich ist, sondern, dass es im Rahmen des MWEP nicht vorgeschlagen ist. Eine Prüfung bei den beiden letztgenannten Fällen anhand weiterer Kriterien entsprechend Kapitel 3.2.6 ist im Bedarfsfall vorzunehmen. Die Bewertung basiert auf der Recherche im Stand der Technik in Kapitel 2.2 und 2.3 sowie den Untersuchungen in Kapitel 3.2.

R1.1			M1	M2	M3	G	AF	A	F	O	T	E	De	Ü	S
DP2 Additive Fertigung	DP2.1 Binder Jetting / 3D-Printing		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP2.2 Lasersintern		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP2.3 Poly-/Multi-Jet Modelling		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP2.4 Stereolithographie		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP2.5 Digital Light Processing		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP2.6 Fused Deposition Modeling		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP2.7 Layer Laminated Manufacturing		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP2.8 Laser-/Elektronen-Strahlschmelzen		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP2.9 Fused Metal Deposition		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
DP3 Trennende Verfahren	DP3.1 Fräsen		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP3.2 Drehen		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP3.3 Schneiden		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
DP4 Weitere Verfahren	DP4.1 Thermoformen		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP4.2 Guss		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DP4.3 Handarbeit		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
R1.2 / 3.1			M1	M2	M3	G	AF	A	F	O	T	E	De	Ü	S
DP1 2D Drucker	DP1.1 Standard-Ausgabegerät		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
DV1 2D Anzeige	DV1.1 Standard-Ausgabegerät		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
R3.2			M1	M2	M3	G	AF	A	F	O	T	E	De	Ü	S
DV1 2D Anzeige	DV1.1 Standard-Ausgabegerät		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
R3.3			M1	M2	M3	G	AF	A	F	O	T	E	De	Ü	S
DV3 Virtual Reality	DV3.1 Display (Stereoskopisch)		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DV3.2 Power-Wall		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DV3.3 CAVE		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
	DV3.4 VR Head Mounted Display		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

Abbildung 6.10: Werkzeugauswahl WA-I Darstellung

Die Wahl passender Werkzeuge bedarf eines iterativen Vorgehens zwischen darstellenden und gestaltenden Werkzeugen. Die Matrizen WA-I+II sind identisch anzuwenden.

Digital		M1	M2	M3	G	AF	A	F	O	T	E	De	Ü	S
GD1 Zeichen- software	GD1.11 Pixel-Grafik 2D													
	GD1.12 Pixel-Grafik 3D													
	GD1.21 Vector Grafik 2D													
	GD1.22 Vector Grafik 3D													
	GD1.3 2D Kantenmodell													
GD2 Modellier- ungssoft- ware	GD2.1 3D Kantenmodellierung													
	GD2.2 Polygonmodellierung direkt													
	GD2.3 Flächen approximiert direkt													
	GD2.4 Flächen exakt direkt													
	GD2.5 Flächen exakt parametrisch													
	GD2.6 Flächen generativ													
	GD2.7 CSG/B-Rep/Hybrid direkt													
	GD2.8 CSG/B-Rep/Hybrid parametrisch													
	GD2.9 CSG/B-Rep/Hybrid feature													
	GD2.10 Virtual Clay Modeling													
GD3 Erweitert	GD3.1 Rendering (Bildsynthese)													

Physisch		M1	M2	M3	G	AF	A	F	O	T	E	De	Ü	S
GP1 Zeichnen	GP1.1 Zeichenutensilien													
	GP1.2 Tapedrawing													
GP2 Modellieren	GP2.1 Clay-Modellierung													
	GP2.2 Modellbau / Prototypenbau													
	GP2.3 Oberflächenbehandlung													

Abbildung 6.11: Werkzeugauswahl WA-II Gestaltung

Die Kombinationsfähigkeit passender Werkzeuge der Gestaltung und der Darstellung kann durch Anwendung der Matrix in Abbildung 6.12 überprüft werden.

Gestaltung - Darstellung		DV1	DV3	DP1	DP2	DP3	DP4	
#	Bezeichnung	Standard-Ausgabegerät	Virtual Reality	Standard-Ausgabegerät	Additive Fertigung	Trennende Verfahren	Weitere Verfahren	
	Legende	Direkt	Quasi-direkt	Transfer	Indirekt			
	GD1.1	Zeichensoftware 2D	D	X	D	X	X D	X T
	GD1.2	Zeichensoftware 3D	D	D	D	QT T1.1	QT T1.2	QT T1.3
	GD2	Modellierungssoftware	D	D	D	QT T2.1	QT T2.2	T T2.3
	GD3	Erweiterte GS	D	D	X D	X	X	X
	GP1	Zeichnen	T T3.1	X	T T3.2	X	X	X
GP2	Modellieren	T T4.1	T T4.3	T T4.4	X T T4.5	X T T4.6	X T T4.7	

Abbildung 6.12: Auswahlmatrix Gestaltung-Darstellung

Bei einer direkten Kombination können beide Werkzeuge ohne Zwischenschritte angewendet werden und der Auswahlprozess ist beendet. Bei indirekten Kombinationen sollte eine Anpassung eines oder beider Werkzeuge vorgenommen werden. Bei den Feldern Quasi-Direkt und Transfer sind die notwendigen Schritte mithilfe der Matrix in Abbildung 6.13 zu bestimmen, wie es beispielsweise bei der Kombination GP2 Modellieren und DV1 Standard-Ausgabegerät der Fall ist. Diese wird in den Zeilen der Matrix gesucht und die

passende Kombination aus Transfer-Software (TS) und/oder Transfer-Hardware durch Abgleich der Spalten ermittelt. In diesem Fall wäre es eine Reverse Engineering Software (TS1) und Hardware für eine 3D Datenerfassung (TH2).

Transfer				TS1	TS2	TS3	TH1	TH2	TH3	
#	Bezeichnung		Darstellung	Reverse Engineering	Fertigung	Transfer	Datenerfassung 2D	Datenerfassung 3D	Datenerfassung taktil	
	Gestaltung									
T1.1	GD1.2	Zeichensoftware 3D	DP2	Additive Fertigung	X	K	X	X	X	X
T1.2			DP3	Trennende Verfahren	X	K	X	X	X	X
T1.3			DP4	Weitere Verfahren	X	K	X	X	X	X
T2.1	GD2	Modellierungssoftware	DP2	Additive Fertigung	X	K	X	X	X	X
T2.2			DP3	Trennende Verfahren	X	K	X	X	X	X
T2.3			DP4	Weitere Verfahren	X	X	X	X	X	X
T3.1	GP1	Zeichnen	DV1	Standard-Ausgabe	X	X	X	K	X	X
T3.2			DP1	Standard-Ausgabe	X	X	X	K	X	X
T4.1	GP2	Modellieren	DV1	Standard-Ausgabe	K	X	X	X	K	P T
T4.3			DV3	Virtual Reality	K	X	X	X	K	X T
T4.4			DP1	Standard-Ausgabe	K P	X K	X	X	K	X T
T4.5			DP2	Additive Fertigung	K P	X K	X	X	K	X T
T4.6			DP3	Trennende Verfahren	K P	X K	X	X	K	X T
T4.7			DP4	Weitere Verfahren	K P	X K	X	X	K	X T

**Abbildung 6.13:** Auswahlmatrix Transfer

Die Einteilung und Bewertung der Kombination basiert auf der Gesamtbetrachtung aller Werkzeugkombinationen zur Gestaltung und Darstellung in Kapitel 3.2.4. Bei geteilten Feldern und zur weiteren Aufschlüsselung der Werkzeugkategorien kann die Tabelle 3.8 herangezogen werden. Die Bewertung in Abbildung 6.13 basiert ebenfalls auf den in Kapitel 3.2.4 erarbeiteten Grundlagen. Für detaillierte Informationen bezüglich einzelner Werkzeuge und bei geteilten Feldern ist Tabelle 3.9 heranzuziehen.

Die Validierung des MWEF sowie die beispielhafte Anwendung mit Beschreibung der einzelnen Schritte wird im Folgenden vorgenommen.

## 6.2 Validierung des MWEF

Ausgehend von den analysierten Projekten in Kapitel 3.2.5.2 sowie der detaillierten Auflistung der Tätigkeiten im Anhang A1 werden einzelne Teilschritte ausgewählt. Sie dienen der Validierung und als Beispiel des aufgestellten Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozess. Im ersten Schritt werden die ausgewählten Teilschritte definiert und die notwendigen Daten gesammelt. Anschließend erfolgt die Durchführung des MWEF sowie



die vergleichende Bewertung mit dem tatsächlichen Vorgehen des Beispiel-Projekts. Es wurden gezielt Teilschritte ausgewählt, die sich anhand der Phase der Entwicklung, den beteiligten Bereichen sowie den eingesetzten Werkzeugen unterscheiden. Darüber hinaus traten bei allen Teilschritten Schwierigkeiten bei der Bewertung im realen Projekt auf.

### 6.2.1 Durchführung des Beispiel-Prozesses für Projekt 1

Im Folgenden wird anhand beispielhafter Teilschritte aus der Projektanalyse die Durchführung des aufgestellten MWEPs vorgestellt und gegenüber der im Projekt 1 gewählten Werkzeuge und Modelle bewertet.

#### 6.2.1.1 Ausgangssituation Projekt 1

Für Projekt 1 werden zwei Teilschritte erfasst. Bei Teilschritt 1 handelt es sich um eine Bewertung in der frühen Phase der Entwicklung mit Entwicklungspartnern und Entscheidungsträgern. Die Einzelheiten des Teilschritts 1 sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst dargestellt. Im Rahmen des Teilschritts wurden Formentwürfe vorgestellt, um eine erste Entscheidung bezüglich der Formensprache und des Designs zu treffen. Die Entwürfe wurden als grobe Copic-Zeichnungen angefertigt und als 2D-Darstellungen digital und gedruckt präsentiert. Bei der Bewertung kam es insbesondere aufgrund von Vorstellungsproblemen der Ansichten, der Darstellung (Detaillierung) und der Proportionswahrnehmung zu Schwierigkeiten bezüglich der Entscheidungsfindung, da ebenfalls technische Aspekte aufgrund der beteiligten Bereiche diskutiert wurden.

Teilschritt	Bereich	Modell		Werkzeuge	Schwierigkeit
		M	R		
Diskussion der Teillösungen und gemeinschaftliche Auswahl der weiterzuerfolgenden Varianten	De	M1/2	R1.2/ R3.1	Ausdrucke Standard Ausgabegerät Monitor	Vorstellungs- probleme Ansichten
Gestaltungswerkzeug:	Zeichenutensilien (GP1.1)				
Ziel der Bewertung:	Entscheidung bzgl. der weiterzuerfolgenden Teillösungen				
Beteiligte Personen:	Entwicklungspartner, Entscheidungsträger (kleine Gruppe)				
Inhalt:	Form				
Randbedingungen:	Maximaler Modellinhalt aufgrund Projektphase M2				

**Tabelle 6.1:** Ausgangssituation Projekt 1 – Teilschritt 1

Der zweite betrachtete Teilschritt des Projekts 1 erfolgte zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt. Die Details sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Teilschritt	Bereich	Modell		Werkzeuge	Schwierigkeit
		M	R		
Analyse und Test der physischen Modelle	T / E	M2	R1.1	Fused Deposition Modeling (FDM)	Schlechte Maßhaltigkeit / Passgenauigkeit der Teile
Gestaltungswerkzeug:	CSG/B-Rep/Hybrid direkt (CAD) (GD2.7)				
Ziel der Bewertung:	Überprüfung einzelner Funktionalitäten anhand der physischen Modelle und Dokumentation der notwendigen Änderungen				
Beteiligte Personen:	Entwickler (Einzelperson)				
Inhalt:	Aufbau-Form				
Randbedingungen:	keine				

**Tabelle 6.2:** Ausgangssituation Projekt 1 – Teilschritt 2

Das Ziel des Teilschritts war die technische und ergonomische Auslegung einer Verriegelung. Die Bewertung erfolgte gestaltungsbegleitend zur Überprüfung der Auslegung aus Entwicklersicht. Aufgrund des darstellenden Werkzeugs ergaben sich Schwierigkeiten bei der Überprüfung der technischen Funktionalität sowie der mikroergonomischen Aspekte.

### 6.2.1.2 Anwendung des MWEF für Teilschritt 1

Anhand des in Tabelle 6.1 beschriebenen Teilschritts 1 des Projekts 1 wird das Vorgehen entsprechend Abbildung 6.2 durchgeführt. Hinsichtlich des Anforderungsprofils zur Modellauswahl in Abbildung 6.3 wird die Auswahl in Tabelle 6.3 festgelegt.

<b>P1</b>	<b>Produkt</b>	Handgeführte Werkzeuge
<b>T2</b>	<b>Tätigkeit</b>	Bewerten
<b>2</b>	<b>Anwender</b>	Entscheider
<b>4</b>	<b>Umfang</b>	Form
<b>M2</b>	<b>Bedingungen</b>	Funktions-/Geometriemodell

**Tabelle 6.3:** Anforderungsprofil I für Projekt 1 – Teilschritt 1

Als Hilfestellung für die Festlegung der beteiligten Personen und des Betrachtungsumfangs dienen die Erklärungen in Abbildung 6.4. Mithilfe dieser Vorgaben können anhand der Matrix in Abbildung 6.7 passende Modelle ausgewählt werden. Als Empfehlung zeigen sich das physische Modell (R1.1) sowie das virtuelle Modell (R3.3). Ebenfalls als mögliche Alternative geeignet ist das digitale 3D Modell (R3.2). Nicht geeignet dagegen sind Abbildungen, sowohl digital (R3.1) als auch physisch (R1.2). Hier zeigt sich bereits eine erste Abweichung gegenüber dem im Projekt gewählten Modell (R1.2/3.1). Auf die Auswirkungen dieser Abweichung wird in der abschließenden Bewertung eingegangen.



Entsprechend der Matrix ist eine höhere Detaillierung (M3) grundsätzlich empfohlen, insbesondere bei R1.1 und R3.2, jedoch nicht notwendig und damit hinsichtlich Aufwands abzuwägen. Eine geringere Detaillierung (M1) ist dagegen deutlich nicht empfohlen. Mit diesem Vorgehen wird die Auswahl in Tabelle 6.4 festgelegt.

<b>R1.1 / 3.3 / 3.2</b>	<b>R-Form</b>	Physisches / Immersives digitales / Digitales 3D Modell
<b>M2</b>	<b>Modellinhalt</b>	Funktions-/Geometriemodell

**Tabelle 6.4:** Anforderungsprofil II für Projekt 1 – Teilschritt 1

Bereits an dieser Stelle zeigt sich, dass grundsätzlich mehrere Modelltypen für die gegebenen Randbedingungen in Frage kommen können. Entsprechend der in Abbildung 3.9 aufgestellten Kriterien kann der Anwender an dieser Stelle weiter eingrenzen, welche Modelle aufgrund der Unternehmensstrukturen und -möglichkeiten sowie weiterer Randbedingungen zu bevorzugen sind. Des Weiteren dient die Modelleinteilung in Tabelle 3.4 als Hilfestellung zur Auswahl einer passenden Modell-Repräsentationsform. An dieser Stelle werden im Rahmen des Beispiels bewusst mehrere Alternativen weitergeführt, um die Möglichkeiten aufzuzeigen. Dies kann auch in der tatsächlichen Anwendung praktiziert werden, um die Entscheidung beispielsweise an späterer Stelle aufgrund der umzusetzenden Werkzeuge zu treffen.

Im nächsten Schritt erfolgt mithilfe der Matrix in Abbildung 6.10 die Festlegung des darstellenden Werkzeugs. Die Spaltenauswahl erfolgt auf Basis der Vorgaben in Tabelle 6.3 und den Randbedingungen in Tabelle 6.1. Bei der Werkzeugauswahl handelt es sich um einen iterativen Prozess, da aufgrund der Vielzahl an Auswahlmöglichkeiten und teils passenden Varianten mehrere Entscheidungen getroffen werden müssen und die Resultate sich gegenseitig beeinflussen. Im Rahmen des Beispiels wird für das physische Modell (R1.1) die Stereolithografie (DP2.4) als Verfahren der Additiven Fertigung (DP2) als passendes darstellendes Werkzeug gewählt. Mit dieser Auswahl kann mit der Matrix aus Abbildung 6.12 eine passende Kategorie an Gestaltungswerkzeugen ermittelt werden. In diesem Fall ist das Modell über einen Quasi-Direkttransfer aus Zeichensoftware 3D (GD1.2) sowie aus Modellierungssoftware (GD2) umsetzbar. Mithilfe von Abbildung 6.11 erfolgt nun eine erste Grobauswahl an passenden Verfahren entsprechend der gesetzten Randbedingungen. Um eine detaillierte Auswahl zu treffen ist an dieser Stelle ebenfalls anhand der zuvor beschriebenen Kriterien vorzugehen. Für das Beispiel zeigt sich die Polygonmodellierung direkt (GD2.2) als passendes Verfahren. Entsprechend dieses Vorgehens wird für das virtuelle Modell (R3.3) das VR Head Mounted Display (DV3.4) als darstellendes Werkzeug und ebenfalls die Polygonmodellierung direkt (GD2.2) als

gestaltendes Werkzeug ermittelt. Für das digitale Modell (R3.2) sind ein Standard Ausgabegerät (DV1.1) in Form eines 2D Monitors und die Polygonmodellierung die entsprechend passenden Werkzeuge. Für die beiden letztgenannten Werkzeuge ist damit die Auswahl beendet, da beide Gestaltungs-Darstellungs-Kombinationen direkt miteinander verknüpft werden können. Bei der ersten Kombination muss zunächst mithilfe der Matrix in Abbildung 6.13 der Umfang des Transfers ermittelt werden. Entsprechend der Matrix sind für die Umsetzung der Kombination Werkzeuge der Fertigung (TS2) notwendig. Das genaue Werkzeug kann, wie beschrieben, mithilfe der Tabelle 3.9 ermittelt werden. In diesem Fall handelt es sich dabei um einen 3D Slicer, um das Polygonmodell für die Fertigung durch das Stereolithografie Verfahren vorzubereiten. Damit sind für den betrachteten Teilschritt 1 des Projekts 1 anhand des Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozesses alle Teilaspekte definiert. Die Auswahl ist in Tabelle 6.5 zusammengefasst dargestellt. Die bevorzugte Wahl ist hervorgehoben.

Modell	Werkzeug
Modellinhalt <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>M2 – Funktions-/Geometriemodell</b></li> </ul> Repräsentationsform <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>R1.1 – Physisches Modell</b></li> <li>• R3.3 – Immersives digitales Modell</li> <li>• R3.2 – Digitales Modell 3D</li> </ul>	Gestaltung <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>GD2.2 – Polygonmodellierung direkt</b></li> </ul> Darstellung <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DP2.4 - Stereolithografie</b></li> <li>• DV3.4 – VR Head Mounted Display</li> <li>• DV1.1 – Standard-Ausgabegerät Monitor</li> </ul> Transfer <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>TS2.2 – 3D Slicer</b></li> </ul>

**Tabelle 6.5:** Modell- und Werkzeugauswahl für Teilschritt 1 des Projekts 1

Im Vergleich zwischen der Modell-Werkzeug-Kombination nach Anwendung der MWEP zeigen sich Unterschiede zur im Projekt gewählten Kombination. Insbesondere die Darstellung der Modelle als 2D Ausdruck und am Monitor ist nachteilig gegenüber den vorgeschlagenen Modellen. Die Ergebnisse der Studie zeigen Unterschiede bezüglich der Genauigkeit der Bewertung anhand der Abbildung gegenüber dem virtuellen, digitalen und physischen Modell. Für die Abbildung (R1.2/3.1) ist eine Tendenz zu einer geringeren Richtigkeit gegenüber dem virtuellen Modell (R3.3) zu erkennen. Aus Anwendersicht unterscheidet sich die Gebrauchstauglichkeit bei der Bewertung der Form signifikant gegenüber dem physischen Modell und dem virtuellen Modell. Eine weitere Detaillierung des Modells wäre für die gegebene Fragestellung nicht zielführend gewesen, weder hinsichtlich Genauigkeit der Bewertung noch aus Anwendersicht. Aufgrund der frühen Phase im Entwicklungsprojekt und der damit verbundenen größeren Variantenvielfalt könnte an dieser Stelle aus Kosten- und Zeitgründen das virtuelle oder digitale

Modell dem physischen Modell vorgezogen werden. Dabei handelt es sich aber um eine individuelle Entscheidung auf Grundlage weiterer, nicht direkt im MWEF berücksichtigter Kriterien. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Anwendung des MWEF für diesen Teilschritt bei entsprechender Auswahl zu einer Steigerung der Gebrauchstauglichkeit und einer Verbesserung der Genauigkeit geführt hätte.

### 6.2.1.3 Anwendung des MWEF für Teilschritt 2

Entsprechend des detailliert beschriebenen Vorgehens in Kapitel 6.2.1.2 für den Teilschritt 1 erfolgt die Anwendung des MWEF für Teilschritt 2. Hierzu wird im ersten Schritt das Anforderungsprofil AP-I definiert, siehe Tabelle 6.6.

P1	Produkt	Handgeführte Werkzeuge
T2	Tätigkeit	Bewerten
1	Anwender	Entwickler
2	Umfang	Aufbau – Form
-	Bedingungen	-

**Tabelle 6.6:** Anforderungsprofil I für Projekt 1 – Teilschritt 2

Mithilfe der Modellauswahlmatrix wird der Modellinhalt M2 als passende Auswahl identifiziert. Bezüglich der Repräsentationsform ist das physische Modell (R1.1) die Gesamtempfehlung, ebenfalls empfohlen ist das virtuelle Modell (R3.3). Wie bei der Durchführung des Teilschritts 1 werden auch in diesem Beispiel beide möglichen Repräsentationsformen weitergeführt. Die getroffene Auswahl und Eintragung in das Anforderungsprofil II sind in Tabelle 6.7 dargestellt.

R1.1 / 3.3	R-Form	Physisches / Immersives digitales Modell
M2	Modellinhalt	Funktions-/Geometriemodell

**Tabelle 6.7:** Anforderungsprofil II für Projekt 1 – Teilschritt 2

Im nächsten Schritt erfolgt mithilfe den Matrizen WA I und II sowie Werkzeugauswahl Gestaltung-Darstellung iterativ die Festlegung der passenden Werkzeuge hinsichtlich der Darstellung und Gestaltung des Modells. Auch in diesem Fall eignen sich eine Vielzahl an Werkzeugen, die mithilfe der Charakterisierungskriterien weiter eingeschränkt werden können. Entsprechend dieses Vorgehens wird das Verfahren Lasersintern (DP2.2) der Kategorie Additive Fertigung (DP2) als Darstellungswerkzeug gewählt. Für die Wahl des Gestaltungswerkzeugs eignen sich ebenfalls mehrere Werkzeuge. Aufgrund des Technikeils ist die CSG/B-Rep/Hybrid direkt (CAD) Modellierung (GD2.7), eine klassische

CAD Anwendung, passend. Die beiden Werkzeuge lassen sich quasi-direkt miteinander kombinieren. Es wird lediglich ein 3D Slicer (TS2.2) für die Druckvorbereitung des Modells benötigt. Für das alternative virtuelle Modell (R3.3) ist kein Transfer notwendig, das gestaltete Modell kann direkt eingesetzt werden. Die Modell- und Werkzeugauswahl ist in Tabelle 6.8 zusammengefasst dargestellt.

Modell	Werkzeug
Modellinhalt <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>M2 – Funktions-/Geometriemodell</b></li> </ul> Repräsentationsform <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>R1.1 – Physisches Modell</b></li> <li>• R3.3 – Immersives digitales Modell</li> </ul>	Gestaltung <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>GD2.7 – CSG/B-Rep/Hybrid direkt (CAD)</b></li> </ul> Darstellung <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DP2.2 – Lasersintern</b></li> <li>• DV3.4 – VR Head Mounted Display</li> </ul> Transfer <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>TS2.2 – 3D Slicer</b></li> </ul>

**Tabelle 6.8:** Modell- und Werkzeugauswahl für Teilschritt 2 des Projekts 1

Die intuitive Auswahl an Modellen und Werkzeugen durch Experten im Prozess bestätigt das Ergebnis mithilfe des MWEF. Darüber hinaus können die aufgetretenen Probleme reduziert und die Modell- und Werkzeugauswahl optimiert werden. Die virtuelle Alternative (R3.3) hätte bezüglich Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision gleichgute Ergebnisse hervorgebracht. Da es sich jedoch um eine begleitende, iterative Bewertung handelt, können Änderungen schneller eingearbeitet, umgesetzt und überprüft werden. Die Gebrauchstauglichkeit ist aufgrund der Einzelperson Entwickler nicht ausschlaggebend, zumal hinsichtlich der subjektiven Genauigkeit und Zufriedenheit keine signifikanten Unterschiede laut Modell-Studie zwischen den Modellen feststellbar sind. Gegenüber dem tatsächlichen Projekt wird mithilfe des MWEF das Verfahren Lasersintern (DP2.2) anstelle des Fused Deposition Modelings (DP2.6) zur Darstellung des Modells gewählt. Die Schwierigkeiten, die im Projekt aufgrund der maßlichen Abweichungen und der Oberflächenstruktur entstanden sind, hätten damit reduziert oder behoben werden können. Es kann somit zusammenfassend auch in Teilschritt 2 durch die Anwendung des MWEF eine Verbesserung durch die gezielte Modell- und Werkzeugauswahl erreicht werden.

### 6.2.2 Durchführung des Beispiel-Prozesses für Projekt 2 und 3

Analog zu den bereits durchgeführten Beispielen aus Projekt 1 erfolgt im folgenden Abschnitt die Validierung an weiteren Beispielen anderer Projekte, um eine möglichst breite repräsentative Bandbreite an Anwendungsfällen zu untersuchen.

### 6.2.2.1 Ausgangssituation Projekt 2 und 3

Aufgrund der ähnlichen Grundausrichtung von Projekt 2 und 3 erfolgt die beispielhafte Durchführung zusammengefasst an jeweils einem Teilschritt. Es sind im Folgenden zwei sich unterscheidende Teilschritte ausgewählt und für die Anwendung des MWEF beschrieben. In Tabelle 6.9 sind die Daten des Teilschritts von Projekt 2 dargestellt.

Teilschritt	Bereich	Modell		Werkzeuge	Schwierigkeit
		M	R		
Präsentation / Diskussion der Konzepte mit Bewertung und Auswahl eines Vorzugskonzepts	E	M1	R1.2/ R3.1	Standard Ausgabegerät Drucker (DP1.1)	Vorstellungs- probleme Ansichten / Funktion
Gestaltungswerkzeug:	Zeichenutensilien (GP1.1)				
Transferwerkzeug:	Standardgeräte zur Datenerfassung Scanner (TH1.1)				
Ziel der Bewertung:	Die Auswahl des Vorzugskonzepts erfolgt auf Basis der erstellten Skizzen und Ergonomie-Bewertung durch beteiligte Bereiche (Marketing, Produktmanagement, Serie, Vorentwicklung, Recht)				
Beteiligte Personen:	Entscheidungsträger (kleine Gruppe)				
Inhalt:	Aufbau (Anordnungen, Positionen, Funktionszusammenhänge, Maße)				
Randbedingungen:	Maximaler Modellinhalt aufgrund Projektphase M2				

**Tabelle 6.9:** Ausgangssituation des Teilschritts von Projekt 2

Der Teilschritt des Projekts 2 stammt aus einer frühen Phase des Projekts. Es sollten erste Konzepte für die Gerätebedienung erarbeitet und durch eine Gruppe von Entscheidern bezüglich der Weiterverfolgung von Konzepten bewertet werden. Der Schwerpunkt der Gestaltung waren makro- und mikroergonomische Aspekte, wie die Anordnung von Stellenteilen, Funktionszusammenhänge, Formgebung (ergonomisch) von Griffstellen und Stellteilen sowie Erreichbarkeiten. Wie auch in Teilschritt 1 des Projekts 1 traten bei den Bewertern Schwierigkeiten aufgrund von Vorstellungsschwierigkeiten der Ansichten, der Wirkzusammenhänge und der maßlichen Abschätzung der Erreichbarkeiten auf.

Bei dem Teilschritt von Projekt 3 handelt es sich um eine Bewertung zu einem späteren Zeitpunkt im Entwicklungsprozess. Die Details des Teilschritts sind in Tabelle 6.10 dargestellt. Zu bewerten war eine erste Gestaltung des gesamten Geräts. Die Technik war bereits weiterentwickelt und bestand teilweise aus Übernahmeteilern anderer Geräte. Daher war es seitens der Technik ein erstes Funktionsmodell. Die ergonomischen Aspekte waren zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht ausdetailliert. Es handelt sich daher um ein reines Konzeptmodell mit einer sehr groben Gestalt sowie ohne Umsetzung ergonomischer Aspekte bezüglich der Formgebung.

Teilschritt	Bereich	Modell		Werkzeuge	Schwierigkeit
		M	R		
Probandenanalyse	T / E	M1/2	R1.1	Lasersintern (LS) (DP2.2) Handarbeit (DP4.3)	Vorstellungs- probleme Qualität
Gestaltungswerkzeug:	CSG/B-Rep/Hybrid direkt (CAD) (GD2.7) / Modellbau / Prototypenbau (GP2.2)				
Ziel der Bewertung:	In verschiedenen Tests mit relevanten Probanden werden Erkenntnisse über die Akzeptanz und hinsichtlich der Weiterentwicklung gesammelt				
Beteiligte Personen:	Proband				
Inhalt:	Aufbau (Anordnungen, Positionen, Funktionszusammenhänge, Maße)				
Randbedingungen:	keine				

**Tabelle 6.10:** Ausgangssituation des Teilschritt von Projekt 3

Dies führte bei Probanden auch zu Problemen bezüglich der Vorstellung, wo genau ge-griffen werden soll, wie das Gerät zu halten ist sowie der Funktionsweise. Erklärungen seitens der Entwickler waren nur bedingt zielführend. Die Gestaltung und Umsetzung des Modells erfolgte sowohl im CAD und mittels Lasersintern sowie durch Handarbeit. Dies machte es schwer, die genaue Gestaltung und maßliche Korrektheit (Winkel) des Griffbereichs nachzuvollziehen und zu überprüfen sowie in das digitale Modell zu überführen.

### 6.2.2.2 Anwendung des MWEF für Projekt 2

Entsprechend der Beschreibung des Teilschritts von Projekt 2 in Tabelle 6.9 wird das Anforderungsprofil I definiert, siehe Tabelle 6.11.

P1	Produkt	Handgeführte Werkzeuge
T2	Tätigkeit	Bewerten
2	Anwender	Entscheider
1	Umfang	Gesamt
-	Bedingungen	-

**Tabelle 6.11:** Anforderungsprofil I für Projekt 2

Die Anwendung der Modellmatrix in Abbildung 6.7 liefert bei den gegebenen Randbedin-gungen als Gesamtempfehlung den Modellinhalt M3 und ebenfalls als Empfehlung M2. Bezüglich der Repräsentationsform eignen sich das physische Modell (R1.1), das virtu-elle Modell (R3.3) und alternativ das digitale 3D Modell (R3.2). Die mithilfe der Charakterisierungskriterien getroffene Auswahl ist in Tabelle 6.12 dargestellt.

R3.2	R-Form	Digitales 3D Modell
M2	Modellinhalt	Funktions-/Geometriemodell

**Tabelle 6.12:** Anforderungsprofil II für Projekt 2



Die Festlegung der Werkzeuge zur Gestaltung und Darstellung erfolgt im zuvor beschriebenen iterativen Prozess. Entscheidungen werden dabei unter Abwägung der für das Projekt relevanten Kriterien bezüglich der Modelle und Werkzeuge getroffen. Die Darstellung des digitalen 3D Modells (R3.2) erfolgt an einem Standard Ausgabegerät (DV1.1). Dies ermöglicht gegenüber Abbildungen (R1.2/3.1) das Hineinzoomen sowie Drehen der Ansicht und erleichtert damit die Erfassung und Vorstellung des Konzepts, was im Projekt zu Schwierigkeiten geführt hat. Als Gestaltungswerkzeug kommen aufgrund der frühen Phase, der freien Formgebung sowie der noch nicht relevanten absoluten maßlichen Korrektheit die Polygonmodellierung direkt (CAS) (GD2.2) sowie Flächen approximiert direkt (CAS) in Frage. Die Entscheidung ist an dieser Stelle aufgrund interner Gegebenheiten wie beispielsweise Verfügbarkeit oder vorhandene Fähigkeiten zu treffen. Aufgrund der direkten Kombination der gestaltenden und darstellenden Werkzeuge ist keine weitere Transferbetrachtung notwendig. Die getroffene Auswahl ist in Tabelle 6.13 dargestellt.

Modell	Werkzeug
Modellinhalt <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>M2 – Funktions-/Geometriemodell</b></li> <li>• M3 – Prototyp / Muster</li> </ul> Repräsentationsform <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>R3.2 – Digitales 3D Modell</b></li> <li>• R1.1 – Physisches Modell</li> <li>• R3.3 – Immersives digitales Modell</li> </ul>	Gestaltung <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>GD2.2 – Polygonmodellierung direkt (CAS)</b></li> <li>• GD2.2 – Flächen approximiert direkt (CAS)</li> </ul> Darstellung <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DV1.1 – Standard-Ausgabegerät Monitor</b></li> </ul>

**Tabelle 6.13:** Modell- und Werkzeugauswahl des Teilschritts von Projekts 2

Die Modell- und Werkzeugwahl durch die Anwendung des MWEF führt bei diesem betrachteten Teilschritt von Projekt 2 zu einem vollkommen anderen Ergebnis, als tatsächlich im Projekt angewendet wurde. Bei der Abbildung (R1.1) und dem Modellinhalt M1 handelt es sich um eine klassische Modell-Werkzeug-Wahl in frühen Phasen, die eine schnelle und einfache Vermittlung von Ideen und Konzepten ermöglicht. Wie die Studie bestätigt, hat die Abbildung jedoch Nachteile bezüglich der Genauigkeit der Bewertung sowie der subjektiven Gebrauchstauglichkeit aus Anwendersicht. Gegenüber der Abbildung steigt mit dem digitalen 3D Modell die Präzision, insbesondere bei höheren Detaillierungsstufen, was besonders bei wenigen Anwendern wichtig ist. Die Modellkombination Abbildung (R1.2) und Modellinhalt M1 zeigt bei der Studie die geringste Genauigkeit, wohingegen das digitale Modell (R3.2) bei hoher Detaillierung (M3) mit die höchste Genauigkeit der Bewertung aufweist. Die subjektive Gebrauchstauglichkeit der beiden Modelle unterscheidet sich signifikant, insbesondere hinsichtlich der Schwierigkeit

der Bewertung sowie der gefühlten Genauigkeit. Dies hat sich auch bei der Projektdurchführung gezeigt, dass insbesondere die Gruppe an Entscheidern Schwierigkeiten bei der Vorstellung der Funktionsweise, der Erreichbarkeiten, der Zusammenhänge oder der Formen hat. Bei der Einschätzung von Maßen ist dagegen keine Verbesserung zu erwarten, hier müsste auf ein physisches (R1.1) oder virtuelles (R3.3) Modell gewechselt werden. Um Schwierigkeiten bei der Anwendung zu vermeiden, wie sie sich bei der Bewertung des System Usability Scales gezeigt haben, könnte die Steuerung der Modellansichten für die Gruppe der Entscheider durch einen Moderator übernommen werden. Zusammenfassend zeigt sich, dass die im Projekt 2 bei diesem Teilschritt bei der Bewertung aufgetretenen Probleme durch die Anwendung des MWEP reduziert werden können. Dies erfordert eine Umstellung bei der Gestaltung der Modelle und der Vorgehensweise der Präsentation, jedoch können die beteiligten Personen bei der Entscheidung unterstützt und diese vereinfacht werden.

### 6.2.2.3 Anwendung des MWEP für Projekt 3

Anhand des bekannten Vorgehens wird für den Teilschritt des Projekts 3 das Anforderungsprofil I definiert, siehe Tabelle 6.14.

P1	Produkt	Handgeführte Werkzeuge
T2	Tätigkeit	Bewerten
3	Anwender	Proband
3	Umfang	Aufbau
-	Bedingungen	-

**Tabelle 6.14:** Anforderungsprofil I für Projekt 3

Auf Basis des Anforderungsprofils I wird der Modellinhalt M2 und die Repräsentationsform physisches Modell (R1.1) als passende Auswahl mithilfe der Modellmatrix identifiziert. Mögliche Alternativen sind die höhere Detaillierung M3 sowie das virtuelle Modell (R3.3). Die getroffene Auswahl des Anforderungsprofil II ist in Tabelle 6.15 dargestellt

R1.1 / 3.3	R-Form	Physisches / Immersives digitales Modell
M2 / 3	Modellinhalt	Funktions-/Geometriemodell / Prototyp/Muster

**Tabelle 6.15:** Anforderungsprofil II für Projekt 3

Bei der iterativen Festlegung der Werkzeuge zur Gestaltung und Darstellung eignen sich entsprechend der Randbedingungen mehrere Verfahren. Die Auswahl ist individuell entsprechend der Charakterisierungskriterien vorzunehmen. Für den Teilschritt eignet sich

aufgrund der umzusetzenden Funktionen des Geräts, der notwendigen Stabilität für Anwendungstests, der Produktgröße sowie der notwendigen Qualität des Lasersintern (DP2.2) als darstellendes Verfahren. Aufgrund der Fokussierung auf die Technik und Makroergonomie sowie der Integration von funktionsfähigen Bauteilen eignet sich die CSG/B-Rep/Hybrid direkt (CAD) Modellierung (GD2.7). Für die Umsetzung des 3D Drucks wird ein 3D Slicer (TS2.2) benötigt. Bei der alternativen Anwendung eines virtuellen Modells (R3.3) sind keine Transferschritte notwendig. Eine höhere Detaillierung könnte mithilfe einer Renderings-Software (GD3.1) auf Basis der CAD Daten erreicht werden oder durch Gestaltung der Form mittels einer Modellierungssoftware für Flächen exakt direkt (CAS) (GD2.4). Die getroffene Auswahl ist in Tabelle 6.16 dargestellt.

Modell	Werkzeug
Modellinhalt <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>M2 – Funktions-/Geometriemodell</b></li> <li>• M3 – Prototyp / Muster</li> </ul> Repräsentationsform <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>R1.1 – Physisches Modell</b></li> <li>• R3.3 – Immersives digitales Modell</li> </ul>	Gestaltung <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>GD2.7 – CSG/B-Rep/Hybrid direkt (CAD)</b></li> <li>• GD3.1 – Rendering</li> <li>• GD2.4 - Flächen exakt direkt (CAS)</li> </ul> Darstellung <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>DP2.2 – Lasersintern</b></li> <li>• DV3.4 – VR Head Mounted Display</li> </ul> Transfer <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>TS2.2 – 3D Slicer</b></li> </ul>

**Tabelle 6.16:** Modell- und Werkzeugauswahl des Teilschritts von Projekts 3

Auch bei diesem Teilschritt des Projekts 3 zeigt sich eine hohe Deckung bezüglich der grundsätzlichen Modell- und Werkzeugauswahl zwischen dem Ergebnis mithilfe des MWEP und der Expertenwahl. Im Detail zeigen sich jedoch erneut Optimierungspotentiale, wodurch aufgetretene Probleme hätten verringert werden können. Basierend auf der Studie hätte die Genauigkeit der Bewertung durch einen höheren Modellinhalt bzw. Detaillierung nicht signifikant gesteigert werden können, jedoch liegt hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit aus Anwendersicht ein signifikanter Unterschied vor. Dies bedeutet, dass die Schwierigkeit der Bewertung aus Probandensicht verringert und die Zufriedenheit mit dem Modell gesteigert werden könnte. Auch entlastet die geringere Schwierigkeit bei der Bewertung den Probanden, wodurch schwierige Fragestellungen besser diskutiert werden können. Die tatsächlich aufgetretenen Schwierigkeiten im Projekt durch die geringe Detaillierung, hätten damit reduziert werden können. Aufgrund der zusätzlichen Fragestellungen bezüglich der Maße wäre nur das virtuelle Modell als Alternative in Frage gekommen. Aufgrund des teilweisen händischen Gestaltungsprozesses

(GP2) wäre für die Darstellung mittels VR (DV3) ein Transfer (T4.3) notwendig, wie Abbildung 6.12 zu entnehmen ist. Mithilfe der Matrix in Abbildung 6.13 kann der Transfer auf eine 3D Datenerfassung und Reverse Engineering Software spezifiziert werden. Mithilfe der Werkzeugübersicht in Tabelle 3.6 und den Charakterisierungsmerkmalen, kann die Auswahl weiter detailliert und auf den Anwendungsfall angepasst werden. Eine mögliche Auswahl wäre das Verfahren Strukturiertes Licht / Streifenprojektion (TH2.4) zur optischen Datenerfassung sowie eine parametrische Flächenrückführung mit Regelgeometrien (TS1.5), um die Daten nahtlos im CAD einzubinden. Zusammenfassend zeigt die Anwendung des MWEP auch bei dem Teilschritt des Projekts 3 verschiedene passende Möglichkeiten an Modellen- und Werkzeugen auf und führt gegenüber dem tatsächlichen Modell- und Werkzeugeinsatz im Projekt zu einer Verbesserung.

Die beispielhafte Anwendung und Validierung des MWEP zeigen die komplexen Abläufe und Zusammenhänge bei der Wahl von Modellen und Werkzeugen für gestalterische und bewertende Aufgaben innerhalb der nutzerzentrierten Produktentwicklung. Diese Wahl wird durch verschiedenste Faktoren aus unterschiedlichen Fachbereichen beeinflusst und basiert in der Praxis häufig auf der Erfahrung des Anwenders. Dieses Vorgehen kann jedoch insbesondere durch einen eingeschränkten Betrachtungsumfang ein limitierender Aspekt sein. Mithilfe des MWEP wurde eine fachbereichsübergreifende und erweiterbare Grundlage geschaffen, um auf Basis einer wissenschaftlichen Studie zur Modellwahrnehmung (Kapitel 5) eine fundierte Entscheidung zur Modell- und Werkzeugauswahl für eine konkrete Aufgabenstellung zu treffen. Die Validierung zeigt anhand mehrerer Beispiele, im Vergleich zu Expertenentscheidungen aus der Praxis, die grundsätzliche Eignung des MWEP für die Anwendung in der nutzerzentrierten Produktentwicklung. Darüber hinaus kann eine qualitative Verbesserung der Entscheidung für explizite Modelle und Werkzeuge aufgezeigt und durch die Ergebnisse der Modell-Studie belegt werden. Diese ersten Erkenntnisse bestätigen somit eine hohe Funktionalität und Anwendbarkeit auf Basis der Definition der gewählten, relevanten Entscheidungskriterien des MWEP in der Praxis.

## 7 Zusammenfassung

Die Auswahl von passenden Produktmodellen zur Bewertung von Produkteigenschaften während der Entwicklung ist ein schwieriger und vielschichtiger Entscheidungsprozess. Erschwert wird dieser durch die notwendige Betrachtung korrespondierender Werkzeuge zur Gestaltung und Darstellung der Modelle. Innerhalb der nutzerzentrierten Produktentwicklung nimmt die Überprüfung der Produktgestalt mithilfe von Modellen eine wesentliche Rolle ein. Aufgrund neuer Technologien, sowohl im virtuellen als auch physischen Sektor, stehen dafür vielfältige Möglichkeiten zur Verfügung, die es bei der Auswahl zu berücksichtigen gilt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht und gezeigt, welche Bedeutung das Modell für die Entscheidungsfindung besitzt, inwieweit sich die Repräsentationsform und die Detaillierung auf eine Bewertung auswirken und wie der Entscheidungsprozess zielgerichtet unterstützt und durchgeführt werden kann.

Es wurde hierzu zunächst der aktuelle Stand der Forschung und Technik (siehe Kapitel 2) hinsichtlich verwandter Forschungsvorhaben sowie zu den relevanten Themenfeldern untersucht. Dies betrifft insbesondere die Anforderungen und Tätigkeiten der nutzerzentrierten Produktentwicklung, den Einsatz und die Wahrnehmung von Produktmodellen sowie Werkzeuge der Gestaltung und Darstellung, beispielsweise aus den Technologiefeldern der Virtual Reality oder der additiven Fertigung.

Auf Basis dieser Untersuchungen wurde das Grundprinzip, die Anforderungen und der Geltungsbereich des Ansatzes zur Modell-Werkzeug-Auswahl definiert (siehe Kapitel 3). Hierfür wurde der Zusammenhang der Aufgabe, des Modells und der Werkzeuge abgeleitet und für die weitere Betrachtung von Werkzeugen die Kategorisierung nach der Tätigkeit am Modell (Gestalten, Darstellen und Transfer) eingeführt. Die drei grundlegenden Aspekte des Ansatzes (Aufgabe, Modell und Werkzeug) wurden durch verschiedene Voruntersuchungen weiter analysiert, abstrahiert, klassifiziert und beschrieben. Die erstellte Modelleinteilung differenziert die Modelle sowohl hinsichtlich der Repräsentationsform, von physisch bis virtuell, als auch nach dem Modellinhalt, beschrieben durch die Detaillierung, die Abstraktion und die Funktionalität. Die untersuchten Werkzeuge wurden auf ihre Basistechnologie abstrahiert und hinsichtlich Einsatzes, Modelldimension und -art, Anwendungsumgebung, Zusatzbedarf und Modellergebnis klassifiziert und beschrieben. Diese Einteilung diente im Weiteren als Ausgangsbasis für die Ableitung von Modell-Werkzeug-Kombinationen als kleinste, nutzbare Einheit für die Tätigkeiten Gestaltung und Darstellung. Der notwendige Transferbedarf für den Wechsel der Darstel-

lungsumgebung wurde hierbei ebenfalls definiert und beschrieben. Für den weiteren Entscheidungsprozess wurden relevante Industrieprojekte im Bereich TD hinsichtlich der durchgeführten Tätigkeiten, der eingesetzten Modelle und Werkzeuge sowie der aufgetretenen Schwierigkeiten analysiert. Die Untersuchungen und Herleitung des Ansatzes verdeutlichen die zentrale Bedeutung des Produktmodells als Ausgangsbasis für den Entscheidungsprozess. Da für eine fundierte Entscheidung in Bezug auf die Tätigkeiten der Bewertung der hergeleiteten Produkteigenschaften am Modell keine ausreichend genauen und detaillierten Daten im Forschungs- und Anwendungsumfeld zur Verfügung stehen, differenziert nach Repräsentationsart und Detaillierung, wurde im Weiteren eine Studie zur Modellwahrnehmung geplant und durchgeführt.

Auf Basis der vorgenommenen Untersuchungen zum Modelleinsatz wurde die Studie nach wissenschaftlichen Standards vorbereitet, die Untersuchungsinhalte definiert, der Ablauf ausgelegt und in Pretests überprüft (siehe Kapitel 4). Es wurden hierzu drei Forschungshypothesen aufgestellt, die den Einfluss der Repräsentationsform und der Detaillierung des Modells sowie die Vorprägung des Bewerbers thematisieren. Für die Studie wurden, ausgehend von der Modelleinteilung in Kapitel 3, insgesamt zwölf in Repräsentationsform und Detaillierung unterschiedliche Modelle definiert. Die Auswahl ermöglicht einerseits Rückschlüsse auf alle in der Modelleinteilung dargestellten Modelle, ohne jedes einzelne direkt zu untersuchen, und gewährleistet zum anderen einen angemessenen Studenumfang für den Probanden hinsichtlich Zeit und Belastung. Um einen Lerneffekt bei der Bewertung der Produkteigenschaften anhand des Modells auszuschließen, wurde zum einen die Reihenfolge der Modelle randomisiert und zum anderen unterschiedliche zugrundeliegende Produkte gewählt. Um dabei den Einfluss des Produkts ausschließen zu können, wurden zur Überprüfung zwei Kontrollmodelle eingefügt. Damit sind je zwei Modelle in Repräsentationsform und Detaillierung identisch, unterscheiden sich aber im dargestellten Produkt.

Im Rahmen der Modell-Studie in Kapitel 5 wurden insgesamt vierzehn Modelle durch die Probanden bewertet. Mithilfe einer sechsstufigen Rating-Skala bewerteten diese zunächst neun Eigenschaften der Produktgestalt, die mit der abschließenden Bewertung der gleichen Eigenschaften am Produkt verglichen wurden. Somit kann eine Differenz zwischen einer Bewertung am Modell und am Produkt gebildet werden. Es hat sich gezeigt, dass sowohl die Repräsentationsform als auch die Detaillierung einen Einfluss auf die Differenz der Bewertung hat. Die Vorkenntnisse der Probanden hat dagegen insgesamt keinen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Bewertung. Bei der ermittelten



Genauigkeit wurde weiter zwischen der Richtigkeit und der Präzision der Bewertung unterschieden, um dezidierte Aussagen bezüglich der Modelle treffen zu können. Des Weiteren bewerteten die Probanden, ebenfalls mit einer sechsstufigen Ratingskale, im Sinne einer Gebrauchstauglichkeit, die Modelle durch die Faktoren der Genauigkeit und Einfachheit der Bewertung sowie die Zufriedenheit mit dem Modell aus Anwendersicht. Auch hier zeigten sich signifikante Unterschiede, bedingt sowohl durch die Repräsentationsform als auch die Detaillierung der Modelle. Die unterschiedliche Einschätzung der Modelle aus Anwendersicht ist insbesondere hinsichtlich eines geplanten Modelleinsatzes und der damit verbundenen notwendigen Akzeptanz zu berücksichtigen. Als weiterer Faktor der Studie wurde anhand der Modelle eine Maßeinschätzung durch die Probanden vorgenommen. Dies ist insbesondere hinsichtlich ergonomischer und technischer Aspekte von Interesse und zeigte deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Repräsentationsformen. Die Detaillierung ist hierbei erwartungsgemäß nicht ausschlaggebend. Abschließend haben die Probanden für die Modelle, zusammengefasst über alle Detaillierungsstufen, eine Bewertung anhand des standardisierten Verfahrens des System Usability Scales vorgenommen. Dies ermöglicht einen Vergleich der Modelle hinsichtlich der Anwendung und bietet zusätzlich die Möglichkeit bei einer weiteren Studie Vergleiche zu ziehen. Die Erkenntnisse der Studie bilden die notwendige Grundlage für eine gezielte Modellwahl für bewertende Aufgaben in Bezug auf die Produktgestalt.

Für einen Übertrag der Erkenntnisse in die Praxis wurde in Kapitel 6, basierend auf den theoretischen Grundlagen in Kapitel 3, ein Modell-Werkzeug-Entscheidungs-Prozess (MWEPE) entwickelt und anhand von analysierten Projekten beispielhaft durchgeführt und validiert. Der MWEPE orientiert sich zunächst an der zu bewertenden Aufgabe und den daran beteiligten Personen. Über einen iterativen Entscheidungsprozess anhand der getroffenen Randbedingungen können für die Aufgabe passende Modelle und dafür notwendige Werkzeuge ermittelt werden. Mithilfe zusätzlicher Faktoren, die in Kapitel 3 eingeführt wurden und nicht direkter Bestandteil der Entscheidungskriterien des MWEPE sind, kann die Auswahl individuell auf die betrieblichen und persönlichen Anforderungen angepasst werden. Die abschließende Durchführung des MWEPE hat eine funktionierende Modell- und Werkzeugwahl aus Expertensicht bestätigt und bei den analysierten Problemsituationen eine modellbedingte Verbesserung aufgezeigt. Sowohl auf Basis des MWEPEs, des theoretischen Ansatzes und den Untersuchungen in Kapitel 3 sowie der durchgeführten Studie zeigen sich ausblickend Anknüpfungspunkte hinsichtlich weiterführender und angrenzender wissenschaftlicher Fragestellungen.

## 8 Ausblick

Ziel und Fokus des MWEP ist es, eine Modellwahl hinsichtlich Repräsentationsform und Detaillierung in Bezug auf die Aufgabe zu optimieren sowie mögliche und notwendige Werkzeuge für die Realisierung aufzuzeigen. Dabei bietet er die Möglichkeit der Erweiterung auf zukünftige Technologien sowie weitere Entscheidungsfaktoren. Im Bereich der VR- und MR-Technologien eröffnen sich durch die aktuellen Entwicklungen und der Marktreife der Technologien, wie die Untersuchungen in Kapitel 2.2.3.3 und 3.2.3 zeigen, weitere Möglichkeiten des Einsatzes. Insbesondere die Überlagerung physischer und virtueller Modelle bietet großes Potential, wie beispielsweise POHL [2009] oder VERLINDEN & HORVÁTH [2009] schon in früheren Untersuchungen zeigten, die jeweiligen Vorteile zu kombinieren und somit sowohl wahrnehmungsspezifischen als auch wirtschaftlichen und betrieblichen Anforderungen gerecht zu werden. Hierfür sind jedoch, neben der Verfügbarkeit serienreifer Technologien, in Anlehnung an die durchgeführte Modell-Studie weitere Untersuchungen notwendig, um die Wahrnehmungsaspekte im Vergleich zu anderen Repräsentationsformen einordnen zu können. Als wesentlicher objektiver Faktor der Bewertung wurde das Maß der Genauigkeit herangezogen, welches durch den MSE-Wert beschrieben ist. Der hierfür aufgestellte Maßstab in Kapitel 5.2.1 hat im Rahmen der Studie eine Einordnung und einen Vergleich der Bewertungen ermöglicht und schlüssige Ergebnisse geliefert, sollte aber im Sinne der Wissenschaftlichkeit in weiteren Studien untersucht und bestätigt werden.

Die Modell-Studie hat aufgezeigt, dass signifikante Unterschiede zwischen den Modellen und deren Ausprägung bei bewertenden Aufgaben in Bezug auf die Produktgestalt existieren. Im Rahmen der Entwicklung sind jedoch eine Vielzahl von weiteren bewertenden Aufgaben, insbesondere hinsichtlich technischer Aspekte durchzuführen, wie beispielsweise aus dem Bereich der Simulation, der Berechnung oder der Fertigung, die ebenfalls bei einer Modellauswahl berücksichtigt werden können. Die Integration solcher Faktoren stellt eine mögliche Erweiterung des Auswahlprozesses hin zu einem übergreifenden Ansatz mit einheitlichem Modellverständnis dar, wie auch von LUTTERS ET AL. [2014] und KOHN [2014] postuliert wurde.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden insbesondere handgeführte, kompakte Produkte mit einer direkten Nutzerschnittstelle betrachtet, die sich durch ein ausgewogenes Zusammenwirken der Bereiche Ergonomie, Technik und Design auszeichnen. Die Anwendung des Ansatzes ist jedoch auch darüber hinaus für andere Produktbereiche, beispielsweise

aus dem Investitionsgüterbereich oder der Automobilentwicklung, interessant. Insbesondere beim Transportation Design zeigt sich ein besonderes Zusammenspiel unterschiedlichster Fachbereiche und eine Vielzahl an gestalterischen und bewertenden Aufgaben. Um jedoch eine Übertragung des Ansatzes auf andere Bereiche zu ermöglichen und zu bestätigen, sind weitere Untersuchungen für die konkreten Aufgabenstellungen und die produktspezifischen Eigenschaften notwendig.

Auch der Faktor der Modellgestaltung als kreativer Vorgang sollte weiter untersucht und in den Ansatz integriert werden. Neben den unterschiedlichen Möglichkeiten der Werkzeuge, wie sie in Kapitel 3.2.3 untersucht und dargestellt wurden, ist dabei vor allem die Anwendung von Interesse. Da dieser Aspekt jedoch stark von den erlernten Fertigkeiten und den Fähigkeiten des Anwenders abhängt, stellt es mögliche vergleichende Studien vor große Herausforderungen. Insbesondere den Einfluss auf die Kreativität bei der Arbeit mit den verschiedenen Modellen und Werkzeugen ist hierbei ein wichtiger Aspekt, wie beispielsweise von ISA ET AL. [2015] in Bezug auf rein physische Modelle untersucht wurde.

Der spezifische Kontext der Modell-Studie und des MWEP verdeutlichen die Ausrichtung auf die konkrete Anwendung des Ansatzes in der Praxis. Eine weitere Nutzung und gezielte Bewertung des Ansatzes würden wichtige Rückschlüsse zur Einordnung der Ergebnisse der Studie liefern sowie eine Optimierung des Auswahlprozesses für die Praxis ermöglichen. Eine Überführung in eine softwarebasierte Anwendung oder Integration in bestehende Systeme würde weiter die Nutzbarkeit der wissenschaftlichen Erkenntnisse erhöhen. Hierbei können zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Zum einen kann durch eine Simplifizierung der Vorgehensweise und Automatisierung im Auswahlprozess eine Anwendung für Laien mit geringem Hintergrundwissen zu den Modellen und Werkzeugen ermöglicht werden. Im Gegenzug kann durch Integration und Berücksichtigung weiterer Faktoren, wie sie in Kapitel 3.2.6 beschrieben sind, eine spezifischere Auswahl getroffen werden, welche insbesondere als Unterstützung für die Anwendung durch Experten, mit entsprechender Kenntnis über die jeweiligen Prozesse, Modelle und Werkzeuge, dienen kann.

## Literaturverzeichnis

- [3D HUBS 2020] 3D Hubs: What is 3D printing? The definitive guide. <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/> (abgerufen am 08.06.2020).
- [3D SYSTEMS 2017] 3D Systems: Haptische Eingabegeräte, 2017. <https://de.3dsystems.com/haptics#haptic-devices> (abgerufen am 12.11.2020).
- [3D SYSTEMS 2020] 3D Systems Inc.: Geomagic Wrap. <https://de.3dsystems.com/software/geomagic-wrap> (abgerufen am 13.02.2020).
- [ABDI 2010] Abdi, H.: Holm's Sequential Bonferroni Procedure. In: Salkind, N. (Hrsg.): Encyclopedia of Research Design. Thousand Oaks: SAGE Publications Inc., 2010, S. 574–577.
- [ADAM & ZIMMER 2014] Adam, G.; Zimmer, D.: Design for Additive Manufacturing - Element transitions and aggregated structures. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Nr. 1, 7, 2014, S. 20–28.
- [ADOBE 2020] Adobe Inc.: Adobe Photoshop - Fotos, Bilder und Designs bearbeiten. <https://www.adobe.com/de/products/photoshop.html> (abgerufen am 13.02.2020).
- [ALBERT & MARX 2014] Albert, R.; Marx, N.: Empirisches Arbeiten in Linguistik und Sprachlehrforschung. 2. Aufl., Tübingen: narr Verlag, 2014.
- [ALCAIDE-MARZAL ET AL. 2013] Alcaide-Marzal, J.; Diego-Más, J. A.; Asensio-Cuesta, S.; Piqueras-Fizman, B.: An exploratory study on the use of digital sculpting in conceptual product design. In: Design Studies, Nr. 2, 34, 2013, S. 264–284.
- [ARAUJO 2001] Araujo, C. S.: Acquisition of product development tools in industry: a theoretical contribution. Department of Control and Engineering Design, Technical University of Denmark, Dissertation, 2001.
- [ARAÚJO ET AL. 2013] Araújo, B. R. de; Casiez, G.; Jorge, J. A.; Hachet, M.: Mockup Builder - 3D modeling on and above the surface. In: Computers & Graphics, Nr. 3, 37, 2013, S. 165–178.
- [ARORA ET AL. 2017] Arora, R.; Kazi, R. H.; Anderson, F.; Grossman, T.; Singh, K.; Fitzmaurice, G.: Experimental Evaluation of Sketching on Surfaces in VR. In: Mark, G.; Fussell, S.; Lampe, C.; Schraefel, M.; Hourcade, J.; Appert, C. und Wigdor, D. (Hrsg.): CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: Association for Computing Machinery Inc., 2017, S. 5643–5654.
- [ARTEC 2020] Artec 3D: 3D-Objektscanner Artec Eva | Der Beste Strukturlichtscanner. <https://www.artec3d.com/de/portable-3d-scanners/artec-eva> (abgerufen am 12.02.2020).
- [AUTODESK 2020a] Autodesk Inc.: Digital Drawing & Sketching Software. <https://www.autodesk.de/solutions/digital-drawing-software> (abgerufen am 28.05.2020).
- [AUTODESK 2020b] Autodesk Inc.: Mudbox | 3D Sculpting and Digital Painting Software. <https://www.autodesk.com/products/mudbox/overview/> (abgerufen am 13.12.2020).
- [AUTODESK 2020c] Autodesk Inc.: NURBS 1: Introduction - Alias Products 2019 - Autodesk Knowledge Network. <https://knowledge.autodesk.com/support/alias-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Alias-Tutorials/files/GUID-366304CB-16FF-46F9-9F64-D7385358D855-htm.html> (abgerufen am 14.05.2020).
- [AUTODESK 2020d] Autodesk Inc.: Polygonal Modeling - Maya 2019 - Autodesk Knowledge Network. <https://knowledge.autodesk.com/support/maya/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Maya-Modeling/files/GUID-7941F97A-36E8-47FE-95D1-71412A3B3017-htm.html> (abgerufen am 27.05.2020).
- [AUTODESK 2020e] Autodesk Inc.: VRED - 3D-Visualisierung und virtuelle Prototypen für Automobilkonstrukteure, 2020d. <https://www.autodesk.de/products/vred/overview> (abgerufen am 13.02.2020).

- [AUTODESK 2020f] Autodesk Inc.: Was ist generatives Design. <https://www.autodesk.de/solutions/generative-design> (abgerufen am 27.05.2020).
- [AUTODESK 2020g] Autodesk Inc.: 3ds Max | Software für Modellierung, Animation und Visualisierung in 3D. <https://www.autodesk.de/products/3ds-max/overview/> (abgerufen am 13.12.2020).
- [AUTODESK 2020h] Autodesk Inc.: Maya-Software | Software für Computeranimation und Modellierung. <https://www.autodesk.de/products/maya/overview/> (abgerufen am 13.12.2020).
- [AZUMA 1997] Azuma, R. T.: A Survey of Augmented Reality. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Nr. 4, 6, 1997, S. 355–385.
- [BALAKRISHNAN ET AL. 1999] Balakrishnan, R.; Fitzmaurice, G.; Kurtenbach, G.; Buxton, W.: Digital tape drawing. In: Vander Zanden, B. und Marks, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th annual ACM symposium on User interface software and technology*. New York: Association for Computing Machinery, 1999, S. 161–169.
- [BANGOR ET AL. 2008] Bangor, A.; Kortum, P. T.; Miller, J. T.: An Empirical Evaluation of the System Usability Scale. In: *International Journal of Human-Computer Interaction*, Nr. 6, 24, 2008, S. 574–594.
- [BAXTER 1995] Baxter, M. R.: *Product design - A practical guide to systematic methods of new product development*. London: Chapman & Hall, 1995.
- [BEIER 2013] Beier, F. M.: *Untersuchungen zum hybriden Designprozess in der technischen Produktentwicklung*. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Dissertation, 2013.
- [BERTSCHE & GRAF 2007] Bertsche, B.; Graf, H.: *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte - Rapid Prototyping*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [BEYER 2002] Beyer, C.: *Nutzung der 3D-Digitalisierung bei der Entwicklung von Produkten*. Aachen: Shaker, 2002.
- [BEYERER ET AL. 2012] Beyerer, J.; Puente León, F.; Frese, C.: *Automatische Sichtprüfung - Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [BJOERKLI 2014] Bjoerkli, L. E.: *A Review of Virtual Prototyping Approaches for User Testing of Design Solutions*. Norwegian University of Science and Technology, Department of Product Design, 2014.
- [BORDEGONI & CUGINI 2006] Bordegoni, M.; Cugini, U.: Haptic modeling in the conceptual phases of product design. In: *Virtual Reality*, Nr. 2-3, 9, 2006, S. 192–202.
- [BORTZ & DÖRING 2006] Bortz, J.; Döring, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation*. 4. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2006.
- [BRATFISCH & HAGMAN 2014] Bratfisch, O.; Hagman, E.: *Räumliches Orientierungsvermögen*. Schuhfried GmbH, Mödling, 2014.
- [BREUNINGER ET AL. 2013] Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: *Generative Fertigung mit Kunststoffen - Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [BROEK ET AL. 2000] Broek, J. J.; Sleijffers, W.; Horvath, I.: Using Physical Models in Design. In: Pan, Y. (Hrsg.): *International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design 2000*. Beijing: International Academic Publ., 2000.
- [BROOKE 1996] Brooke, J.: SUS - A quick and dirty usability scale. In: *Usability evaluation in industry*, Nr. 194, 189, 1996, S. 4–7.
- [BÜHNER & ZIEGLER 2009] Bühner, M.; Ziegler, M.: *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München: Pearson - Higher Education, 2009.
- [BURDEA & COIFFET 2003] Burdea, G. C.; Coiffet, P.: *Virtual Reality Technology*. 2. Aufl., New York: John Wiley & Sons Incorporated, 2003.

- [BUTTERWORTH ET AL. 1992] Butterworth, J.; Davidson, A.; Hensch, S.; Olano, M. T.: 3DM - A three dimensional modeler using a head-mounted display. In: Levoy, M. (Hrsg.): Proceedings of the 1992 symposium on Interactive 3D graphics. New York: ACM, 1992, S. 135–138.
- [CHMELÍK 2011] Chmelík, J.: Virtual Environment Kit for Visual Arts. In: Sarhangi, R. und Séquin, C. (Hrsg.): Proceedings of Bridges 2011: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture. Phoenix: Tessellations Publishing, 2011, S. 131–138.
- [CHMELÍK 2013] Chmelík, J.: Virtual Environment Kit for Visual Arts. Faculty of Informatics, Masaryk University, Dissertation, 2013.
- [CROSS 1996] Cross, N.: Analysing design activity. Chichester: Wiley, 1996.
- [DASSAULT 2017] Dassault Systemes: SOLIDWORKS 3D-CAD, 2017. <https://www.solidworks.com/de/product/solidworks-3d-cad> (abgerufen am 13.02.2020).
- [DASSAULT 2019] Dassault Systemes: View CAD Files in AR/VR, 2019. <https://www.edrawingsviewer.com/view-cad-files-arvr> (abgerufen am 18.02.2020).
- [DASSAULT 2020] Dassault Systemes: Review 2D & 3D Designs with eDrawings | eDrawings Viewer. <https://www.edrawingsviewer.com/> (abgerufen am 12.12.2020).
- [DEISINGER ET AL. 2000] Deisinger, J.; Blach, R.; Wesche, G.; Breining, R.; Simon, A.: Towards Immersive Modeling - Challenges and Recommendations: A Workshop Analyzing the Needs of Designers, 2000.
- [DICT 2020] dict.cc GmbH: Rendering | Übersetzung Englisch-Deutsch. [https://www.dict.cc/?s=rendering&failed\\_kw=redering](https://www.dict.cc/?s=rendering&failed_kw=redering) (abgerufen am 11.11.2020).
- [DIGITAL 2014] Digital Production: Leap Motion Plug-in für Maya 2014 - DIGITAL PRODUCTION, 2014. [https://www.digitalproduction.com/2013/08/27/leap-motion-plug-in-fuer-maya-2014/?utm\\_source=rss&utm\\_medium=rss&utm\\_campaign=leap-motion-plug-in-fuer-maya-2014](https://www.digitalproduction.com/2013/08/27/leap-motion-plug-in-fuer-maya-2014/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=leap-motion-plug-in-fuer-maya-2014) (abgerufen am 13.12.2020).
- [DIN 1319-1 1995] Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe, Januar 1995.
- [DIN 8580 2003] Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [DIN EN ISO 6385 2016] Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen, Dezember 2016.
- [DIN EN ISO 9241-11 2018] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte, November 2018.
- [DIN EN ISO 9241-210 2019] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme, 2019.
- [DIN EN ISO 9241-220 2017] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 220: Prozesse zur Ermöglichung, Durchführung und Bewertung menschenzentrierter Gestaltung für interaktive Systeme in Hersteller- und Betreiberorganisationen, Mai 2017.
- [DIN EN ISO 9241-910 2011] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [DIN ISO 5725-1 1997] Deutsches Institut für Normung e.V.: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen, Teil1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe, November 1997.
- [DÖRNER ET AL. 2019] Dörner, R.; Broll, W.; Grimm, P.: Virtual und Augmented Reality (VR/AR). 2. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2019.
- [DORTA 2005] Dorta, T.: Hybrid modeling: manual and digital media in the first steps of the design process. In: Duarte, J. (Hrsg.): eCAADe 23 - Digital design: the quest for new paradigms, proceedings of the 23rd conference on education in computer aided architectural design in Europe. Lisbon, 2005, S. 819–827.



- [DORTA ET AL. 2008] Dorta, T.; Pérez, E.; Lesage, A.: The ideation gap. In: Design Studies, Nr. 2, 29, 2008, S. 121–141.
- [DUDEN 2020a] Duden: Technik - Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft. Bibliographisches Institut GmbH. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Technik> (abgerufen am 20.02.2020).
- [DUDEN 2020b] Duden: Werkzeug - Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft. Bibliographisches Institut GmbH. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Werkzeug> (abgerufen am 10.03.2020).
- [DUDEN 2020c] Duden: Klassifizieren - Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft. Bibliographisches Institut GmbH. <https://www.duden.de/rechtschreibung/klassifizieren> (abgerufen am 08.11.2020).
- [DUDLEY ET AL. 2018] Dudley, J. J.; Schuff, H.; Kristensson, P. O.: Bare-Handed 3D Drawing in Augmented Reality. In: Koskinen, I.; Lim, Y.; Cerratto-Pargman, T.; Chow, K. und Odom, W. (Hrsg.): Conference on Designing Interactive Systems. New York: ACM Press, 2018, S. 241–252.
- [EHRENSPIEL & MEERKAMM 2017] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- [ELVERUM ET AL. 2016] Elverum, C. W.; Welø, T.; Tronvoll, S.: Prototyping in New Product Development - Strategy Considerations. In: Procedia CIRP, 50, 2016, S. 117–122.
- [EPIC 2020] Epic Games Inc.: Unreal Engine - The most powerful real-time 3D creation platform. <https://www.unrealengine.com/en-US/> (abgerufen am 14.02.2020).
- [FANTINI ET AL. 2017] Fantini, M.; Crescenzo, F. de; Brognara, L.; Baldini, N.: Design and Rapid Manufacturing of a customized foot orthosis: a first methodological study. In: Eynard, B.; Nigrelli, V.; Oliveri, S.; Peris-Fajarnes, G. und Rizzuti, S. (Hrsg.): Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing. Cham: Springer, 2017, S. 457–467.
- [FELDHUSEN & GROTE 2013] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [FISCHER-STABEL 2018] Fischer-Stabel, P.: Datenvisualisierung - Vom Diagramm zur Virtual Reality. München: UVK Verlag, 2018.
- [FLANDERA 2014] Flandera, T.: AutoCAD - Referenz - Beispiele - Nachschlagewerk. München: Hanser, 2014.
- [FLEISCH ET AL. 2004] Fleisch, T.; Brunetti, G.; Santos, P.; Stork, A.: Stroke-input methods for immersive styling environments. In: Giannini, F. (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2004, S. 275–283.
- [FORBES & KINNELL 2018] Forbes, T.; Kinnell, P.: A Study into the Influence of Visual Prototyping Methods and Immersive Technologies on the Perception of Abstract Product Properties. In: Ekströmer, P.; Ölvander, J. und Schütte, S. (Hrsg.): Proceedings of NordDesign 2018: LiU Tryck, 2018.
- [FOUNDRY 2020] Foundry: Modo Creative 3D Modeling Software. <https://www.foundry.com/products/modo> (abgerufen am 13.12.2020).
- [FRANZEN 2014] Franzen, A.: Antwortskalen in standardisierten Befragungen. In: Baur, N. und Blasius, J. (Hrsg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer VS, 2014, S. 701–711.
- [FRAZER ET AL. 2002] Frazer, J. H.; Xiyu, L.; Mingxi, T.; Janssen, P.: Generative and evolutionary techniques for building envelope design. In: Soddu, C. (Hrsg.): 5th International Conference Generative Art 2002. Milan, 2002, 3.1-3.16.
- [FRICK 1996] Frick, R.: Erzeugnisqualität und Design - Zu Inhalt und Organisation polydisziplinärer Entwicklungsarbeit. 1. Aufl., Berlin: Verl. Technik, 1996.

- [FUGE ET AL. 2012] Fuge, M.; Yumer, M. E.; Orbay, G.; Kara, L. B.: Conceptual design and modification of freeform surfaces using dual shape representations in augmented reality environments. In: *Computer-Aided Design*, Nr. 10, 44, 2012, S. 1020–1032.
- [FURHT 2011] Furht, B.: *Handbook of augmented reality*. New York: Springer, 2011.
- [GAGET 2019] Gaget, L.: What is Digital Sculpting? Sculpteo. <https://www.sculpteo.com/blog/2019/06/12/what-is-digital-sculpting/> (abgerufen am 27.05.2020).
- [GARDNER 2001] Gardner, R. C.: *Psychological statistics using SPSS for Windows*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2001.
- [GAVAČOVÁ & VEREŠ 2013] Gavačová, J.; Vereš, M.: *Generative Design Methods in Process of Car Body Components Development*, 2013.
- [GEBHARDT 2000] Gebhardt, A.: *Rapid prototyping - Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung*. 2. Aufl., München: Hanser, 2000.
- [GEBHARDT 2003] Gebhardt, A.: *Rapid prototyping*. 1. Aufl., München: Hanser, 2003.
- [GEBHARDT 2016] Gebhardt, A.: *Additive Fertigungsverfahren*. 5. Aufl., München: Hanser, 2016.
- [GEBHARDT ET AL. 2016] Gebhardt, A.; Kessler, J.; Thurn, L.: *3D-Drucken*. 2. Aufl., München: Hanser, 2016.
- [GOOGLE 2020] Google: Tilt Brush. <https://www.tiltbrush.com/> (abgerufen am 29.05.2020).
- [GRABOWSKI ET AL. 1993] Grabowski, H.; Anderl, R.; Polly, A.; Warnecke, H.-J.: *Integriertes Produktmodell*. 1. Aufl., Berlin, Wien, Zürich: Beuth, 1993.
- [GRAVITY SKETCH 2020] Gravity Sketch. <https://www.gravitysketch.com/> (abgerufen am 29.05.2020).
- [GRIEB 2010] Grieb, P.: *Digital Prototyping*. 1. Aufl., München: Hanser, 2010.
- [GROSSMAN ET AL. 2002] Grossman, T.; Balakrishnan, R.; Kurtenbach, G.; Fitzmaurice, G.; Khan, A.; Buxton, B.: Creating principal 3D curves with digital tape drawing. In: Wixon, D. (Hrsg.): *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York: ACM, 2002, S. 121.
- [GULANOVÁ ET AL. 2017] Gulánová, J.; Gulán, L.; Forrai, M.; Hirz, M.: Generative engineering design methodology used for the development of surface-based components. In: *Computer-Aided Design and Applications*, Nr. 5, 14, 2017, S. 642–649.
- [HEDDERICH & SACHS 2012] Hedderich, J.; Sachs, L.: *Angewandte Statistik*. 14. Aufl., Heidelberg: Springer, 2012.
- [HEINECKE 2012] Heinecke, A. M.: *Mensch-Computer-Interaktion*. Dordrecht: Springer, 2012.
- [ISA & LIEM 2014] Isa, S. S.; Liem, A.: Classifying Physical Models and Prototypes in the Design Process. In: Marjanovic Dorian, Storga Mario, Pavkovic Neven, Bojcetic Nenad (Hrsg.): *Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference*, 2014, S. 2071–2082.
- [ISA ET AL. 2015] Isa, S. S.; Liem, A.; Steinert, M.: The Value of Prototypes in the Early Design and Development Process. In: Weber, C.; Husung, S.; Cascini, G.; Cantamessa, M.; Marjanovic, D. und Rotini, F. (Hrsg.): *The 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15)*. Bd. 5, Glasgow: Design Society, 2015, S. 235–242.
- [ISO 10303-1 1994] International Organization for Standardization: *Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 1: Overview and fundamental principles*, Dezember 1994.
- [JÄNSCH 2007] Jänsch, J.: *Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz*. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl., 2007.
- [JENKE 2019] Jenke, M., 2019: *Skript zur Erzeugung Randomisierter Reihen mit Randbedingungen*. Version 1.0.
- [JERALD ET AL. 2013] Jerald, J.; Mlyniec, P.; Yoganandan, A.; Rubin, A.; Paullus, D.; Solotko, S.: MakeVR - A 3D world-building interface. In: Lécuyer, A. (Hrsg.): *2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. Piscataway: IEEE, 2013, S. 197–198.

- [KÄHLER 2004] Kähler, W. M.: Statistische Datenanalyse. 3. Aufl., Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag, 2004.
- [KANO ET AL. 1996] Kano, N.; Seraku, N.; Takahashi, F.; Tsuji, S.: Attractive Quality and Must-Be Quality. In: Hromi, J. (Hrsg.): The best on quality. Milwaukee, Wis.: ASQC Quality, 1996, S. 165–186.
- [KAUFMANN & SCHMALSTIEG 2006] Kaufmann, H.; Schmalstieg, D.: Designing Immersive Virtual Reality for Geometry Education. In: Julier, S.; Chen, J. und Göbel, M. (Hrsg.): IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006). Alexandria: IEEE Computer Society, 2006, S. 51–58.
- [KAZI ET AL. 2017] Kazi, R. H.; Grossman, T.; Cheong, H.; Hashemi, A.; Fitzmaurice, G.: DreamSketch. In: Gajos, K.; Mankoff, J. und Harrison, C. (Hrsg.): Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. New York, New York, USA: ACM Press, 2017, S. 401–414.
- [KEEFE ET AL. 2008] Keefe, D. F.; Acevedo, D.; Miles, J.; Drury, F.; Swartz, S. M.; Laidlaw, D. H.: Scientific sketching for collaborative VR visualization design. In: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Nr. 4, 14, 2008, S. 835–847.
- [KIM & LEE 2016] Kim, K.; Lee, K.: Collaborative product design processes of industrial design and engineering design in consumer product companies. In: Design Studies, 46, 2016, S. 226–260.
- [KIRCHNER 2011] Kirchner, K.: Entwicklung eines Informationssystems für den effizienten Einsatz generativer Fertigungs-verfahren im Produktentwicklungsprozess. 1. Aufl., München: Dr. Hut, 2011.
- [KLOCKE 2015] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 5 - Gießen, Pulvermetallurgie, Additive Manufacturing. 4. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [KOHN 2014] Kohn, A.: Entwicklung einer Wissensbasis für die Arbeit mit Produktmodellen. Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München, Dissertation, 2014.
- [KORNPROBST 2019] Kornprobst, P.: CATIA V5-6 für Einsteiger - Volumenkörper, Baugruppen und Zeichnungen. 2. Aufl., München: Hanser, 2019.
- [KRAUSE & LÜDDEMANN 1997] Krause, F.-L.; Lüddemann, J.: Virtual Clay Modelling. In: Pratt, M.; Sriram, R. und Wozny, M. (Hrsg.): Product Modeling for Computer Integrated Design and Manufacture. Boston: Springer US, 1997, S. 162–175.
- [KREBS 2017] Krebs, J.: Basics CAD. Basel: Walter de Gruyter GmbH, 2017.
- [KRISH 2011] Krish, S.: A practical generative design method. In: Computer-Aided Design, Nr. 1, 43, 2011, S. 88–100.
- [KÜDERLI 2007] Küderli, F.: Computer Aided Styling und die virtuelle Realität im Außen- und Innendesign. In: Braess, H.-H. und Seiffert, U. (Hrsg.): Automobildesign und Technik. Wiesbaden: Vieweg, 2007, S. 302–314.
- [LA FLOR & MONGEON 2012] La Flor, M. de; Mongeon, B.: Digital sculpting with Mudbox - Essential tools and techniques for artists: Focal Press, 2012.
- [LA ROSA ET AL. 2019] La Rosa, S. d.; Bülthoff, I.; Bülthoff, H.: Objekterkennung, Modelle im Dorsch Lexikon der Psychologie, Hogrefe AG, 2019. <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/objekterkennung-modelle> (abgerufen am 14.12.2020).
- [LEE & LIN 2014] Lee, L.-C. J.; Lin, M.-H.: Experimental Research in Applying Generative Design and 3D Printers in User Participating Design. In: Hutchison, D.; Kanade, T. und Kittler, J. (Hrsg.): Third International Conference - Design, User Experience, and Usability - Theories, Methods, and Tools for Designing the User Experience. Bd. 8517, Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 296–307.
- [LEWANDOWSKI & BOLT 2010] Lewandowski, S.; Bolt, S.: Box-and-Whisker Plot. In: Salkind, N. (Hrsg.): Encyclopedia of Research Design. Thousand Oaks: SAGE Publications Inc., 2010, S. 105–108.

- [LINDEMANN 2009] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsge-recht anwenden. 3. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [LOBOS 2018] Lobos, A.: Finding balance in Generative Product Design. In: Ekströmer, P.; Ölvander, J. und Schütte, S. (Hrsg.): Proceedings of NordDesign 2018: LiU Tryck, 2018.
- [LÜDDEMANN 1996] Lüddemann, J.: Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign. Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Technischen Universität Berlin, Dissertation, 1996.
- [LUTTERS ET AL. 2014] Lutters, E.; van Houten, F. J.; Bernard, A.; Mermoz, E.; Schutte, C. S.: Tools and techniques for product design. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Nr. 2, 63, 2014, S. 607–630.
- [MACHUCA ET AL. 2018] Machuca, M. D. B.; Asente, P.; Stuerzlinger, W.; Lu, J.; Kim, B.: Multiplanes. In: Geiger, A. und Valkov, D. (Hrsg.): Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction. New York: The Association for Computing Machinery, 2018, S. 36–47.
- [MACOMBER & YANG 2011] Macomber, B.; Yang, M.: The Role of Sketch Finish and Style in User Responses to Early Stage Design Concepts. In: Massachusetts Institute of Technology (Hrsg.): Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference: ASME International, 2011, S. 567–576.
- [MADARY & METZINGER 2016] Madary, M.; Metzinger, T. K.: Recommendations for Good Scientific Practice and the Consumers of VR-Technology. In: Frontiers in Robotics and AI, 3, 2016.
- [MAIER 2008] Maier, T.: Haptic design of handles. In: Grunwald, M. (Hrsg.): Human haptic perception: basics and applications. Basel: Birkhäuser, 2008, S. 459–466.
- [MAIER & SCHMID 2020] Maier, T.; Schmid, M.: Skript zur Vorlesung Technisches Design. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, 2020.
- [MALLOT 1998] Mallot, H. A.: Sehen und die Verarbeitung visueller Information - Eine Einführung. Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag, 1998.
- [MCKNIGHT 2017] McKnight, M.: Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer. In: KEG, Nr. 2, 2, 2017, S. 176–181.
- [MENICHINELLI ET AL. 2017] Menichinelli, M.; Bosqué, C.; Troxler, P.; Raspanti, C.; Schaub, A.; Neves, H.: Fab lab - Revolution field manual. Salenstein: Niggli Verlag, 2017.
- [MENOLD & JABLOKOW 2017] Menold, J.; Jablokow, K.: Prototype for X (PFX) - A Prototyping Framework to Support Product Design. Engineering Design & Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, Dissertation, 2017.
- [MENOLD ET AL. 2017] Menold, J.; Jablokow, K.; Simpson, T.: Prototype for X (PFX) - A holistic framework for structuring prototyping methods to support engineering design. In: Design Studies, 50, 2017, S. 70–112.
- [MICROSOFT 2020] Microsoft Corporation: Microsoft HoloLens - Mixed Reality-Technologie für Unternehmen. <https://www.microsoft.com/de-de/hololens> (abgerufen am 11.11.2020).
- [MILGRAM & KISHINO 1994] Milgram, P.; Kishino, F.: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. In: IEICE Transactions on Information and Systems, 77, 1994, S. 1321–1329.
- [MINDESK 2020] Mindesk Inc.: Mindesk – Real Time VR CAD. <https://mindeskv.com/> (abgerufen am 29.05.2020).
- [MINE ET AL. 2015] Mine, M.; Yoganandan, A.; Coffey, D.: Principles, interactions and devices for real-world immersive modeling. In: Computers & Graphics, 48, 2015, S. 84–98.
- [MOI3D 2014] Triple Squid Software Design: Mol, 3D modeling for designers and artists, 2014. <http://moi3d.com/index.htm> (abgerufen am 13.12.2020).
- [MOORS 2008] Moors, G.: Exploring the effect of a middle response category on response style in attitude measurement. In: Quality & quantity, Nr. 6, 42, 2008, S. 779–794.

- [MOREAU ET AL. 2004] Moreau, G.; Fuchs, P.; Stergiopoulos, P.: Applications of Virtual Reality in the manufacturing industry: from design review to ergonomic studies. In: *Mécanique & Industries*, Nr. 2, 5, 2004, S. 171–179.
- [MÜLLER 2005] Müller, K.: NURBS und Unterteilungsflächen: adaptive Visualisierung von Unterteilungsflächen und ihre Erweiterung auf nicht-uniforme Flächen. Technischen Universität Braunschweig, Dissertation, 2005.
- [NIEBERDING 2010] Nieberding, F. H. M.: Selecting and Tailoring Design Methodologies in the Form of Roadmaps for a Specific Development Project. Department of Industrial Engineering, University of Stellenbosch, Dissertation, 2010.
- [OBERHOFER ET AL. 2017] Oberhofer, F., Janny, B., Maier, T., Wulle, F., & Verl, A.: Chancen und Grenzen der Additiven Fertigung bei der Gestaltung physischer Mensch-Maschine-Schnittstellen. In: Jäger, M. (Hrsg.): *Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels - Kreativ, Innovativ, Sinnhaft*. Dortmund: GfA-Press, 2017.
- [OBERHOFER & MAIER 2018] Oberhofer, F.; Maier, T.: Product Modeling Tools: Approach To A Targeted Application in User-Centered Product Design. In: Ekströmer, P.; Ölvander, J. und Schütte, S. (Hrsg.): *Proceedings of NordDesign 2018*: LiU Tryck, 2018.
- [OLSEN ET AL. 2009] Olsen, L.; Samavati, F. F.; Sousa, M. C.; Jorge, J. A.: Sketch-based modeling - A survey. In: *Computers & Graphics*, Nr. 1, 33, 2009, S. 85–103.
- [PAHL ET AL. 2007] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung*. 7. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [PARK ET AL. 2017] Park, G.; Choi, H.; Lee, U.; Chin, S.: Virtual figure model crafting with VR HMD and Leap Motion. In: *The Imaging Science Journal*, Nr. 6, 65, 2017, S. 358–370.
- [PESTER 2020] Pester, A.: Beispiel aus der Computergraphik. [https://www.mathe-online.at/materialien/Andreas.Pester/files/Vectors/beispiel\\_aus\\_der\\_computergraphik.htm](https://www.mathe-online.at/materialien/Andreas.Pester/files/Vectors/beispiel_aus_der_computergraphik.htm) (abgerufen am 28.05.2020).
- [PHAM & HIEU 2008] Pham, D. T.; Hieu, L. C.: Reverse Engineering—Hardware and Software. In: Raja, V. und Fernandes, K. (Hrsg.): *Reverse Engineering*. London: Springer, 2008, S. 33–70.
- [PIPES 2007] Pipes, A.: *Drawing for designers*. London: Laurence King, 2007.
- [PIXOLOGIC 2020] Pixologic Inc.: Pixologic : ZBrush - The all-in-one-digital sculpting solution. <https://pixologic.com/> (abgerufen am 13.12.2020).
- [POHL 2009] Pohl, C.: *Mixed-Reality-Modelle im Industrial-Design-Prozess, Konzept zur Integration virtueller und realer Modelle für wahrnehmungsgerechte Präsentationen*. Aachen: Shaker, 2009.
- [PONN & LINDEMANN 2011] Ponn, J.; Lindemann, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte - Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungs-lösungen*. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [PONTO ET AL. 2013] Ponto, K.; Tredinnick, R.; Bartholomew, A.; Roy, C.; Szafir, D.; Greenheck, D.; Kohlmann, J.: SculptUp - A rapid, immersive 3D modeling environment. In: Lécuyer, A. (Hrsg.): *2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*. Piscataway: IEEE, 2013, S. 199–200.
- [PORST 2014] Porst, R.: *Fragebogen - Ein Arbeitsbuch*. 4. Aufl., Wiesbaden: Springer VS, 2014.
- [POUPYREV ET AL. 1998] Poupayrev, I.; Ichikawa, T.; Weghorst, S.; Billingham, M.: Ego-centric Object Manipulation in Virtual Environments: Empirical Evaluation of Interaction Techniques. In: *Computer Graphics Forum*, Nr. 3, 17, 1998, S. 41–52.
- [PREIM & DACHSELT 2015] Preim, B.; Dachsel, R.: *Interaktive Systeme, Band 2: User Interface Engineering, 3D-Interaktion, Natural User Interfaces*. 2. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2015.
- [RAAB-STEINER & BENESCH 2010] Raab-Steiner, E.; Benesch, M.: *Der Fragebogen - Von der Forschungsidee zur SPSS/PASW-Auswertung*. 2. Aufl., Wien: Facultas-Verlag, 2010.

- [RACK & CHRISTOPHERSEN 2007] Rack, O.; Christophersen, T.: Experimente. In: Albers, S.; Klapper, D.; Konradt, A. und Wolf, J. (Hrsg.): Methodik der empirischen Forschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2007, S. 17–32.
- [RADEMACHER ET AL. 2014] Rademacher, M. H.; Krömker, H.; Weber, C.; Riedel, O.: Virtual reality in der Produktentwicklung - Instrumentarium zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der Automobilindustrie. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [RAJA & FERNANDES 2008] Raja, V.; Fernandes, K. J.: Reverse Engineering. London: Springer, 2008.
- [RANSCOMBE & BISSETT-JOHNSON 2017] Ranscombe, C.; Bissett-Johnson, K.: Digital Sketch Modelling: Integrating Digital Sketching as a Transition between Sketching and CAD in Industrial Design Education. In: Design and Technology Education, Nr. 1, 22, 2017.
- [RASCH ET AL. 2014] Rasch, B.; Friese, M.; Hofmann, W.; Naumann, E.: Quantitative Methoden 2. Heidelberg: Springer, 2014.
- [RAUER 2011] Rauer, M.: Quantitative Usability-Analysen mit der System Usability Scale (SUS), Seibert Media GmbH, 2011. <https://blog.seibert-media.net/blog/2011/04/11/usability-analysen-system-usability-scale-sus/> (abgerufen am 10.02.2020).
- [REDSHIFT 2016] Redshift by Autodesk Inc.: Définition de la conception générative, 2016. <https://redshift.autodesk.fr/definition-conception-generative/> (abgerufen am 19.11.2020).
- [REESE 2005] Reese, J.: Der Ingenieur und seine Designer. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [REGENBRECHT 1999] Regenbrecht, H.: Faktoren für die Präsenz in virtueller Architektur. Fakultät Architektur, Stadt- und Regionalplanung, Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 1999.
- [REID ET AL. 2013] Reid, T. N.; MacDonald, E. F.; Du, P.: Impact of Product Design Representation on Customer Judgment. In: Journal of Mechanical Design, Nr. 9, 135, 2013, S. 91008.
- [REIPSCHLÄGER & DACHSELT 2019] Reipschläger, P.; Dachsel, R.: DesignAR: Immersive 3D-Modeling Combining Augmented Reality with Interactive Displays. In: Lee, B.; Lee, G.; Scott, S.; Tory, M. und Kim, J. (Hrsg.): Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces. New York: The Association for Computing Machinery, 2019, S. 29–41.
- [RIEUF ET AL. 2017] Rieuf, V.; Bouchard, C.; Meyrueis, V.; Omhover, J.-F.: Emotional activity in early immersive design: Sketches and moodboards in virtual reality. In: Design Studies, 48, 2017, S. 43–75.
- [ROPOHL 1991] Ropohl, G.: Technologische Aufklärung - Beiträge zur Technikphilosophie. 1. Aufl., Frankfurt a. M.: Suhrkamp, 1991.
- [SACHS 2002] Sachs, L.: Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden. 10. Aufl., Berlin: Springer, 2002.
- [SACKEWITZ 2014] Sackewitz, M.: Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2014.
- [ŞAHIN ET AL. 2007] Şahin, A.; Boë, M.; Terpenney, J.; Bohn, J. H.: A Study to Understand Perceptual Discrepancies Using Visual Illusions and Data Envelopment Analysis (DEA). In: Journal of Mechanical Design, Nr. 7, 129, 2007, S. 744.
- [SALKIND 2010] Salkind, N.: Encyclopedia of Research Design. Thousand Oaks: SAGE Publications Inc., 2010.
- [SARRIS 1990] Sarris, V.: Erkenntnisgewinnung und Methodik der experimentellen Psychologie. München, Basel: Ernst Reinhardt Verlag, 1990.
- [SARRIS 1992] Sarris, V.: Versuchsplanung und Stadien des psychologischen Experiments. München, Basel: Ernst Reinhardt Verlag, 1992.
- [SCHIELE 2012] Schiele, H.-G.: Computergrafik für Ingenieure - Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.



- [SCHLECHTWEG 2010] Schlechtweg, S.: Computergraphik Grundlagen - V. Die Rendering-Pipeline, 2010. Fachbereich Informatik Hochschule Anhalt. <http://www.mttcs.org/Skripte/Pra/Material/vorlesung4.pdf> (abgerufen am 28.05.2020).
- [SCHMID & MAIER 2017] Schmid, M.; Maier, T.: Technisches Interface Design. Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [SCHÖNE & STELZER 2012] Schöne, C.; Stelzer, R.: Reverse Engineering in der Produktentwicklung - Aktuelle Herausforderungen. In: Linke, M.; Kranke, G.; Wölfel, C. und Krzywinski, J. (Hrsg.): Entwerfen, Entwickeln, Erleben 2012, Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung. Dresden: TUDpress, 2012, S. 351–363.
- [SCHUHFRIED 2020] Schuhfried GmbH: Wiener Testsystem. <https://www.schuhfried.at/wts/> (abgerufen am 07.02.2020).
- [SCHWARZ & BRUDERER ENZLER 2018] Schwarz, J.; Bruderer Enzler, H.: Methodenberatung, Universität Zürich, 2018. [https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse\\_spss.html](https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss.html) (abgerufen am 14.12.2020).
- [SCHWARZ ET AL. 1991] Schwarz, N.; Knauper, B.; Hippler, H.-J.; Noelle-Neumann, E.; Clark, L.: Rating Scales: Numeric Values May Change the Meaning of Scale Labels. In: Public Opinion Quarterly, Nr. 4, 55, 1991, S. 570.
- [SEDLMEIER 2002] Sedlmeier, P.: Planung, Durchführung und Auswertung empirischer Studien. In: Janetzko, D.; Hildebrandt, M. und Meyer, A. (Hrsg.): Das experimentalpsychologische Praktikum im Labor und WWW. Göttingen: Hogrefe Verlag für Psychologie, 2002, S. 43–100.
- [SEEGER 2005] Seeger, H.: Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [SELF & DALKE 2009] Self, J.; Dalke, H.: The Character of Design Tools - A framework for describing the character of design tools and their relationship to industrial design practice. In: Kim, J.; Chen, L. und Lee, K. (Hrsg.): International Association of Societies of Design Research 2009 - Rigor and Relevance in Design: Korean Society of Design Science, 2009, S. 4267–4270.
- [SELF 2011] Self, J.: The Use of Design Tools in Industrial Design Practice. Faculty of Art, Design and Architecture, Kingston University London, Dissertation, 2011.
- [SHAPR3D 2020] Shapr3D Zrt.: The World's Leading Mobile 3D Design App for iPad | Shapr3D. <https://www.shapr3d.com/> (abgerufen am 13.12.2020).
- [SHEA ET AL. 2005] Shea, K.; Aish, R.; Gourtovaia, M.: Towards integrated performance-driven generative design tools. In: Automation in Construction, Nr. 2, 14, 2005, S. 253–264.
- [SINGAMNENI ET AL. 2012] Singamneni, S.; Roychoudhury, A.; Diegel, O.; Huang, B.: Modeling and evaluation of curved layer fused deposition. In: Journal of Materials Processing Technology, Nr. 1, 212, 2012, S. 27–35.
- [SIXENSE 2017] Sixense Enterprises Inc.: MakeVR, 2017. <http://www.viveformakers.com/> (abgerufen am 13.12.2020).
- [SÖDERMAN 2005] Söderman, M.: Virtual reality in product evaluations with potential customers. In: Journal of Engineering Design, Nr. 3, 16, 2005, S. 311–328.
- [STATISTA 2016] Statista GmbH: MINT-Berufe: Frauenanteil in Deutschland bis 2016, 2016. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/946493/umfrage/frauenanteil-in-mint-berufen-in-deutschland/> (abgerufen am 21.11.2020).
- [STOLTERMAN ET AL. 2008] Stolterman, E.; Mcatee, J.; Royer, D.; Thandapani, S.: Designerly Tools. In: Durling, D.; Rust, C.; Chen, L.; Ashton, P. und Friedman, K. (Hrsg.): Design Research Society Conference 2008. Sheffield: Sheffield Hallam University, 2008, S. 116.
- [SUTHERLAND 1963] Sutherland, I.: Sketchpad, A Man-Machine Graphical Communication System. Massachusetts Institute of Technology, University of Cambridge, Dissertation, 1963.

- [TAKALA ET AL. 2013] Takala, T. M.; Makarainen, M.; Hamalainen, P.: Immersive 3D modeling with Blender and off-the-shelf hardware. In: Lécuyer, A. (Hrsg.): 2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI). Piscataway: IEEE, 2013, S. 191–192.
- [TCHEBETCHOU 2005] Tchebetchou, A. R. B.: Methoden für das Industriedesign in Virtueller Realität. Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Technischen Universität Berlin, Dissertation, 2005.
- [TECHVIZ 2020] Techviz: VR-Software für Ihre Projektbewertungen. <https://www.techviz.net/de/vr-software-fur-ihre-projektbewertungen/> (abgerufen am 18.02.2020).
- [THOMPSON ET AL. 2016] Thompson, M. K.; Moroni, G.; Vaneker, T.; Fadel, G.; Campbell, R. I.; Gibson, I. et al.: Design for Additive Manufacturing. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Nr. 2, 65, 2016, S. 737–760.
- [ULLMAN ET AL. 1990] Ullman, D. G.; Wood, S.; Craig, D.: The importance of drawing in the mechanical design process. In: Computers & Graphics, Nr. 2, 14, 1990, S. 263–274.
- [ULRICH & EPPINGER 2012] Ulrich, K. T.; Eppinger, S. D.: Product design and development. 5. Aufl., New York: McGraw-Hill Irwin, 2012.
- [ULTRALEAP 2019] Ultraleap Limited: Paint – Ultraleap Gallery, 2019. <https://gallery.leapmotion.com/paint/> (abgerufen am 13.12.2020).
- [ULTRALEAP 2020] Ultraleap Limited: Tracking - Leap Motion Controller. <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/> (abgerufen am 13.12.2020).
- [VAJNA 2014] Vajna, S.: Integrated Design Engineering - Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [VAJNA ET AL. 2018] Vajna, S.; Weber, C.; Zeman, K.; Hehenberger, P.; Gerhard, D.; Wartzack, S.: CAx für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung. 3. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 2018.
- [VAN DEN BOOM 1994] van den Boom, H.: Betrifft: Design - Unterwegs zur Designwissenschaft in fünf Gedankengängen. Alfter: VDG Verlag und Datenbank für Geisteswissenschaften, 1994.
- [VAUGHAN 2011] Vaughan, W.: Digital Modeling. Berkeley: Pearson Education Inc., 2011.
- [VDI 2209 2009] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: 3D-Produktmodellierung: Technische und organisatorische Voraussetzungen - Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen - Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis, März 2009.
- [VDI 2221-1 2019] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Modell der Produktentwicklung, November 2019.
- [VDI 2221-2 2019] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse, November 2019.
- [VDI 2222-1 1997] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Juni 1997.
- [VDI 2223 2004] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Methodisches Entwerfen technischer Produkte, Januar 2004.
- [VDI 2242 2016] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Ergonomiegerechte Gestaltung technischer Erzeugnisse, Juni 2016.
- [VDI 2424-1 1986] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Industrial Design: Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweisen, 1986.
- [VDI 3405-1 2014] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen, Dezember 2014.
- [VDI 5620 2017] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Reverse Engineering von Geometriedaten, März 2017.

- [VDID 2009] VDID Verband Deutscher Industrie Designer e.V.: Innovationsfaktor Design: Leitfaden für kleine und mittlere Unternehmen, 2009. [https://www.vdid.de/inhalte/pdf/73\\_1.pdf](https://www.vdid.de/inhalte/pdf/73_1.pdf) (abgerufen am 25.02.2020).
- [VDID 2012] VDID Verband Deutscher Industrie Designer e.V.: DER VDID CODEX: Industriedesign. Herausforderungen und Verantwortung, 2012. [https://www.vdid.de/inhalte/pdf/91\\_1.pdf](https://www.vdid.de/inhalte/pdf/91_1.pdf) (abgerufen am 25.02.2020).
- [VERLINDEN & HORVÁTH 2009] Verlinden, J.; Horváth, I.: Analyzing opportunities for using interactive augmented prototyping in design practice. In: *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, Nr. 03, 23, 2009, S. 289–303.
- [VERMA 2016] Verma, J. P.: *Repeated measures design for empirical researchers*. Hoboken: Wiley, 2016.
- [VINAYAK & RAMANI 2015] Vinayak; Ramani, K.: A gesture-free geometric approach for mid-air expression of design intent in 3D virtual pottery. In: *Computer-Aided Design*, 69, 2015, S. 11–24.
- [VIOPROTO 2020] VIOPROTO c/o Cast-Solut GmbH: Prototypenbau - Möglichkeiten, Beratung, Fertigung. <https://vioproto.de/prototypenbau/> (abgerufen am 12.11.2020).
- [VIRTALIS 2020] Virtualis Holdings Limited: Visionary Render. <https://www.virtualis.com/products/visionary-render/> (abgerufen am 18.02.2020).
- [VISWANATHAN & LINSEY 2011] Viswanathan, V.; Linsey, J.: Understanding physical models in design cognition: A triangulation of qualitative and laboratory studies. In: Kellogg, S. und Karlin, J. (Hrsg.): *2011 Frontiers in Education Conference (FIE)*. Rapid City: IEEE, 2011, S3F-1-S3F-6.
- [WACKER ET AL. 2018] Wacker, P.; Voelker, S.; Wagner, A.; Borchers, J.: Physical Guides. In: Geiger, A. und Valkov, D. (Hrsg.): *Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction*. New York: The Association for Computing Machinery, 2018, S. 25–35.
- [WACOM 2020] Wacom Europe GmbH: Wacom Global. <https://www.wacom.com/de-de> (abgerufen am 13.12.2020).
- [WALL ET AL. 1992] Wall, M. B.; Ulrich, K. T.; Flowers, W. C.: Evaluating prototyping technologies for product design. In: *Research in Engineering Design*, Nr. 3, 3, 1992, S. 163–177.
- [WEICHBOLD 2014] Weichbold, M.: Pretest. In: Baur, N. und Blasius, J. (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer VS, 2014, S. 299–304.
- [WESCHE & SEIDEL 2001] Wesche, G.; Seidel, H.-P.: FreeDrawer. In: Green, M.; Shaw, C. und Wang, W. (Hrsg.): *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology 2001*. New York: ACM, 2001, S. 167.
- [WESTHOFF & HAGEMEISTER 2005] Westhoff, K.; Hagemeister, C.: *Konzentrationsdiagnostik*. Lengerich: Pabst, 2005.
- [WESTIN 1998] Westin, S. H.: Computer-aided industrial design. In: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Nr. 1, 32, 1998, S. 49–52.
- [WIESE ET AL. 2010] Wiese, E.; Israel, J.; Meyer, A.; Bongartz, S.: Investigating the learnability of immersive free-hand sketching. In: LaViola, J. und Léon, J.-C. (Hrsg.): *EUROGRAPHICS Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling (2010)*. Goslar: Eurographics Association, 2010, S. 135–142.
- [WULLE ET AL. 2017] Wulle, F.; Coupek, D.; Schäffner, F.; Verl, A.; Oberhofer, F.; Maier, T.: Workpiece and Machine Design in Additive Manufacturing for Multi-Axis Fused Deposition Modeling. In: *Procedia CIRP*, 60, 2017, S. 229–234.
- [YANG ET AL. 2008] Yang, W. Z.; Xie, S. Q.; Ai, Q. S.; Zhou, Z. D.: Recent development on product modelling: A review. In: *International Journal of Production Research*, Nr. 21, 46, 2008, S. 6055–6085.
- [YLIMÄKI ET AL. 2015] Ylimäki, M.; Kannala, J.; Heikkilä, J.: Optimizing the Accuracy and Compactness of Multi-view Reconstructions. In: Azzopardi, G. und Petkov, N. (Hrsg.): *International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*. Bd. 9257, Cham: Springer, 2015, S. 171–183.

- [ZACHMANN 2011] Universität Clausthal: Virtuelle Realität - Interaktionsmetaphern, 2011. [https://cgvr.informatik.uni-bremen.de/teaching/vr\\_11/fohlen/08%20-%20interaktion%20in%20vr.pdf](https://cgvr.informatik.uni-bremen.de/teaching/vr_11/fohlen/08%20-%20interaktion%20in%20vr.pdf) (abgerufen am 12.11.2020).
- [ZÜHLKE 2012] Zühlke, D.: Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen: Useware-Engineering für technische Systeme. 2. Aufl., Heidelberg: Springer, 2012.

### Zitierte studentische Arbeiten unter Anleitung des Verfassers

- [BEN MANSOUR 2018] Ben Mansour, R.: Untersuchung zur Flächenrückführung von 3D-Scan-Daten hinsichtlich eines gesamtheitlichen Reverse Engineering Prozesses im Technischen Design, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Studienarbeit, 2018.
- [BUCHHOLZ 2018] Buchholz, T.: Untersuchung zu Virtual-Reality-Headsets in der nutzerzentrierten Produktentwicklung, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Masterarbeit, 2018.
- [FLEGEL 2016] Flegel, A.-K.: Gestaltung eines Produktprogramms mithilfe digitaler Designwerkzeuge, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Studienarbeit, 2016.
- [GRIESBAUM 2016] Griesbaum, J.: Untersuchung zu 3D-Scan Methoden zur Digitalisierung von Design- und Ergonomieentwürfen hinsichtlich eines gesamtheitlichen Reverse Engineering Prozesses im Technischen Design, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2016.
- [GRIESBAUM 2018] Griesbaum, J.: Untersuchung zur Hybridisierung physischer Modelle mittels Mixed Reality Brillen im Technischen Design, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Masterarbeit, 2018.
- [RIST 2016] Rist, U.: Untersuchung zu Augmented Reality in der Produktdesign-Entwicklung, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Masterarbeit, 2016.
- [SCHÄFFER 2017] Schäffer, F.: Untersuchungen zu Konstruktionsrichtlinien für die Additive Fertigung unter gestalterischen und ergonomischen Gesichtspunkten, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Studienarbeit, 2017.
- [SCHWEIGART 2017] Schweigart, M.: Untersuchung zu Virtual Clay Modeling bei der Gestaltung nutzerzentrierter Produkte, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Masterarbeit, 2017.
- [SCHWIMMER 2018] Schwimmer, E.: Untersuchung des generativen Designs hinsichtlich der Anwendung im Technischen Design, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Masterarbeit, 2018.
- [SEIBOLD 2015] Seibold, P.: Vom virtuellen zum physischen Modell – Rapid Prototyping in der Produktentwicklung, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Studienarbeit, 2015.
- [SPEER 2017] Speer, A.: Untersuchung zur analogen und digitalen Modellierung in den frühen Phasen der Produktentwicklung. Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Unveröffentlichte Studienarbeit, 2017.
- [WOLF 2019] Wolf, L.: Untersuchung zum Einsatz von Produktmodellen in Bezug auf den Modellinhalt und die Dastellungsform, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Studienarbeit, 2019.
- [ZORBA 2015] Zorba, C.: Untersuchungen zur digitalen 3D-Modellierung in der Produktentwicklung, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, unveröffentlichte Studienarbeit, 2015.

# Anhang

## A1 Analyse von Entwicklungsprojekten

Phase	Arbeitsabschnitt	Aktivität	Inhalt	Teilschritt (modellbezogene Teilschritte in grau markiert)	Ergänzende Beschreibung	Ergebnis	
Planen	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	Definition des Entwicklungsumfangs	Im Rahmen der Angebotserstellung wird definiert welcher Umfang bei der Entwicklung betrachtet wird > Projektbeschreibung	- Produktbeschreibung - Branchenbeschreibung - Entwicklungsumfang - Entwicklungsziel		Angebot mit Projektbeschreibung - Konsumgut im medizinischen Umfeld - Einzelprodukt - Weiterentwicklung - Schwerpunkt sind Ergonomie und Design - Schnittstellen zu weiteren Bereichen	
		Funktionsanalyse	Untersuchung bestehender Produkte hinsichtlich ergonomischer, funktionaler und gestalterischer Aspekte aus Expertensicht	Untersuchung des realen Produkts hinsichtlich definierter Parameter Erstellung vereinfachter digitaler Geometrie-Modelle des Produkts für eine Ergonomie-Bewertung hinsichtlich der Erreichbarkeit von definierten Bereichen zur Überprüfung von Körperwinkeln	Grund für die Erstellung eines Modells war die Ergonomie-Untersuchung in Human Builder > Ausgangspunkt Darstellung	Stärken und Schwächen Bewertung der Körperhaltung bei der Nutzung	
		Ergonomieanalyse	Untersuchung bestehender Produkte hinsichtlich ergonomischer, funktionaler und gestalterischer Aspekte aus Anwendersicht	Beobachtung von Anwendern mit Dokumentation Interview und Befragung der Anwender bzgl. ergonomischer, funktionaler und gestalterischer Aspekte mittels Fragebogen		Stärken-Schwächen-Profil und Optimierungspotentiale	
		Aufstellen von Anforderungen	Definition der Anforderungen hinsichtlich technischer, ergonomischer und gestalterischer Aspekte basierend auf den Analyse-Erkenntnissen sowie den Vorgaben der beteiligten Partner	Erstellung des Pflichtenhefts einschließlich Mensch-Produkt-Anforderungen		Pflichtenheft	
Konzipieren	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	Gliedern des Produkts in Teilfunktionen	Als Grundlage für die Konzeptfindung wird das Produkt in mehrere Teilsysteme und weiter in Teilfunktionen untergliedert	Definition von Teilsystemen und Teilfunktionen welche auf Basis der Anforderungsliste und entsprechend des Entwicklungsumfangs von Bedeutung sind		Teilsysteme	
				Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	Entwickeln von Lösungsideen für die definierten Teilsysteme und Teilfunktionen	Brainstorming zu grundsätzlichen Lösungsmöglichkeiten welche in einer Matrix festgehalten sind Generieren und Gestalten von Lösungsideen für die Anordnung von Bauteilen und technische Detaillösungen	Erstellung eines Morphologischen Kastens zur Unterstützung der folgenden Detaillierung und Gestaltung der Lösungsvarianten Aufgrund eines hohen Freiheitsgrades war die prinzipielle Positionierung von Bauteilen im Fokus, eine Einhaltung von Maßen und Realisierbarkeit war nicht von Belangen
	Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts	Vorbereitung der Bewertung	Zur Durchführung der Bewertung müssen die generierten Konzepte entsprechend der Anforderungen an eine Bewertung aufbereitet werden	Bündeln von Lösungsideen	Zusammentragen und Zusammenfassen von Lösungsideen welche zuvor dokumentiert wurden		
				Erstellen von Modellen für die Begutachtung, Bewertung und Auswahl der Anordnungsprinzipien und technische Teillösungen	Hierbei stehen die Ansprüche der anschließenden Tätigkeit, sprich der Bewertung im Vordergrund	Modell der Bauteilanordnung	
				Erstellen von Modellen für die Begutachtung, Bewertung und Auswahl der Nutzungsführungsvarianten	Hierbei stehen die Ansprüche der anschließenden Tätigkeit, sprich der Bewertung im Vordergrund	Modelle der Interfacevarianten	
				Erstellen von Modellen für die Begutachtung, Bewertung und Auswahl der Formvarianten zur Vermittlung eines ersten Eindrucks		Zeichnungen in ein oder zwei Ansichten	
				Erstellen von Modellen für die Begutachtung, Bewertung und Auswahl der Formvarianten mit verschiedenen Details	Um die Entscheidung für die beteiligten Personen ohne spezifisches Fachwissen zu vereinfachen und die Varianten klarer zu präsentieren wurden basierend auf den Skizzen 3D Modelle erstellt und gerendert	Gerenderte 3D Modelle und Ansichten	
				Bewertung der Teilkonzepte	Entscheidung über die grundsätzliche Ausrichtung des Produkts hinsichtlich technischer Teilsysteme, der Anordnung von Bauteilen, der Interfacekonzepte sowie der Formensprache	Diskussion der Teillösungen und gemeinschaftliche Auswahl der weiterzuerfolgenden Varianten	An der Auswahl waren ausschließlich Ingenieure aus den Bereichen Elektrotechnik und Sensorik beteiligt
	Entwerfen	Gliedern in realisierbare Module	Erstellung eines Maßkonzepts des Produkts	Basierend auf den Entscheidungen der Teilkonzepte wird auf Basis der bereits definierten Technischen Komponenten bzw. des dafür vorgesehenen Raums ein Maßkonzept im Sinne der Hauptkomponenten erstellt	Zusammentragen aller Informationen aus Technik, Ergonomie und Design zur Ableitung des Platzbedarfs aller Komponenten Gestaltung des Maßkonzepts zur Ermittlung der Hauptmaße	Parallel zur Entwicklung der Ergonomie und Design wurden seitens der Konstruktion Teillösungen für die Technik und die Elektronik erarbeitet Das Maßkonzept ist die Grundlage für die weitere Entwicklung sowohl aller nutzerzentrierten und gestalterischen Aspekte als auch der Konstruktion, die Genauigkeit liegt hierbei im Millimeterbereich und soll zunächst einen Überblick über den ungefähren Bedarf liefern	Maßkonzept
				Aufteilung in Bereiche der Zuständigkeit	Die an der Entwicklung beteiligte Bereiche gliedern sich in Elektronik, Konstruktion Funktionsbaugruppen sowie Gehäuse und Nutzerschnittstellen	Definition der Bereiche und Festlegung der Schnittstellen	
Gestalten maßgebender Module 1/2		Erstellung von Entwürfen Gehäuse / Nutzerschnittstellen	Modellerstellung des Produkts basierend auf prinzipiellen Maßen der Grundbausteine	Definition der Eigenschaften der verschiedenen Entwürfe Generieren verschiedener Entwürfe und Lösungen durch Modelle Erstellung von gerenderten Modellen	Hierbei wurden die verschiedenen definierten Bereiche variiert Überprüfung der Wirkung mit gerenderten Modellen (höhere Detaillierung)	Definition der Entwürfe Entwürfe des Produkts Gerenderte Modelle	

Tabelle A1.1: Inhalte und Teilschritte der Projektanalyse – Projekt 1

Phase	Arbeitsabschnitt	Aktivität	Inhalt	Teilschritt (modellbezogene Teilschritte in grau markiert)	Ergänzende Beschreibung	Ergebnis		
Entwerfen	Gestalten maßgebender Module 2/2			Aufbereitung des Modells und der Umgebung für die virtuelle Darstellung und Analyse	Vorbereitung des Modells und der virtuellen Umgebung	Funktionsfähiges Modell und VR Umgebung		
				Darstellung und Analyse hinsichtlich Wirkung, Erreichbarkeit, Position und Größe	Ersten Abprüfen des aktuellen Stands bzw. Zwischenstands	Immersiones Modell		
				Anpassung des Modells auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den Renderings und VR Darstellung	Beispielsweise wurden Abstände, Bereiche für die Hände und weitere Details angepasst	Vollständig gestaltetes Modell der verschiedenen Entwürfe		
		Bewerten der Entwürfe			Aufbereitung der Modelle zur Visualisierung fotorealistischer Darstellungen	Erzeugung realitätsnaher Modelle zur abschließenden Bewertung mit vorläufigen Farben und Grafiken	vollständig aufbereitetes dreidimensionales Modell	
					Erstellung und Darstellung der Modelle in Form von Renderings zur Bewertung	Ableiten von Renderings auf Basis der zuvor vorgenommenen Einstellungen	Renderings als Abbildungen	
					Bewertung der Entwürfe und Auswahl	Diskussion der Entwürfe im Gremium, ausschließlich Ingenieure aus dem Bereich Elektronik und Sensorik	Entscheidung bezgl. Des weiterzuverfolgenden Entwurfs	
	Gestalten des gesamten Produktes Integrieren des gesamten Produktes	Konstruktion des ausgewählten Entwurfs	Basierend auf der Entwurfsentscheidung wird das Gesamtprodukt konstruiert. Dazu werden die zuvor aufgedienten Bereiche Konstruktion Innenleben, Gehäuse und Elektronik zusammengeführt	Finale Festlegung des Platzbedarfs der einzelnen Funktionsbaugruppen			Überarbeitetes Maßkonzept	
				Konstruktion des Gehäuses - von außen nach innen - mit allen Nutzerschnittstellen und Funktionsprinzipien	Die Gestaltung des Gehäuses und aller Nutzerschnittstellen erfolgt unter Einhaltung fertigungsgerechter Vorgaben für das Vakuumgießen und Berücksichtigung der Schnittstellen zu Elektronik und Innenleben	Ausdetailliertes Modell hinsichtlich Funktion, Gestalt und Ergonomie		
				Aufbereitung und Vorbereitung des Modells und Umgebung für VR	Zur Überprüfung von Positionierungen, Größenbereichen für die Hände und Zugänglichkeiten wurde das Modell in virtueller Umgebung betrachtet	Immersiones Modell		
				Ableiten von Teilmodellen zur Erstellung physischer Testmodell	Zur Überprüfung einzelner Funktionalitäten im Vorfeld wurden einzelne Bereiche abgeleitet und physisch hergestellt	Teilmodelle		
				Herstellung und Darstellung eines physischen Modells der Teilfunktionen	Umsetzung eines physischen Modells des Schiebers zur ergonomischen Überprüfung hinsichtlich Fingerfreiraum und testen den Funktionsprinzips der Auffangschale	physisches Modell von Teilfunktionen		
				Analyse und Test der physischen Modelle	Überprüfung einzelner Funktionalitäten anhand der physischen Modelle und Dokumentation der notwendigen Änderungen	Optimierungspunkte		
				Rückführung und Umsetzung/Gestaltung der Optimierungen	Die Optimierungspunkte wurden im Modell umgesetzt und dokumentiert	Optimiertes Modell		
				Zusammenführung der separat gestalteten Baugruppen Gehäuse, Elektronik und technisches Innenleben	Konstruktive Zusammenführung	Gesamtmodell		
				Analyse des Zusammengeführten Modells	Analyse und Diskussion von nötigen Anpassungen bei der Zusammenführung der einzelnen Baugruppen	Dokumentierte Änderungen		
				Umsetzung von Anpassungen aufgrund der Zusammenführung und Gestaltung der Schnittstellen	Konstruktive Umsetzung nötiger Anpassungen	Optimiertes Gesamtmodell		
				Ergonomische Analyse digital	Analyse des Gesamtprodukts mittels digitalem Menschmodell	Bewertung der Körperwinkel bei der Nutzung nach RULA		
				Bewertung des Gesamtprodukts	Abschließende Diskussion des Entwicklungsstandes, um die Freigabe für die Herstellung zu erzielen		Fotorealistische Aufbereitung des Modells für Präsentationszwecke	
	Ableiten von Renderings für Gefallensbewertung und Zwischenpräsentation						Renderings als Abbildungen	
Diskussion des Gesamtprodukts	Gemeinschaftliche Beurteilung des Produkts	Freigabe des Konstruktionsstandes für die Herstellung von vollfunktionsfähigen Evaluationsspendern						
Ausarbeiten	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben	Umsetzung des Gesamtprodukts	Für die weiteren Schritte (Evaluation) werden vollfunktionsfähige Produkte hergestellt und aufgebaut	Übermittlung der Konstruktionsdaten an Gehäusehersteller und Überprüfung hinsichtlich fertigungstechnischer Randbedingungen	Überprüfung von Wandstärken, Spiel zwischen beweglichen Teilen, etc. hinsichtlich des Herstellungsverfahrens	Anmerkungen für die Konstruktion		
				Überarbeitung auf Basis der Anmerkungen hinsichtlich Fertigung	Einarbeiten von Rückmeldungen bezüglich Spiels	Finale und freigegebene Konstruktionsdaten		
				Umsetzung der Konstruktionsdaten in physische Teile	Fertigung der Gehäuseteile im Vakuumguss durch Zulieferer	Physische Gehäuseteile		
				Zusammenbau des Produkts	Parallel wurden die weiteren Baugruppen (Elektronik, Sensorik, Innenleben) durch die beteiligten Bereiche gefertigt	Fertiges Produkt		
	Gestaltung der Piktogramme und Farbgebung	Zur Unterstützung der Nutzerführung werden für das Produkt Piktogramme bezüglich der richtigen Platzierung der Hände sowie die Funktionsweise erstellt		Festlegung der relevanten Schritte, der Positionen und des darzustellenden Funktionsprinzips	Auf Basis der Eingangsanalysen und des Pflichtenhefts werden die grundsätzlichen Vorgaben hinsichtlich Grafik zusammengetragen			
				Gestaltung verschiedener Konzepte zur Nutzerführung mittels Grafiken und Piktogrammen	Hinsichtlich der Vorgaben werden erste Überlegungen zu möglichen Umsetzungen ausgearbeitet und dokumentiert	Grafikvarianten		
				Bündelung und Auswahl der entstandenen Skizzen zu Gesamtkonzepten	Die Skizzen werden begutachtet, gebündelt und Gesamtkonzepte zusammengestellt			
				Umsetzung der Grafikkonzepte für die Bewertung und Auswahl	Dieses Gesamtkonzepte Grafik werden für die anschließende Bewertung durch die beteiligten Personen ausgearbeitet	Grafik Gesamtkonzepte		
				Fotorealistische Gestaltung des Gesamtprodukts mit Grafiken	Zur Verdeutlichung der Wirkung der Grafiken auf dem Produkt sind Gesamtdarstellungen notwendig	Modell mit Grafiken und Farbe		
				Herstellung des Produkts mit Piktogrammen für die Bewertung	Erstellung von Ausdrucken für die Begutachtung der Grafiken	Ausdrucke der Grafiken		
				Bewertung und Auswahl des Grafikkonzepts	Diskussion der verschiedenen Grafikkonzepte und Auswahl bzw. Definition des finalen Konzepts	Definition des finalen Grafikkonzepts		
				Einarbeitung und Umsetzung der finalen Grafiken	Anpassungen entsprechend der Diskussion wird eingearbeitet	Finale Grafiken		
				Umsetzung (physisch) der Grafiken	Herstellung der Grafiken zum Anbringen auf dem Produkt	Physische Grafiken		
				Endmontage	Letzter Arbeitsschritt zum Fertigstellen des Produkts	Zusammenbau mit Anbringen der Piktogramme		Fertige finale Produkte

Tabelle A1.1: Inhalte und Teilschritte der Projektanalyse – Projekt 1 (Fortsetzung)



Phase	Arbeitsabschnitt	Aktivität	Inhalt	Teilschritt (modellbezogene Teilschritte in grau markiert)	Ergänzende Beschreibung	Ergebnis	
Planen	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	Definition des Entwicklungsumfangs	Im Rahmen des Angebots wird der betrachtete Umfang des Projekts beschrieben und die einzelnen Teilschritte definiert → Projektbeschreibung	- Produktbeschreibung - Branchenbeschreibung - Entwicklungsumfang - Entwicklungsziel - beteiligte Projektpartner / Abteilungen		Angebot mit Projektbeschreibung - Konsumgut / handgeführtes Elektrogerät - Einzelprodukte und Produktsystem - Weiterentwicklung bestehender Geräte - Schwerpunkt sind Ergonomie / Interface - Schnittstellen zu weiteren Bereichen sind zu berücksichtigen (Recht, Konstruktion, Marketing, Design)	
		Anforderungen/Ranbedingungen festlegen	Definition von Freiheiten und Randbedingungen aus den Bereichen Recht, Marketing, Konstruktion Serie, Anwendung, Erprobung etc.	- Definition der Randbedingungen / Konstruktiven Freiheiten - Definition der Anwendungsfälle und Arbeitsweisen mit den Geräten - Festlegung der Zielkunden und deren Profil		Freiheitsgrade und Randbedingungen	
		Analyse der Ausgangsgeräte	Untersuchung der aktuellen Geräte hinsichtlich Ergonomie (Makro und Mikro) und funktionaler Aspekte aus Expertensicht sowohl mittels Anwender	Expertenanalyse		Bedienanalyse der relevanten Geräte durch Experten hinsichtlich Makro- und Mikroergonomie als Vorbereitung für die weiteren Projektschritte	Stärken- Schwächen-Profil und Optimierungspotentiale
				Analyse Erstkontakt Anwendungsfallanalyse		Erstkontakts von realen Anwendern mit den Geräten Untersuchung der Arbeit mit den Geräten von realen Anwendern	
Erstellung eines Designpflichtenheft	Definition der Mensch-Produkt-Anforderungen basierend aus den Erkenntnissen der Analyse sowie auf Vorgaben aus Literatur, Forschung und Praxis	Zusammenstellen der Anforderungen			Designpflichtenheft		
Konzipieren	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	Gliedern des Betrachtungsumfangs in Teilaspekte	Die für das Bedienkonzepte relevanten Inhalte werden in Teilfunktionen aufgeteilt - Positionierung der Hand - Greif- und Bewegungsarten - Funktionen (Ein/Aus, Sperrtaster, etc.) - Betätigung	Definition der Teilbereiche		Teilfunktionen	
				Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	Entwickeln von Lösungsideen und Konzepten für Produktgruppe 1	Auf Basis der Erkenntnisse aus der Analyse werden Lösungen für die Teilfunktionen gesucht und zu schlüssigen Konzepten zusammengeführt	Recherche zu grundsätzlichen Lösungsmöglichkeiten für die definierten Teilfunktionen Brainstorming zu Lösungsmöglichkeiten Generieren und Gestalten von Lösungsideen für die Positionierung von Stellteilen, die Betätigungsart, die Positionierung der Hand etc. Diskussion, Bündelung und Auswahl von Lösungsideen für die Zusammenstellen von Gesamtlösungsvarianten und Dokumentation von Optimierungen Gestalten und Generieren von Gesamtlösungen mit Einarbeiten von Optimierungen
	Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts	Vorbereitung der Bewertung		Festlegung der Lösungskonzepte			
				Gestaltung und Erstellung von Modellen für die Begutachtung und Bewertung der Konzeptideen		Auf Basis dieser Modelle soll eine erste Einschätzung hinsichtlich Ergonomischer Aspekte (Makro- und Mikroergonomie) getroffen werden	Modelle des Bedienkonzepts hinsichtlich Anordnung und Gestaltung von Griffstellen und Stellteilen
				Digitalisierung der gestalteten Modelle für weitere Entwicklungsschritte physische Darstellung der gestalteten Modelle als Diskussionsgrundlage		Für die Bewertung und Verteilung der Konzepte sind digitale Versionen notwendig Großformatige Ausdrucke zu besserer Visualisierung und Vergleichbarkeit der Konzeptvarianten	digitale Abbildungen Poster
	Bewertung der Konzepte	Bewertung der Konzepte sowohl durch Experten im Bereich Ergonomie als auch durch alle beteiligten Unternehmensbereiche: Vorentwicklung, Serienentwicklung, Recht, Marketing, Produktmanagement, Erprobung	Bewertung der Konzepte sowohl durch Experten im Bereich Ergonomie als auch durch alle beteiligten Unternehmensbereiche: Vorentwicklung, Serienentwicklung, Recht, Marketing, Produktmanagement, Erprobung	Bewertung der Konzepte aus Expertensicht bzgl. einer möglichen ergonomischen Wertigkeit		Hierbei wird die im besten Fall realisierbare Ergonomie des Konzepts aus Sicht von Experten bewertet und dient als Grundlage für die Konzeptentscheidung	Konzeptbewertung
				Präsentation / Diskussion der Konzepte mit Bewertung und Auswahl eines Vorzugskonzepts		Die Auswahl des Vorzugskonzepts erfolgt auf Basis der erstellten Skizzen und Ergonomie-Bewertung durch beteiligte Bereiche (Marketing, Produktmanagement, Serie, Vorentwicklung, Recht)	Konzeptentscheid
			Entscheid der Vorzugskonzepte für die weitere Detaillierung		Aufgrund interner Entscheidungen werden für die weitere Betrachtung mehrere Konzepte in zwei Varianten weiterverfolgt		
Entwerfen	Gliedern in realisierbare Module	Abstimmung und Definition der Module und Schnittstellen	Aufteilung in Bedienkonzept, Konstruktion und Design			Betrachtungsumfang	
				Gestalten maßgebender Module	Gestaltung der Bedienkonzepte	Basierend auf der getroffenen Konzeptauswahl werden die Konzepte ausdetailliert und für die Konstruktion vorbereitet	Recherche zu maßlichen Griffgestaltung, Handmaße, Sinnfälligkeit, etc. Gestaltung und Erstellung von Modellen zur Definition wesentlicher ergonomischer Maße der Erreichbarkeit → Makroergonomie Überprüfung der Gestaltung mit Grenzperzentilpersonen Erfassung wesentlicher Maße des Claymodells
				Abgleich erfasster Maße mit Vorgaben aus Literatur und Praxis	Ermittlung von Optimierungen		
				Optimierung und Weitergestaltung des erstellten Modells anhand der Überprüfungen und Ergänzung von Form	iteratives Vorgehen in mehreren Wiederholungen → Erfassen - Optimieren	Optimiertes Claymodell	
				Erstellung von Maßzeichnungen der Konzepte zur Umsetzung digitaler 3D Modelle	Nach einer weiteren Erfassung der Maße mit gleichen Werkzeugen werden maßstäbliche Zeichnungen für die Konstruktion erstellt	Technische Zeichnung	

Tabelle A1.2: Inhalte und Teilschritte der Projektanalyse – Projekt 2

Phase	Arbeitsabschnitt	Aktivität	Inhalt	Teilschritt (modellbezogene Teilschritte in grau markiert)	Ergänzende Beschreibung	Ergebnis			
Entwerfen	Gestalten maßgebender Module	Konzeptergänzung Produktgruppe 1	Aufgrund interner Beweggründe wird das bestehende Gerät auf ergonomische Optimierung bei gleichbleibender konstruktiver Randbedingungen untersucht und umgesetzt	Festlegung der Freiheitsgrade der Stellteile und Griffstellen		Konzept eines optimierten Bedienkonzepts des Serienprodukts Maßkonzept Stellteilvarianten Numerische Steuerungsinformation für die AF-Anlage physische Modelle der Stellteile Maße des physischen Modells Optimiertes Claymodell Technische Zeichnung			
				Gestaltung und Entwicklung eines zusätzlichen optimierten Serienkonzepts					
				Gestaltung und Erstellung von Modellen zur Definition wesentlicher ergonomischer Maße der Erreichbarkeit → Makroergonomie	Auf Basis der Zeichnungen der ausgewählten Konzepte werden erste maßstäbliche Modelle zur Festlegung und Definition der Maße erstellt				
				Gestalten von Stellteilen in unterschiedlichen Varianten zur Ergänzung der Modelle → Formgebung	Für bessere Haptik und Anpassbarkeit wurden digital Modelle der Stellteile erstellt, um in das physische Modell eingebunden zu werden				
				Transfer der Stellteile Modelle zur physischen Umsetzung					
				Umsetzung der Stellteilmodelle in physische Modelle	Die Modelle werden physisch dargestellt und in das bereits vorhandenen Modell eingesetzt				
				Überprüfung der Gestaltung mit Grenzperzentilpersonen	Schnelle Überprüfung der Gestalt und Dokumentation notwendiger Anpassungen				
				Erfassung wesentlicher Maße des Claymodells					
				Abgleich erfasster Maße mit Vorgaben aus Literatur und Praxis	Ermittlung von Optimierungen				
				Optimierung und Weitergestaltung des erstellten Modells anhand der Überprüfungen und Ergänzung von Form	Iteratives Vorgehen in mehreren Wiederholungen --> Erfassen - Optimieren				
				Erstellung von Maßzeichnungen der Konzepte zur Umsetzung digitaler 3D Modelle	Nach einer weiteren Erfassung der Maße mit gleichen Werkzeugen werden maßstäbliche Zeichnungen für die Konstruktion erstellt				
				Digitalisierung der aufgebauten Konzepte zur weiteren Analyse	Aufgrund unterschiedlicher Ergebnisse bei der Evaluation bzgl. Form und Erreichbarkeit → Untersuchung physischer Prototypen		digitale Modelle der physischen Prototypen		
				Konzeptoptimierung Griffstelle Produktgruppe 1	Auf Basis der Umgesetzten Konzepte und den Erkenntnissen der Studie werden die Konzepte untersucht und angepasst		Ermittlung von Abweichungen mittels Soll-/Ist-Vergleich	Überprüfung der Nutzerrückmeldungen bei der Evaluationsstudie	Abweichungen zwischen den Modellen
							Gestaltung optimierter Modelle bezüglich Griffgestaltung und Stellteilpositionierung und -form	Aufgrund unterschiedlichster Stände / Varianten im physischen Modell wird ein neues optimiertes Konzept erstellt in verschiedenen Varianten	überarbeitetes Konzept
	Darstellung der Abweichungen maßstabsgetreu	Zur Rückführung der Änderungen ins Modell werden die Anpassungen im Verlauf der Form dargestellt	Konturen der Griff und Stellteilform						
	Umsetzung der Änderungen am 3D Modell zur Visualisierung	Zur Unterstützung der Kommunikation oder Verbesserung der Umsetzung wird das Modell in 3D auf Basis des Scans angepasst	Einfaches Modell des Griffs						
	Übertragung Bedienkonzept auf weiteres Gerät Produktgruppe 2	Überprüfung der Möglichkeit zur Adaption des bisherigen Konzepts auf ein weiteres Gerät und Vornehmen notwendiger Anpassungen	Überprüfung der Arbeitsweisen und Hand-Arm-Stellungen	Aus Basis der Erkenntnisse aus der ersten Analyse wird das Konzept auf eine mögliche Übertragung überprüft	Übertragbarkeit und notwendige Anpassungen				
			Gestaltung der formalen Integration des Bedienkonzepts auf das neue Gerät	Gestaltung von Varianten, wie das Griffteil mit Stellteilen an das neue Gerät angebunden werden kann	Gestaltungsvarianten				
			Digitalisierung der aufgebauten Konzepte zur weiteren Analyse	Da in der Konstruktion nicht vorhergesehene Varianten erstellt wurden, müssen diese überprüft und Kombinationen erstellt werden	Digitale Modelle der physischen Prototypen				
			Überprüfung und Ermittlung von Abweichungen		Abweichungen zwischen den Modellen				
			Gestaltung und Zusammenführung von zwei Varianten	Die verschiedenen Varianten hinsichtlich Griffgestaltung und Stellteilvarianten müssen kombiniert und überprüft werden	Kombiniertes Modell von zwei Varianten				
			Aufbereitung bzw. Vorbereitung der Daten für die physische Herstellung	Die digitale Gestaltung muss in ein physisches Modell zur Überprüfung dargestellt werden	Numerische Steuerungsinformation für die AF-Anlage				
			Physische Darstellung der Modelle zur Überprüfung und Evaluation	Herstellung der Teile (Griff und Stellteil) mittels AF	physisches Modell				
			Evaluation der Modelle mit Grenzperzentilen		Optimierungspunkte				
			Gestaltung optimierter Modelle bezüglich Griffgestaltung und Stellteilpositionierung und -form	Digitale Modellerstellung 3D für einfachere Anpassung von verbesserten Konzepten	digitales Modell				
			Aufbereitung der Daten für die physische Herstellung		Numerische Steuerungsinformation für die AF-Anlage				
			Physische Darstellung der Modelle zur Überprüfung und Evaluation	Schnelle physische Darstellung der angepassten Modelle zur Überprüfung → Iteratives Vorgehen in mehreren Schleifen	physisches Modell				
			Aufbereitung der digitalen Modelle für die konstruktive Umsetzung	Aufbau eines Flächenmodells mittels RE zur Verwendung im CAD	Universelles Datenmodell				
			Konzeptoptimierung Griffstelle alle Baureihen	Überprüfung und Anpassung der Konstruktion auf Basis neuer Erkenntnisse aus Expertenbegutachtung und Evaluation	Digitalisierung der aufgebauten Konzepte zur weiteren Analyse	Da in der Konstruktion nicht vorhergesehene Varianten erstellt wurden, müssen diese überprüft und Kombinationen erstellt werden	Digitale Modelle der physischen Prototypen		
					Überprüfung und Ermittlung von Abweichungen		Abweichungen zwischen den Modellen		
	Gestaltung optimierter Modelle bezüglich Griffgestaltung und Stellteilpositionierung und -form	Anpassung der erstellen digitalen Modelle zur Überführung der Anpassungen			digitales Modell				
	Aufbereitung der Daten für die physische Herstellung				Numerische Steuerungsinformation für die AF-Anlage				
	Physische Darstellung der Modelle zur Überprüfung und Evaluation	Schnelle physische Darstellung der angepassten Modelle zur Überprüfung → Iteratives Vorgehen in mehreren Schleifen			Physisches Modell				
	Evaluation der Modelle mit Grenzperzentilen				Optimierungspunkte				
	Aufbereitung der digitalen Modelle für die konstruktive Umsetzung	Aufbau eines Flächenmodells mittels RE zur Verwendung im CAD			Universelles Datenmodell				
	Übertrag des Bedienkonzepts auf weitere Geräte Produktgruppe 3	Überprüfung der Möglichkeit zur Adaption des bisherigen Konzepts auf weitere Spezial-Geräte und Vornehmen notwendiger Anpassungen			Überprüfung der Arbeitsweisen und Hand-Arm-Stellungen	Aus Basis der Erkenntnisse aus der ersten Analyse wird das Konzept auf eine mögliche Übertragung überprüft	Übertragbarkeit und notwendige Anpassungen		
					Gestaltung und Anpassung der Modelle bezüglich Griffgestaltung und Stellteilpositionierung und -form	Anpassung der erstellen digitalen Modelle zur Überführung der Anpassungen	Digitales Modell		
					Aufbereitung der Daten für die physische Herstellung		Numerische Steuerungsinformation für die AF-Anlage		
					Physische Darstellung der Modelle zur Überprüfung und Evaluation	Schnelle physische Darstellung der angepassten Modelle zur Überprüfung → Iteratives Vorgehen in mehreren Schleifen	physisches Modell		
					Evaluation der Modelle mit Grenzperzentilen		Optimierungspunkte		
					Aufbereitung der digitalen Modelle für die konstruktive Umsetzung	Aufbau eines Flächenmodells mittels RE zur Verwendung im CAD	universelles Datenmodell		

Tabelle A1.2: Inhalte und Teilschritte der Projektanalyse – Projekt 2 (Fortsetzung)

Phase	Arbeitsabschnitt	Aktivität	Inhalt	Teilschritt (modellbezogene Teilschritte in grau markiert)	Ergänzende Beschreibung	Ergebnis
Entwerfen	Gestalten des gesamten Produktes Integrieren des gesamten Produkts	Konstruktion des Gesamtgeräts in verschiedenen Varianten je für Produktgruppe 1 Produktgruppe 2 Produktgruppe 3 Produktgruppe 4 Produktgruppe 5	Die konstruktive Umsetzung der Gesamtgeräte auf Basis der ausgewählten Konzepte unter Berücksichtigung des Teilbereichs Bedienkonzept erfolgt durch den Auftraggeber	Gestaltung und Umsetzung der Konstruktion	Durchgeführt durch Dienstleister	Ausdetaillierte CAD Konstruktion des Geräts
Ausarbeiten	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben	Farbgebung des Entwurfs Produktgruppe 1	Umsetzung der Farbgebung aus den Konzepten für die Prototypen	Gestaltung der Farbgebung	Farbgebung zur Erhöhung der Eindeutigkeit und Verbesserung der Sinnfälligkeit	Farbgestaltung
		Umsetzung der Gesamtentwürfe Produktgruppe 1	Die ausgearbeiteten, konstruierten und in mehreren Iterationen optimierten Konzepte werden physisch und voll funktionsfähig aufgebaut, um evaluiert zu werden	Aufbereitung der Konstruktionsdaten für die Herstellung der Gehäuse- und Stellteile Umsetzung der digitalen Modelle in physische Modelle Aufbereitung, Zusammenbau und Fertigstellung der Prototypen		Daten für Teileherstellung Fertiger Prototyp
		Konzeptevaluation Produktgruppe 1	Die aufgebauten Konzepte werden in einer Zielkundenstudie unter anwendungsnahen Bedingungen durch einen Dienstleister erprobt sowie durch Experten bzgl. Ergonomie bewertet	Ermittlung einer Ergonomischen Wertigkeit Durchführung der Evaluation mit den ausgearbeiteten Prototypen Ableiten von notwendigen Optimierungen Auswahl der weiterzuerfolgenden Vorzugskonzepte	Unter der Annahme der bestmöglichen Umsetzung werden die Potentiale der Konzepte hinsichtlich Ergonomie eingeschätzt	Analyse und Bewertung der Konzepte
		Farbgebung Entwurfoptimierung Produktgruppe 1/2	Besonderer Fokus lag hierbei auf der Sicherheitsfunktion	Farbgestaltung der Modelle Farbgestaltung der Sicherheitsfunktion	Zur Verbesserung der Sinnfälligkeit und Usability Umsetzung der Sicherheitsfunktion	eingefärbtes Modell Farbgestaltung der Sicherheitsfunktion
		Umsetzung der Gesamtentwürfe Produktgruppe 2	Die ausgearbeiteten, konstruierten und in mehreren Iterationen optimierten Konzepte werden physisch und voll funktionsfähig aufgebaut, um evaluiert zu werden	Aufbereitung der Konstruktionsdaten für die Herstellung der Gehäuse- und Stellteile Umsetzung der digitalen Modelle in physische Modelle Aufbereitung, Zusammenbau und Fertigstellung der Prototypen		Daten für Teileherstellung Fertiger Prototyp
		Konzeptevaluation Produktgruppe 2	Die aufgebauten Konzepte werden in einer Zielkundenstudie unter Anwendungsnahen Bedingungen durch einen Dienstleister erprobt und durch Experten bzgl. Ergonomie bewertet	Durchführung der Evaluation mit den ausgearbeiteten Prototypen Ableiten von notwendigen Optimierungen		Analyse und Bewertung der Konzepte
		Parameterbeschreibung Produktgruppe 1/2/3	Für zukünftige Entwicklungen und Anpassungen werden die relevanten Erkenntnisse zur Gestaltung des Bedienkonzepts in eine Parameterbeschreibung überführt, die alle notwendigen Maße zur Gestaltung beinhaltet	Erstellung von Maßzeichnungen der Konzepte Dokumentation und Beschreibung der verschiedenen Konzepte und deren Einsatzbereich auf Basis der Zeichnungen		Maßzeichnung
		Umsetzung der Gesamtentwürfe Produktgruppe 3	Die ausgearbeiteten, konstruierten und in mehreren Iterationen optimierten Konzepte werden physisch und voll funktionsfähig aufgebaut, um evaluiert zu werden	Aufbereitung der Konstruktionsdaten für die Herstellung der Gehäuse- und Stellteile Umsetzung der digitalen Modelle in physische Modelle Aufbereitung, Zusammenbau und Fertigstellung der Prototypen		Daten für Teileherstellung Fertiger Prototyp
		Konzeptevaluation Produktgruppe 3	Die aufgebauten Konzepte werden in einer Zielkundenstudie unter Anwendungsnahen Bedingungen durch einen Dienstleister erprobt und durch Experten bzgl. Ergonomie bewertet	Durchführung der Evaluation mit den ausgearbeiteten Prototypen Ableiten von notwendigen Optimierungen		Analyse und Bewertung der Konzepte
		Umsetzung der Gesamtentwürfe Produktgruppe 4	Die ausgearbeiteten, konstruierten und in mehreren Iterationen optimierten Konzepte werden physisch und voll funktionsfähig aufgebaut, um evaluiert zu werden	Aufbereitung der Konstruktionsdaten für die Herstellung der Gehäuse- und Stellteile Umsetzung der digitalen Modelle in physische Modelle Aufbereitung, Zusammenbau und Fertigstellung der Prototypen		Daten für Teileherstellung fertiger Prototyp
		Konzeptevaluation Produktgruppe 4	Die aufgebauten Konzepte werden in einer Zielkundenstudie unter Anwendungsnahen Bedingungen durch einen Dienstleister erprobt und durch Experten bzgl. Ergonomie bewertet	Durchführung der Evaluation mit den ausgearbeiteten Prototypen Ableiten von notwendigen Optimierungen		Analyse und Bewertung der Konzepte
		Parameterbeschreibung Produktgruppe 1/2/3/4	Für zukünftige Entwicklungen und Anpassungen werden die relevanten Erkenntnisse zur Gestaltung des Bedienkonzepts in eine Parameterbeschreibung überführt, die alle notwendigen Maße zur Gestaltung beinhaltet	Erweiterung der Maßzeichnungen der Konzepte Ergänzung der Dokumentation und Beschreibung der verschiedenen Konzepte und deren Einsatzbereich auf Basis der Zeichnungen	Ergänzung und Aktualisierung der Parameterbeschreibung bzw. Erneuerung der Maßzeichnungen	Maßzeichnung
		Umsetzung der Gesamtentwürfe Produktgruppe 5	Die ausgearbeiteten, konstruierten und in mehreren Iterationen optimierten Konzepte werden physisch und voll funktionsfähig aufgebaut, um evaluiert zu werden	Aufbereitung der Konstruktionsdaten für die Herstellung der Gehäuse- und Stellteile Umsetzung der digitalen Modelle in physische Modelle Aufbereitung, Zusammenbau und Fertigstellung der Prototypen		Daten für Teileherstellung fertiger Prototyp
		Konzeptevaluation Produktgruppe 5	Die aufgebauten Konzepte werden in einer Zielkundenstudie unter Anwendungsnahen Bedingungen durch einen Dienstleister erprobt und durch Experten bzgl. Ergonomie bewertet	Durchführung der Evaluation mit den ausgearbeiteten Prototypen Abschließende Beurteilung	Ergonomische Einschätzung aus Expertensicht	Analyse und Bewertung der Konzepte
		Parameterbeschreibung Produktgruppe 1/2/3/4/5	Für zukünftige Entwicklungen und Anpassungen werden die relevanten Erkenntnisse zur Gestaltung des Bedienkonzepts in eine Parameterbeschreibung überführt, die alle notwendigen Maße zur Gestaltung beinhaltet	Erweiterung der Maßzeichnungen der Konzepte Ergänzung der Dokumentation und Beschreibung der verschiedenen Konzepte und deren Einsatzbereich auf Basis der Zeichnungen	Ergänzung und Aktualisierung der Parameterbeschreibung bzw. Erneuerung der Maßzeichnungen	Maßzeichnung

Tabelle A1.2: Inhalte und Teilschritte der Projektanalyse – Projekt 2 (Fortsetzung)



Phase	Arbeitsabschnitt	Aktivität	Inhalt	Teilschritt (modellbezogene Teilschritte in grau markiert)	Ergänzende Beschreibung	Ergebnis	
Planen	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	Definition des Entwicklungsumfangs	Im Rahmen des Angebots wird der betrachtete Umfang des Projekts beschrieben und die einzelnen Teilschritte definiert → Projektbeschreibung	- Produktbeschreibung - Branchenbeschreibung - Entwicklungsumfang - Entwicklungsziel - beteiligte Projektpartner / Abteilungen		Angebot mit Projektbeschreibung - Konsumgut / handgeführtes Elektrogerät - Einzelprodukte - Weiterentwicklung bestehendes Gerät, aber neues Energiekonzept - Schwerpunkt sind Ergonomie - Schnittstellen zu weiteren Bereichen sind zu berücksichtigen (Konstruktion, Produktmanagement, Design)	
		Analyse der Ausgangsgeräte	Untersuchung der aktuellen Geräte hinsichtlich Ergonomie (Makro und Mikro) und funktionaler Aspekte aus Expertensicht sowohl mittels Anwender	Expertenworkshop mit Funktionsanalyse Anwendungsfall- und Ergonomieanalyse Analyse Funktionswechsel	Analyse der relevanten Geräte durch Experten hinsichtlich Makro- und Mikroergonomie als Vorbereitung für die weiteren Projektschritte Untersuchung von Anwendern mit den Geräten unter Realbedingungen mit Fokus auf der Makroergonomie Besonderer Fokus im Projekt war der Wechsel der Funktionsweise des Geräts und wurde in einer separaten Analyse untersucht hinsichtlich Bedienschritte, Verständlichkeit und Zeit	Ersteindruck und Vorwissen für weitere Studien Use Cases, Stärken- Schwächen-Profil und Optimierungspotentiale Use Cases, Stärken- Schwächen-Profil und Optimierungspotentiale	
	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen	Gliedern des Betrachtungsumfangs in Teilaspekte	Die für das Ergonomiekonzept relevanten Teilaspekte werden ermittelt und definiert sowie Schnittstellen zu weiteren Bereichen definiert	Ermittlung und Definition der Teilaspekte	Teilbereiche - Funktionswechsel - Aufbau - Griffanordnung - Tragesystem & Fangsack		
				Diskussion und Festlegung der Teilbereiche und Schnittstellen			
Konzipieren	Erneuerung - Gliedern des Teilbereichs Funktionswechsel in Teilfunktionen	Die bereits entwickelten Konzepte des Funktionswechsels werden erneut grundlegend betrachtet, um auf einen gleichen Entwicklungsstand wie die weiteren Bereiche gebracht zu werden	Festlegung der Teilaspekt des Funktionswechsels	Teilbereiche - Verbindungssystem - Orientierung - Montage(zustand) - Rohrquerschnitt		Teilfunktionen des Funktionswechsels	
			Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	Entwicklung von Lösungsideen	Auf Basis der Erkenntnisse aus der Analyse werden Lösungen für die Teilfunktionen gesucht	Recherche zu grundsätzlichen Lösungsmöglichkeiten für die definierten Teilfunktionen Brainstorming zu Lösungsmöglichkeiten Generieren und Gestalten von Lösungsideen für die Anordnung von Baugruppen, Fangsackanbindung und Funktionswechsel Diskussion, Bündelung und Auswahl von Lösungsideen für die Zusammenstellen von Gesamtlösungsvarianten und Dokumentation von Optimierungen Erstellung eines Modells zur Überprüfung ergonomischer Maße und Festlegung relevanter Maße Gestalten und Generieren von Gesamtlösungen mit Einarbeiten von Optimierungen Aufbau und Gestaltung von Aufbaumodellen zur Überprüfung grundsätzlicher Bauteil- und Griffanordnungen	Bündelung von Konzepten Zur Einhaltung von Komfortwinkeln wurde zur Festlegung relevanter Maße bzw. Verstellbereiche ein vereinfachtes Modell erstellt Umsetzen von Gesamtlösungen für die Teilfunktionen → Iteratives Vorgehen Auf Basis realer Geräte werden durch Anbringung zusätzlicher Teile Aufbaumodelle gestaltet, anhand derer erste Handlingversuche unternommen werden können
	Erneuerung - Entwickeln von Teillösungen für den Teilaspekt Funktionswechsel	Unter Berücksichtigung der bereits gefunden Teillösungen werden hinsichtlich der neuen Einteilungen Lösungen in einem morphologischen Kasten zusammengetragen und entwickelt	Erstellung eines Morphologischen Kastens und sammeln und gestalten von Lösungsideen				Lösungsideen
			Auswahl und Festlegung von sinnfälligen Gesamtkonzepten				Festlegung Gesamtkonzepte
	Bewerten und Auswählen des Lösungskonzepts	Vorbereitung der Bewertung		Festlegung der Lösungskonzepte			
				Gestaltung und Erstellung von Modellen für die Begutachtung und Bewertung der Konzeptideen	Auf Basis dieser Modelle soll eine erste Einschätzung hinsichtlich Makroergonomischer Aspekte und Funktionsweisen getroffen werden	Modelle des Ergonomiekonzepts und des Aufbaus	
				Digitalisierung der gestalteten Modelle für weitere Entwicklungsschritte	Für die Bewertung und Verteilung der Konzepte sind digitale Versionen notwendig	Digitale Abbildungen	
				physische Darstellung der gestalteten Modelle als Diskussionsgrundlage	Großformatige Ausdrucke zu besserer Visualisierung und Vergleichbarkeit der Konzeptvarianten	Poster	
	Bewertung der Konzepte	Bewertung der Konzepte sowohl durch Experten im Bereich Ergonomie als auch durch alle beteiligten Unternehmensbereiche: Vorentwicklung, Serienentwicklung, Produktmanagement, Erprobung	Bewertung der Konzepte aus Expertensicht bzgl. einer möglichen ergonomischen Wertigkeit	Hierbei wird die im besten Fall realisierbare Ergonomie des Konzepts aus Sicht von Experten bewertet und dient als Grundlage für die Konzeptentscheidung	Konzeptbewertung		
			Präsentation / Diskussion der Konzepte mit Bewertung und Auswahl eines Vorzugskonzepts	Die Auswahl des Vorzugskonzepts erfolgt auf Basis der erstellten Skizzen und Ergonomie-Bewertung durch beteiligte Bereiche (Marketing, Produktmanagement, Serie, Vorentwicklung, Recht)	Konzeptentscheid		
Entscheid der Vorzugskonzepte für die weitere Detaillierung			Aufgrund interner Entscheidungen werden für die weitere Betrachtung mehrere Konzepte in zwei Varianten weiterverfolgt				
Entwerfen	Gliedern in realisierbare Module	Abstimmung und Definition der Module und Schnittstellen	Festlegung der zu gestaltenden Bereiche - Konstruktion Technik Antrieb - Konstruktion Technik Lüfter - Griffe und Anordnung - Akku			Modulfestlegung	

Tabelle A1.3: Inhalte und Teilschritte der Projektanalyse – Projekt 3

Phase	Arbeitsabschnitt	Aktivität	Inhalt	Teilschritt (modellbezogene Teilschritte in grau markiert)	Ergänzende Beschreibung	Ergebnis		
Entwerfen	Gestalten maßgebender Module	Gestaltung der Griffanordnung und Akkuposition	Basierend auf der Konzeptauswahl wird nun bei gegebenem Aufbau die Positionierung und Gestaltung der Griffe und Akkupositionierung vorgenommen	Sammeln und Gestalten von Lösungsideen zur Anordnung von Griffpositionen und Akku	Unter der Zielsetzung der Ergonomieoptimierung (Makro) werden bei gegebener Blas/Saug-Konfiguration Gestaltungslösungen ermittelt	Lösungsmöglichkeiten		
				Diskussion und Auswahl der relevanten Lösungen		Vergleichsmöglichkeit der Modelle		
				Gestalten von anpassbaren Modellen zur Gegenüberstellung und Bewertung	Entscheidendes Kriterium hinsichtlich Handling ist die Position der Hände über Schwerpunkt und Blasachse, die mithilfe der Modelle überprüft werden sollen			
				Darstellen von physischen Griffmodellen zur Überprüfung mit Grenzperzentilen	Zur schnellen Überprüfung wurden einfache physische 2D Modelle abgeleitet	Physisches Modell zur Überprüfung		
				Überprüfung und Diskussion der physischen Modelle				
				Einarbeitung und Weitergestaltung der Griffanordnungen	Die zuvor erstellen digitalen Modelle werden um neue Erkenntnisse ergänzt und weitergestaltet → iteratives Vorgehen	Angepasstes digitales Modell		
				Aufbereitung der Daten für die Weitergabe an die Konstruktion	Ableiten von Konstruktionszeichnungen für die CAD Modellerstellung	CAD-lesbare Datei		
				Bewertung der Varianten	Digitale Ergonomieüberprüfung der Modelle	Aufbereitung und Vorbereitung der Modelle und der Manikin	Die Analyse erfolgt in Catia, dafür ist eine Aufbereitung notwendig	Fertiges Modell und Manikin für die Ergonomieanalyse
						Durchführung der Analyse	Mithilfe des Human Builders in Catia werden die Konzepte in den unterschiedlichen Modi mit den Grenzperzentilen überprüft	
						Auswertung und Ableitung von Optimierungen sowie Auswahl des Favoriten	Basierend auf der Ergonomieanalyse wird eine Auswahl für das Vorzugskonzept getroffen	Vorzugskonzept
	Detaillierung und Gestaltung des Vorzugskonzepts	Weiterentwicklung der Griffanordnung auf Basis der Analyse und mithilfe des CAD Modells	Gestaltung / Definition der Griffanordnungen am digitalen Modell	Grobe Ausgestaltung der Griffposition und -verlauf ohne Griffform	Griffgestaltung			
			Überprüfung mittels digitalem Mensch-Modell	Begleitende Überprüfung der Gestaltung mit Human Builder	Optimierungsansätze			
			Einarbeiten und Gestalten der Erkenntnisse	Einarbeitung von Erkenntnissen und Weitergestaltung	Modell der optimierten Griffgestalt			
			Aufbereiten und Ableiten der Daten für die Weiterkonstruktion	Ableiten von allgemeinen Datenformaten zur Konstruktion	Universell lesbares Modell der Griffgestalt			
	Erneuerung - Gestaltung des Funktionswechsels	Auf Basis der mit dem morphologischen Kasten erstellten Gesamtkonzepte werden diese nun gestaltet und detailliert	Suche nach Lösungsprinzipien im Kontext des Gesamtkonzepts	Unter Berücksichtigung sowohl konstruktiver als auch mikroergonomischer Aspekte werden Lösungen für die Vorgänge beim Funktionswechsel gesucht und gestaltet	Einfache Prinzipmodelle			
			Gestaltung von Lösungsideen für die Gesamtkonzepte	Die Lösungsansätze werden detailliert und dokumentiert	Prinzipmodelle (gesamtheitlich)			
			Überführung der Modelle in digitale Umgebung	Für die Aufbereitung und Bewertung werden diese in ein digitales Modell überführt und ausgestaltet				
			Detaillierung der Konzepte für anschließende Bewertung	Ausgestaltung der Konzepte	Detaillierte digitale Modelle			
	Erneuerung - Bewertung der Konzepte des Funktionswechsels	Für die Auswahl und Überführung der Konzepte in das Gesamtsystem erfolgt eine Bewertung hinsichtlich technischer und ergonomischer Aspekte	Durchführung der Bewertung hinsichtlich der aufgestellten Kriterien aus Expertensicht		Technische Wertigkeit der Konzepte			
			Diskussion und Bewertung der Konzepte mit Beteiligung anderer Bereiche (Serie, Vorentwicklung, Produktmanagement, Erprobung)		Konzeptauswahl			
	Gestaltung des Vorzugskonzepts	Fortführung des Projekts - nachdem mehrere Varianten getestet und finale Randbedingungen festgelegt wurden, kann das Griffkonzept detailliert werden	Anpassung der bisherigen Griffmodelle auf die aktuellen Randbedingungen	Die digitalen Modelle werden auf die neuen Randbedingungen angepasst und überprüft	Maßkonzept			
			Gestaltung und Optimierung des Modells hinsichtlich Schwerpunktes und Griffanordnung	Der drehbare Griff muss hinsichtlich Körperwinkel für beide Modi angepasst werden	Aufbau und Positionierung der Griffpositionen			
			Aufbereiten der Daten für die Konstruktion	Datentransfer zur Übertragung in CAD Umgebung	CAD lesbares Datenmodell			
	Formale Gestaltung des Funktionswechsels	Zur Verdeutlichung des drehbaren Griffs werden formale Lösungen erarbeitet, um die Verständlichkeit und Intuitivität zu steigern	Gestaltung von Lösungsideen für die Kennzeichnung des Drehbaren Griffs	Sammlung von Ideen	Lösungsansätze			
			Gestaltung und Aufbereitung der Ideen zur Darstellung des Lösungskonzepts		Lösungskonzept			
	Weiterentwicklung der Vorzugskonzepts	Nach weiteren Schleifen wird die Griffposition weiter optimiert	Gestaltung und Anpassung des Gesamtmodells hinsichtlich der zweiten Griffposition	Aufbau zweier Varianten zur Möglichkeit der Griffanbindung	Lösungsmodelle			
			Überprüfung der Modelle mittels digitaler Menschmodelle	Bewertung der Greifpositionen mit Grenzperzentilen	Bewertung der Konzepte			
			Anpassung der Greifstellen im Gesamtmodell	Auf Basis der Erkenntnisse aus der digitalen Analyse	optimiertes Lösungsmodell			
Aufbereitung der Daten für die Weitergabe an die Konstruktion			Datentransfer in universelles Modellformat	CAD Modell zur Weitergabe				
Gestalten des gesamten Produktes / Integrieren des gesamten Produkts	Konstruktion des Grundaufbaus	Die parallel ablaufende Entwicklung der technischen Baugruppen wurde zu einer Gesamtkonstruktion zusammengeführt (Aufbau, keine Funktion) mit Raum für das Griff und Akku-Modul	Gestaltung und Konstruktion des Gesamtgeräts	Durchgeführt durch Dienstleister	Gesamtkonstruktion Aufbau			
			Gestaltung und Konstruktion des Gesamtgeräts	Durchgeführt durch Dienstleister	Konstruktion Gesamtgerät			
	Umsetzung des Gesamtentwurfs	Das ausgearbeitete, konstruierte und in mehreren Iterationen optimierte Konzept (Vorzugskonzept) wird physisch und funktionsfähig (eingeschränkt) aufgebaut um anschließend evaluiert zu werden	Aufbereitung der Konstruktionsdaten für die Herstellung der Gehäuse- und Funktionsteile		Daten für Teileherstellung Numerische Steuerungsinformation für die AF-Anlage			
			Darstellung / Umsetzung der digitalen Modelle in physische Modelle		physische Teile			
			Aufbereitung, Zusammenbau und Fertigstellung der Prototypen	Fertigstellung der Modelle und Ergänzung um Farbe	fertiger Prototyp			
	Analyse des Gesamtentwurfs	Mithilfe des physischen Modells werden erste Erkenntnisse zum Aufbau und der Griffanordnung gewonnen	Expertenanalyse	Der physische Prototyp wird aus Expertensicht bzgl. Griffanordnung und Handling beurteilt und Optimierungsmaßnahmen erfasst	Erkenntnisse zum aktuellen Stand und Optimierungsansätze			
			Probandenanalyse	In verschiedenen Tests mit relevanten Probanden werden Erkenntnisse über die Akzeptanz und hinsichtlich der Weiterentwicklung gesammelt	Erkenntnisse zum aktuellen Stand und Optimierungsansätze			
Konstruktion weiterer Gesamtgeräte	Auf Basis aller bisherigen Erkenntnissen zu Technik und Ergonomie werden weitere Modelle mit Funktionalität gestaltet	Gestaltung und Konstruktion des Gesamtgeräts in verschiedenen Ausführungen	Durchgeführt durch Dienstleister Aufgrund unterschiedlicher Ausrichtungen hinsichtlich Handhabung werden verschiedenen Konzepte hinsichtlich Griffanordnung und Akkuposition getestet	Konstruktion Gesamtgerät				

Tabelle A1.3: Inhalte und Teilschritte der Projektanalyse – Projekt 3 (Fortsetzung)

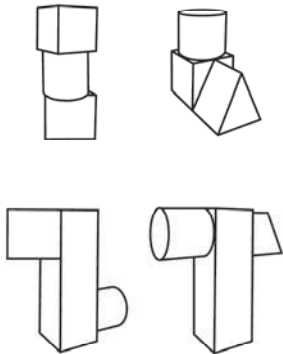
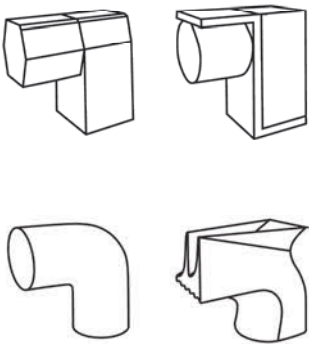
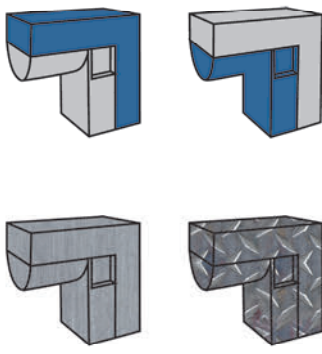
Phase	Arbeitsabschnitt	Aktivität	Inhalt	Teilschritt (modellbezogene Teilschritte in grau markiert)	Ergänzende Beschreibung	Ergebnis
Entwerfen	Gestalten des gesamten Produktes / Integrieren des gesamten Produkts	Umsetzung des Gesamtentwurfs	Das ausgearbeitete, konstruierte und in mehreren Iterationen optimierte Konzept (Vorzugskonzept) wird physisch und funktionsfähig (eingeschränkt) aufgebaut um anschließend evaluiert zu werden	Aufbereitung der Konstruktionsdaten für die Herstellung der Gehäuse- und Funktionsteile		Daten für Teileherstellung Numerische Steuerungsinformation für die AF-Anlage
				Darstellung / Umsetzung der digitalen Modelle in physische Modelle		physische Teile
				Aufbereitung, Zusammenbau und Fertigstellung der Prototypen	Fertigstellung der Modelle und Ergänzung um Farbe	fertiger Prototyp
		Analyse des Gesamtentwurfs	Mithilfe des physischen Modells werden erste Erkenntnisse zum Aufbau und der Griffanordnung gewonnen	Probandenanalyse und interne Tests	In verschiedenen Tests mit relevanten Probanden werden Erkenntnisse über die Akzeptanz und hinsichtlich der Weiterentwicklung gesammelt	Erkenntnisse zum aktuellen Stand und Optimierungsansätze
		Analyse der Modelle	Projektfortsetzung - nach dem letzten Abschluss wurden weitere Varianten des Gesamtgeräts konstruiert, aufgebaut und getestet. Der letzte Stand wird nun aus Expertensicht und mit Probanden evaluiert.	Bewertung aus Expertensicht des aktuellen Stands	Ausführliches Testen der Geräte hinsichtlich Ergonomie / Handling und Technik bzgl. Funktionswechsel	Erkenntnisse zum aktuellen Entwicklungsstand
				Test der Geräte mit relevanten Probanden	Überprüfung der Geräte mit Probanden, die dem Zielpersonenkreis entsprechen	Erkenntnisse zum aktuellen Entwicklungsstand
Konstruktion des Gesamtgeräts mit drehbarem Griff	Auf Basis der Analyse und der Vorgaben wird ein weiteres Modell mit drehbarem Griff umgesetzt	Gestaltung und Konstruktion des Gesamtgeräts entsprechend der Vorgaben Anpassung des Modells entspr. der Vorgaben bzgl. Loop-Griff	Durchgeführt durch Dienstleister	Gesamtmodell		
Ausarbeiten	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben	Konstruktion des Gesamtgeräts Umsetzung des Gesamtentwurfs	Unter Berücksichtigung aller Erkenntnisse und Randbedingungen wird ein finales Gesamtmodell erstellt Das ausgearbeitete, konstruierte und in mehreren Iterationen optimierte Konzept (Vorzugskonzept) wird physisch und voll funktionsfähig mit einer ersten formalen Gestaltung aufgebaut	Gestaltung und Konstruktion des Gesamtgeräts in finaler Ausführung	Durchgeführt durch Dienstleister	Konstruktion Gesamtgerät
				Aufbereitung der Konstruktionsdaten für die Herstellung der Gehäuse- und Funktionsteile		Daten für Teileherstellung Numerische Steuerungsinformation für die AF-Anlage
				Darstellung / Umsetzung der digitalen Modelle in physische Modelle		Physische Teile
				Aufbereitung, Zusammenbau und Fertigstellung der Prototypen	Fertigstellung der Modelle und Ergänzung um Farbe	Fertiger Prototyp
		Analyse des Gesamtentwurfs	Abschließende Bewertung des Prototyps	Probandenanalyse und interne Tests	Bewertung durch Experten und intern beteiligte Bereiche	Erkenntnisse zum finalen Stand
		Dokumentation Ergonomiemaße	Basierend auf allen Erkenntnissen und Entwicklungsstufen werden finale Grenzmaße für die Weiterentwicklung der Serie definiert und dokumentiert	Gestalten, definieren und Festlegen der Maße	Basierend auf Literatur und mithilfe digitaler Menschmodelle werden die Grenzbereiche festgelegt und gestaltet	Grenzmaße
				Darstellen und Dokumentation als maßstabsgetreue Zeichnungen	Die definierten Maße werden in 2D maßstabsgetreue Zeichnungen zur Weitergabe an die Serienentwicklung überführt	Maßzeichnungen
		Farb- und Piktogrammgestaltung zur Drehbarkeit	Zur Verdeutlichung des drehbaren Griffs werden die ersten Lösungen weiter detailliert und konkretisiert	Gestaltung der Lösungsvarianten	Festlegung von Farben, Piktogrammen und Sichtbarkeitsbereichen	Lösungsbereiche
Darstellung und Aufbereitung der Lösungen	Darstellung der Ergebnisse			Finale Gestaltung		

Tabelle A1.3: Inhalte und Teilschritte der Projektanalyse – Projekt 3 (Fortsetzung)




## A2 Versuchseinführung

Erklärung **KTD**

Aufbau	Form	Oberfläche Farbe
 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Handhabung</li> <li>• Erreichbarkeit</li> <li>• Sichtbarkeit</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Formgebung</li> <li>• Design</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberflächenbeschaffenheit</li> <li>• Farbgebung</li> </ul>

**Abbildung A2.1:** Erklärung der Teilgestalten als Handkarte

Rasentrimmer **KTD**



The moodboard consists of eight photographs showing individuals using trimmers in different environments: a man in a grey shirt and jeans using a red trimmer near a house; a woman in a green shirt using a red trimmer on a path; a man in a plaid shirt using an orange trimmer near a pool; a man in a blue shirt using a green trimmer; a man in a grey shirt using a green trimmer; a man in a brown shirt using a red trimmer; a woman in a grey top using a green trimmer; and a woman in a grey top using a green trimmer.

**Abbildung A2.2:** Moodboard für die Arbeit mit einem Rasentrimmer





Abbildung A2.3: Moodboard für die Arbeit mit einem Blasergerät



Abbildung A2.4: Moodboard für die Arbeit mit einer Heckenschere

## A3 Fragebogen

### Allgemeine Angaben

Vielen Dank für die Teilnahme an der Studie.

Bevor wir mit der Bewertung der Produktmodelle loslegen, möchte ich Sie bitten, mir ein paar allgemeine Fragen zu beantworten.

#### Alter \*

Jahre

#### Körpergröße \*

cm

#### Geschlecht \*

- weiblich  
 männlich  
 divers

#### Ausbildung (höchster Abschluss) \*

- kein Schulabschluss  
 Pflichtschule oder Realschule  
 Berufsausbildung oder Fachschule  
 Höhere Schule mit Abitur  
 Universität oder Hochschule

#### Aktuelle Tätigkeit \*

- Studium (+ evtl. berufliche Nebentätigkeit)  
 Promotion (und Berufstätigkeit)  
 Berufstätigkeit (Vollzeit)  
 Teilzeitbeschäftigung  
 keine

Bitte benennen Sie kurz Ihre berufliche Haupt- oder Nebentätigkeit (sofern zutreffend) oder Ihren beruflichen Hintergrund

### Studium

#### Studienrichtung \*

Bitte machen Sie hier Angaben zu Ihrem letzten abgeschlossenen oder noch laufendem Studium.

- Maschinenbau  
 Technologiemanagement  
 Mechatronik  
 Fahrzeug- und Motorentechnik  
 Elektrotechnik

Abbildung A3.1: Fragebogen Allgemein



**Welche der folgenden Vorlesungen am IKTD haben Sie während Ihres Studiums gehört oder hören Sie aktuell? \***  
 Mehrfachauswahl ist möglich

Grundzüge der Maschinenkonstruktion (GDM / MAK / KMT)

Konstruktionslehre (KL)

Technisches Design (TD)

Interface Design (ID)

Fahrzeug Design (FD)

Methodische Produktentwicklung

Informationstechnik und Wissensverarbeitung in der Produktentwicklung

keine der genannten

---

**Erfahrung**  
 Bitte beurteilen Sie, wie häufig Sie bereits mit folgenden Technologien und Methoden gearbeitet haben: \*  
 Sollte Ihnen eine Technologie oder Methode nicht bekannt sein, wählen Sie bitte "kenne ich nicht" aus.

	noch nie	selten	gelegentlich	häufig	sehr häufig	kenne ich nicht
Computer Aided Design (CAD)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Computer Aided Styling (CAS)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Virtual Reality	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Augmented Reality	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Reverse Engineering (Scan/Flächenrückführung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Additive Fertigung (3D Druck)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Werkzeugbau (Drehen, Fräsen etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Modellbau	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Clay-Modellierung	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Skizzieren / Handzeichnungen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Digital-Zeichnen (Photoshop)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ergonomie-/Produkttest (Probandenstudien)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Abbildung A3.1:** Fragebogen Allgemein (Fortsetzung)

**Visuelle Einschränkungen**

Liegen bei Ihnen Fehlsichtigkeiten oder Einschränkungen der visuellen Wahrnehmung vor? \*

Mehrfachauswahl ist möglich

- Nein
- Kurzsichtigkeit
- Weitsichtigkeit
- Rot-Grün-Sehschwäche
- Farbblindheit
- Visuelle Wahrnehmungs- und Verarbeitungsstörung (VWVS)
- 

Tragen Sie heute beim Versuch Kontaktlinsen oder eine Brille? \*

- Nein
- Brille
- Kontaktlinsen

**Abbildung A3.1:** Fragebogen Allgemein (Fortsetzung)

**Modell X**

Bitte bewerten Sie die folgenden Merkmale des späteren Produkts anhand des aktuellen Modells: \*

	sehr schlecht 1	2	3	4	5	sehr gut 6
<b>Aufbau</b>						
Die Handhabung des Produkts, bedingt durch die Anordnung von Bauteilen und Griffen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Positionierung der Bedienelemente/Stellteile zum Betätigen (Erreichbarkeit)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Sichtbarkeit von Bauteilen, Griffen und Stellteilen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Form</b>						
Die Größe der Griffe, Greifräume und Stellteile zum Greifen und Betätigen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Form der Griffe und Stellteile zum Greifen und Betätigen (anthropomorphe Formgebung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Proportionen des Produkts	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Formgebung des Produkts (Gefallen)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Oberfläche / Farbe</b>						
Die Oberflächenbeschaffenheit von Griffen und Stellteilen (Komfort, Greifsympathie)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Erkennung von Funktionen, bedingt durch die Farbgebung (Greifstellen, Stellteile, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Bitte schätzen Sie die Hauptabmessungen des Produkts ab \*

	Länge	Breite	Höhe
Maße in cm	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Bitte beurteilen Sie, wie schwer es Ihnen gefallen ist, die Merkmale zu bewerten: \*

	sehr schwer 1	2	3	4	5	sehr einfach 6
<b>Aufbau</b> (Handhabung, Erreichbarkeit, Sichtbarkeit)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Form</b> (Formgebung, Design)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Oberfläche / Farbe</b> (Oberflächenbeschaffenheit, Farbgebung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Bitte beurteilen Sie aus Ihrer Sicht die Genauigkeit Ihrer Bewertungen: \*

	sehr ungenau 1	2	3	4	5	sehr genau 6
<b>Aufbau</b> (Handhabung, Erreichbarkeit, Sichtbarkeit)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Form</b> (Formgebung, Design)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Oberfläche / Farbe</b> (Oberflächenbeschaffenheit, Farbgebung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung A3.2: Fragebogen der Studie



**Bitte beurteilen Sie, wie zufrieden Sie mit dem Modell für die Bewertung sind: \***

	sehr unzufrieden					sehr zufrieden
	1	2	3	4	5	6
<b>Aufbau</b> (Handhabung, Erreichbarkeit, Sichtbarkeit)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Form</b> (Formgebung, Design)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Oberfläche / Farbe</b> (Oberflächenbeschaffenheit, Farbgebung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Sonstige Anmerkungen zum Modell:**

**SUS X**

**Bitte bewerten Sie die Ihnen genannte Repräsentationsform, im Folgenden als "System" bezeichnet, anhand dieser Aussagen: \***

	stimme überhaupt nicht zu				stimme voll zu
	1	2	3	4	5
Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig in diesem oder einem anderen Zusammenhang zu nutzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich empfinde das System als unnötig komplex	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich empfinde das System als einfach zu nutzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit diesem System sehr schnell lernen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Abbildung A3.2:** Fragebogen der Studie (Fortsetzung)

## A4 Reihenfolge Probanden

Proband	Modellreihenfolge	Proband	Modellreihenfolge
P1	[g, l, d, n, k, i, b, j, e, c, h, a, m, f]	P28	[f, g, b, i, d, h, j, m, a, k, c, e, l, n]
P2	[a, n, d, h, c, m, f, k, i, b, j, e, g, l]	P29	[l, e, j, n, a, i, b, g, f, h, d, k, c, m]
P3	[m, l, g, b, j, n, a, e, c, d, h, f, k, i]	P30	[e, g, c, m, l, b, j, f, h, a, n, d, k, i]
P4	[k, i, b, g, e, c, m, f, j, n, d, h, l, a]	P31	[b, j, n, d, h, l, m, f, a, i, k, c, e, g]
P5	[k, i, e, j, n, d, h, c, m, f, a, l, b, g]	P32	[n, j, i, e, l, m, f, b, g, k, a, h, c, d]
P6	[i, a, h, d, n, j, f, b, g, k, c, e, l, m]	P33	[i, e, g, k, d, b, l, h, c, m, f, a, n, j]
P7	[c, g, b, f, m, l, e, i, j, n, a, h, d, k]	P34	[k, c, h, d, n, j, b, i, e, g, f, m, l, a]
P8	[e, c, m, l, h, a, f, k, g, b, i, j, n, d]	P35	[c, m, f, k, i, a, h, d, n, j, e, g, l, b]
P9	[b, i, a, h, c, k, d, n, j, e, g, f, m, l]	P36	[a, k, g, b, f, h, l, m, c, j, e, i, d, n]
P10	[n, d, k, i, b, g, l, m, c, e, a, f, h, j]	P37	[d, k, i, b, l, m, f, g, e, j, n, a, h, c]
P11	[i, k, f, m, c, h, a, e, l, g, b, j, n, d]	P38	[m, c, h, l, a, k, f, b, g, e, j, n, d, i]
P12	[n, a, e, c, g, b, f, m, l, h, j, i, k, d]	P39	[f, m, c, k, a, i, b, j, n, d, h, l, g, e]
P13	[b, g, e, c, m, f, k, d, n, a, i, j, h, l]	P40	[e, j, h, a, n, d, i, b, f, g, k, c, m, l]
P14	[j, b, d, n, a, h, f, g, l, m, c, k, i, e]	P41	[g, e, l, h, j, i, d, n, a, k, c, m, f, b]
P15	[m, f, g, b, l, d, h, c, k, a, n, j, e, i]	P42	[n, d, c, m, f, b, l, h, j, e, g, k, i, a]
P16	[g, k, f, m, c, j, e, i, d, b, l, h, a, n]	P43	[g, b, d, h, f, j, n, a, k, i, e, c, m, l]
P17	[d, n, j, h, l, m, c, k, a, e, g, f, b, i]	P44	[f, h, a, n, d, b, j, e, i, k, c, g, l, m]
P18	[l, m, c, k, f, b, i, j, h, d, n, a, e, g]	P45	[a, l, e, g, k, c, m, f, h, j, b, i, d, n]
P19	[i, j, b, f, m, l, h, a, n, d, k, g, c, e]	P46	[c, d, h, l, m, f, k, i, b, g, e, j, n, a]
P20	[j, e, g, l, m, c, k, i, b, d, h, f, a, n]	P47	[k, f, g, b, i, e, c, m, l, a, h, j, n, d]
P21	[c, m, l, h, a, k, g, e, i, d, n, j, f, b]	P48	[l, b, i, a, n, j, e, g, f, k, d, h, c, m]
P22	[h, a, l, b, f, m, c, j, n, d, k, i, e, g]	P49	[a, h, j, n, d, i, e, c, m, f, b, l, g, k]
P23	[m, f, k, c, h, a, n, j, b, g, e, l, d, i]	P50	[g, l, b, i, k, a, n, d, h, c, m, f, j, e]
P24	[e, i, j, h, d, n, a, l, m, c, k, g, b, f]	P51	[b, d, n, a, h, j, i, k, g, f, m, c, e, l]
P25	[h, c, m, f, g, e, j, n, d, l, b, i, k, a]	P52	[j, n, d, c, m, f, a, e, g, k, i, b, l, h]
P26	[d, h, f, k, a, n, j, i, b, l, m, c, g, e]	P53	[f, a, n, j, b, l, m, c, h, d, k, i, e, g]
P27	[h, f, m, l, b, g, k, c, j, e, i, a, n, d]	P54	[h, l, b, g, e, j, n, d, i, k, a, f, m, c]

a	R1_D1	b	R1_D2	c	R1_D3	d	R2_D1	e	R2_D2	f	R2_D3	g	R3_D1
h	R3_D2	i	R3_D3	j	R4_D1	k	R4_D2	l	R4_D3	m	K1	n	K2

**Tabelle A4.1:** Modellreihenfolge der Studie

### A5 Poster der Modell-Studie

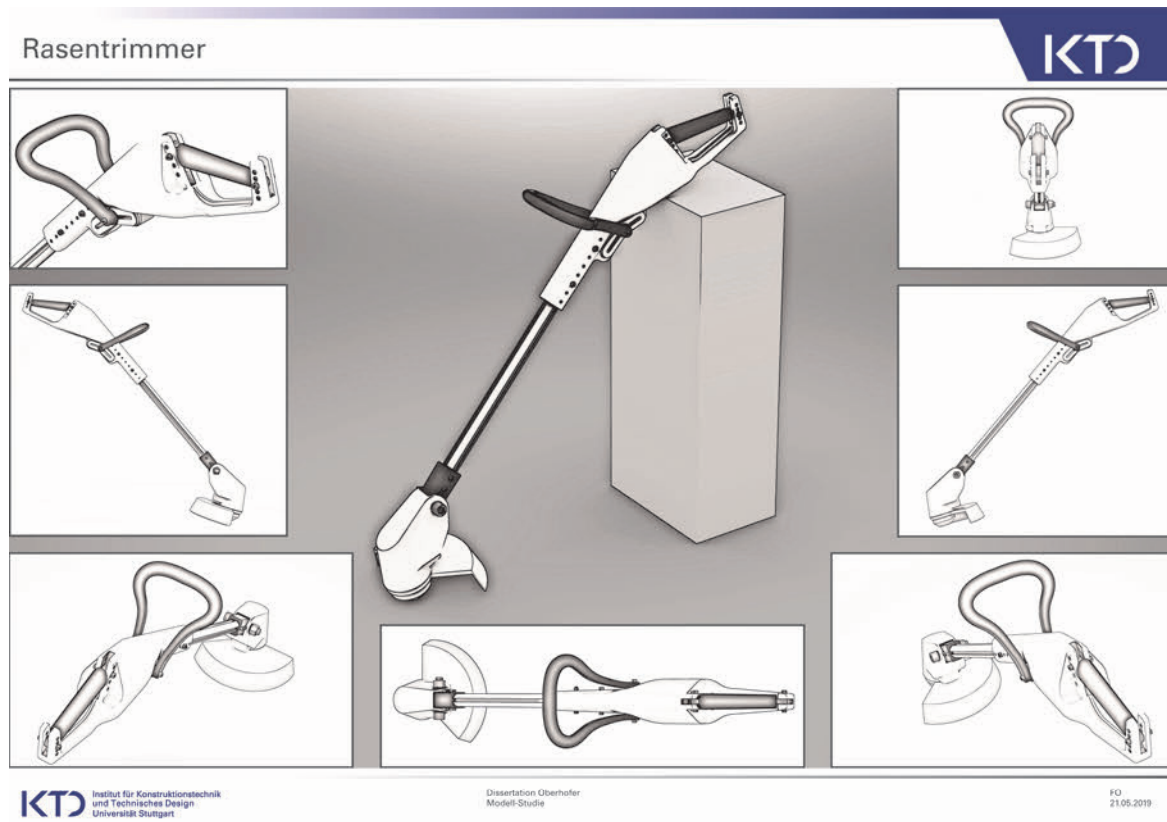


Abbildung A5.1: Poster der Modell-Studie D1



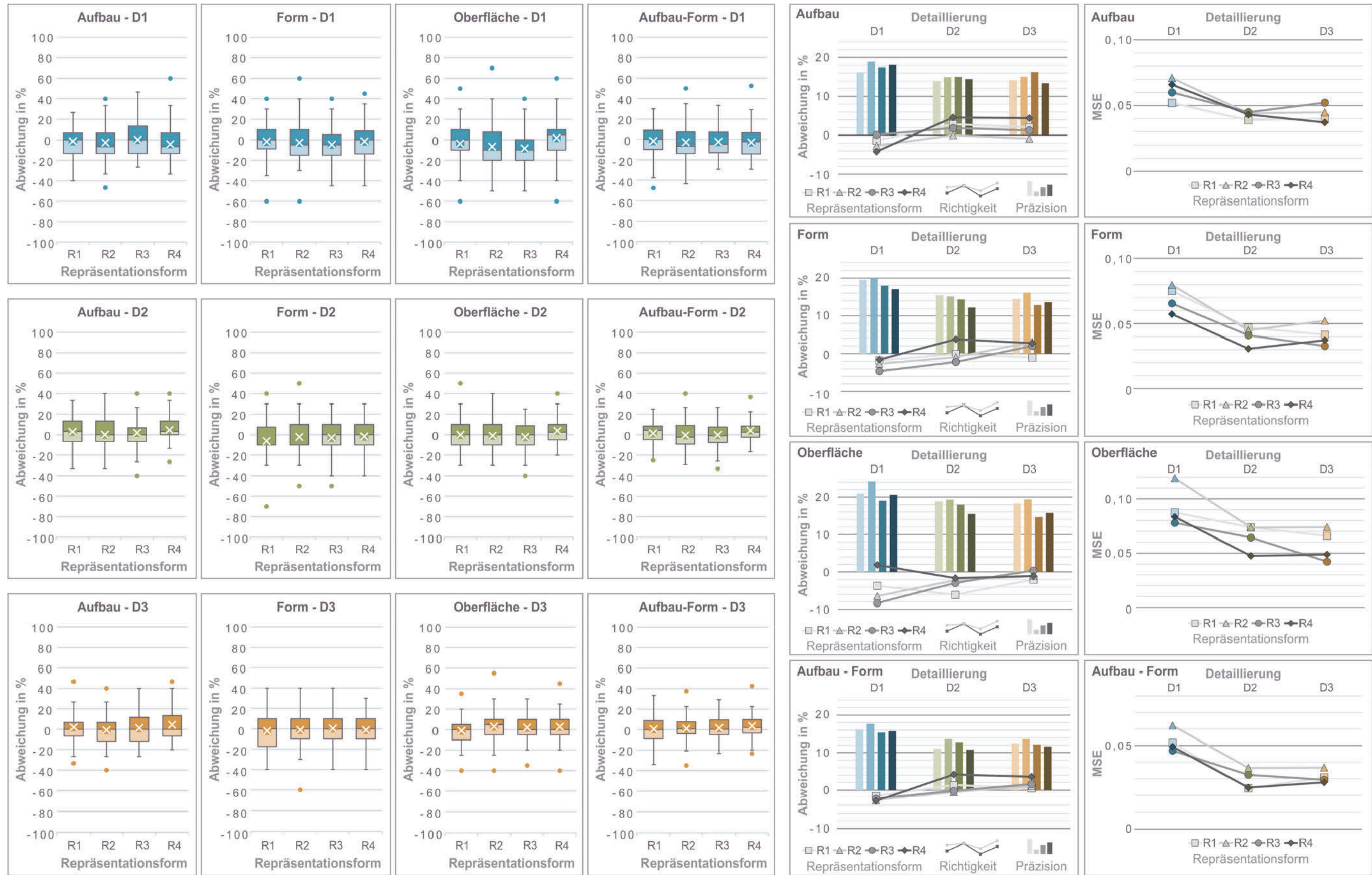
Abbildung A5.2: Poster der Modell-Studie D2



Abbildung A5.3: Poster der Modell-Studie D3



**A6 Auswertungsergebnisse**



**Abbildung A6.1:** Rohdaten zur Modell-Produkt-Abweichung der Modell-Studie



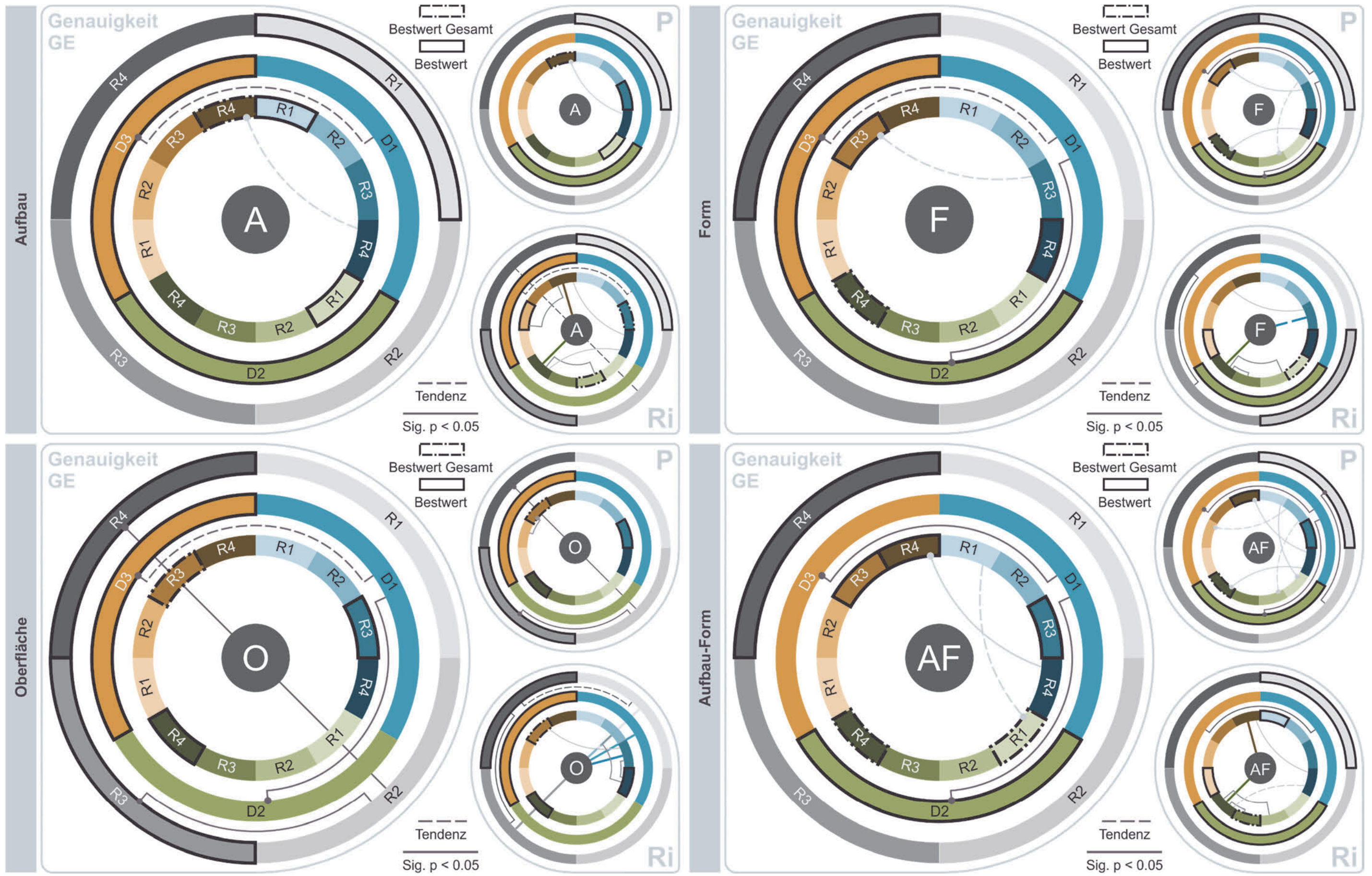


Abbildung A6.2: Signifikante Paarungen nach Teilgestalten zur Modell-Produkt-Abweichung der Modell-Studie



Haupteffekt	Sphärizität / Korrektur	F-Verteilung		F-Wert	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
		dfZähler	dfNenner			
<b>Modell-Produkt Abweichung</b>						
Genauigkeit						
R	Greenhouse-Geisser	2.618	138.774	2.874	.046	.051
D	Sphärizität angenommen	2	106	7.389	.001	.122
R*D	Greenhouse-Geisser	3.412	180.836	.615	.627	.011
Richtigkeit						
R	Greenhouse-Geisser	2.479	128.926	3.368	.028	.061
D	Sphärizität angenommen	2	104	2.676	.077	.049
R*D	Greenhouse-Geisser	4.845	252.128	.758	.577	.014
<b>Modellbewertung</b>						
Gebrauchstauglichkeit						
R	Greenhouse-Geisser	2.407	125.161	61.382	.000	.541
D	Greenhouse-Geisser	1.626	84.562	77.814	.000	.599
R*D	Sphärizität angenommen	6	312	4.945	.000	.087
Schwierigkeit						
R	Greenhouse-Geisser	1.927	100.207	65.439	.000	.557
D	Sphärizität angenommen	2	104	21.220	.000	.290
R*D	Sphärizität angenommen	6	312	1.094	.366	.021
Genauigkeit						
R	Sphärizität angenommen	3	156	24.974	.000	.324
D	Greenhouse-Geisser	1.369	71.170	40.299	.000	.437
R*D	Sphärizität angenommen	6	312	2.173	.045	.040
Zufriedenheit						
R	Greenhouse-Geisser	2.257	117.355	18.781	.000	.265
D	Sphärizität angenommen	2	104	81.876	.000	.612
R*D	Sphärizität angenommen	6	312	6.637	.000	.113
<b>Maßabweichung</b>						
Genauigkeit						
R	Greenhouse-Geisser	2.667	138.674	14.163	.000	.214
D	Sphärizität angenommen	2	104	4.999	.008	.088
R*D	Greenhouse-Geisser	3.581	186.203	3.872	.007	.069
Richtigkeit						
R	Greenhouse-Geisser	3.045	158.348	29.315	.000	.361
D	Sphärizität angenommen	2	104	33.101	.000	.389
R*D	Greenhouse-Geisser	6.171	320.877	.972	.445	.018

Tabelle A6.1: Daten der interferenzstatistischen Auswertung der Haupteffekte

Paarung	MD/df*	SD/t*	Sig.	Paarung	MD/df*	SD/t*	Sig.
<b>Genauigkeit</b>							
R1 – R2	-.011	.007	.683	R3 – R4	.002	.004	1.000
R1 – R3	.002	.005	1.000	D1 – D2	.021	.007	.011
R1 – R4	.004	.006	1.000	D1 – D3	.021	.007	.007
R2 – R3	.013	.005	.108	D2 – D3	-.0001	.005	1.000
R2 – R4	.015	.005	.036	R1_D1 – R2_D1	-.012	.013	1.000

Tabelle A6.2: Daten der inferenzstatistischen Auswertung der Modell-Produkt-Abweichung zur Genauigkeit und Richtigkeit

Paarung	MD/df*	SD/t*	Sig.	Paarung	MD/df*	SD/t*	Sig.
R1_D1 – R3_D1	.009	.008	1.000	R2_D3 – R4_D3	.011	.008	1.000
R1_D1 – R4_D1	.005	.012	1.000	R3_D3 – R4_D3	-.002	.007	1.000
R2_D1 – R3_D1	.020	.012	.494	R1_D1 – R1_D2	.025	.009	.025
R2_D1 – R4_D1	.016	.009	.483	R1_D1 – R1_D3	.023	.010	.080
R3_D1 – R4_D1	-.004	.010	1.000	R1_D2 – R1_D3	-.003	.006	1.000
R1_D2 – R2_D2	-.011	.009	1.000	R2_D1 – R2_D2	.026	.015	.259
R1_D2 – R3_D2	-.007	.006	1.000	R2_D1 – R2_D3	.025	.013	.155
R1_D2 – R4_D2	.006	.006	1.000	R2_D2 – R2_D3	.000	.011	1.000
R2_D2 – R3_D2	.004	.007	1.000	R3_D1 – R3_D2	.009	.007	.599
R2_D2 – R4_D2	.017	.008	.175	R3_D1 – R3_D3	.018	.008	.066
R3_D2 – R4_D2	.013	.005	.049	R3_D2 – R3_D3	.009	.007	.670
R1_D3 – R2_D3	-.009	.010	1.000	R4_D1 – R4_D2	.026	.010	.044
R1_D3 – R3_D3	.004	.007	1.000	R4_D1 – R4_D3	.020	.007	.028
R1_D3 – R4_D3	.002	.007	1.000	R4_D2 – R4_D3	-.006	.007	1.000
R2_D3 – R3_D3	.013	.008	.513				
<b>Richtigkeit</b>							
R1 – R2	.004	.012	1.000	R3_D3 – R4_D3	-.008	.013	1.000
R1 – R3	.002	.008	1.000	R1_D1 – R1_D2	-.011	.025	1.000
R1 – R4	-.023	.009	.073	R1_D1 – R1_D3	-.019	.025	1.000
R2 – R3	-.002	.009	1.000	R1_D2 – R1_D3	-.009	.019	1.000
R2 – R4	-.026	.010	.069	R2_D1 – R2_D2	-.030	.024	.667
R3 – R4	-.024	.008	.019	R2_D1 – R2_D3	-.044	.019	.083
D1 – D2	-.026	.019	.490	R2_D2 – R2_D3	-.014	.021	1.000
D1 – D3	-.038	.016	.072	R3_D1 – R3_D2	-.031	.021	.415
D2 – D3	-.011	.015	1.000	R3_D1 – R3_D3	-.055	.019	.015
R1_D1 – R2_D1	.018	.020	1.000	R3_D2 – R3_D3	-.024	.019	.632
R1_D1 – R3_D1	.020	.015	1.000	R4_D1 – R4_D2	-.034	.020	.307
R1_D1 – R4_D1	-.010	.015	1.000	R4_D1 – R4_D3	-.033	.020	.314
R2_D1 – R3_D1	.002	.016	1.000	R4_D2 – R4_D3	.001	.016	1.000
R2_D1 – R4_D1	-.029	.017	.617	R1_D1 – Ref.	53*	-1.053*	.297
R3_D1 – R4_D1	-.031	.015	.243	R2_D1 – Ref.		-1.665*	.102
R1_D2 – R2_D2	-.001	.018	1.000	R3_D1 – Ref.		-2.224*	.030
R1_D2 – R3_D2	.000	.012	1.000	R4_D1 – Ref.		-.634*	.529
R1_D2 – R4_D2	-.034	.013	.057	R1_D2 – Ref.		-.736*	.465
R2_D2 – R3_D2	.001	.015	1.000	R2_D2 – Ref.		-.571*	.571
R2_D2 – R4_D2	-.033	.014	.121	R3_D2 – Ref.		-.641*	.524
R3_D2 – R4_D2	-.034	.010	.013	R4_D2 – Ref.		1.686*	.098
R1_D3 – R2_D3	-.006	.017	1.000	R1_D3 – Ref.		-.199*	.843
R1_D3 – R3_D3	-.015	.016	1.000	R2_D3 – Ref.		.194*	.847
R1_D3 – R4_D3	-.024	.015	.703	R3_D3 – Ref.	.825*	.413	
R2_D3 – R3_D3	-.009	.015	1.000	R4_D3 – Ref.	1.310*	.196	
R2_D3 – R4_D3	-.017	.012	1.000				

**Tabelle A6.2:** Daten der inferenzstatistischen Auswertung der Modell-Produkt-Abweichung zur Genauigkeit und Richtigkeit (Fortsetzung)

Paarung	t	p	p kor.	Paarung	t	p	p kor.
<b>Präzision   df = 52</b>							
R1 – R2	2.956	.0046	.028	R3_D2 – R4_D2	3.235	.002	.011
R1 – R3	.900	.3723	1.000	R1_D3 – R2_D3	1.218	.229	.916
R1 – R4	.389	.6992	.699	R1_D3 – R3_D3	.726	.471	1.000
R2 – R3	2.760	.0079	.032	R1_D3 – R4_D3	.426	.672	1.000
R2 – R4	2.895	.0055	.027	R2_D3 – R3_D3	2.158	.036	.213
R3 – R4	.503	.6168	1.000	R2_D3 – R4_D3	2.036	.047	.188
D1 – D2	2.442	.018	.036	R3_D3 – R4_D3	.359	.721	.721
D1 – D3	2.888	.006	.017	R1_D1 – R1_D2	2.606	.012	.036
D2 – D3	.189	.851	.851	R1_D1 – R1_D3	2.223	.031	.061
R1_D1 – R2_D1	.885	.380	1.000	R1_D2 – R1_D3	.394	.695	.695
R1_D1 – R3_D1	1.242	.220	.880	R2_D1 – R2_D2	2.046	.046	.092
R1_D1 – R4_D1	.493	.624	.624	R2_D1 – R2_D3	2.282	.027	.080
R2_D1 – R3_D1	2.285	.026	.158	R2_D2 – R2_D3	.062	.951	.951
R2_D1 – R4_D1	1.376	.175	.874	R3_D1 – R3_D2	.813	.420	.420
R3_D1 – R4_D1	.697	.489	.978	R3_D1 – R3_D3	2.165	.035	.105
R1_D2 – R2_D2	1.530	.132	.528	R3_D2 – R3_D3	1.261	.213	.426
R1_D2 – R3_D2	1.358	.180	.541	R4_D1 – R4_D2	3.482	.001	.003
R1_D2 – R4_D2	1.303	.198	.397	R4_D1 – R4_D3	2.440	.018	.036
R2_D2 – R3_D2	.558	.579	.579	R4_D2 – R4_D3	1.102	.276	.276
R2_D2 – R4_D2	3.255	.002	.012				

**Tabelle A6.3:** Daten der inferenzstatistischen Auswertung der Modell-Produkt-Abweichung zur Präzision

Paarung	MD	SD	Sig.	Paarung	MD	SD	Sig.
<b>Gebrauchstauglichkeit</b>							
R1 – R2	1.006	.101	.000	R3_D2 – R4_D2	-.378	.090	.001
R1 – R3	.796	.083	.000	R1_D3 – R2_D3	.857	.119	.000
R1 – R4	.420	.084	.000	R1_D3 – R3_D3	.692	.111	.000
R2 – R3	-.211	.060	.005	R1_D3 – R4_D3	.550	.110	.000
R2 – R4	-.587	.077	.000	R2_D3 – R3_D3	-.165	.081	.283
R3 – R4	-.376	.069	.000	R2_D3 – R4_D3	-.307	.090	.008
D1 – D2	-.454	.055	.000	R3_D3 – R4_D3	-.142	.085	.616
D1 – D3	-.671	.065	.000	R1_D1 – R1_D2	-.321	.074	.000
D2 – D3	-.217	.042	.000	R1_D1 – R1_D3	-.559	.103	.000
R1_D1 – R2_D1	1.214	.140	.000	R1_D2 – R1_D3	-.238	.073	.006
R1_D1 – R3_D1	.971	.107	.000	R2_D1 – R2_D2	-.587	.097	.000
R1_D1 – R4_D1	.363	.121	.025	R2_D1 – R2_D3	-.916	.108	.000
R2_D1 – R3_D1	-.243	.101	.121	R2_D2 – R2_D3	-.329	.086	.001
R2_D1 – R4_D1	-.851	.128	.000	R3_D1 – R3_D2	-.569	.095	.000
R3_D1 – R4_D1	-.608	.109	.000	R3_D1 – R3_D3	-.838	.094	.000
R1_D2 – R2_D2	.948	.110	.000	R3_D2 – R3_D3	-.269	.083	.006
R1_D2 – R3_D2	.723	.095	.000	R4_D1 – R4_D2	-.338	.086	.001
R1_D2 – R4_D2	.345	.085	.001	R4_D1 – R4_D3	-.372	.098	.001
R2_D2 – R3_D2	-.225	.080	.042	R4_D2 – R4_D3	-.033	.075	1.000
R2_D2 – R4_D2	-.602	.093	.000				

**Tabelle A6.4:** Daten der inferenzstatistischen Auswertung der Modellbewertung

Paarung	MD	SD	Sig.	Paarung	MD	SD	Sig.
<b>Schwierigkeit</b>							
R1 – R2	1.496	.157	.000	R3_D2 – R4_D2	-.713	.129	.000
R1 – R3	1.271	.133	.000	R1_D3 – R2_D3	1.434	.187	.000
R1 – R4	.542	.101	.000	R1_D3 – R3_D3	1.334	.172	.000
R2 – R3	-.225	.076	.027	R1_D3 – R4_D3	.628	.142	.000
R2 – R4	-.953	.122	.000	R2_D3 – R3_D3	-.101	.131	1.000
R3 – R4	-.728	.114	.000	R2_D3 – R4_D3	-.807	.139	.000
D1 – D2	-.318	.054	.000	R3_D3 – R4_D3	-.706	.167	.001
D1 – D3	-.352	.065	.000	R1_D1 – R1_D2	-.152	.076	.151
D2 – D3	-.034	.059	1.000	R1_D1 – R1_D3	-.301	.091	.005
R1_D1 – R2_D1	1.662	.175	.000	R1_D2 – R1_D3	-.149	.076	.167
R1_D1 – R3_D1	1.351	.148	.000	R2_D1 – R2_D2	-.423	.132	.007
R1_D1 – R4_D1	.585	.149	.002	R2_D1 – R2_D3	-.529	.124	.000
R2_D1 – R3_D1	-.311	.136	.161	R2_D2 – R2_D3	-.106	.140	1.000
R2_D1 – R4_D1	-1.077	.160	.000	R3_D1 – R3_D2	-.376	.113	.005
R3_D1 – R4_D1	-.766	.155	.000	R3_D1 – R3_D3	-.319	.126	.043
R1_D2 – R2_D2	1.391	.177	.000	R3_D2 – R3_D3	.057	.120	1.000
R1_D2 – R3_D2	1.127	.147	.000	R4_D1 – R4_D2	-.322	.102	.008
R1_D2 – R4_D2	.415	.089	.000	R4_D1 – R4_D3	-.259	.132	.167
R2_D2 – R3_D2	-.264	.116	.162	R4_D2 – R4_D3	.063	.104	1.000
R2_D2 – R4_D2	-.976	.155	.000				
<b>Genauigkeit</b>							
R1 – R2	.796	.110	.000	R3_D2 – R4_D2	-.235	.118	.312
R1 – R3	.493	.093	.000	R1_D3 – R2_D3	.518	.133	.002
R1 – R4	.257	.092	.045	R1_D3 – R3_D3	.361	.130	.045
R2 – R3	-.303	.094	.013	R1_D3 – R4_D3	.265	.128	.264
R2 – R4	-.539	.106	.000	R2_D3 – R3_D3	-.156	.105	.855
R3 – R4	-.237	.078	.023	R2_D3 – R4_D3	-.253	.114	.184
D1 – D2	-.577	.092	.000	R3_D3 – R4_D3	-.096	.109	1.000
D1 – D3	-.676	.097	.000	R1_D1 – R1_D2	-.528	.142	.001
D2 – D3	-.099	.046	.114	R1_D1 – R1_D3	-.501	.150	.005
R1_D1 – R2_D1	1.015	.174	.000	R1_D2 – R1_D3	.027	.097	1.000
R1_D1 – R3_D1	.605	.149	.001	R2_D1 – R2_D2	-.688	.137	.000
R1_D1 – R4_D1	.226	.153	.871	R2_D1 – R2_D3	-.998	.155	.000
R2_D1 – R3_D1	-.411	.168	.108	R2_D2 – R2_D3	-.310	.098	.008
R2_D1 – R4_D1	-.789	.190	.001	R3_D1 – R3_D2	-.619	.157	.001
R3_D1 – R4_D1	-.379	.145	.072	R3_D1 – R3_D3	-.744	.151	.000
R1_D2 – R2_D2	.855	.129	.000	R3_D2 – R3_D3	-.126	.112	.798
R1_D2 – R3_D2	.514	.120	.000	R4_D1 – R4_D2	-.475	.139	.004
R1_D2 – R4_D2	.279	.105	.061	R4_D1 – R4_D3	-.462	.129	.002
R2_D2 – R3_D2	-.341	.138	.100	R4_D2 – R4_D3	.013	.103	1.000
R2_D2 – R4_D2	-.576	.133	.000				

**Tabelle A6.4:** Daten der inferenzstatistischen Auswertung der Modellbewertung (Fortsetzung)

Paarung	MD	SD	Sig.	Paarung	MD	SD	Sig.
<b>Zufriedenheit</b>							
R1 – R2	.729	.125	.000	R3_D2 – R4_D2	-.189	.117	.680
R1 – R3	.626	.116	.000	R1_D3 – R2_D3	.621	.168	.003
R1 – R4	.461	.130	.005	R1_D3 – R3_D3	.383	.157	.107
R2 – R3	-.104	.071	.919	R1_D3 – R4_D3	.762	.153	.000
R2 – R4	-.268	.087	.019	R2_D3 – R3_D3	-.237	.121	.329
R3 – R4	-.164	.088	.412	R2_D3 – R4_D3	.141	.151	1.000
D1 – D2	-.466	.070	.000	R3_D3 – R4_D3	.378	.147	.079
D1 – D3	-.987	.088	.000	R1_D1 – R1_D2	-.284	.118	.058
D2 – D3	-.520	.072	.000	R1_D1 – R1_D3	-.877	.153	.000
R1_D1 – R2_D1	.967	.185	.000	R1_D2 – R1_D3	-.592	.119	.000
R1_D1 – R3_D1	.960	.171	.000	R2_D1 – R2_D2	-.652	.145	.000
R1_D1 – R4_D1	.278	.185	.828	R2_D1 – R2_D3	-1.223	.160	.000
R2_D1 – R3_D1	-.007	.130	1.000	R2_D2 – R2_D3	-.571	.144	.001
R2_D1 – R4_D1	-.689	.135	.000	R3_D1 – R3_D2	-.712	.142	.000
R3_D1 – R4_D1	-.682	.131	.000	R3_D1 – R3_D3	-1.453	.144	.000
R1_D2 – R2_D2	.600	.148	.001	R3_D2 – R3_D3	-.742	.151	.000
R1_D2 – R3_D2	.533	.153	.006	R4_D1 – R4_D2	-.218	.115	.192
R1_D2 – R4_D2	.344	.155	.183	R4_D1 – R4_D3	-.393	.116	.004
R2_D2 – R3_D2	-.067	.114	1.000	R4_D2 – R4_D3	-.175	.116	.416
R2_D2 – R4_D2	-.255	.141	.455				

**Tabelle A6.4:** Daten der inferenzstatistischen Auswertung der Modellbewertung (Fortsetzung)

Paarung	MD	SD	Sig.	Paarung	MD	SD	Sig.
<b>Genauigkeit</b>							
R1 – R2	-.087	.016	.000	R2_D2 – R3_D2	-.028	.056	1.000
R1 – R3	-.091	.018	.000	R2_D2 – R4_D2	.089	.045	.514
R1 – R4	-.020	.008	.121	R3_D2 – R4_D2	.117	.031	.004
R2 – R3	-.004	.023	1.000	R1_D3 – R2_D3	-.096	.025	.003
R2 – R4	.067	.020	.013	R1_D3 – R3_D3	-.111	.024	.000
R3 – R4	.070	.018	.002	R1_D3 – R4_D3	-.001	.009	1.000
D1 – D2	-.049	.019	.037	R2_D3 – R3_D3	-.015	.026	1.000
D1 – D3	-.043	.016	.035	R2_D3 – R4_D3	.095	.027	.010
D2 – D3	.007	.015	1.000	R3_D3 – R4_D3	.110	.028	.003
R1_D1 – R2_D1	-.045	.019	.249	R1_D1 – R1_D2	-.009	.014	1.000
R1_D1 – R3_D1	-.012	.013	1.000	R1_D1 – R1_D3	-.020	.018	.865
R1_D1 – R4_D1	-.029	.018	1.000	R1_D2 – R1_D3	-.011	.009	.809
R2_D1 – R3_D1	.032	.015	.385	R2_D1 – R2_D2	-.085	.046	.208
R2_D1 – R4_D1	.016	.021	1.000	R2_D1 – R2_D3	-.071	.031	.078
R3_D1 – R4_D1	-.016	.017	1.000	R2_D2 – R2_D3	.015	.048	1.000
R1_D2 – R2_D2	-.121	.041	.045	R3_D1 – R3_D2	-.146	.041	.003
R1_D2 – R3_D2	-.149	.036	.001	R3_D1 – R3_D3	-.118	.029	.001
R1_D2 – R4_D2	-.032	.016	.471	R3_D2 – R3_D3	.028	.034	1.000

**Tabelle A6.5:** Daten der inferenzstatistischen Auswertung der Maßabweichung zur Genauigkeit und Richtigkeit

Paarung	MD	SD	Sig.	Paarung	MD	SD	Sig.
R4_D1 – R4_D2	-.012	.027	1.000	R4_D1 – Pr	.014	.016	1.000
R4_D1 – R4_D3	.008	.021	1.000	R1_D2 – Pr	.001	.010	1.000
R4_D2 – R4_D3	.021	.015	.505	R2_D2 – Pr	.122	.041	.044
R1 – Pr	-.007	.010	1.000	R3_D2 – Pr	.150	.038	.003
R2 – Pr	.080	.017	.000	R4_D2 – Pr	.033	.019	.949
R3 – Pr	.084	.019	.000	R1_D3 – Pr	-.007	.017	1.000
R4 – Pr	.014	.013	1.000	R2_D3 – Pr	.089	.023	.004
R1_D1 – Pr	-.015	.013	1.000	R3_D3 – Pr	.104	.025	.001
R2_D1 – Pr	.030	.018	1.000	R4_D3 – Pr	-.006	.019	1.000
R3_D1 – Pr	-.002	.009	1.000				
<b>Richtigkeit</b>							
R1 – R2	-.117	.018	.000	R1_D1 – R1_D3	-.116	.023	.000
R1 – R3	-.123	.019	.000	R1_D2 – R1_D3	-.016	.018	1.000
R1 – R4	-.002	.013	1.000	R2_D1 – R2_D2	-.124	.037	.004
R2 – R3	-.007	.015	1.000	R2_D1 – R2_D3	-.133	.032	.000
R2 – R4	.115	.019	.000	R2_D2 – R2_D3	-.009	.033	1.000
R3 – R4	.122	.017	.000	R3_D1 – R3_D2	-.150	.030	.000
D1 – D2	-.124	.019	.000	R3_D1 – R3_D3	-.142	.026	.000
D1 – D3	-.117	.018	.000	R3_D2 – R3_D3	.008	.030	1.000
D2 – D3	.007	.014	1.000	R4_D1 – R4_D2	-.144	.027	.000
R1_D1 – R2_D1	-.103	.028	.006	R4_D1 – R4_D3	-.102	.025	.001
R1_D1 – R3_D1	-.098	.023	.001	R4_D2 – R4_D3	.041	.021	.148
R1_D1 – R4_D1	.009	.024	1.000	R1 – Pr	-.009	.013	1.000
R2_D1 – R3_D1	.005	.023	1.000	R2 – Pr	.107	.019	.000
R2_D1 – R4_D1	.112	.027	.001	R3 – Pr	.114	.019	.000
R3_D1 – R4_D1	.106	.022	.000	R4 – Pr	-.008	.013	1.000
R1_D2 – R2_D2	-.127	.034	.004	R1_D1 – Pr	-.016	.023	1.000
R1_D2 – R3_D2	-.148	.032	.000	R2_D1 – Pr	.086	.026	.016
R1_D2 – R4_D2	-.036	.023	1.000	R3_D1 – Pr	.081	.022	.005
R2_D2 – R3_D2	-.021	.030	1.000	R4_D1 – Pr	-.025	.018	1.000
R2_D2 – R4_D2	.091	.031	.053	R1_D2 – Pr	-.021	.019	1.000
R3_D2 – R4_D2	.112	.029	.003	R2_D2 – Pr	.106	.029	.006
R1_D3 – R2_D3	-.120	.023	.000	R3_D2 – Pr	.127	.028	.000
R1_D3 – R3_D3	-.124	.021	.000	R4_D2 – Pr	.015	.020	1.000
R1_D3 – R4_D3	.022	.014	1.000	R1_D3 – Pr	.010	.018	1.000
R2_D3 – R3_D3	-.004	.022	1.000	R2_D3 – Pr	.130	.026	.000
R2_D3 – R4_D3	.142	.025	.000	R3_D3 – Pr	.134	.027	.000
R3_D3 – R4_D3	.146	.025	.000	R4_D3 – Pr	-.012	.019	1.000
R1_D1 – R1_D2	-.099	.023	.000				

**Tabelle A6.5:** Daten der inferenzstatistischen Auswertung der Maßabweichung zur Genauigkeit und Richtigkeit (Fortsetzung)



Paarung	t	p	p kor.	Paarung	t	p	p kor.
<b>Präzision   df = 52</b>							
R1 – R2	3.443	.001	.009	R1_D1 – R1_D3	.600	.551	1.000
R1 – R3	4.680	.000	.000	R1_D2 – R1_D3	.746	.459	1.000
R1 – R4	2.255	.028	.142	R2_D1 – R2_D2	1.749	.086	.259
R2 – R3	1.282	.205	.616	R2_D1 – R2_D3	1.174	.246	.492
R2 – R4	1.446	.154	.617	R2_D2 – R2_D3	.672	.504	.504
R3 – R4	2.746	.008	.058	R3_D1 – R3_D2	5.019	.000	.000
D1 – D2	2.089	.042	.083	R3_D1 – R3_D3	4.318	.000	.000
D1 – D3	2.576	.013	.039	R3_D2 – R3_D3	.875	.386	.386
D2 – D3	.444	.659	.659	R4_D1 – R4_D2	.234	.816	.816
R1_D1 – R2_D1	2.213	.031	.282	R4_D1 – R4_D3	1.004	.320	.959
R1_D1 – R3_D1	.307	.760	.760	R4_D2 – R4_D3	.883	.381	.763
R1_D1 – R4_D1	2.053	.045	.361	R1 – Pr	1.066	.2912	.291
R2_D1 – R3_D1	2.252	.029	.286	R2 – Pr	2.372	.0214	.129
R2_D1 – R4_D1	.333	.740	1.000	R3 – Pr	3.580	.0008	.007
R3_D1 – R4_D1	1.855	.069	.485	R4 – Pr	1.119	.2684	.537
R1_D2 – R2_D2	4.154	.000	.001	R1_D1 – Pr	1.087	.2819	1.000
R1_D2 – R3_D2	5.200	.000	.000	R2_D1 – Pr	1.271	.2094	1.000
R1_D2 – R4_D2	1.874	.067	.200	R3_D1 – Pr	.806	.4237	1.000
R2_D2 – R3_D2	.632	.530	1.000	R4_D1 – Pr	1.177	.2446	1.000
R2_D2 – R4_D2	2.480	.016	.066	R1_D2 – Pr	.534	.5953	.595
R3_D2 – R4_D2	3.427	.001	.007	R2_D2 – Pr	5.255	.0000	.000
R1_D3 – R2_D3	3.620	.001	.006	R3_D2 – Pr	6.700	.0000	.000
R1_D3 – R3_D3	5.027	.000	.000	R4_D2 – Pr	2.655	.0105	.052
R1_D3 – R4_D3	.572	.570	1.000	R1_D3 – Pr	.781	.4381	1.000
R2_D3 – R3_D3	.649	.519	1.000	R2_D3 – Pr	2.580	.0127	.064
R2_D3 – R4_D3	2.850	.006	.038	R3_D3 – Pr	3.108	.0031	.021
R3_D3 – R4_D3	3.579	.001	.006	R4_D3 – Pr	.276	.7838	.784
R1_D1 – R1_D2	.026	.979	.979				

**Tabelle A6.6:** Daten der inferenzstatistischen Auswertung der Maßabweichung zur Präzision



---

## Lebenslauf

### Persönliche Angaben:

Name: Felix Oberhofer  
Geburtsdatum: 02.02.1987  
Geburtsort: Stuttgart  
Staatsangehörigkeit: deutsch

### Ausbildung:

11/2013 – 04/2014 Diplomarbeit am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart, Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design und bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG  
10/2007 – 04/2014 Studium Maschinenwesen an der Universität Stuttgart Hauptfächer Konstruktionstechnik und Fabrikbetrieb  
07/2006 Allgemeine Hochschulreife, Württemberg Gymnasium Stuttgart-Untertürkheim

### Beruflicher Werdegang:

Seit 07/2020 Entwicklungsingenieur Vorentwicklung bei der ANDREAS STIHL AG & Co. KG  
07/2014 – 06/2020 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart, Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design





ISBN-13: 978-3-946924-20-3