

Schriften zur Medienproduktion

RESEARCH

Martin H. Rademacher

# Virtual Reality in der Produktentwicklung

Instrumentarium zur Bewertung der  
Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der  
Automobilindustrie



Springer Vieweg

---

# Schriften zur Medienproduktion

**Herausgegeben von**

H. Krömker, Ilmenau, Deutschland

P. Klimsa, Ilmenau, Deutschland

Diese Schriftenreihe betrachtet die „Medienproduktion“ als wissenschaftlichen Gegenstand. Unter Medienproduktion wird dabei das facettenreiche Zusammenspiel von Technik, Content und Organisation verstanden, das in den verschiedenen Medienbranchen völlig unterschiedliche Ausprägungen findet.

Im Fokus der Reihe steht das Finden von wissenschaftlich fundierten Antworten auf praxisrelevante Fragestellungen der Medienproduktion. Umfangreiches Erfahrungswissen soll hier systematisch aufbereitet und in generalisierbare, so weit wie möglich theoriegeleitete Erkenntnisse überführt werden. Da im Bereich Medien der Rezipiente eine besondere Rolle spielt, räumt die Schriftenreihe der Mensch-Maschine-Kommunikation einen hohen Stellenwert ein.

**Herausgegeben von**

Prof. Dr. Heidi Krömker,  
Fachgebiet Medienproduktion,  
TU Ilmenau

Prof. Dr. Paul Klimsa,  
Fachgebiet Kommunikations-  
wissenschaft, TU Ilmenau

---

Martin H. Rademacher

# Virtual Reality in der Produktentwicklung

Instrumentarium zur Bewertung der  
Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der  
Automobilindustrie

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Heidi Krömker  
und Prof. Dr. Paul Klimsa

 Springer Vieweg

Martin H. Rademacher  
Ilmenau, Deutschland

Dissertation Technische Universität Ilmenau, 2014

ISBN 978-3-658-07012-0

ISBN 978-3-658-07013-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-07013-7

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

# Geleitwort

Virtuelle Modelle von Produkten sind eine vielversprechende Basis, um das interdisziplinäre Wissen in komplexen Produktentwicklungsprozessen zusammenfließen zu lassen. Akteure und Akteurinnen aus der Produktionsplanung, der Qualitätssicherung, der Entwicklung, der Ergonomie und dem Design sowie den Entscheidungsgremien können direkt am virtuellen Produkt gemeinsam arbeiten.

Bisher ziehen die virtuellen Modelle nur zögerlich in die Produktentstehungsprozesse ein, die bereits mit vielfältiger Technik unterstützt werden. Über die Gründe wird oft spekuliert:

- Entsprechen die Darstellungen und die Interaktionen mit den virtuellen Modellen nicht den Anforderungen der Beteiligten am Produktentstehungsprozess?
- Oder sind die hoch professionalisierten Handlungsmuster an den virtuellen Prototypen nicht ausführbar?

Diesen Fragen geht Martin Rademacher in der vorliegenden Schrift nach. Vergleichende Studien untersuchen die Handlungsmuster der Akteure und Akteurinnen aus den unterschiedlichsten Disziplinen bei physikalischen und virtuellen Modellen am Beispiel der Automobilindustrie. Den detaillierten Analysen gelingt es, die typischen Barrieren und Möglichkeiten der Aufgabenausführung an virtuellen Modellen aufzudecken.

Damit diese Ergebnisse direkt in die Praxis einfließen können, hat Martin Rademacher einen Leitfaden erstellt, der Schritt für Schritt das Erstellen von virtuellen Modellen begleitet. Der Leitfaden sichert, dass die virtuellen Modelle anwenderorientiert entwickelt werden und damit in der Praxis erfolgreich eingesetzt werden können.

Mit dem vorliegenden Buch erhalten Interessierte aus Theorie und Praxis eine systematische Anleitung sowie Anregungen, virtuelle Modelle im Produktentstehungsprozess erfolgreich einzusetzen.

*Heidi Krömker / Paul Klümsa*

# Vorwort

Mein besonderer Dank gilt Frau Professor Heidi Krömker, die mich durch ihre Betreuung sowie ihre fachlichen Ratschläge und Hinweise bei der Erstellung dieser Arbeit wesentlich unterstützt hat. Ferner gilt mein Dank Herrn Professor Christian Weber für die Übernahme des Zweitgutachtens und Herrn Professor Schade für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Herrn Dr. Marcel Norbey und Herrn Dr. Stephan Husung danke ich sehr herzlich sowohl für die Beteiligung an der Prüfungskommission als auch für die Möglichkeit, jederzeit eine fachliche und methodische Diskussion zum Dissertationsthema führen zu können.

Diese Arbeit ist während meiner Zeit als Doktorand in der Abteilung DKM/Toleranzmanagement bei der AUDI AG in Ingolstadt entstanden. In diesem Zusammenhang gilt mein herzlicher Dank Herrn Dr. Oliver Riedel für die Übernahme des Drittgutachtens sowie die fachliche Unterstützung und Ratschläge, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt ferner Herrn Carsten Dabs für die Initiierung des Promotionsvorhabens sowie für die immerwährende Unterstützung - sowohl als fachlicher Diskussionspartner als auch als Abteilungsleiter während meiner Zeit als Doktorand, in der ich alle notwendigen Freiräume zur Erstellung der Arbeit eingeräumt bekommen habe. Weiterhin gilt mein besonderer Dank Frau Dr. Karin Spors von der Volkswagen AG, die zur richtigen Zeit am richtigen Ort gewesen ist und somit zum Gelingen dieser Arbeit wesentlich beigetragen hat.

Ferner danke ich allen Kollegen bei Audi und Volkswagen - insbesondere „meinen“ Diplomanden Philipp Buczek, Michaela Benz, Michael Schneider, Clemens Stachl und Maria Wycislo - für die Unterstützung, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit zuteil geworden ist.



Der größte Dank gebührt jedoch meiner Familie - insbesondere meinen Eltern und meinen Brüdern - sowie meinen Freunden, die mir jederzeit mit einem offenen Ohr, einem aufmunternden Wort und für einen fachlichen Diskurs zur Seite gestanden haben.

*Martin H. Rademacher*

# Kurzfassung

Die virtuelle Entwicklung ist als wesentlicher Bestandteil im Entwicklungsprozess neuer Produkte etabliert. Virtual Reality (VR) - ein Teilbereich der virtuellen Entwicklung - bietet die Möglichkeit, Entwicklungsstände schnell zu visualisieren und mit ihnen zu interagieren, um frühzeitig Fehler aufzudecken bzw. Ergonomie- und Verbauuntersuchungen oder Designfindungen zu unterstützen. Hierdurch können - durch einen ganzheitlichen Blick auf das Produkt - kostenintensive Optimierungsschleifen zu späteren Zeitpunkten reduziert werden.

Die Praxis zeigt, dass virtuelle Modelle nicht ausreichen, um alle notwendigen Fragestellungen zu beantworten. In diesem Zusammenhang hat in der Vergangenheit eine technikorientierte Weiterentwicklung der VR stattgefunden, ohne die Ausführbarkeit spezifischer Arbeitsaufgaben aus Nutzersicht zu untersuchen.

Ausgehend von diesen Defiziten wird im Rahmen dieser Arbeit ein Vorgehensmodell entwickelt, mit dem sich die Einsatzfähigkeit der VR für Fragestellungen im automobilen Entwicklungsprozess in einem nutzer- und aufgabenzentrierten Kontext untersuchen lässt.

Das Vorgehensmodell besteht aus der Analyse des vorhandenen VR-Arbeitssystems, der Identifikation und Klassifikation von Barrieren bei seiner Verwendung, einer gezielten Verbesserung der Arbeitsmittel und einer abschließenden Evaluation der Arbeitsaufgabe - unter Einbeziehung von Usability Evaluationskriterien - sowie des gesamten VR-Arbeitssystems durch die Verwendung von arbeitswissenschaftlichen Bewertungskriterien. Zur Untersuchung der Anwendbarkeit wird das Vorgehensmodell in einer Fallstudie auf den Aufgabenbereich „Absicherung der Anmutung und Qualität“ in einem Automobilunternehmen angewendet.

In dieser Fallstudie wird das VR-Arbeitssystem mit seinen wesentlichen Komponenten analysiert und beschrieben. Hierbei wird die zentrale Arbeits-

aufgabe herausgearbeitet, die durch 21 Teilaufgaben anhand von fünf Arbeitsobjekten bearbeitet wird. Weiterhin werden 12 Barrieren identifiziert, die die Nutzer des VR-Arbeitssystems von der Lösbarkeit der Arbeitsaufgabe abhalten. Im weiteren Verlauf wird zur gezielten Verbesserung exemplarisch eine Barriere reduziert bzw. behoben.

Die abschließende Evaluation der Arbeitsaufgabe ergibt, dass zur Lösung der Teilaufgaben spezifische Verbesserungen bei der Darstellung, der Interaktion und der Informationsdichte des virtuellen Modells notwendig sind. Aus den Ergebnissen werden Handlungsempfehlungen für die Verbesserung des spezifisch untersuchten VR-Arbeitssystems abgeleitet. Das entwickelte Vorgehensmodell lässt sich aufgrund seines allgemeinen Ansatzes auf andere Aufgabenbereiche der Automobilindustrie und weiterer produzierender Industrien anwenden.

# Abstract

Virtual development has been established as an important tool in the product development process. Virtual Reality (VR) - as a part of the virtual development - offers the potential for a fast product visualization and interaction, especially during early development stages. The VR-based visualization offers the potential for early error detection and leads to a reduction of cost-intensive product optimization at a later stage of the development process.

However, virtual models are yet not suitable for every task of the development process. In order to improve the effectiveness of virtual models, a technology-driven development of VR took place in the past with no or just a rudimentary focus on the user and his tasks during the product development process.

Based on the identified deficits, a process model was developed in this thesis with the particular goal to evaluate the usability of VR to support specific automotive-oriented tasks, focusing on the user and his needs during the product development process.

The model contains the analysis of the VR-work system including the identification and classification of barriers for the usability of the system, specific improvements of the tools and a final evaluation of the specific task as well as the whole VR-work-system through certain evaluation criteria. The model is verified by a case study focusing on the scope 'validation of the quality and the look-and-feel' at a car manufacturer.

The mentioned case study covers an analysis of the main components of the VR-work-system, identifying the main task which is represented by 21 subtasks, solved by the evaluation of 5 different work-items. During the evaluation 12 barriers were identified, which reduce the usability of the VR-work-system. Throughout the step 'improvement of the work-system', one barrier was eliminated.

The final evaluation showed that certain improvements regarding the visualization, the interaction and the information density of the virtual scene have to be brought. Therefore, specific suggestions are given in order to improve the usability of the VR-work-system. Due to its generic approach, the developed process model can be adopted to other scopes within the development of automotive or other industrial products.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xxiii
Abkürzungsverzeichnis	xxv
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und methodisches Vorgehen . . . . .	4
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>9</b>
2.1 Produktentwicklungsprozess . . . . .	9
2.1.1 Allgemeines . . . . .	9
2.1.2 Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie . . . . .	11
2.1.3 Virtuelle Produktentwicklung und Virtual Reality . . . . .	13
2.1.4 Aufgabenbereiche mit Virtual Reality . . . . .	17
2.2 Virtual Reality . . . . .	18
2.2.1 Begriffsdefinition . . . . .	18
2.2.2 Zusammenhang Virtual Reality System - Arbeitssystem	20
2.2.3 Stand der Technik . . . . .	25
2.2.4 Klassifikation von Virtual-Reality-Arbeitssystemen . . . . .	27
2.2.5 Zusammenfassung . . . . .	31
2.3 Akzeptanz und Usability . . . . .	31
2.3.1 Begriffsdefinition . . . . .	31

2.3.2	Usability-Engineering . . . . .	34
2.3.3	Usability Engineering von Virtual Reality . . . . .	36
2.4	Zusammenfassung . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Vorgehensmodell zur Evaluation von VR-Arbeitssystemen</b>	<b>43</b>
3.1	VR-Arbeitssystem . . . . .	43
3.1.1	Beschreibung und Charakterisierung . . . . .	43
3.1.2	Arbeitsmittel . . . . .	46
3.1.3	Evaluationskriterien . . . . .	48
3.1.4	Zusammenfassung . . . . .	52
3.2	Entwicklung des Vorgehensmodells . . . . .	53
3.2.1	Allgemeine Beschreibung . . . . .	53
3.2.2	Beschreibung und Analyse des VR-Arbeitssystems . . . . .	54
3.2.3	Analyse und Klassifikation von Barrieren . . . . .	56
3.2.4	Gezielte Verbesserung des VR-Arbeitssystems . . . . .	57
3.2.5	Analyse der Arbeitsaufgabe/Akzeptanz des VR-Ar- beitssystems . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Fallbeispiel: Absicherung der Anmutung und Qualität</b>	<b>61</b>
4.1	Auswahl des Aufgabenbereichs . . . . .	61
4.2	Methodisches Vorgehen . . . . .	62
4.3	Beschreibung und Analyse des VR-Arbeitssystems . . . . .	64
4.3.1	Beteiligte Rollen und deren Aufgabenziele . . . . .	64
4.3.2	Arbeitsaufgabe und Arbeitsobjekte . . . . .	65
4.3.3	Arbeitsmittel . . . . .	74
4.4	Analyse und Klassifikation von Barrieren . . . . .	75
4.5	Gezielte Verbesserung des VR-Arbeitssystems . . . . .	79
4.5.1	Gewichtung der identifizierten Barrieren . . . . .	79
4.5.2	Zusammenfassung und Auswahl der zu behe- benden Barrieren . . . . .	87
4.5.3	Behebung einer ausgewählten Barriere - Entwicklung einer intuitiven Bedienung . . . . .	88

---

<b>5</b>	<b>Empirische Studie zum Fallbeispiel</b>	<b>99</b>
5.1	Ziel der Studie . . . . .	99
5.2	Testdesign . . . . .	100
5.2.1	Untersuchungsmethode und Arbeitsmittel . . . . .	100
5.2.2	Konzeption der Testaufgaben . . . . .	101
5.2.3	Datenerhebung und Auswertung . . . . .	104
5.3	Durchführung der Studie . . . . .	107
5.3.1	Ablauf der Studie . . . . .	107
5.3.2	Probanden . . . . .	109
<b>6</b>	<b>Auswertung und Schlussfolgerungen</b>	<b>111</b>
6.1	Evaluation der Arbeitsaufgabe . . . . .	111
6.1.1	Allgemeine Erscheinung . . . . .	111
6.1.2	Oberfläche eines Bauteils . . . . .	112
6.1.3	Übergänge zwischen zwei Bauteilen . . . . .	114
6.1.4	Designkanten und Konturverläufe . . . . .	116
6.1.5	Übergänge zwischen zwei Bauteiloberflächen . . . . .	119
6.2	Zusammenfassende Evaluation der Arbeitsaufgabe . . . . .	120
6.3	Evaluation des VR-Arbeitssystems . . . . .	123
6.4	Evaluation des Kriteriums Zufriedenheit . . . . .	127
6.5	Ableitung von Handlungsempfehlungen . . . . .	129
6.6	Kritische Betrachtung der Tests . . . . .	131
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>133</b>
<b>A</b>	<b>Leitfaden zur Evaluation von VR-Arbeitssystemen</b>	<b>143</b>
<b>B</b>	<b>Leitfadeninterview „Rollen, Aufgabenziele, Barrieren“</b>	<b>145</b>
<b>C</b>	<b>Allgemeiner Fragebogen</b>	<b>147</b>
<b>D</b>	<b>Leitfadeninterview Usability-Test</b>	<b>151</b>
<b>E</b>	<b>Feedbackfragebogen</b>	<b>173</b>



<b>F</b>	<b>Detaillierte Auswertung der Arbeitsaufgabe</b>	<b>177</b>
F.1	Arbeitsobjekt Allgemeine Erscheinung . . . . .	177
F.1.1	Stimmigkeit von Proportionen und Volumen . . . . .	177
F.1.2	Schlüssigkeit aus Kundensicht . . . . .	179
F.1.3	Sichtbare unterliegende Geometrie . . . . .	181
F.1.4	Sichtbare Verbindungstechnik . . . . .	183
F.2	Arbeitsobjekt Oberfläche eines Bauteils . . . . .	184
F.2.1	Grundspannung der Fläche . . . . .	185
F.2.2	Flächenfehler . . . . .	186
F.2.3	Konvex-konkav-Wechsel . . . . .	188
F.2.4	Flachstellen . . . . .	190
F.2.5	Anläufe und Beschleunigungen . . . . .	192
F.2.6	Highlights und Lichtreflexe . . . . .	194
F.3	Arbeitsobjekt Übergänge zwischen zwei Bauteilen . . . . .	195
F.3.1	Optische Parallelität der Fugen . . . . .	196
F.3.2	Optische Parallelität der Schindelungen . . . . .	197
F.3.3	Fugen- und Radiengröße im Kontext . . . . .	199
F.3.4	Fugengrund . . . . .	201
F.3.5	Lichtkanten und Aufsicht auf Fugenbänke . . . . .	203
F.3.6	Abstellungen . . . . .	205
F.4	Arbeitsobjekt Designkanten und Konturverläufe . . . . .	206
F.4.1	Optische Stetigkeit der Linienverläufe . . . . .	206
F.4.2	Optisch stetige Radiengröße . . . . .	208
F.4.3	Ausläufe der Kanten . . . . .	210
F.5	Arbeitsobjekt Übergänge zwischen zwei Bauteiloberflächen . . . . .	212
F.5.1	Stetiger Bauteilübergang . . . . .	212
F.5.2	Farbwirkung zueinander . . . . .	214
<b>G</b>	<b>Übersicht Effizienz Teilaufgaben</b>	<b>217</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>219</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Änderungskosten in der Produktentwicklung nach [Kim02] . . .	2
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	8
2.1	Aufgabenbereiche mit VR-Unterstützung . . . . .	18
2.2	Das 3I-Modell nach Burdea und Coiffet [BC03] . . . . .	21
2.3	Die klassischen Komponenten eines VR-Systems nach Burdea und Coiffet [BC03] . . . . .	22
2.4	Arbeitssystem im arbeitswissenschaftlichen Kontext in An- lehnung an Schlick u.a. [SBL10] . . . . .	24
2.5	Zusammenhang zwischen VR- und Arbeitssystem . . . . .	25
2.6	Kategorisierung der Eingabegeräte für virtuelle Szenen . . . .	28
2.7	Prinzip des Human-Centered-Design nach DIN EN ISO 9241- 210 [DIN10] . . . . .	35
2.8	Methode zur nutzerzentrierten Entwicklung und Evaluation virtueller Umgebungen nach Gabbard u.a. [GHS99] . . . . .	38
2.9	Usability-Kriterien von VR nach Stanney u.a. [SMR <sup>+</sup> 03] . . .	40
3.1	Darstellung des VR-Arbeitssystems mit seinen Komponenten	44
3.2	Evaluationskriterien der Arbeitsaufgabe und des VR-Arbeits- systems . . . . .	52
3.3	Vorgehensmodell zur Evaluation virtueller Szenen für den Produktentwicklungsprozess . . . . .	55
4.1	Verteilung der Rollenzugehörigkeit der Interviewpartner . . .	64

4.2	Zusammenhang Arbeitsobjekte, Arbeitsaufgabe und Teilaufgaben . . . . .	69
4.3	Unterschiedliche Verfeinerungsstufen des adaptiven Raytracingverfahrens . . . . .	75
4.4	Finaler Prototyp für eine intuitive Bedienung virtueller Szenen aus Rademacher u.a. [RSD12] . . . . .	92
4.5	Auswertung der angegebenen Nutzungshäufigkeit der Probanden mit Tablet-PCs . . . . .	93
4.6	Testaufgabe des zweiten Abschnitts der Vorstudie . . . . .	94
4.7	Auswertung der benötigten Zeit zur Lösung der Testaufgaben durch die Probanden . . . . .	96
5.1	Die für die Usability-Tests verwendeten Arbeitsmittel . . . . .	101
5.2	Der für die Usability-Tests verwendete Untersuchungsgegenstand . . . . .	102
5.3	Schematische Darstellung des Testaufbaus . . . . .	108
6.1	Zusammenfassung der Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Allgemeine Erscheinung</i> . . . . .	112
6.2	Zusammenfassung der Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Oberfläche eines Bauteils</i> . . . . .	114
6.3	Zusammenfassung der Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Übergänge zwischen zwei Bauteilen</i> . . . . .	117
6.4	Zusammenfassung der Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Designkanten und Konturverläufe</i> . . . . .	118
6.5	Zusammenfassung der Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Übergänge zwischen zwei Bauteiloberflächen</i> . . . . .	120
6.6	Einschätzung zur allgemeinen Durchführbarkeit der Teilaufgaben . . . . .	125
6.7	Beurteilung der kurzfristigen körperlichen Beeinträchtigung durch die Probanden . . . . .	126

F.1	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Stimmigkeit von Proportionen und Volumen</i> . . . . .	178
F.2	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Stimmigkeit von Proportionen und Volumen</i> . . . . .	178
F.3	Ausführbarkeit der Teilaufgabe <i>Schlüssigkeit aus Kundensicht</i>	180
F.4	Zufriedenheit der Probanden bei der Ausführung der Teilaufgabe <i>Schlüssigkeit aus Kundensicht</i> . . . . .	180
F.5	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Sichtbare unterliegende Geometrie</i> . . . . .	182
F.6	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Sichtbare unterliegende Geometrie</i> . . . . .	182
F.7	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Sichtbare Verbindungstechnik</i>	183
F.8	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Sichtbare Verbindungstechnik</i> . . . . .	184
F.9	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Grundspannung der Fläche</i>	185
F.10	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Grundspannung der Fläche</i> . . . . .	186
F.11	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Flächenfehler</i> . . . . .	187
F.12	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Flächenfehler</i> . . . . .	187
F.13	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Konvex-konkav-Wechsel</i> . .	189
F.14	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Konvex-konkav-Wechsel</i> . . . . .	189
F.15	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Flachstellen</i> . . . . .	191
F.16	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Flachstellen</i> . . . . .	191
F.17	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Anläufe und Beschleunigungen</i> . . . . .	192
F.18	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Anläufe und Beschleunigungen</i> . . . . .	193
F.19	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Highlights und Lichtreflexe</i>	194

F.20	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Highlights und Lichtreflexe</i> . . . . .	195
F.21	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>optische Parallelität der Fugen</i> . . . . .	196
F.22	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>optische Parallelität der Fugen</i> . . . . .	197
F.23	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>optische Parallelität der Schindelungen</i> . . . . .	198
F.24	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>optische Parallelität der Schindelungen</i> . . . . .	199
F.25	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Fugen- und Radiengröße im Kontext</i> . . . . .	200
F.26	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Fugen- und Radiengröße im Kontext</i> . . . . .	201
F.27	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Fugengrund</i> . . . . .	202
F.28	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Fugengrund</i> . . . . .	202
F.29	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Lichtkanten und Aufsicht auf Fugenbänke</i> . . . . .	203
F.30	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Lichtkanten und Aufsicht auf Fugenbänke</i> . . . . .	204
F.31	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Abstellungen</i> . . . . .	205
F.32	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Abstellungen</i> . . . . .	206
F.33	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>optische Stetigkeit der Linienverläufe</i> . . . . .	207
F.34	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>optische Stetigkeit der Linienverläufe</i> . . . . .	208
F.35	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>optisch stetige Radiengröße</i> . . . . .	209
F.36	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>optisch stetige Radiengröße</i> . . . . .	209
F.37	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Ausläufe der Kanten</i> . . . . .	211

---

F.38	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Ausläufe der Kanten</i> . . . . .	211
F.39	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>stetiger Bauteilübergang</i> . .	213
F.40	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>stetiger Bauteilübergang</i> . . . . .	213
F.41	Durchführbarkeit der Teilaufgabe <i>Farbwirkung zueinander</i> . .	215
F.42	Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgabe <i>Farbwirkung zueinander</i> . . . . .	215

# Tabellenverzeichnis

2.1	Ausprägungen von VR-Arbeitssystemen in Anlehnung an Mujber u.a. [MSH04] . . . . .	29
2.2	Überblick Usability Evaluation von Virtual Reality . . . . .	37
3.1	VR-Arbeitssystem - Ausprägung der Komponente Nutzer . . . . .	45
3.2	VR-Arbeitssystem - Ausprägung der Komponente Arbeitsmittel . . . . .	47
4.1	Rollenzuordnung zu den unterschiedlichen Aufgabenbereichen . . . . .	62
4.2	Beschreibung der beteiligten Rollen . . . . .	66
4.3	Arbeitsobjektspezifische Dimensionen der Informationsdarstellungen . . . . .	67
4.4	Teilaufgaben, die anhand des Arbeitsobjekts <i>Allgemeine Erscheinung</i> bearbeitet werden. . . . .	70
4.5	Teilaufgaben, die anhand des Arbeitsobjekts <i>Oberfläche eines Bauteils</i> bearbeitet werden. . . . .	71
4.6	Teilaufgaben, die anhand des Arbeitsobjekts <i>Übergänge zwischen zwei Bauteilen</i> bearbeitet werden. . . . .	72
4.7	Teilaufgaben, die anhand des Arbeitsobjekts <i>Designkanten und Konturverläufe</i> bearbeitet werden. . . . .	73
4.8	Teilaufgaben, die anhand des Arbeitsobjekts <i>Übergänge zwischen zwei Bauteiloberflächen</i> bearbeitet werden. . . . .	73
4.9	Verteilung der erhobenen Barrieren auf die unterschiedlichen Rollen . . . . .	80

4.10	Bewertung der verschiedenen Barrieren hinsichtlich ihrer Behebbarkeit . . . . .	87
4.11	Funktionale Anforderungen der Interaktionsaufgaben an die Steuerung . . . . .	90
4.12	Benötigte Zeit zur Lösung der Teilaufgaben durch die Probanden . . . . .	95
6.1	Überblick über die Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Allgemeine Erscheinung</i> . . . . .	113
6.2	Überblick über die Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Oberfläche eines Bauteils</i> . . . . .	115
6.3	Überblick über die Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Übergänge zwischen zwei Bauteilen</i> . . . . .	117
6.4	Überblick über die Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Designkanten und Konturverläufe</i> . . . . .	119
6.5	Überblick über die Teilaufgaben des Arbeitsobjekts <i>Übergänge zwischen zwei Bauteiloberflächen</i> . . . . .	120
6.6	Überblick der durchführbaren und nicht durchführbaren Teilaufgaben . . . . .	122
6.7	Übersicht über die Zufriedenheit der Probanden bei der Durchführung der Teilaufgaben . . . . .	128
6.8	Abgeleitete Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Durchführbarkeit der Arbeitsaufgabe . . . . .	129
A.1	Leitfaden zur Evaluierung von VR-Arbeitssystemen . . . . .	144
G.1	Übersicht Zeitmessung der Probanden zu den einzelnen Teilaufgaben . . . . .	218



# Abkürzungsverzeichnis

CAD .....	<b>C</b> omputer <b>A</b> ided <b>D</b> esign
CAE .....	<b>C</b> omputer <b>A</b> ided <b>E</b> ngineering
CAVE .....	<b>C</b> ave <b>A</b> utomated <b>V</b> irtual <b>E</b> nvironment
CAx .....	<b>C</b> omputer <b>A</b> ided <b>x</b>
CFD .....	<b>C</b> omputational <b>F</b> luid <b>D</b> ynamics
DfX .....	<b>D</b> esign for <b>X</b>
DMU .....	<b>D</b> igital <b>M</b> ock- <b>U</b> p
FEM .....	<b>F</b> inite <b>E</b> lemente <b>M</b> ethode
GUI .....	<b>G</b> raphical <b>U</b> ser <b>I</b> nterface
HMD .....	<b>H</b> ead <b>M</b> ounted <b>D</b> isplay
PEP .....	<b>P</b> rodukt <b>E</b> ntwicklungs <b>P</b> rozess
VR .....	<b>V</b> irtual <b>R</b> eality