Konzeption und Einführung von Virtueller Realität als Komponente der Digitalen Fabrik in Industrieunternehmen

von der Fakultät für Maschinenbau

der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von

Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Christoph Runde

aus Riesenbeck

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
Mitberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath
Tag der Einreichung:	18. Oktober 2006
Tag der mündlichen Prüfung:	22. März 2007

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2007

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **13**

Abkürzungsverzeichnis **16**

1 Einleitung **18**

1.1 Ausgangssituation 18

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise 19

2 Festlegung des Untersuchungsbereiches **20**

2.1 Digitale Fabrik - Definition, Ziele, Anwendungsgebiete 20

2.2 Virtuelle Realität (VR) 22

2.2.1 Definition der Virtuellen Realität 22

2.2.2 Virtuelle Präsenz und Immersion 22

2.3 Abgrenzung der Begriffe Digitale Fabrik und Virtuelle Realität 23

2.3.1 Anwendungen Virtueller Realität in der Digitalen Fabrik 25

3 Anforderungen an ein Verfahren zur Konzeption und Einführung von VR in Industrieunternehmen **31**

3.1 Identifikation der VR-Einsatzhemmnisse 31

3.2 Analyse der VR-Einsatzhemmnisse 32

3.3 Anforderungen an die VR-Systemkonzeption 34

3.4 Anforderungen an den Nutzennachweis für VR-Technologien für Aufgaben des Unternehmens 36

3.5 Anforderungen an die Einführung von VR-Technologien in Industrieunternehmen 37

3.6 Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten 37

4 Stand der Technik und des Wissens **40**

4.1 Konzeption von VR-Systemen 40

4.1.1 Auswahl von VR-Systemkomponenten 40

4.1.2 Gestaltungsrichtlinien für VR-Systeme 40

4.1.2.1 Gestaltung von VR-Interface-Systemen 41

4.1.2.2 Vorgehensmodelle 41

4.1.2.3 Evaluationsmethoden Virtueller Umgebungen 41

4.1.3 Bewertung der Vorgehensweisen zur Konzeption von VR-Systemen 42

4.2 Nutzen von VR-Systemen ... 43
4.2.1 Tätigkeitsbezogener Nutzen von VR-Systemen ... 43
4.2.2 Funktionsorientierter Nutzen von VR-Systemen: Unterstützung von Wahrnehmung und Interaktion ... 47
4.2.2.1 Visuelle Wahrnehmung ... 47
4.2.2.2 Graphische Ausgabesysteme ... 47
4.2.2.3 Auditive Wahrnehmung ... 50
4.2.2.4 Akustische Ausgabesysteme ... 50
4.2.2.5 Taktile Wahrnehmung ... 52
4.2.2.6 Systeme zur Ausgabe von Hautreizen ... 52
4.2.2.7 Kinästhetische Wahrnehmung ... 53
4.2.2.8 Kraftausgabesysteme ... 53
4.2.2.9 Ausgabesysteme für den Orientierungssinn ... 55
4.2.2.10 Olfaktorische und gustatorische Wahrnehmung ... 55
4.2.2.11 Geruchsstoffemitter ... 56
4.2.2.12 Positionserfassungssysteme ... 56
4.2.2.13 Eingabesysteme ... 57
4.2.3 Grenzen des Einsatzes von VR ... 59
4.2.4 Bewertung der Erkenntnisse zum Nutzen von VR-Systemen ... 60
4.3 Einführung von VR-Systemen in Industrieunternehmen ... 60
4.3.1 Erkenntnisse zur Einführung von VR-Systemen in Industrieunternehmen ... 60
4.3.2 Erkenntnisse aus der Einführung anderer IT-Systeme in Industrieunternehmen ... 61
4.3.3 Bewertung der Erkenntnisse zur Einführung von VR- und IT-Systemen ... 64
5 Entwurf eines Verfahrens zur Konzeption und Einführung von VR in Industrieunternehmen ... 65
5.1 Konzeption einer Methode zur objektiven Beschreibung und Einordnung von VR-Interface-Systemen ... 65
5.2 Konzeption einer Methode zur Beschreibung und Einordnung von Aufgaben der Digitalen Fabrik zur Ableitung von Anforderungen an VR-Systeme ... 67
5.3 Konzeption einer Methode zur Ermittlung eines einzusetzenden VR-Systems für benannte Aufgaben unter Nutzenkriterien ... 69
5.4 Konzeption einer Methode zur Einführung von VR in Industrieunternehmen ... 75
6 Realisierung eines Verfahrens zur Konzeption und Einführung von VR in Industrieunternehmen ... 77
6.1 Ableitung einer Methode zur objektiven Beschreibung und Einordnung von VR-Interface-Systemen ... 77
6.1.1 Identifikation der benötigten Beschreibungsschemata ... 77
6.1.2 Strukturierte Beschreibung graphischer Ausgabesysteme ... 79
6.1.3 Strukturierte Beschreibung akustischer Ausgabesysteme ... 84
6.1.4 Strukturierte Beschreibung von Systemen zur Ausgabe von Hautreizen ... 88
6.1.5 Strukturierte Beschreibung von Kraftausgabesystemen ... 92
6.1.6 Strukturierte Beschreibung von Geruchsstoffemittern ... 96
6.1.7 Strukturierte Beschreibung von Positionserfassungssystemen ... 100
6.1.8 Strukturierte Beschreibung von Eingabesystemen ... 104
6.1.9 Weitere Vorgehensweise auf Basis der Beschreibungsschemata ... 108

6.2 Ableitung einer Methode zur Beschreibung und Einordnung von Aufgaben der Digitalen Fabrik zur Ableitung von Anforderungen an VR-Systeme ... 108
6.2.1 Beschreibung von Aufgaben der Digitalen Fabrik auf Basis deren Betrachtungsgegenstandes ... 114
6.2.1.1 Erscheinung als Betrachtungsgegenstand ... 114
6.2.1.2 Logische Zusammenhänge als Betrachtungsgegenstand ... 115
6.2.1.3 Physikalische, technische und wirtschaftliche Modelle als Betrachtungsgegenstand ... 116
6.2.1.4 Menschliches Verhalten als Betrachtungsgegenstand ... 116
6.2.1.5 Wissen als Betrachtungsgegenstand ... 117
6.2.2 Beschreibung von Aufgaben der Digitalen Fabrik auf Basis deren Handlungsklasse ... 118
6.2.2.1 Handlungsklasse Bewerten ... 118
6.2.2.2 Handlungsklasse Gestalten ... 119
6.2.2.3 Handlungsklasse Wissenstransfer und Wissenssicherung ... 119
6.2.2.4 Handlungsklasse Tele-Anwendungen ... 120
6.2.2.5 Handlungsklasse in-situ-Prozessunterstützung ... 121
6.2.3 Beschreibung von Aufgaben der Digitalen Fabrik auf Basis der Kombination von deren Handlungsklasse und von deren Betrachtungsgegenstand ... 122
6.2.3.1 Betrachtungsgegenstand-spezifische Anforderungen bewertender Aufgaben ... 122
6.2.3.2 Betrachtungsgegenstand-spezifische Anforderungen gestaltender Aufgaben ... 123
6.2.3.3 Betrachtungsgegenstand-spezifische Anforderungen von Aufgaben des Wissenstransfers und der Wissenssicherung ... 124
6.2.3.4 Betrachtungsgegenstand-spezifische Anforderungen von Aufgaben in Tele-Anwendungen ... 124
6.2.3.5 Betrachtungsgegenstand-spezifische Anforderungen von Aufgaben der in-situ-Prozessunterstützung ... 125
6.2.4 Anforderungen aus Unternehmensvorgaben und indirekte Anforderungen ... 125
6.3 Ableitung einer Methode zur Ermittlung eines einzusetzenden VR-Systems für benannte Aufgaben unter Nutzenkriterien ... 125
6.3.1 Entwicklung der Prinzipien der Kombinierbarkeit von VR-Interface-Systemen ... 125
6.3.2 Schritte der Wertsynthese ... 127
6.4 Ableitung einer Methode zur Einführung von VR-Systemen in Industrieunternehmen ... 131
6.4.1 Festlegung der Gestaltungsbereiche Strukturen, Menschen, Ausstattung, Strategie und operative Maßnahmen ... 131
6.4.1.1 Wandel der Unternehmensstrukturen ... 131
6.4.1.2 Wandel der Humanressourcen ... 133
6.4.1.3 Wandel der Ausstattung ... 134
6.4.1.4 Wandel der Unternehmensstrategie ... 134
6.4.1.5 Operative Maßnahmen der Einführung ... 135
6.4.2 Zusammenfassung der Methode zur Einführung von VR in Industrieunternehmen ... 135
7 Anwendung der Methoden ... 137
7.1 Fallbeispiel 1: Verbaubarkeitsuntersuchungen ... 137
7.1.1 Unternehmensanalyse ... 137
7.1.2 Schritte der Wertsynthese ... 137
7.1.3 Änderungserfordernisse des Unternehmens ... 141
7.1.4 Nutzenabschätzung und Wirtschaftlichkeitsbewertung ... 142
7.1.5 Operative Maßnahmen ... 142
7.1.6 Betrachtung realisierter Systemaufbauten ... 143
7.1.7 Diskussion des Ergebnisses ... 143

7.2 Fallbeispiel 2: Arbeitsplatzvalidierung ... 144
7.2.1 Unternehmensanalyse ... 144
7.2.2 Schritte der Wertsynthese ... 144
7.2.3 Änderungserfordernisse des Unternehmens ... 148
7.2.4 Nutzenabschätzung und Wirtschaftlichkeitsbewertung ... 149
7.2.5 Operative Maßnahmen ... 150
7.2.6 Betrachtung realisierter Systemaufbauten ... 150
7.2.7 Diskussion des Ergebnisses ... 150
7.3 Fallbeispiel 3: Fabrikanordnungsplanung ... 151
7.3.1 Unternehmensanalyse ... 151
7.3.2 Schritte der Wertsynthese ... 151
7.3.3 Änderungserfordernisse des Unternehmens ... 155
7.3.4 Nutzenabschätzung und Wirtschaftlichkeitsbewertung ... 156
7.3.5 Operative Maßnahmen ... 157
7.3.6 Betrachtung realisierter Systemaufbauten ... 157
7.3.7 Diskussion des Ergebnisses ... 158
7.4 Bewertung der entwickelten Methoden hinsichtlich der gestellten Anforderungen ... 158
7.4.1 Diskussion der Methode zur objektiven Beschreibung und Einordnung von VR-Interface-Systemen ... 158
7.4.2 Diskussion der Methode zur Beschreibung und Einordnung von Aufgaben der Digitalen Fabrik zur Ableitung von Anforderungen an VR-Systeme ... 159
7.4.3 Diskussion der Methode zur Ermittlung einzusetzender VR-Systeme für benannte Aufgaben unter Nutzenkriterien ... 160
7.4.4 Diskussion der Methode zur Einführung von VR in Industrieunternehmen ... 161
8 Zusammenfassung und Ausblick ... 162
8.1 Zusammenfassung und Ausblick ... 162
8.2 Summary ... 164
9 Literaturverzeichnis ... 167
9.1 Monographien, Artikel und Internetquellen ... 167
9.2 Normen, Richtlinien und Schutzrechte ... 192
10 Anhang ... 194

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die Anwendungsfelder der Virtuellen Realität (englisch: Virtual Reality, VR) sind heute sehr breit gestreut und finden sich beispielsweise in der Medizin, im Militär, in der Archäologie, in der Unterhaltung oder in der Produktentwicklung [Barfield 1995; Brooks 1999; McLaughlin 2002]. Das in dieser Arbeit beleuchtete Anwendungsfeld der VR ist die Produktion, also alle Tätigkeiten und Aufgaben, die dazu dienen, die Produktion von Gütern zu ermöglichen. Zur Absicherung von Planungen und Entscheidungen in der Produktion werden heute sogenannte Technologien der Digitalen Fabrik eingesetzt. Diese erlauben die computergestützte Vorab-Planung und Optimierung von Produktionen.

Die ersten, grundlegenden Ansätze zur Erzeugung Computer-generierter Virtueller Umgebungen entstanden in den sechziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts [Sutherland 1965; Sutherland 1968; Bauer, C. 1996]. Mit der in den achtziger und neunziger Jahren rasant ansteigenden Leistung von Computer-CPUs und Graphiksystemen [Bullinger 1994; Brooks 1999] verbesserten sich die Voraussetzungen für Entwicklungen in der VR auf breiter Front, da nun nicht mehr die großen Graphik-Workstations in dem Maße benötigt wurden, wie es zehn Jahre zuvor noch der Fall gewesen war. In der Mitte der neunziger Jahre wurden dann auch seitens vieler Autoren die strategischen Vorteile von Virtueller Realität betont und ein Durchbruch dieser Technologie in die breite Anwendung hinein vorhergesagt [Bullinger 1994; Flaig 1996a; Encarnação 1997; Brooks 1999].

Dieser Durchbruch auf breiter Front ist nicht eingetreten [Lechler 1998; CyberEdge 2002; Decker 2002]. Beiträge aus jüngerer Zeit bestätigen zwar den permanenten Einsatz von Technologien der VR in spezifischen Anwendungsfeldern einzelner Branchen [Gillner 1999; Automobilentwicklung 2000a], der massenhafte, branchenübergreifende Einsatz findet jedoch nach wie vor nicht statt. Dieses ist umso erstaunlicher, als die Potenziale von VR-Technologien in der Digitalen Fabrik in unzähligen Fachartikeln betont wurden und werden [Bullinger 1994; Flaig 1996a; Flaig 1998i; Weyrich 1999; Automobilentwicklung 2000a; Automobilentwicklung 2000b; Koch 2000; Westkämper 2001a; Westkämper 2001b; Whyte 2001; Gausemeier 2002; Reinhart 2002a; SGI 2002; Stadtler 2002]. Gleichfalls zeigen Markt- und Nutzeruntersuchungen lohnende Einsatzgebiete der VR auf, in denen sich Verwender großen Nutzen versprechen [CyberEdge 2002; Decker 2002; Klocke 2003a].

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, eine wissenschaftliche Methode zu entwickeln, die einer wesentlich größeren Zahl von Unternehmen den Zugang zu den Potenzialen der VR eröffnet.

Nach Abschnitt 1.1 sind die Potenziale der VR benannt und akzeptiert, jedoch wird die Mehrzahl der Unternehmen durch noch zu identifizierende Hemmnisse an der Erschließung dieser Potenziale gehindert.

Daher müssen in einem ersten Schritt die Hemmnisse des VR-Einsatzes in Industrieunternehmen recherchiert werden. Diese Hemmnisse ergeben sich aus den Ergebnissen bereits durchgeführter Marktforschungsuntersuchungen und Nutzerbefragungen [Bullinger 1994; Goertz 1994; Larson 1994; Bauer, C. 1996; Lechler 1998; Brooks 1999; Westkämper 2001a; Whyte 2001; Decker 2002; Haselberger 2003; Klocke 2003a; Dangelmaier, M. 2005].

Daraufhin sind die zugrunde liegenden Ursachen für diese Hemmnisse zu identifizieren. Das Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, die Gründe dafür zu bestimmen, dass VR-Einsatzhemmnisse noch immer existieren, obgleich die Technologien und Nutzenpotenziale der VR seit geraumer Zeit bekannt sind. Nur wenn die Ursachen der Einsatzhemmnisse bekannt sind, lassen sich Methoden ableiten, welche die VR-Einsatzhemmnisse ursächlich und damit nachhaltig beseitigen.

Im nächsten Schritt werden Anforderungen an Methoden definiert, die diese Barriereursachen beseitigen oder vermindern. Nachhaltigkeit impliziert beispielsweise, dass keine Einschränkungen der zu entwickelnden Methoden auf bestimme VR-Systeme oder noch nicht absehbare technische Entwicklungen erfolgen dürfen.

Weiterhin werden auf der Basis der identifizierten VR-Einsatzhemmnisse auch die methodischen Entwicklungsschwerpunkte dieser Arbeit festgelegt.

Diese Entwicklungsschwerpunkte definieren die wissenschaftliche Grundlage der Arbeit, innerhalb welcher der Stand der Technik und des Wissens zu erheben ist. Vorhandene Methoden und Ansätze, welche bereits Beiträge zu den Entwicklungsschwerpunkten liefern, werden identifiziert und bewertet. Gleichzeitig wird ein Blick auf ähnlich gelagerte Aufgabenstellungen benachbarter Themen- und Technologiebereiche genommen, um anwendbare Lösungsansätze zu identifizieren. So existierten und existieren industrielle Einsatzhemmnisse nicht nur für VR-Systeme, sondern auch für bereits länger im Einsatz befindliche IT-Systeme wie CAD (Computer Aided Design)- oder EDM (Engineering Data Management) / PDM (Product Data Management)-Systeme [Kahlert 2001; Hayka 2003; VDI 2216; VDI 2219].

Die Analyse des Stands der Technik und des Wissens zeigt aktuelle Lücken und Entwicklungserfordernisse auf. Auf dieser Basis und vor dem Hintergrund der definierten Anforderungen werden wissenschaftliche Methoden zur Beseitigung und Verminderung der VR-Einsatzhemmnisse konzipiert und entwickelt.

Schließlich folgen die Auswahl typischer und aussagekräftiger Testszenarien, anhand derer die entwickelten Methoden validiert werden.