

Thomas Alt

Augmented Reality in der Produktion



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Zugleich: Dissertation, Magdeburg, Univ., 2002

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2003

ISBN 3-8316-0226-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Augmented Reality (AR) Technologie	3
2.1	Definition	3
2.2	Abgrenzung	4
2.3	Funktionsweise der AR-Technologie	5
2.4	Aufbau von AR-Systemen	6
2.5	Anzeigeegeräte der AR-Technologie	8
2.5.1	Look-Through Anzeigeegeräte	8
2.5.2	Monitor-basierte Anzeigeegeräte	9
3	Anwendungen der AR-Technologie	11
3.1	Anwendungsbereiche	11
3.2	Medizintechnik	11
3.3	Militärtechnik	12
3.4	Freizeit und Endverbraucher	12
3.5	Architektur und Bauindustrie	13
3.6	Produktentwicklung und Service	13
3.7	Produktion	15
3.8	Bewertung der Anwendungen der AR-Technologie	17
4	Fragestellungen des AR-Einsatzes	20
5	Anzeigeegeräte der AR-Technologie	22
5.1	Klassifikation der AR-Anzeigeegeräte	22
5.2	Augenoptische Grundlagen	23
5.2.1	Bildentstehung	23
5.2.2	Räumliche Wahrnehmung	24
5.3	Bildquellen	26
5.4	Beschreibende Parameter	27
5.4.1	Monokulares Sichtfeld (Field of View)	27
5.4.2	Binokulares Sichtfeld (Field of View)	28
5.4.3	Auflösung von Head Mounted Displays (HMD)	29
5.4.4	Austrittspupille	30
5.5	Optischer Aufbau von Anzeigeegeräten	30
5.5.1	HMD ohne optische Elemente	31
5.5.2	HMD mit Lupe	32
5.5.3	HMD mit Mikroskop	34
5.5.4	Holografische Displays	35
5.6	Anforderungen an Anzeigeegeräte für den Produktionseinsatz	36
5.6.1	Auflösung	36
5.6.2	Räumliche Visualisierung	40
5.6.3	Field of View	41
5.6.4	Austrittspupille	44
5.6.5	Unterscheidungsfreie Überlagerung	45
5.7	Klassifikation von Visualisierungstechnologien	47
5.8	Untersuchung existierender Anzeigeegeräte	49
5.8.1	Einführung	49

5.8.2	Versuchsaufbau	49
5.8.3	Auswertung	52
5.8.4	Beurteilung existierender Anzeigegeräte	54
5.9	Eignung der Anzeigegeräte	55
5.10	Basisanforderungen an Anzeigegeräte	57
6	Informationsdarstellung für den Produktionseinsatz	58
6.1	Ermittlung von effektiven Darstellungsmöglichkeiten	58
6.1.1	Versuchsablauf	60
6.1.2	Vorauswertung	61
6.1.3	Versuchsergebnisse	62
6.2	Zeichenhöhen und Strichbreiten	68
7	Tracking-Systeme für den Produktionseinsatz	70
7.1	Verfahren	70
7.2	Bewertungsfaktoren von Tracking-Systemen	74
7.2.1	Freiheitsgrade	74
7.2.2	Genauigkeit	75
7.2.3	Meßzeit und Latenzzeit	76
7.2.4	Robustheit	78
7.2.5	Trackingbereich / Messraum	79
7.3	Bewertung von Tracking-Verfahren für den Produktionseinsatz	79
8	Produktionstechnischer Einfluss der AR-Technologie	81
8.1	Potenzial der AR-Technologie	81
8.1.1	Ausgangssituation	81
8.1.2	Versuchsbeschreibung	81
8.1.3	Versuchsauswertung	86
8.1.4	Potenzialabschätzung	89
8.2	Arbeitsaufgabenspezifische Anforderungen an AR-Systeme	91
8.2.1	Anwendungsbereiche	91
8.2.2	Informationsbedarf	93
8.2.3	Benötigte Informationsarten	94
8.3	Komplexität der Arbeitsaufgabe	95
8.3.1	Komplexität am Beispiel der Kommissionierung	95
8.3.2	Komplexitätsbeherrschung mit AR	99
9	Anwendungsbeispiele der AR-Technologie	101
9.1	AR-unterstützte Fabrik- und Anlagenplanung	101
9.1.1	Virtuelle Techniken in der Fabrik- und Anlagenplanung	101
9.1.2	Unterstützung von Planungsprozessen mit AR	102
9.1.3	Prototyp	103
9.2	AR-unterstützte Kommissionierung und Montage	105
9.2.1	Grundlagen der Kommissionierung	105
9.2.2	Kommissionierung in der Modul-Montage	106
9.2.3	Konzeption des Zielsystems	107
9.2.4	Einsparungspotentiale	109
9.3	AR-unterstützte Qualitätssicherung	111
9.3.1	Qualitätssicherung und -kontrolle in der Produktion	111
9.3.2	Qualitätssicherung in der Modul-Montage	113
9.3.3	Sollkonzept	116
9.3.4	Prototyp	117

10	Zusammenfassung und Ausblick	120
11	Verzeichnisse.....	122
11.1	Formelzeichen	122
11.2	Abkürzungsverzeichnis.....	123
11.3	Quellen	124
11.4	Abbildungen	135
12	Anhang	137
A.	Liste verfügbarer Anzeigeräte	137
B.	Technische Daten verwendeter Anzeigeräte	137

1 Einleitung

Die Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen beruht im Wesentlichen auf den Fähigkeiten der Produktionsfaktoren Mensch, Maschine, Material und Methode sowie deren effektiven Kombination. Die menschliche Leistungsfähigkeit ist in Bezug auf die Wahrnehmung und Verarbeitung von Informationen begrenzt. Eine Leistungssteigerung kann durch die Unterstützung des Menschen mit elektronischen Rechenanlagen, mit mechanischen Systemen oder mit einer Kombination daraus (z.B. Roboter) ermöglicht werden.

Kennzeichen der dazu verwendeten elektronischen Systeme ist, dass sie sehr schnelle und exakte Rechenprozesse ermöglichen. Das menschliche Gehirn ist dagegen im einzelnen Prozess um ein Vielfaches langsamer, aber dafür vernetzter. Des Weiteren zeichnet sich der Mensch durch eine hohe körperliche und geistige Flexibilität aus.

Vor dem Hintergrund einer verstärkten Nachfrage nach kundenindividuellen Produkten gewinnt die Flexibilität von Produktionssystemen zunehmend an Bedeutung. Der Trend hin zu variantenreichen Produkten führt, insbesondere innerhalb der Produktion, zu einer verstärkenden Tendenz von starren, auf hohe Stückzahlen ausgelegten Produktionssystemen zu flexiblen Fertigungseinrichtungen.

In der Zukunft werden daher Systeme eingesetzt, die variantenreiche Produkte in hohen Stückzahlen wirtschaftlich herstellen können. Bei einer auf Vielfalt fokussierten Produktion steigt der Kommunikationsaufwand zur Steuerung und Planung der Einzelprozesse überproportional an, da die Produktvarianten oft unterschiedliche Prozesse durchlaufen.

Die Technologie der Erweiterten Realität (Augmented Reality) erlaubt die Anreicherung der menschlichen Sinneswahrnehmung mit elektronisch generierten Informationen. Durch deren Einsatz wird die Kombination der Flexibilität des Produktionsfaktors Mensch mit den schnellen Berechnungsprozessen von Rechenanlagen durch die situationsgerechte Bereitstellung von Informationen möglich. Der Aufwand für die Kommunikation kann so trotz hoher Flexibilität verringert werden.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird untersucht, ob sich die neue Technologie der Augmented Reality für die Unterstützung von manuellen Arbeitsprozessen innerhalb der Produktion eignet und welche Anforderungen an ihren Einsatz bestehen. Zielsetzung ist es, den zukünftigen Einsatz der Technologie in der Produktion vorzubereiten.

Auf Basis der theoretischen Grundlagen werden Fragestellungen des Einsatzes in der Produktion definiert. Diese werden in theoretischen und experimentellen Untersuchungen behandelt und in Anforderungen an die Technologie überführt.

Besondere Bedeutung hat die produktionstechnische Bewertung der für die Augmented Reality Technologie notwendigen Anzeigegeräte und Positions-

bestimmungssysteme. Darüber hinaus wird der Einfluss der Technologie auf produktionstechnische Kenngrößen wie Fertigungszeit und Qualität behandelt sowie Rationalisierungspotenziale identifiziert.

Abschließend werden prototypische Anwendungen der Technologie aus unterschiedlichen Bereichen der Produktion entwickelt und deren Eignung für den Serieneinsatz in der Produktion untersucht.

2 Grundlagen der Augmented Reality (AR) Technologie

2.1 Definition

Der Begriff der Augmented Reality (Erweiterte Realität) beschreibt allgemein die Ergänzung der realen Umgebung des Menschen durch rechnergenerierte Informationen. Die aus der Literatur bekannten Definitionen des Begriffes Augmented Reality (AR) unterscheiden sich hinsichtlich der Anwendung auf technische Systeme mit unterschiedlichem Aufbau bzw. Funktionalitäten. Es werden drei unabhängige Definitionen unterschieden [MIL99].

Die erste umfassende Definition beschreibt AR als Technologie, die beliebige menschliche Sinneswahrnehmungen der „realen“ Welt durch rechnergenerierte Zusatzinformationen erweitert, wobei Letztere als „virtuelle“ Informationen bezeichnet werden [MIL99]. Diese bezieht beispielsweise den gleichzeitigen Blick auf einen stationären Bildschirm (Wahrnehmung virtueller Informationen) und in die Umgebung (Wahrnehmung realer Informationen) ein. Des Weiteren schließt diese Definition auch die Erweiterung durch haptische (z.B. Datenhandschuhe) oder akustische (z.B. Musik) Medien ein.

Die zweite Definition beschränkt die Anwendung des Begriffes AR auf die Erweiterung des menschlichen Sehsinns durch die Verwendung kopfgetragener Bildschirmsysteme, sogenannter Head-Mounted-Displays (HMD) [MIL99].

Die dritte Definition löst die Anwendung des Begriffes von der Verwendung spezieller Geräte. AR wird als Technologie beschrieben, die reale und virtuelle Informationen kombiniert, in Echtzeit mit dem Anwender interagiert und dreidimensional wirksam wird [AZU97A]. Neben der Kombination der realen und der virtuellen Informationsaufnahme stehen demnach bei dieser Definition die Parameter Geschwindigkeit der Informationsveränderung (Interaktion) und die Dimensionalität der Informationsbereitstellung im Vordergrund.

Für die vorliegende Arbeit wird der Begriff AR in Anlehnung an die zweite Definition wie folgt definiert:

Augmented Reality beschreibt die Ergänzung der visuellen Wahrnehmung des Menschen durch die situationsgerechte Anzeige von rechnergenerierten Informationen auf im Sichtfeld positionierten, tragbaren Geräten.

Diese Definition stützt sich im Wesentlichen auf die Erweiterung der visuellen Wahrnehmung und die Verwendung tragbarer Geräte. Da die vom Sehinn gelieferten Informationen bei der Verarbeitung der Reize im menschlichen Gehirn dominieren, wird die visuelle Wahrnehmung in die Definition aufgenommen. Die Kopplung dieser erweiterten („augmentierten“) Wahrnehmung

mit tragbaren Geräten ist für das situationsgerechte Agieren in unterschiedlichen, räumlich verteilten Umgebungen notwendig.

Die produktionstechnische Definition schließt verschiedene Anwendungen ein, bei denen gleichermaßen Mobilität und von der jeweiligen Arbeitsaufgabe abgeleitete, visuelle Informationsdarstellung erforderlich sind. Ein Beispiel ist die Wartung einer Werkzeugmaschine, bei der das Servicepersonal verschiedene, maschinenbezogene (situationsgerechte) Informationen in unterschiedlicher Form mobil benötigt.

2.2 Abgrenzung

Im Gegensatz zu der im industriellen Umfeld recht weit verbreiteten Technologie der Virtuellen Realität (Virtual Reality) ist die Technologie der Erweiterten Realität (AR) heute noch nicht im industriellen Umfeld verbreitet.

Der Begriff Virtuelle Realität beschreibt eine dreidimensionale, rechnergenerierte Umgebung, mit der Anwender in Echtzeit interagieren können. Zielsetzung der Technologie ist es, ein möglichst detailgetreues Abbild der Realität zu schaffen. Anwendungsbereiche gibt es beispielsweise bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen und bei der Planung von Fabriken und Fertigungsprozessen. Im Entwicklungsprozess soll durch die frühzeitige Visualisierung von Konstruktionsdaten mit der Virtuellen Realität der Entwicklungsstand beurteilt werden. Die Herstellung von realen und kostenintensiven Prototypen soll eingeschränkt oder ganz überflüssig werden. Der Grad der Anreicherung der menschlichen Wahrnehmung mit rechnergenerierten Zusatzinformationen bestimmt die Anwendung des Begriffes der AR. Es wird hierbei zwischen der Virtuellen Realität (Virtual Reality), der vollständig rechnergenerierten Umgebung, und der realen Umgebung (Reality) des Menschen unterschieden (Abbildung 2-1).

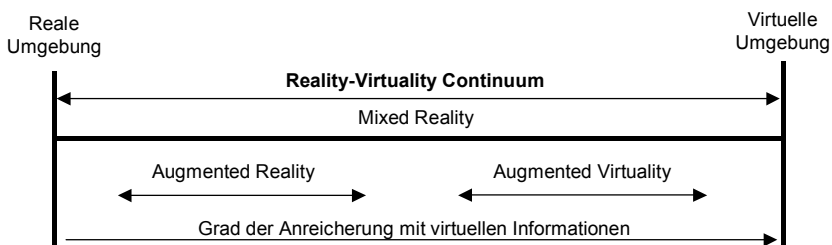


Abbildung 2-1: Abgrenzung Augmented Reality zu Augmented Virtuality, z.T. nach [MIL99]

Der Bereich zwischen diesen beiden Extrempositionen wird als „Misch-Realität“ (Mixed Reality) bezeichnet. Dieser Zwischenbereich, auch Reality-

Virtuality-Continuum genannt, ist wiederum in die Bereiche AR und Erweiterte Virtualität (Augmented Virtuality) geteilt [Mil99].

Während bei der Augmented Reality der Schwerpunkt auf der Wahrnehmung der Realität liegt, liegt er bei der Augmented Virtuality entsprechend auf der Wahrnehmung der Virtualität.

In Anlehnung an die Begriffsdefinition in Kapitel 2.1 liegt bei der AR-Technologie der Schwerpunkt der visuellen Wahrnehmung bei der Aufnahme von Informationen der realen Umgebung. Der Grad der Anreicherung der realen Umgebung mit virtuellen Informationen ist gering.

2.3 Funktionsweise der AR-Technologie

Die AR-Technologie basiert auf der situationsgerechten Bereitstellung von Informationen im Sichtfeld des Anwenders. Diese computergenerierten (virtuellen) Informationen werden den Seheindrücken der realen Umgebung überlagert. Abbildung 2-2 zeigt eine derartige Überlagerung. Die virtuellen Objekte werden im Abstand $x_V - x_A$ vom Auge des Anwenders, der sogenannten virtuellen Objektweite, angezeigt. Die realen Objekte befinden sich im Abstand $x_R - x_A$ vom Auge des Anwenders. Durch die gleichzeitige Wahrnehmung von virtuellen und realen Objekten erscheinen die Objekte überlagert.

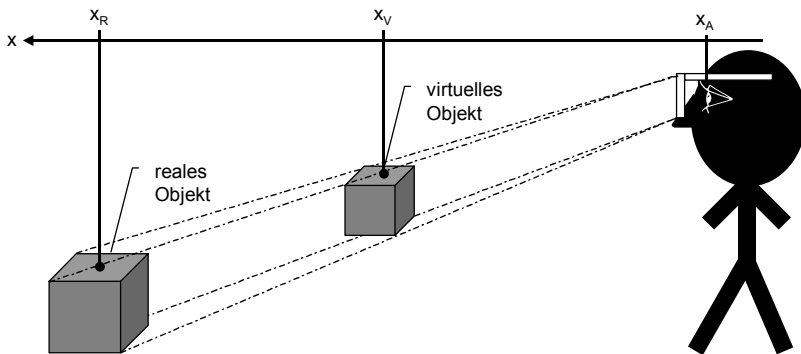


Abbildung 2-2: Überlagerte Anzeige von realen und virtuellen Objekten

Zur Anzeige der virtuellen Objekte können verschiedene Anzeigegeräte eingesetzt werden, wobei kopf-basierte und monitor-basierte Systeme unterschieden werden. Bei den kopfbasierten Geräten handelt es sich meist um sogenannte Head-Mounted-Displays (HMD). Diese werden vom Anwender, ähnlich einer Brille, auf dem Kopf getragen und ermöglichen es, z.B. durch einen Strahlenteiler, neben der realen Umgebung rechnergenerierte Zusatz-

informationen wahrzunehmen. Monitor-basierte Geräte stellen die Informationen auf einem frei beweglichen Bildschirm dar.

Mit der AR-Technologie können alle bekannten computergenerierten Informationen dargestellt werden. Mögliche Informationsarten reichen von der Anzeige von Textdokumenten bis hin zur perspektivisch richtigen Darstellung von dreidimensionalen Grafiken.

2.4 Aufbau von AR-Systemen

AR-Systeme bestehen typischerweise aus folgenden Hauptkomponenten (Abbildung 2-3):

- ## Tracking-System
- ## Datenhaltungssystem
- ## Szenengenerator
- ## Anzeigegerät

Tracking-Systeme kommen zum Einsatz, um die räumliche Position des Anwenders oder des realen Objektes bezüglich eines Bezugskoordinatensystems zu bestimmen. Diese Position wird benötigt, um einen Rückschluss auf den genauen Ausschnitt vom Sichtfeld des Betrachters zu ziehen. Erst mittels dieser Information kann das Sichtfeld mit lagerichtig überlagerten Informationen (virtuellen Objekten) erweitert werden.

Tracking-Systeme werden hinsichtlich der Genauigkeit in Grob- bzw. Fein-Tracking unterteilt. Zu den Grob-Tracking-Verfahren zählt beispielsweise das Global-Positioning-System (GPS) mit einer Genauigkeit von 3 - 10 m [Usc95]. Für eine exaktere Messung (bis zu +/-1 mm) werden Fein-Tracking-Verfahren mit verschiedenen Messprinzipien eingesetzt. Ein Beispiel ist das optische Vermessen mit Bildverarbeitungsprogrammen [KAT99].

Die durch das System ermittelte Position wird in Form von x,y,z-Koordinaten, sowohl an den Szenen-Generator wie an das Datenhaltungssystem übergeben. Das Datenhaltungssystem sucht die zu der jeweiligen Position passenden (situationsgerechten) Informationen (z.B. Arbeitsanweisungen) und übergibt diese an den Szenengenerator. Dieser erzeugt, basierend auf der ermittelten Position, die virtuellen Objekte in der für den Anwender richtigen Perspektive. Die virtuellen Objekte werden lagerichtig im Anzeigegerät (z.B. HMD) dargestellt und vom Anwender visuell mit den Seheindrücken der realen Umgebung überlagert.

AR-Systeme existieren in verschiedenen Ausprägungen. Entscheidend für den systemtechnischen Aufbau sind die Anforderungen der jeweiligen Anwendung. Ist beispielsweise eine lagerichtige Überlagerung von virtuellen Objekten mit realen Objekten nicht notwendig, so wird die Verwendung des Tracking-Systems überflüssig. Ein Beispiel hierfür ist eine Wartungsaufgabe, bei der

lediglich das Wartungshandbuch in elektronischer Form angezeigt werden soll. Hierfür genügt die Verwendung eines Anzeigerätes (z.B. HMD) in Kombination mit einem Datenhaltungssystem.

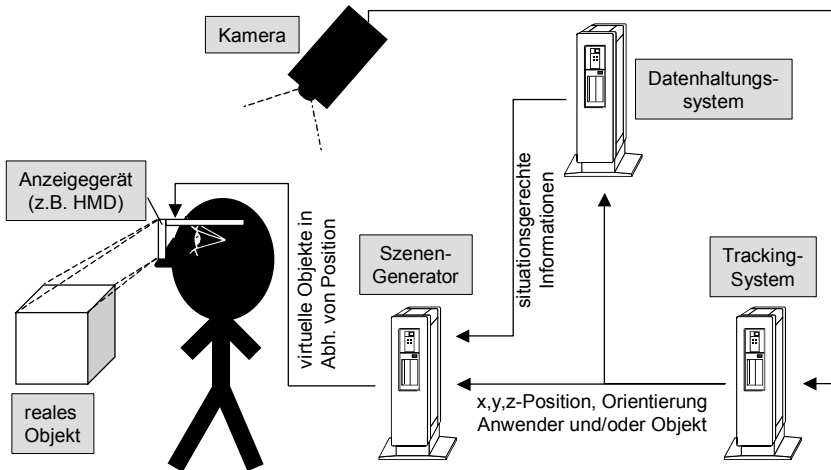


Abbildung 2-3: Komponenten von AR-Systemen

Der Bezug der virtuellen Objekte zur Arbeitsaufgabe (z.B. passendes Wartungshandbuch) kann beispielsweise durch die Eingabeaufforderung „Eingabe Maschinenkennnummer“ erfolgen. Abbildung 2-3 zeigt somit exemplarisch ein AR-System mit maximalem Geräteumfang.

Das Tracking- und Datenhaltungssystem sowie der Szenengenerator können auf verschiedenen Rechnersystemen arbeiten. Unterschieden werden lokale und verteilte Systemkonfigurationen [EVE01]. Bei der lokalen Ausprägung werden alle für das AR-System notwendigen Komponenten auf einem Rechner betrieben. Zum Einsatz kommen oft tragbare Rechner (Wearable-PC's). Diese werden vom Anwender direkt am Körper (z.B. am Gürtel) getragen.

Bei der verteilten Systemkonfiguration werden nur Teilaufgaben des AR-Systems (z.B. Anzeige der virtuellen Objekte) durch den mobilen Rechner durchgeführt. Dieser ist über eine Datennetzwerkverbindung (z.B. Funknetzwerk) mit den anderen Systemkomponenten verbunden. Vorteil dieses Systemaufbaus gegenüber den lokalen Systemen sind geringere Anforderungen an die kostenintensive lokale Rechenleistung mobiler Geräte. Besteht die Notwendigkeit auf umfassende Datenbestände (z.B. im Firmennetzwerk) zuzugreifen, wird daher oft eine verteilte Systemkonfiguration gewählt.