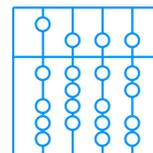




Institut für Informatik der  
Technischen Universität München



# Augmented Reality als Vergleichswerkzeug am Beispiel der Automobilindustrie

Stefan Nölle

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Informatik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Nassir Navab, Ph. D.

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Gudrun J. Klinker, Ph. D.
2. Univ.-Prof. Dr. Stefan Müller,  
Universität Koblenz-Landau

Die Dissertation wurde am 09.05.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Informatik am 17.10.2006 angenommen.

## *Danksagung*

Zuerst danke ich ganz herzlich meiner betreuenden Professorin Frau Gudrun Klinker, Ph. D. für die sehr gute Förderung, Zusammenarbeit und Unterstützung meiner Arbeit. Auch danke ich ihr dafür, dass sie mir diese Arbeit ermöglicht hat. Herrn Prof. Dr. Stefan Müller danke ich für die Anregungen sowie der freundlichen Unterstützung und Begutachtung meiner Arbeit. Ebenso Herrn Prof. Nassir Navab, Ph. D., der bei meinem Rigorosum den Vorsitz führte, spreche ich meinen Dank aus.

Für die persönliche Unterstützung bei der Erstellung meiner Arbeit im Rahmen meiner täglichen Arbeit möchte ich besonders Herrn Peter Zimmermann und Herrn Dr. Ralf Rabätje danken. Sie haben beide zur Vollendung meiner Arbeit beigetragen. Weiterer Dank für die persönliche Unterstützung gilt Herrn Fabian Doil als sehr guter Kollege. Herrn Eduard Jundt sei hier für die ausführlichen Fachgespräche gedankt. Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. Martin Bergmann, der mir stets mit zahlreichen Anregungen und Hinweisen zur Seite stand.

Herrn Dr. Thomas Alt sowie seinen Mitarbeitern danke ich für ihre Unterstützung während des Rigorosums und der Promotion. Hierfür sei auch allen beteiligten Mitarbeitern vom Institut für Informatik der Technischen Universität München, speziell Herrn Martin Bauer und Herrn Marcus Tönnis, gedankt.

Von Herzen danke ich meiner Freundin Melanie Neukirchen für ihre Geduld, ihren Zuspruch und ihre persönliche Unterstützung. Hervorheben möchte ich hier auch Herrn Thomas Bauche, der mich als Freund oft motiviert hat.

Widmen möchte ich diese Arbeit abschließend meinen Eltern. Sie haben mich stets unterstützt, mir das Studium und meine Promotion ermöglicht - dafür gilt ihnen großer Dank.

## Kurzfassung

In der Automobilindustrie lässt sich derzeit am Markt ein starker Wettbewerb beobachten. Ein produzierendes Unternehmen ist hier ständig gefordert Produktentwicklungskosten zu senken, Innovationszyklen zu verkürzen und dabei höherwertige Produkte zu entwickeln. Hierbei spielen Computer Aided Design Techniken eine wesentliche Rolle.

Im Verlauf des Produktentstehungsprozess ergibt sich beim Prototypenbau ein Übergang von virtuellen zu realen Komponenten. In dieser Phase sind wesentliche, immer wiederkehrende Arbeiten die Ver- und Abgleiche realer Komponenten mit ihren computergenerierten Konstruktionsvorgaben.

Dieser so genannte Soll-/ Ist-Vergleich zwischen virtuellen Geometriedaten und realen Bauteilen ist eine ideale Anwendung, die mit Hilfe von Augmented Reality (AR) unterstützt werden kann. Die Realisierung von AR als Vergleichswerkzeug in der Automobilindustrie nimmt sich diese Arbeit an und bearbeitet Fragestellungen, welche Darstellung der Überlagerung für diese Art des Vergleichs geeignet ist und wie Koordinatensysteme von realen und virtuellen Objekten in den richtigen Bezug gesetzt werden können.

Weiterhin wird eine Lösung vorgestellt, wie Abstandsmessungen im Rahmen dieses Vergleichs realisiert werden können und die dazu benötigten Interaktionsgeräte erläutert. Abschließend werden anhand von Anwendungsbeispielen die Ergebnisse der Arbeit dargestellt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung und Grundbegriffe</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Struktur der Arbeit . . . . .	2
1.3 Grundbegriffe . . . . .	4
<b>2 Thema der Arbeit</b>	<b>11</b>
2.1 Hintergrund . . . . .	11
2.2 Fragestellung . . . . .	18
2.3 Abgrenzungen . . . . .	19
<b>3 Stand der Technik</b>	<b>21</b>
3.1 AR-Anwendungen im industriellen Umfeld . . . . .	21
3.2 AR-Anwendungen in der Automobilindustrie . . . . .	26
3.3 Zusammenfassung . . . . .	29
<b>4 Tracking und Registrierung</b>	<b>30</b>
4.1 Übersicht Trackingsysteme . . . . .	30
4.2 Trackingsysteme für die Anwendung dieser Arbeit . . . . .	43
4.3 Objektregistrierung . . . . .	53
4.4 Der Kameraoffset . . . . .	68
4.5 Interne Kameraparameter . . . . .	74
4.6 Zusammenfassung . . . . .	78

<b>5</b>	<b>Aspekte der Darstellung</b>	<b>79</b>
5.1	Darstellung der Überlagerung . . . . .	79
5.2	Beleuchtungseinflüsse . . . . .	91
5.3	Ausgabe der Darstellung . . . . .	97
5.4	Anwenderbericht . . . . .	99
5.5	Zusammenfassung . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Interaktion</b>	<b>101</b>
6.1	Gestaltung der Interaktion . . . . .	101
6.2	Messen in einer AR-Umgebung . . . . .	106
6.3	Funktionalitäten . . . . .	112
6.4	Zusammenfassung . . . . .	115
<b>7</b>	<b>Anwendungsbeispiele</b>	<b>116</b>
7.1	Aufbau der AR-Systeme . . . . .	116
7.2	Anwendungsbeispiele für CAD-Überlagerungen . . . . .	119
7.3	Anwendungsbeispiele für FEM-Überlagerungen . . . . .	124
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>129</b>
<b>A</b>	<b>Mathematische Grundlagen</b>	<b>131</b>
A.1	Mathematik für Trackingsysteme . . . . .	131
A.2	Homogene Koordinaten . . . . .	132
A.3	Singulärwertzerlegung (SWZ) . . . . .	134
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>135</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>138</b>

# Kapitel 1

## Einleitung und Grundbegriffe

### 1.1 Motivation

Heutige Rechnersysteme werden zunehmend leistungsfähiger und graphisch orientierter. Besonders durch den Leistungszuwachs in der dreidimensionalen Grafikausgabe ergibt sich in industriellen Entwicklungsprozessen der Einsatz von virtuellen Umgebungen. Neben der Virtual Reality (VR) gewinnt auch die Technik der erweiterten Realität - der so genannten Augmented Reality (AR) - an wachsender Bedeutung. Bei der erweiterten Realität werden die Sinne des Menschen, insbesondere das Sichtfeld, mit virtuellen, computergenerierten Informationen angereichert bzw. überlagert.

Entlang des gesamten Produktentstehungsprozesses der Automobilindustrie lassen sich Anwendungen finden, die mit Hilfe der AR-Technologie unterstützt und optimiert werden können. Da der Entwicklungsbereich noch die meiste Nähe zur Forschung aufweist, bieten sich insbesondere hier Anwendungen für den Einsatz erster Prototypen der komplexen AR-Technologie an.

Grund dafür sind neben einer grundsätzlichen Begeisterung und dem Interesse der Anwender an neuen, innovativen Techniken die deutlich geringeren ergonomischen Anforderungen im Entwicklungsbereich. Eine Anwendung muss sich dort nur ca. 30 min. im Einsatz bewähren und nicht eine komplette, mehrstündige Schicht durchlaufen. Es ist wahrscheinlich, dass sich zuerst hier ein durchgängig produktiver Einsatz der AR etablieren wird.

Diese Arbeit ist im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMB+F) geförderten Leitprojekts ARVIKA (01.07.1999 - 30.06.2003) initiiert worden und beleuchtet die Einsatzmöglichkeiten von AR in der Entwicklung der Automobilindustrie. Eine wesentliche Anwendung, die durch AR unterstützt werden kann, ist der Vergleich zwischen computergenerierten Geometriedaten und realen Bauteilen. Die Geometriedaten können neben den Daten aus Konstruktionen auch aus Berechnungsergebnissen einer Simulation gewonnen werden.

Für die Realisierung von AR als Vergleichswerkzeug nimmt sich diese Arbeit der folgenden Fragestellungen an:

- Wie lässt sich ein AR-System aufbauen, das die wesentlichen Anforderungen erfüllt, die bei einem konkreten Anwendungsfall eines Vergleichs gestellt werden?
- Welche Darstellung der Überlagerung ist für diese Art des Vergleichs geeignet, und wie werden Koordinatensysteme von realen und virtuellen Objekten in den richtigen Bezug gesetzt (registriert)?
- Ist es möglich, erkannte Unterschiede zu dokumentieren oder sogar zu quantifizieren?

Für diese Fragestellungen werden Methoden entwickelt, die in der vorgegebenen Umgebung des Anwenders integriert werden können. Es werden Lösungen vorgestellt, wie die für diese Anwendung wichtige Möglichkeit - relevante Messungen für den Vergleich durchzuführen - realisiert wird. Für die Durchführung eines Soll-/Ist-Vergleichs werden die benötigten Funktionen ermittelt und die dafür entsprechenden Interaktionsgeräte und -metaphern erläutert. Abschließend werden anhand von Anwendungsbeispielen die Ergebnisse der Arbeit dargelegt.

## 1.2 Struktur der Arbeit

Im Anschluss an diese Einleitung werden einige grundsätzliche Definitionen dargelegt. Die Begriffe VR, AR und Finite Elemente Methode werden erläutert, um dem Leser für den Einsatz virtueller Technologien und für die Fragestellung dieser Arbeit das nötige Hintergrundwissen zur Verfügung zu stellen.

Die Motivation und genaue Fragestellung der Arbeit wird im **Kapitel 2** erläutert. Ausgehend vom Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie wird der zunehmende Anteil computergenerierter Daten im Bereich des Prototypenbaus dargelegt. Reale Bauteile an einem (im Aufbau befindlichen) Prototypen werden mit ihren virtuellen Konstruktionsvorgaben verglichen. Dieser Vergleich lässt sich mit Hilfe der AR-Technologie unterstützen. Somit ergibt sich die Fragestellung, wie ein AR-System zu realisieren ist, das den Anforderungen eines Vergleichswerkzeugs genügt.

Die Einbeziehung von bereits geleisteten Arbeiten und Erkenntnissen bezüglich industrieller AR-Anwendungen ist Inhalt von **Kapitel 3**. Prototypische AR-Anwendungen aus der Automobilindustrie werden dabei gesondert dargestellt.

Um die realen und virtuellen Bauteile möglichst "formtreu" zu überblenden, müssen diese zueinander entsprechend registriert werden. Die für eine Registrierung benötigten Informationen über Position und Orientierung realer Bauteile wird von so genannten Trackingsystemen geliefert. Das **Kapitel 4** beginnt mit einer Übersicht dieser Trackingsysteme, weil sie eine wesentliche Technik für die Registrierung und allgemein für AR darstellen. Werden in einer AR-Anwendung zusätzlich Interaktionen wie Messvorgänge durchgeführt, müssen die Bauteile in speziellen Koordinatensystemen vorliegen. Weiterhin gilt es, auch stark abweichende Bauteile zu registrieren. Alle für eine AR-Anwendung benötigten Registrierungsprozesse bilden den zentralen Inhalt des Kapitels.

**Kapitel 5** beinhaltet mit den "Aspekten der Darstellung" eine Analyse, mit welchen Mitteln der Darstellung ein Vergleich zwischen realen und virtuellen Bauteilen realisiert werden kann. Dabei werden insbesondere Techniken erläutert, die ein Überblenden zwischen realen und virtuellen Bauteilen ermöglichen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Beleuchtungssituationen werden betrachtet und mögliche Ausgabebewege der Überlagerung diskutiert.

Neben der Überlagerung der AR-Anwendung werden auch Interaktionen benötigt. Die Interaktionen zielen auf die Analyse- und Dokumentationsmöglichkeiten, die bei einem Vergleich zwischen realen und virtuellen Bauteilen benötigt werden. In **Kapitel 6** werden zuerst benötigte Funktionalitäten der AR-Anwendung erläutert, um dann geeignete Interaktionsmetaphern zu entwickeln. Nach einer Zusammenstellung von Funktionen, wie Messen, Markieren und Dokumentieren, wird ihre Form der Umsetzung beschrieben.

**Kapitel 7** enthält einige Beispiele der realisierten Anwendungen. Der System- und Softwareaufbau der AR-Systeme wird erläutert, und es werden einige Beispielanwendungen anhand von Screenshots aus der Anwendung dargestellt. Dabei werden auch kurz einige Ergebnisse, die durch die AR-Anwendung erkannt wurden, vorgestellt.

Abschließend werden in **Kapitel 8** die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und die gewonnenen Erkenntnisse festgehalten. Mit einem Ausblick auf mögliche Optimierungen oder weiterführende Arbeiten wird die Arbeit abgeschlossen.

## 1.3 Grundbegriffe

In der Automobilindustrie lassen sich Anwendungen aus dem rein virtuellen Bereich bis hin zur Anwendung eines ersten, realen und fahrtauglichen Prototypen finden. Dabei kommen neben Anwendungen aus der Virtual Reality auch zunehmend Mixed Reality (gemischt virtuelle) Anwendungen zum Einsatz.

Zur Mixed Reality zählt auch die Augmented Reality, die im industriellen Umfeld an Bedeutung gewinnt. Die Bandbreite sowie die Abgrenzung dieser Techniken untereinander werden beim so genannten "Reality-Virtuality Continuum" von Milgram [MI94, MIL] in Abbildung 1.1 deutlich:

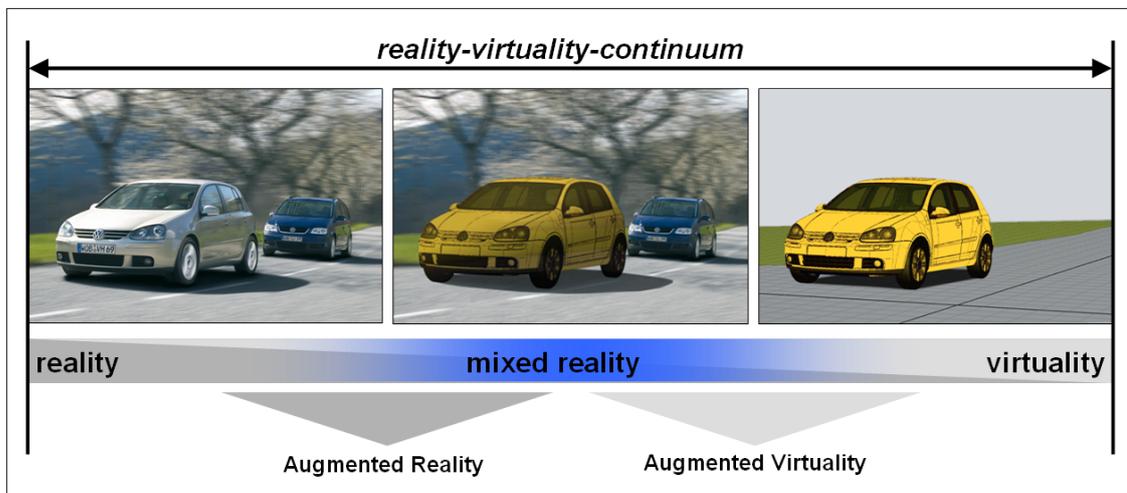


Abbildung 1.1: Eigener Entwurf des Reality-Virtuality-Kontinuums nach Milgram

Links im Kontinuum steht die reale Umwelt, rechts die durchgängig virtuelle Umgebung. Dazwischen befindet sich der Bereich der Mixed Reality (MR). In diesem Bereich wird die reale Umgebung mit computergenerierten Objekten versetzt. Der Anteil der computergenerierten Objekte ist ein Indiz für die Position innerhalb des Kontinuums. Ist nur noch ein sehr kleiner Anteil real, wie ein realer Moderator in einem komplett virtuellen Fernsehstudio, so bietet sich die Bezeichnung Augmented Virtuality (AV) an. AR dagegen beschreibt mehr die Anreicherung einer realen Szene mit einzelnen, computergenerierten Objekten.

Da Anwendungen, die in dieser Arbeit beschrieben werden, in dem Bereich der VR hineinragen oder dort ihren Ursprung haben, wird VR kurz erläutert.

### 1.3.1 Virtual Reality

Mitte bis Ende der 80er Jahre wurde Virtual Reality (VR) unter dem Synonym "Cyberspace" bekannt. In der Regel wurde darunter eine künstliche Welt verstanden, die nur im Computer existierte. Später konnten Menschen mit Hilfe eines Datenhelms (Head Mounted Display) in diese künstliche Welt regelrecht eintauchen. Populär wurde der Begriff des Cyberspace sicherlich durch den 1984 erschienenen Roman "Neuromancer" von William Gibson.

1989 wurde dann von Jaron Lanier <sup>1</sup> der Ausdruck "Virtual Reality" geprägt und versucht, damit der Idee einer perfekten Erschaffung einer künstlichen, computergenerierten Welt einen Namen zu geben. Der Begriff Cyberspace wird heutzutage nur noch selten für die Bezeichnung von VR eingesetzt und meint vielmehr die weltweite Computervernetzung durch das Internet.

Die Bezeichnung Virtual Reality ist im Grunde genommen ein Paradoxon, da die Realität nicht durch etwas Virtuelles oder Künstliches beschrieben werden kann - es gibt, salopp formuliert, nur die "eine", absolute Realität. Um den Begriff Virtual Reality etwas enger zu fassen, hat sich vor industriellem Hintergrund die folgende Definition durchgesetzt. Sie ist etwas erweitert an die Ausführungen von [HEN] angelehnt.

**Definition 1:** *Virtual Reality ist eine Mensch-Maschine-Schnittstelle für einen oder mehrere Benutzer, deren Ziel es ist, eine computergenerierte, künstliche Umgebung wirklichkeitsgetreu erscheinen zu lassen. Dies wird durch eine möglichst intuitive Benutzeroberfläche und die Ansprache multi-modaler Interaktionskanäle erreicht.*

Um VR zu klassifizieren, werden nach [STY] und [ZEL] drei hauptsächliche Merkmale der VR eingeführt:

1. Immersion (oder "Präsenz")
2. Interaktion
3. Simulation

Die *Immersion* beschreibt das "Eintauchen" des Benutzers in die virtuelle Welt, d.h. wie stark sich der Nutzer in die künstliche Welt eingebunden fühlt. Die *Interaktion* steht für die Kommunikation zwischen Anwender und der computergenerierten Welt. Hier geht es um die Gestaltung der Benutzerschnittstelle. *Simulation* bedeutet die Abbildung realer Prozesse und realen Verhaltens innerhalb der künstlichen Welt. Dabei werden insbesondere physikalische Gegebenheiten simuliert.

Eine perfekt umgesetzte VR würde in allen drei Merkmalen beim Grad der Realisierung ein Höchstmaß benötigen und wäre folglich kaum noch von der realen Umgebung zu unterscheiden. Heutzutage bieten die Techniken jedoch nur in Teilaspekten der Merkmale eine gute Realisierungsqualität.

Eine Anwendung, die beispielsweise in allen Merkmalen einen hohen Realisierungsgrad erreicht, ist ein High-End-Flugsimulator. Eine entgegengesetzte Anwendung ist das Erstellen einer Bauzeichnung am Computer und kann bereits als virtuelle Umgebung bezeichnet werden.

Nicht jede VR-Anwendung benötigt eine möglichst perfekte Umsetzung aller Merkmale. Beispielsweise kann auf eine physikalische Simulation verzichtet werden, wenn das primäre Ziel einer Anwendung auf einer möglichst hochwertigen Visualisierung liegt.

---

<sup>1</sup>(Mit-)Erfinder von VR-Helm und Datenhandschuh. Entwickler erster kommerzieller VR-Software; Fortune Magazine, März 1998 (siehe auch [JAR]).

Die VR grenzt sich deutlich von Realisierungen in der Filmindustrie durch den Aspekt der **Echtzeit** ab. Ein VR-System ist stets echtzeitfähig, was durch die Merkmale Interaktion und Simulation impliziert wird. Der Anwender ist jederzeit ein Teil des Regelkreises eines VR Systems.

Betrachtet man rückblickend die Entwicklung von VR, so wird deutlich, dass diese besonders eng verknüpft ist mit der Entwicklung der Computergraphik. Ohne die Ergebnisse der Forschungsarbeiten von Gouraud und Phong in den 70er Jahren wäre Virtual Reality in der Form, wie sie heute möglich ist, nicht denkbar.

In den 80er Jahren wurde die Entwicklung von einer entsprechenden VR-Peripherie weiter vorangetrieben. Die Computergraphik lieferte beeindruckend realistische Ergebnisse: Rechenanlagen wurden schnell, kostengünstig und klein in den Abmaßen. Allein das Fehlen "brauchbarer" VR-Interaktions-Geräte schien einem Durchbruch dieser neuen Technologie im Wege zu stehen.

Schließlich standen in den beginnenden 90er Jahren sowohl erste Hardware als auch erste kommerzielle VR-Software zur Verfügung, die als VR Lösungen vermarktet wurden.

### **VR in der Anwendung**

Virtuelle Realität ist eine sehr vielseitig einsetzbare Technologie. Da hier eine Beschreibung aller möglichen Anwendungsfelder den Rahmen sprengen würde, werden folgend drei Anwendungsbereiche stellvertretend dargelegt:

1. In der Architektur ist VR ein genutztes Mittel, um Bauwerke noch vor Baubeginn virtuell begehbar zu machen. Teilelemente können schnell und ohne viel Aufwand in der virtuellen Welt ausgetauscht werden. So besteht die Möglichkeit, nacheinander in kurzer Abfolge verschiedene Architekturentwürfe in einer, dem realen Bauumfeld entsprechenden Umgebung zu betrachten.
2. In der Medizin wird durch die Anschauung an virtuellen Organ-Modellen VR zur Verbesserung der Diagnose genutzt. Bei der Ausbildung von Ärzten werden Operationen virtuell trainiert, ohne dass ein Risiko für einen Patienten besteht. In der Planung und bei der Durchführung von Operationen kann ein VR-System unterstützen, weil es ein VR-Modell des aktuellen Patienten zur Verfügung stellen kann, welches zusätzlich bei der Operation als Referenz dient.
3. In der Automobilbranche, etwa der Volkswagen AG, wird VR überwiegend zur Fahrzeugvisualisierung genutzt [ZIM]. Bevor erste, reale Prototypen gebaut werden, wird das Design eines Fahrzeugs bewertet, werden virtuelle Machbarkeitsanalysen und Montagen durchgeführt sowie in Belastungssimulationen die Sicherheit eines Fahrzeugs überprüft. An virtuellen Prototypen werden Aussagen über Ergonomie und Bedienkonzepte getroffen. Nachdem ein Fahrzeug in der Serienproduktion ist, wird anhand von VR qualifiziertes Fachpersonal für Reparatur und Instandsetzung ausgebildet [DA96, GRE].

### 1.3.2 Augmented Reality

Frei übersetzt bedeutet Augmented Reality *die Anreicherung oder Erweiterung der realen Umgebung durch virtuelle, computergenerierte Objekte*.

Ronald Azuma hat in seinen Arbeiten [AZU, ABF] eine Definition geschaffen, die frei von speziellen Techniken ist. Sie zeichnet sich in der internationalen Fachwelt durch eine starke Gültigkeit und Akzeptanz aus. Ähnlich der Merkmale von VR hat Azuma für AR drei markante Merkmale definiert:

1. Kombination von realen und virtuellen Objekten in einer realen Umgebung
2. Interaktion in Echtzeit
3. 3-dimensionale Registrierung zwischen realen und virtuellen Objekten

Analog zur VR ist bei der AR das Merkmal der Echtzeit wesentlich, um in einer AR-Anwendung interagieren zu können. Die 3-dimensionale Registrierung steht dafür, dass zwischen realen und virtuellen Objekten ein räumlicher Bezug hergestellt sein muss, der nicht nur für die momentane Sicht des Anwenders gilt, sondern den virtuellen Objekten feste Koordinatenpositionen in der realen Umgebung zuordnet.

**Anmerkung:** Formal ist mit AR die Anreicherung aller Sinne eines Menschen gemeint. Jedoch dominieren die vom Sehsinn gelieferten Informationen bei der Verarbeitung der Reize im menschlichen Gehirn. Daher beziehen sich Anwendungen im industriellen Umfeld und das derzeit allgemeine Verständnis der Fachwelt auf die alleinige Anreicherung der visuellen Wahrnehmung. Auch diese Arbeit unterliegt diesem Verständnis.

Um das reale Umfeld mit virtuellen Objekten anzureichern, gibt es in der AR Technologie zwei wesentliche Grundprinzipien:

- optical-see-through
- video-see-through

Die folgende Abbildung ist an die Abbildungen von [AZU] angelehnt und veranschaulicht diese Prinzipien.

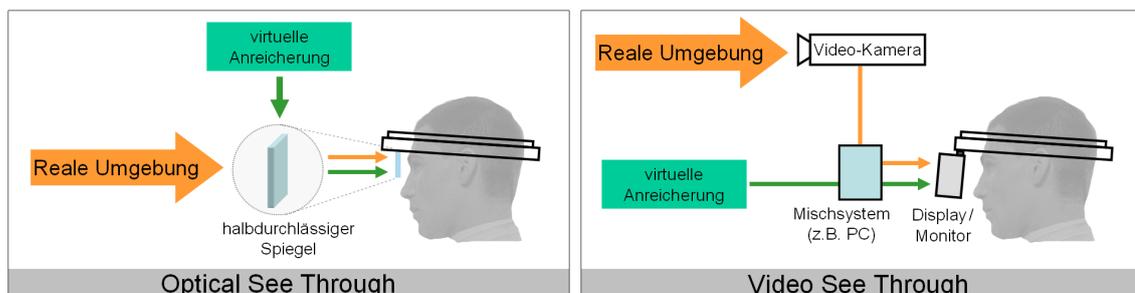


Abbildung 1.2: Grundprinzipien der Augmentierung

Für beide Varianten wird in der Regel ein Head Mounted Display (HMD) verwendet und dem Anwender die computergenerierten Informationen einspielt.

Beim optical-see-through Prinzip weist das HMD eine Optik mit einem halbdurchlässigen Spiegel auf, durch die der Anwender direkt sein reales Umfeld sehen kann. Über den Spiegel werden dann die computergenerierten Informationen in die reale Sicht eingeblendet. Die Vermischung der realen und virtuellen Ansichten findet somit erst im Auge bzw. Gehirn statt. Auf der linken Hälfte von Abbildung 1.3 ist ein optical-see-through HMD der Firma Lumus zu sehen [LUM].

Bei einem HMD mit dem video-see-through Prinzip ist am HMD eine Videokamera angebracht, die die reale Szene erfasst. Das Videobild kann nun mit virtuellen Informationen angereichert werden, und die so bereits komplett augmentierte Szene wird dem Anwender im HMD dargestellt. Eine direkte Sicht auf die reale Szene ist hier nicht möglich, der Anwender kann seine Umgebung nur durch die Videokamera sehen. Die rechte Hälfte von 1.3 zeigt die nicht mehr erhältliche Glastron von Sony [SNY], die zwar eine optische Durchsicht bietet, jedoch in der Regel als ein video-see-through HMD verwendet wird, indem die Durchsicht abgeschaltet wird.



Abbildung 1.3: Grundprinzipien der Augmentierung

Jedes der beiden Grundprinzipien bringt Vor- und Nachteile mit sich. AR wird typischerweise mit der Verwendung eines HMD assoziiert. Erst in den letzten Jahren sind zunehmend Anwendungen aufgetreten, die eine Augmentierung ohne Verwendung eines HMD umsetzen. Beispielsweise wird bei [NÖL] das mittels des video-see-through Prinzips augmentierte Bild auf einem Monitor oder einer Projektionswand dargestellt. Auch Stricker beschreibt in seiner Dissertation [STR] diese, mittlerweile weit verbreitete, monitor- und projektorbasierte AR-Anwendungen.

### Geschichte von AR

In den 60er Jahren forschte E. Sutherland an einem HMD mit dem optical-see-through Prinzip. Das Display ermöglichte die perspektivisch korrekte Darstellung von dreidimensionalen Vektorgrafiken [SUT]. Im Bereich der Rüstung wurden so genannte Head Up Displays (HUD) für Pilotenunterstützung in Flugzeugen entwickelt.

Etwa werden in einem F15 Kampffjet Informationen zur Sensorik und Flugzeugzuständen im Sichtfeld des Piloten auf die Scheibe projiziert [FIU]. 1967 kam dann zum ersten Mal ein HMD zum praktischen Einsatz. Bei einem Projekt mit der Bell Helicopter Company wurde dem Piloten das Bild einer unter dem Hubschrauber befestigten Infrarotkamera eingeblendet, um Landungen bei Nacht zu unterstützen. Dabei wurde die Infrarotkamera an die Sicht des Piloten gekoppelt und folgte seinem Sichtfeld [RHO].

Die ersten praktischen AR-Anwendungen in der Industrie wurden Anfang der 90er Jahre von David Mizell bei Boeing durchgeführt. Mizell benutzte die AR-Technologie um das komplizierte Zusammenstellen von Kabelsträngen für Flugzeuge zu unterstützen. Der Anwender bekam lagerichtig die Position des zu montierenden Kabels eingeblendet. Mizell prägte mit dieser Anwendung den Begriff AR für die Industrie nachhaltig, da die Funktionalität und die Ergebnisrichtigkeit des Systems nachgewiesen werden konnten. Allein die mangelnde Performance der Hardware zu der Zeit stand einem Serieneinsatz im Wege [MIZ].

Ab Mitte der 90er Jahre sind auch Anwendungen in anderen Bereichen, wie in der Medizin, entstanden. Eine weiterführende Erläuterung von Anwendungen findet sich im Kapitel 3.

Wichtig zu erwähnen bleibt noch das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Leitprojekt ARVIKA. Das weltweit bedeutsame Projekt um Augmented Reality fand vom 1.7.1999 bis 31.06.2003 in Deutschland statt. 18 namhafte Partner aus Industrie und Forschungsinstituten analysierten den Einsatz der Augmented Reality Technologie in den Bereichen Entwicklung, Produktion und Service [AV04]. Als ein besonderes Merkmal in diesem Projekt wurde neben der technischen Frage der Augmentierung der komplette Prozess mit einbezogen. Angefangen von der Beschaffung und Gestaltung bzw. Aufbereitung der benötigten Information über die Art der Augmentierung bis zur benötigten Dokumentation wurden alle Aspekte beleuchtet. Methoden und Lösungen wurden stets aus anwenderorientierter Sicht angegangen. Auch diese Arbeit ist im Rahmen des ARVIKA Projekts initiiert worden.

### 1.3.3 Finite Elemente Methode

Die folgenden Erläuterungen dienen für das Verständnis, wie Simulationsdaten gewonnen werden, die dann mit Hilfe der AR-Technik überlagert werden können. Dies ist relevant, da für Geometriebeschreibungen, die aus Berechnungsergebnissen einer FEM-Simulation entstanden sind, spezielle Kalibrierungen nötig sind, um die Daten mit realen Objekten in Bezug zu setzen.

**Definition 3:** Der Begriff Finite Elemente Methode (FEM) kann als Methode der endlich großen Elemente übersetzt werden. Mit der FEM lassen sich nahezu alle Vorgänge der Technik auf einem Computer simulieren [BOS].

Diese erstmals 1960 von R. W. Clough vorgeschlagene Ausdrucksweise wird seit den 1970er Jahren überall verwendet. Bei einer Simulation mit Hilfe der FEM muss ein beliebiger Körper (gasförmig, flüssig oder fest) in möglichst kleine Elemente einfacher Form (Linie, Dreieck, Viereck, Tetraeder oder Hexaeder) zerlegt werden, die an ihren Eckpunkten ("Knoten") fest miteinander verbunden sind. Kleine Elemente sind wichtig, weil das näherungsweise über lineare Gleichungen formulierte Verhalten der Elemente nur für das unendlich (infinitesimal) kleine Element gilt, die Rechenzeit jedoch endlich große (finite) Elemente verlangt. Die Annäherung an die Realität ist umso besser, je kleiner die Elemente sind. In der Regel wird mittels Optimierungen versucht, am Körper nur dort sehr kleine Elemente zu wählen, wo das stärkste Verhalten der Elemente zu erwarten ist.

### Einsatz der FEM

Der Einsatz der FEM in der Praxis begann in den frühen 1960er Jahren in der Luft- und Raumfahrtindustrie und folgend auch im Fahrzeugbau. Die Methode basiert hier auf den Arbeiten bei der DaimlerChrysler AG in Stuttgart, die das selbst entwickelte FEM Programm ESEM einsetzte, lange bevor die computerunterstützte Konstruktion (CAD) Anfang der 1980er Jahre ihren Einzug hielt. Mittlerweile findet die Methode in allen Gebieten der Technik einschließlich Wettervorhersage und Medizintechnik ihre Anwendung: Im Fahrzeugbau bei Kleinteilen über Motor und Fahrwerk bis hin zur Karosserieberechnung und zum Crash Verhalten [BOS]. Abbildung 1.4 zeigt das Berechnungsergebnis eines Fahrzeugcrashes. Deutlich sind an der Karosserie die einzelnen Elemente in Form kleiner Quadrate zu erkennen.

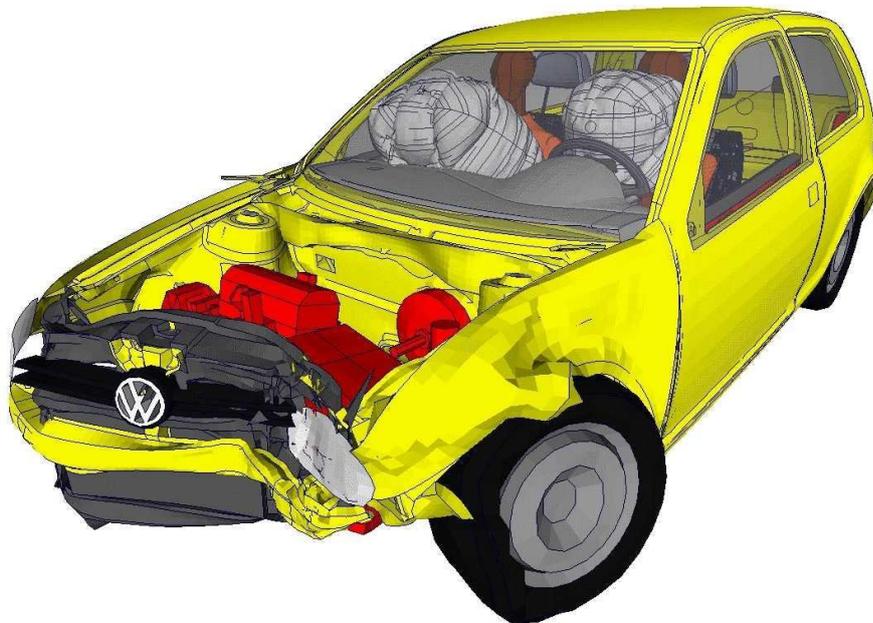


Abbildung 1.4: FEM Berechnung eines Fahrzeugcrashes

# Kapitel 2

## Thema der Arbeit

Dieses Kapitel erarbeitet die Fragestellung, die in dieser Arbeit behandelt wird. Ausgehend von Prozessen in der Automobilindustrie wird der Vergleich zwischen realen und virtuellen Fahrzeugkomponenten als Anwendung motiviert, die mit der AR-Technologie unterstützt werden kann.

### 2.1 Hintergrund

Folgend wird ein Teil des Entwicklungsprozess der Automobilindustrie beleuchtet, um relevante, dort vorherrschende Prozesse zu beschreiben.

#### 2.1.1 Der Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie

In der Automobilindustrie ergibt sich derzeit am Markt ein sich permanent verschärfender, internationaler Wettbewerb. Um weiterhin am Markt bestehen zu können, ist ein produzierendes Unternehmen ständig gefordert, die Produktentwicklungskosten zu senken, Innovationszyklen zu verkürzen und dabei höherwertige Produkte zu entwickeln [BAN]. Daher ist stets die Notwendigkeit gegeben, den Produktentstehungsprozess (PEP) zu optimieren. Es hat sich gezeigt, dass hierzu die Existenz einer durchgängigen und vollständig CAx<sup>1</sup> unterstützten Prozesskette durch alle Stufen der Produktentwicklung unerlässlich ist [GIU]. In jedem Bereich der Forschung und Entwicklung sind Computer Aided Design (CAD) Techniken zum integralen Bestandteil geworden. Nahezu alle Bauteile eines Fahrzeuges werden mittels CAD unmittelbar am Computer konstruiert. Daraus lassen sich virtuelle Prototypen aufbauen, die schnell reproduziert, verändert und transportiert werden können [DAI].

---

<sup>1</sup>CAx steht für "Computer Aided x", wobei x ein Platzhalter für unterschiedliche Buchstaben ist. Stark verbreitet sind CAD, CAE und CAS, die für Computer Aides Design, Engineering und Styling stehen.

Komponenten der Karosserie eines Fahrzeuges, die maßgeblich für das Design und für die Formgebung des Fahrzeugs ausschlaggebend sind, werden neben CAD auch durch 3-dimensionale Abtastung ("scannen") von handmodellierten Modellen gewonnen. Zu einem späteren Zeitpunkt im PEP werden auf Grundlage der CAD-Daten diverse Simulationen durchgeführt. Die Summe aller CAD, Simulations- und Versuchsdaten machen die Menge der *digitalen* (oder auch *virtuellen*) *Entwicklungsdaten* aus.

### 2.1.2 Bauteilvergleiche beim Prototypenbau

Im Verlauf des Produktentstehungsprozesses ergibt sich beim so genannten Prototypenbau ein Übergang von virtuellen zu realen Komponenten. Nach Vorgabe der CAD-Konstruktionsdaten werden die Bauteile in Hardware gefertigt, um einen ersten physischen und repräsentativen Prototypen aufzubauen. Zuerst sind die Aufbauten noch nicht funktionsfähig; es werden hier insbesondere das Design und die äußere Wirkung des Fahrzeugs - die visuelle Qualität - geprüft. Ein solcher Prototyp wird Datenkontrollmodell genannt, weil an diesem Modell alle vorliegenden CAD-Daten überprüft bzw. kontrolliert werden. Da es zu diesem Zeitpunkt im PEP noch keine Werkzeuge zur Erstellung der Karosserie bzw. der Bauteile des Modells gibt, wird jedes Bauteil aus einzelnen Konstruktionsdatensätzen aufwendig gefräst. Das Modell stellt wegen der Einzelanfertigung einen hohen Kostenfaktor dar. Zudem dauert der Prozess zur Erstellung eines kompletten Modells einige Wochen. Oft hat sich in dieser Zeit der Konstruktionsstand vieler Bauteile geändert und das fertig gestellte Datenkontrollmodell zeigt nicht mehr den aktuellen Stand der Konstruktion und muss aufwendig nachgebessert oder sogar neu erstellt werden.

Nach der Erreichung der gewünschten visuellen Qualität des äußeren Fahrzeugs werden die physischen Prototypen zur Kontrolle des Interieurs und der funktionalen Komponenten verwendet. Bei der Kontrolle stehen stets zwei Fragen im Vordergrund:

1. Stimmen die Bauteile des derzeitigen Prototypen mit dem aktuellen Stand der Konstruktion überein?
2. Stimmt die Qualität eines Bauteils? Das heißt: Wird das Bauteil im Rahmen der angegebenen Toleranzen entsprechend genau nach seiner Konstruktions- und Qualitätsvorgabe gefertigt (wobei auch weiterhin Bauteile der Karosserie auf Mängel in ihrem Fertigungsprozess zu begutachten sind)?

Durch beide Fragestellungen wird ein Vergleich zwischen CAD-Konstruktionsdaten und realen Bauteilen beschrieben. Nimmt man die Konstruktionsdaten als das "Soll" und die Bauteile des realen, physischen Prototypen als das "Ist", so kann allgemein von einem **Soll-/ Ist-Vergleich** gesprochen werden.

Beim Vergleich hinsichtlich der ersten Frage geht es um Aspekte der Topologie und der allgemeinen Erscheinung des Bauteils. Stimmen beispielsweise Größen und Abmaße? Sind Bohrungen sowie Anschlussstellen richtig positioniert, und sind ihre Durchmesser korrekt?

Hinsichtlich der zweiten Frage werden Aspekte, wie Formgebung, Konturverlauf und Beschaffenheit betrachtet. Gibt es Unebenheiten im Material oder wurden Toleranzen überschritten, so dass die Kontur eines Bauteils nicht zu der Kontur eines benachbarten Bauteils passt? Gibt es Abweichungen in der Bündigkeit?

Werden bei diesem Vergleich Unterschiede oder Abweichungen festgestellt, ist es unerlässlich, diese Unterschiede zu dokumentieren und auftretende Abweichungen zu quantifizieren bzw. zu vermessen. Mögliche Erkenntnisse und gewonnene Ergebnisse des Vergleichs sollten umgehend in den Fertigungsprozess einfließen, um diesen zu verbessern. Um Fertigungszeit und -kosten zu sparen, ist es entscheidend, dass die durch den Vergleich ermittelten Änderungen möglichst zeitnah in den Prozess eingebracht und umgesetzt werden.

Neben einem einfachen, rein optischen Vergleich durch einen Ingenieur oder Facharbeiter, der die Bauteile am realen Prototypen in Augenschein nimmt, werden heutzutage zusätzliche Techniken und Systeme genutzt, um Abweichungen zu vermessen und erkannte Unterschiede zu dokumentieren. Dabei kommen überwiegend Messsysteme zum Einsatz.

Beim Einsatz von Messsystemen ist neben der *Genauigkeit*, die ein Messsystem leisten kann, die Zeit relevant, die benötigt wird, um die Messdaten interpretieren und veranschaulichen zu können (Der Aspekt der *Echtzeit*). Zusätzlich spielt auch die Form, in der die Daten vorliegen, eine wichtige Rolle. Neben einer Form, die möglichst *anschaulich* ist, sollten die Daten in einer intuitiv zu erfassenden Weise vorliegen. Entscheidend dafür ist der Grad der *Abstraktion* der Daten. Das heißt: Können die Daten von jedermann - auch von fachfremden Personen - sofort gelesen und verstanden werden? Abschließend steht bei jedem Vergleichsvorgang eine *Dokumentation* der Daten an. Hier ist relevant, ob die Dokumentation der Daten geeignet ist, um später die komplette Historie eines Bauteils mit den dazu durchgeführten Vergleichen nachvollziehen zu können.

Die folgende Tabelle zeigt eine Auswahl der genutzten Verfahren, die nach den gerade genannten Merkmalen bewertet sind.

	Streifenprojektion (3D Scan)	taktiler Koordinatenmessarm	Digitalfotos	Rollmassband
Produkt / Hersteller	Atos I / [GOM]	Infinite 3m / [RMR]	[SNY]	Tri-Matic / [SOL]
Genauigkeit	< 0,025mm	< 0,05mm	–	ca. 1mm
Echtzeit	0,15 – 3 Std.	Echtzeit bis 0,5 Std.	3 min.	Echtzeit
Abstraktion	Lesen einer virtuellen Bauteildarstellung	Interpretation von Koordinaten	sofort verständlich	Lesen von Abständen
Anschaulichkeit	Bauteilrepräsentation am Computer	Abstands- und Koordinatenangaben	sehr anschaulich	Abstands- und Längenangaben
Dokumentation	Komplette Bauteilform wird dokumentiert	Messprotokoll einschl. Abweichungen	Komplette visuelle Erscheinung	Kein Angabe möglich, einzelne Abstandslängen

### 2.1.3 AR als neue Methode für einen Bauteilvergleich

Die in der obigen Tabelle dargestellten Methoden sehen entweder vor, die reale Situation in konstruktionsähnlichen Computerdaten zu erfassen, um sie dann im Konstruktionssystem in Bezug zu setzen, oder die reale Situation in Form von Messwerten festzuhalten, um sie am Computer zusammen mit den Konstruktionsdaten zu analysieren. Beide Vorgehensweisen beinhalten zwei wesentliche Nachteile:

1. Die gewonnenen Informationen können nicht am realen Fahrzeug in Echtzeit verglichen werden. Die Informationen bzw. Daten müssen erst weiterverarbeitet oder aufbereitet werden. Es ist keine unmittelbare Interaktion mit den Daten möglich. Wurde beispielsweise bei einer Erfassung durch einen 3D-Scan eine relevante Stelle nicht genau genug erfasst, muss erst ein neuer Scan durchgeführt werden. In der Regel muss dazu das Bauteil einem komplett neuen Scan unterzogen werden. Der Einsatz einer taktilen Messmaschine lässt zwar eine gewisse Reaktion in Echtzeit zu, allerdings sind die gewonnenen Messwerte nicht intuitiv oder anschaulich und müssen erst in das Konstruktionssystem eingebracht werden. Ist die Messmaschine bereits vom Fahrzeug entfernt worden, so muss sie zuerst wieder in das Bezugssystem des Fahrzeugs eingemessen werden.

Eine wesentliche Folge der nicht gegebenen Echtzeitfähigkeit ist die zeitliche Verzögerung, die sich zwischen Gewinnung und Analyse der für den Vergleich relevanten Daten ergibt. Ein schnelles Reagieren auf Unterschiede zwischen den realen und virtuellen Bauteilen ist so nicht möglich, jedoch im Sinne einer Prozessoptimierung erforderlich.

2. Keine der genannten Methoden kann reale und virtuelle Bauteile in einen direkten Bezug setzen. Es wäre wünschenswert, mögliche Unterschiede und Abweichungen unmittelbar auf einen Blick erkennen zu können. Ein 3D-Scan eines Bauteils lässt sich zwar in einem Konstruktionsprogramm veranschaulichen und mit dem entsprechenden virtuellen Bauteil in einen direkten Bezug setzen, jedoch besteht bei der Anmutung und Wirkung eines realen Bauteils ein deutlicher Unterschied zu der gescannten Repräsentation am Computer.

Ein Vorgehen für einen Soll-/ Ist-Vergleich, das diese Nachteile nicht aufweist, wäre somit eine Überlagerung des virtuellen mit dem realen Bauteil. Durch eine Überlagerung im Sinne einer formtreuen Überblendung, bei der das reale und das virtuelle Bauteil möglichst die gleiche Position, Orientierung, Größe, Form und Betrachtungsperspektive aufweisen, lassen sich beide Bauteile in einen direkten Bezug zueinander bringen. Dabei sollten die Bauteile jeweils mit gleichem Anteil und zu gleicher Zeit sichtbar sein. Der Überlagerungsvorgang sollte in Echtzeit realisiert sein und jeden beliebigen Betrachtungswinkel auf die Objekte ermöglichen.

Eine Technologie, die diese formtreue Überlagerung leisten kann, ist die **AR Technologie**. Die Erweiterung einer realen Szene - hier eines realen Bauteils - mit einer computergenerierten Information - hier mit einem virtuellen Bauteil - ermöglicht in Echtzeit den gewünschten Soll-/ Ist-Vergleich.

### 2.1.4 Idee für die Umsetzung von AR als Vergleichswerkzeug

Bei einem Vergleich zwischen realen Bauteilen und digitalen Entwicklungsdaten mit Hilfe einer formtreuen Überlagerung muss grundsätzlich geklärt werden, welche Daten/ Informationen die Vorgabe oder das "Soll" und welche Daten/ Informationen das "Ist" repräsentieren und entsprechend kontrolliert werden müssen. Im vorangegangenen Abschnitt war beispielsweise der CAD-Master das "Soll" und das real produzierte Bauteil das "Ist". Hier ergibt sich folglich bei einer Überlagerung mit Hilfe der AR Technologie ein alleiniger Abgleich des realen Bauteils. Werden dagegen Simulationsdaten überlagert, so wird das reale Bauteil zum "Soll", und die Berechnungsergebnisse der Simulation werden als das "Ist" abgeglichen. Auch die Verschmelzung beider Fälle innerhalb einer Anwendung ist denkbar und lässt sich auf die Einzelbetrachtungen beider Fälle zurückführen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden beide Anwendungsfälle untersucht. Um die in diesem Abschnitt formulierte Idee der formtreuen Überlagerung weiter zu veranschaulichen, werden im Folgenden jeweils eine mögliche Anwendung für die beiden Fälle eines Soll-/ Ist-Vergleichs in ihrer Umsetzung vorgestellt.

### 2.1.5 Beispiel "Augmentierter Meisterbock"

Beim so genannten "Augmentierten Meisterbock" wird eine sehr hohe Anforderung an die Genauigkeit der Überlagerung gestellt. Bei dieser Anwendung geht es darum, werkzeugfallende (d.h. maschinell gepresste) Karosseriebauteile anhand einer formtreuen Überlagerung zu überprüfen. Mit der Anwendung werden zwei Fragestellungen bearbeitet:

1. Abgleich eines werkzeugfallenden Bauteils mit dem korrespondierenden CAD-Master. Es wird nach Abweichungen in der Formgebung und Fehlern in der Topologie (Bohrungen falsch platziert) des Bauteils gesucht. In Abbildung 2.1 ist die formtreue Überlagerung eines dunkelblauen Beifahrer Kotflügels mit seinem CAD-Master in einer rötlichen Wireframe-Darstellung zu sehen.

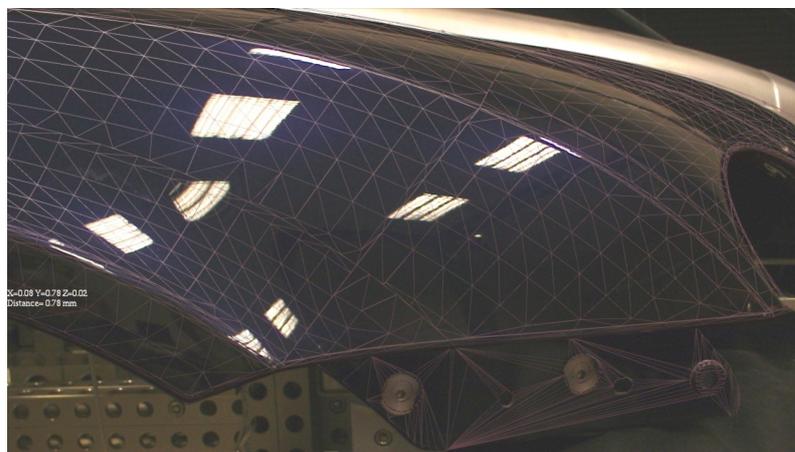


Abbildung 2.1: Realer Kotflügel mit überlagertem CAD-Master

2. Abgleich eines werkzeugfallenden Bauteils mit den um- und anliegenden Bauteilen hinsichtlich der Fugenverläufe, Spaltmaße und der Passgenauigkeit allein durch die Augmentierung der anliegenden Bauteile. In Abbildung 2.2 ist die Überlagerung der virtuellen Anbauteile (grüne Farbgebung) am realen Kotflügel (grau-beiger Farbton) zu erkennen.



Abbildung 2.2: Realer Kotflügel mit virtuellen Anbauteilen

Der wesentliche Nutzen dieser Anwendung liegt zum einen in der Einsparung der realen, anliegenden Bauteile (der so genannten "Cubingteile"), die sonst in der Regel extra angefertigt und kostspielig gefräst werden müssen. Zum anderen kann durch die Augmentierung des CAD-Masters unmittelbar auf Bauteiländerungen reagiert werden, da die Hardware nicht extra neu angefertigt werden muss. Der Vergleich kann schnell durchgeführt und die Ergebnisse können mittels der formtreuen Überlagerung auch fachfremden Personen intuitiv erläutert werden.

### 2.1.6 Beispiel "Überlagerung beim Fahrzeugcrash"

Während des Produktentstehungsprozesses werden neben der Konstruktion auch zunehmend Simulationen durchgeführt. Strömungssimulation von Luft, Simulation der Wärmeverteilung und Struktursimulationen seien hier nur beispielhaft genannt. Eine wichtige Anwendung der Umformsimulation sind Crashberechnungen von Bauteilen und ganzen Fahrzeugen. Fahrzeugcrashes werden mit Hilfe der Finiten Elemente Methode berechnet. Durch das Zusammenwirken vieler unterschiedlicher Bauteile und Materialien im Fahrzeug gestaltet sich eine Crashsimulation sehr komplex. Daher ist für die Optimierung der Simulation der Vergleich oder vielmehr ein Abgleich des Berechnungsergebnisses mit dem realen Fahrzeugcrash unerlässlich.

Ein direkter Vergleich dieser Berechnungsergebnisse mit dem realen Crashfahrzeug stellt sich jedoch recht schwierig dar. Von dem realen Crash gibt es Video- und Fotoaufnahmen, die sich nur ungenügend mit den Berechnungsergebnissen in Bezug setzen lassen. Darüber hinaus sind die Möglichkeiten mit diesem Vergleich stets 2-dimensional. Gerade in der Beurteilung von Verformungen am Fahrzeug ist eine 3-dimensionale Vergleichsmöglichkeit durch ihren zusätzlichen Tiefeindruck geeigneter.

Mit Hilfe der AR-Technik können dem Anwender die FEM Berechnungsergebnisse direkt auf einem real gecrashten Fahrzeug überlagert werden. Abweichungen bei den Berechnungsergebnissen können so auf einen Blick erkennbar und veranschaulicht werden.

Entsprechend den Erläuterungen in diesem Kapitel ergibt sich hier eine andere Form des Soll-/ Ist-Vergleichs. Denn im Gegensatz zur formtreuen Überlagerung von Konstruktionsdaten ist hier das reale Bauteil/ Fahrzeug, das "Soll", und die Berechnungsergebnisse sind das "Ist". Folglich sollen hier die virtuellen Daten analysiert und geändert werden. Abbildung 2.3 zeigt die Überlagerung einer real gecrashten Fahrzeugseitentür mit dem virtuellen Berechnungsergebnis einer durch FEM Simulation gecrashten Seitentür.



Abbildung 2.3: Crashtür mit augmentiertem FEM Berechnungsergebnis

Bei dieser Form des Soll-/ Ist-Vergleichs ergeben sich zwei zusätzliche Problemstellungen:

- Zum einen ist das Fahrzeug durch den Crash erheblich verformt und weicht in der Regel trotz guter Berechnungsprogramme und Berechnungsvorgaben zusätzlich von der Simulation ab. Um reale und virtuelle Koordinatensysteme in Bezug zu setzen, bedarf es somit bei der Registrierung spezieller, angepasster Methoden.
- Zum anderen wird eine spezielle Darstellung der Überlagerung benötigt, weil trotz der starken Verformung und Zerklüftung des Crashobjekts die Struktur der FEM-Berechnungsergebnisse noch erkennbar sein soll. Hier muss eine besondere Art der Visualisierung der FEM-Daten gefunden werden.

## 2.2 Fragestellung

Diese Arbeit beleuchtet die spezielle Anwendung der AR-Technologie zur Unterstützung von Soll-/ Ist-Vergleichen im PEP: ***Das formtreue Überlagern oder Überblenden von realen Objekten mit digitalen Entwicklungsdaten.***

Für die Realisierung müssen neuartige Methoden entwickelt werden, weil die verbreitete Einsatzform der AR-Technologie nicht eine direkte Überlagerung eines realen Objekts mit seinem virtuellen Pendant vorsieht. In der Regel wird in einem AR-System das reale Umfeld mit Objekten angereichert, die in der Umgebung selbst nicht vorkommen. Beispielsweise werden bei einer Montageanleitung Anweisungen, Symbole und Pfeile eingeblendet.

Bei einer Fabrikplanung werden Maschinen und Fördersysteme gleichzeitig augmentiert (siehe [AV04]). Stets sind hier die augmentierten Objekte während der Anwendung nicht als reale Objekte vorhanden. In sofern gibt es bei diesen Anwendungen eine eindeutige Aufteilung, welche Objekte real und welche Objekte virtuell zu sehen sind. Ein Objekt existiert somit entweder nur real oder nur virtuell.

Wird nun bei der Augmentierung von einem realen Objekt mit sich selbst bzw. mit seinem virtuellen Pendant möglichst deckend überblendet, so entsteht ein spezieller Fall einer AR-Anwendung, die eine besondere Form der Überlagerung benötigt. Auf den ersten Blick ist das Vorgehen, ein Objekt mit sich selbst möglichst deckend zu augmentieren, wenig "sinnvoll", da in einer AR-Anwendung gerade diejenigen Objekte ergänzt und augmentiert werden, die in der Realität nicht vorhanden sind [MIL].

In der Literatur lassen sich AR-Anwendungen finden, in denen reale Objekte mit entsprechenden virtuellen möglichst passgenau und deckend überlagert werden. Die Darstellung wird jedoch überwiegend zur Validierung der Kalibrierung von optical-see-through Systemen verwendet [WHI, TUC]. Eine andere Anwendung überlagert einen computergenerierten Totenschädel eines Dinosauriers auf einen realen Schädel. Hier werde nur Teile des Schädels (z.B. Zähne) augmentiert und nicht der komplette Schädel überlagert [BIM].

Zusammenfassend ergeben sich im Wesentlichen die zwei folgenden Fragestellungen, die im Rahmen dieser Arbeit bearbeitet werden:

- Wie muss die Darstellung der formtreuen Überlagerung realisiert werden, damit ein Vergleich zwischen realen und virtuellen Objekten durchführbar ist?
- Welche Vorgehensweise wird benötigt, um vorhandene Unterschiede und Abweichungen entsprechend messen und dokumentieren zu können?

Für diese Fragestellungen sollen Methoden entwickelt werden, die in die vorgegebene Umgebung des Anwenders integriert werden können. Es werden Lösungen vorgestellt, wie die für diese Anwendung wichtige Möglichkeit, relevante Messungen für den Vergleich durchzuführen, realisiert wird.

Für die Durchführung eines Soll-/ Ist-Vergleichs werden die benötigten Funktionen ermittelt und die dafür sinnvollen Interaktionsgeräte und Metaphern beschrieben. Abschließend werden anhand von Anwendungsbeispielen die Ergebnisse der Arbeit dargelegt.

Erinnert sei an die drei wesentlichen Merkmale eines AR-Systems von Azuma, die im Abschnitt 1.3.2 erläutert wurden. Um ein AR-System aufzubauen, das die oben formulierten Fragestellungen mit diesen Merkmalen erfüllt, wird in dieser Arbeit pro Kapitel eines der Merkmale bearbeitet und umgesetzt:

**Kapitel 4** "*Tracking und Registrierung*" beinhaltet die 3-dimensionale Registrierung realer und virtueller Objekte. Die richtige Kombination von realen und virtuellen Umgebungen wird im **Kapitel 5** "*Aspekte der Darstellung*" beleuchtet. Die "*Interaktion*" wird im gleichnamigen **Kapitel 6** bearbeitet.

## 2.3 Abgrenzungen

Der Begriff "formtreue Überlagerung" wurde in dieser Arbeit gewählt, da es bei dieser Art der Überlagerung darum geht, die Form des realen Objekts möglichst zu erhalten bzw. ihr zu entsprechen. Es gilt, das virtuelle Objekt möglichst in der gleichen Position, Orientierung, Größe und Formgebung zu überlagern. Diese formorientierte oder formtreue Überlagerung kann nur im Sinne einer bestmöglichen Annäherung erfolgen. Dies ist allein schon durch die Quantisierung der realen Umgebung anhand der Pixelgenauigkeit der erfassenden Videokamera gegeben. Am Rand des realen Objekts kann es durch die Pixelauflösung der Videokamera zu minimalen Änderungen an der Außenkontur des Objekts kommen.

Begriffe wie Kongruenz oder Deckungsgleichheit sind in der Mathematik sehr "scharf" gefasst und für die Beschreibung der hier beabsichtigten Überlagerung nicht angebracht, unterstützt durch das Fehlen einer Metrik für eine Beurteilung der Güte der Überlagerung.

Die Überlagerung soll einen Soll-/ Ist-Vergleich ermöglichen. Wird nun versucht, mit allen "Mitteln" das virtuelle Objekt möglichst exakt über das reale Objekt zu überlagern - wohl möglich noch passgenau -, dann können beispielsweise Abweichungen zwischen den Objekten in Position und Orientierung nicht erkannt werden. Falls sich tatsächlich eine Abweichung zwischen realer und virtueller Form ergibt, sollte diese auch in der Überlagerung zu erkennen sein.

Die Qualität der erreichten formtreuen Überlagerung kann zwar durch Messungen von 3-dimensionalen Positionsabweichungen zwischen den realen und virtuellen Objekten überprüft werden (siehe Abschnitt 6.2.3 auf Seite 110), jedoch ist die Beurteilung der rein visuellen Überlagerungsqualität allein durch die menschliche Intuition gegeben. Dabei zeigt sich, dass der Mensch grundsätzlich ein gutes "Gespür" hat, wie exakt zwei Formen übereinander gelegt wurden. Oft stellt sich in der Praxis heraus, dass messtechnisch exakte Formeinpassungen sich visuell nicht so darstellen und umgekehrt. Die Beurteilung der erreichten Güte einer formtreuen Überlagerung wird somit durch den fachkundigen Anwender gegeben.

Die Anwendungen in dieser Arbeit werden ausschließlich mit AR-Systemen im video-see-through Verfahren umgesetzt. Bei Augmentierungen mit dem optical-see-through Verfahren kommen in der Regel HMDs zum Einsatz, die über einen halbdurchlässigen Spiegel die optical-see-through Funktion realisieren (siehe linke Hälfte von Abbildung 1.3.). Im Wesentlichen ergeben sich bei der Verwendung dieser HMDs die folgenden Nachteile:

- Für AR-Anwendungen müssen optical-see-through HMDs aufwendig kalibriert werden. In [TUC] wird beispielsweise ein Kalibrierverfahren beschrieben, bei dem der Anwender in seiner Sicht durch ein HMD typischerweise 12 Punkte zu fluchten hat. Diese Kalibrierung muss der Anwender vor jeder Anwendung erneut durchführen, ein Absetzen oder Verrutschen des HMDs führt zu Verschiebungen in der Überlagerung.
- Die Kalibrierung eines optical-see-through HMDs ist neben den Kalibrierungen und Registrierungen, die für optical- und video-see-through Systeme gleichermaßen nötig sind, eine weitere bzw. zusätzliche Fehlerquelle.
- Die Überlagerung in einem optical-see-through HMD kann nur ein einziger Anwender zur gleichen Zeit sehen. Die dargestellte Überlagerung lässt sich somit nicht in einer größeren Gruppe diskutieren.
- Beim Betrachten des zu überlagernden Objekts aus einer möglichst konstanten Perspektive verursacht der Anwender ständig minimale, muskulös bedingte Kopfbewegungen. Hierdurch unterliegt die dargestellte Überlagerung einem Zittern oder "Schwimmen". Der Vergleich zwischen realem und virtuellem Objekt kann aufgrund dieser Störungen kaum durchgeführt werden.
- Anhand der Optik eines HMDs wird die computergenerierte Information in einem bestimmten Abstand (Tiefe) vor dem Anwender projiziert. Um die überlagerten Informationen scharf zu sehen, fokussiert (auch akkomodiert) der Anwender auf die Tiefe dieser Darstellung. Selten befindet sich jedoch das reale Objekt im gleichen Abstand vor dem Anwender wie die eingeblendeten Informationen. Der Anwender fokussiert zwischen der Tiefe des realen Objekts und der Tiefe der Überlagerung hin und her. Im Gehirn kann so keine Verschmelzung entstehen, die Objekte werden voneinander getrennt wahrgenommen. Alt führt hierzu in seiner Arbeit [AL02] den Begriff der "unterscheidungsfreien Überlagerung" ein. Ein Vergleich zwischen realem und virtuellem Objekt kann nur bei einer Unterscheidungsfreiheit der Überlagerung erfolgen.

Aus Prozesssicht beziehen sich die Fragestellungen in dieser Arbeit allein auf die technische Umsetzung eines AR-Systems als Werkzeug zum Vergleich von realen Bauteilen mit digitalen Entwicklungsdaten. Die Integration der Technik in bestehende Prozesse und Abläufe innerhalb der Entwicklungsprozesse wird im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Arbeit sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

# Kapitel 3

## Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein Überblick darüber gegeben, welche industriellen Anwendungen mit Hilfe der AR-Technologie bereits unterstützt werden oder sich in der Erprobung befinden. Ausgehend vom Thema dieser Arbeit werden in einem separaten Abschnitt mögliche AR-Anwendungen in der Automobilindustrie beleuchtet.

### 3.1 AR-Anwendungen im industriellen Umfeld

Seit Ende der 60er Jahre sind erste Prototypen zur Nutzung der AR-Technologie aus dem militärischen Bereich bekannt. Der Einsatz von prototypischen Anwendungen auch in anderen Bereichen, wie Medizin und Industrie, ist verstärkt in den 90er Jahren aufgekommen.

Die Möglichkeit, mit der AR-Technologie beliebige, computergenerierte Informationen dem Anwender in sein reales Sichtfeld einzublenden - und dies auch abhängig im Kontext mit der Umwelt zu gestalten -, liefert eine Vielzahl von Anwendungen für den industriellen Bereich, die derzeit meist noch von prototypischer Natur sind.

Der wesentliche Nutzen bzw. die wesentlichen Ziele für den Einsatz der AR-Technologie sind:

- Verkürzung von Arbeitszeiten in Prozessen und somit allgemein die Verkürzung der Prozesszeit
- Erhöhung der (Produkt-)Qualität
- Kosteneinsparungen
- Verbesserte Dokumentation
- Abarbeitung von komplexeren Arbeitsschritten
- Erhöhung der Ergonomie von Arbeitsschritten
- Attraktiverer Arbeitsplatz

### 3.1.1 Architektur und Bauindustrie

Die wichtigsten AR-Anwendungen im Bereich der Architektur zielen auf die überlagerte Visualisierung von geplanten Bau- und Umbaumaßnahmen in der realen Bauumgebung. [KLI] beschreibt die großflächige Visualisierung von Außenansichten ganzer Bauwerke (z.B. einer Brückenkonstruktion). Visualisierungen innerhalb von Gebäuden werden genutzt, um Rohrleitungen hinter Zimmerwänden sichtbar zu machen [KL97].

Weitere AR-Anwendungen sind auch im Bereich der Innenarchitektur und dem Design möglich. Bei [BIL] wird ein System beschrieben, mit dem sich die Anordnung und das Aussehen des Mobiliars für einen Wohnraum planen lassen.

### 3.1.2 Militärtechnik

In der Militärtechnik kommt die AR-Technologie in zwei wesentlichen Bereichen zum Einsatz: Unterstützung beim Bedienen von militärischen Geräten sowie die Unterstützung von Bodentruppen durch taktische Informationen. Beispielsweise beschreibt [WAN] die Unterstützung bei der Bedienung von Kampffjets und Hubschraubern. Zielerfassungssysteme werden anhand von Vektorgraphiken in das Sichtfeld eingeblendet. Als Displays kommen hier HMDs oder so genannte Head-Up-Displays zum Einsatz. Diese blenden die Informationen direkt auf die Frontscheibe und sind fest installiert.

[JUL] beschreibt das Überlagern von strategischen und taktischen Informationen mittels HMD im Sichtfeld von Mitgliedern einer Bodentruppe. Unterschiedliche, einsatzbezogene Informationen, wie Luftaufnahmen, Geheimdienstdaten und digitalisierte Landkarten, werden direkt im HMD oder auf einem am Körper getragenen Display angezeigt. Besonders wichtig sind hierbei Positionsbestimmungen per GPS, die als Trackinginformation genutzt werden [TAP].

Wartungsunterstützung von militärischen Geräten, Dokumentation von Einsatzdaten sowie die Unterstützung von Sanitätseinsätzen auf dem Schlachtfeld sind weitere mögliche Anwendungen der AR-Technologie [TAP].

### 3.1.3 Medizintechnik

Zur Durchführung einer Operation benötigt ein Arzt vielschichtige Informationen, um sich am bzw. im Patienten orientieren zu können. Die Daten stehen beispielsweise in Form von Röntgenbildern, Darstellungen aus der Computer-Tomographie und insbesondere Videobildern (live) von einer Endoskopiekamera zur Verfügung. Der operierende Arzt muss hier ständig seine Konzentration zwischen Patienten und beispielsweise dem Videomonitor wechseln. Zusätzlich müssen die unterschiedlichen Maßstäbe der Informationen ausgeglichen werden.

Durch den Einsatz der AR-Technologie können die Ausgangsinformationen eines unterstützenden Systems (Videoendoskopie, Computer-Tomograph) direkt mit dem

zu behandelnden Patienten überlagert werden. Organe und Informationen über das Innere des Patienten können so ohne operativen Eingriff sichtbar gemacht werden. [LIE] bezeichnet dies als "X-Ray-Vision" für den operierenden Arzt.

Es sind bereits einige prototypische medizinische AR-Anwendungen dokumentiert - z.B. [GRI]. Dabei muss unterschieden werden, ob die Anwendungen zur Unterstützung von Operationen oder für die Untersuchung von Patienten gedacht sind. [STA] beschreibt die Unterstützung einer Brustoperation durch den Einsatz der AR-Technologie. [FUC] dagegen erläutert eine AR-Anwendung zur Untersuchung der Bauchhöhle anhand der Überlagerung von korrespondierenden Ultraschallaufnahmen.

Ein neues Anwendungsfeld im Bereich Medizin ergibt sich in der Ausbildung von Ärzten. [LAP] beschreibt ein AR-System, mit dem die Geburtshilfe trainiert werden kann. An einem realen Beckennachbau kann anhand einer Überlagerung des ungeborenen Kindes die Vorgehensweisen bei unterschiedlichen Lagen des Kindes im Mutterleib geschult werden.

Auch an der Technischen Universität München ist ein AR-System entwickelt worden, um Geburten zu simulieren. In [SIL] erläutert Sielhorst, wie bei diesem System ein realer Simulator mit einer Überlagerung kombiniert wird. Um in der Simulation bei diesem System auch den Tastsinn des Anwenders zu berücksichtigen, beinhaltet hierfür der Kopf des Ungeborenen einen Kraftsensor.

Traub [TRA] beschreibt, wie AR genutzt werden kann, um eine Operation am Herz-Kreislaufsystem zu unterstützen. Dabei kann mit Hilfe der AR-Technologie der Eingriff überwacht und Operationszeit eingepart werden. Zusätzlich trägt AR zur genauen Planung des Eingriffs bei.

An die AR-Anwendungen innerhalb der Medizin werden besonders hohe Maßstäbe bezüglich Sicherheit und Genauigkeit angelegt. Mögliche Fehlfunktionen können lebensbedrohliche Auswirkungen auf die Patienten haben. Dies hat zur Folge, dass trotz des hohen Potentials der AR-Technologie für die Medizin erst wenige Anwendungen im Einsatz sind und die übrigen Anwendungen in Form von Prototypen vorliegen.

### 3.1.4 Freizeit und Endverbraucher

Bereits 1993 beschreibt [FEI] die ersten Versuche, die AR-Technologie für die Unterstützung von Instandhaltungsaufgaben einzusetzen. Als Versuch wurde die Wartung eines Laserdruckers erläutert. Die AR-Anwendung besitzt eine Kopplung an eine Datenbank, die Wartungsinformationen enthält. Die Informationen werden als dreidimensionale Vektorgraphik in einem HMD überlagert.

Ein recht beliebtes Anwendungsfeld für die AR-Technologie ist der Bereich der Computerspiele. [THO] erläutert ein Spiel, in dem die Spieler mit Wearables PC und einem HMD ausgestattet sind und sich innerhalb eines Gebäudes bewegen. Dem Spieler werden Spielfiguren in die reale Umgebung des Gebäudes überlagert. Als Tracking kommen optische Systeme zum Einsatz, die entsprechende Marken an den Decken der Räume erkennen.

An der Technischen Universität Graz wurde eine Vielzahl von AR-Anwendungen für den Freizeitbereich auf Basis des ARToolKit [ATK] entwickelt. Beispielsweise beschreibt Barakonyi in [BAR] einen Klavierlehrer in Form einer AR-Anwendung, indem die zu drückenden Tasten an einem Keyboard durch farbliche Augmentierungen hervorgehoben werden.

Die zunehmende Verbreitung von so genannten PDAs (Personal Digital Assistant) legt auch hier den Einsatz von AR nahe. Durch die noch recht schwache Rechenleistung dieser PDAs, kommen sie lediglich zur Aufnahme und Anzeige von AR-Funktionalitäten zum Einsatz. [FRÜ] beschreibt, wie an einem PDA eine mobile Kamera angeschlossen wird, welche die Umgebung aufnimmt. Das Bild wird dann mit computergenerierten Objekten angereichert und auf dem Display des PDA ausgegeben. Die Funktionalitäten sollen einer breiten Masse von Anwendern zur Verfügung gestellt werden. Eine Anwendung hierfür ist die überlagerte Visualisierung von Produktinformationen oder Bedienungsanleitungen.

Derzeit werden Versuche gemacht, um auch Mobilfunkgeräte (Handys) für AR-Anwendungen zu nutzen. Dies bietet sich an, da bereits die Mehrzahl der derzeitigen Handys eine eingebaute Videokamera vorweisen können. [MOE] beschreibt die Integration eines Vision Based Trackings, anhand dessen dreidimensionale Objekte lagerichtig auf dem Videobild des Handys augmentiert werden können.

Auch in der Filmindustrie ist der Einsatz von AR zu erwarten. In [GRA] erläutert Grau wie Sportsendungen mit Hilfe der AR-Technologie unterstützt werden.

Die nachfolgenden Unterkapitel beziehen sich auf Anwendungen aus der Industrie. Speziell die Automobilindustrie wird separat in Kapitel 3.2 im Detail betrachtet.

### 3.1.5 Produktentwicklung

Wesentliche Anwendungen aus der Entwicklung, die mit der AR-Technologie unterstützt werden können, sind ergonomische und gestalterische Aufgabenstellungen. Bei dem Design und der Konzeption eines Cockpits für ein Flugzeug spielt insbesondere die Anordnung der Schalter, Bedieninstrumente und Anzeigen eine elementare Rolle; hier müssen primär ergonomische Anforderungen abgedeckt werden. Mit Hilfe von AR können an einem vereinfachten Hardwareaufbau eines Cockpits die verschiedenen Gestaltungsvarianten getestet werden. Dabei betrachtet der Anwender das Cockpit durch ein HMD und bekommt die entsprechenden Bedieninstrumente überlagert [AV04]. Weitere Beispiele sind in den Referenzen [ARV, AV04] zu dem öffentlich geförderten Leitprojekt ARVIKA zu finden.

### 3.1.6 Produktion

Ein hervorstechendes Projekt bezüglich des Einsatzes der AR-Technologie in der Produktion wird seit Anfang der neunziger Jahre beim Flugzeughersteller Boeing durchgeführt. Das Projekt hat zum Inhalt, die manuelle Kabelbaummontage für Passagierflugzeug durch AR zu unterstützen [CAU, MIZ].

### 3.1.7 Service

Die Wartung von Anlagen, Maschinen und Gerätschaften bietet eine Vielzahl von Anwendungen, die mit Hilfe der AR-Technologie unterstützt werden können. [NEU] beschreibt in einer Fallstudie, dass zum Beispiel bei einer Flugzeugwartung nur 45% der Wartungszeit für Tätigkeiten verwandt wird. Die restliche Wartungszeit wird für das Aufsuchen der benötigten Informationen benötigt. Durch die Unterstützung durch die AR-Technologie kann der Zeitaufwand für die Informationssuche reduziert werden. In [AV04] werden Szenarien zur Wartung eines Hubschraubers und des Eurofighters erläutert. Beim Eurofighter werden anhand der AR-Technik Montagevorgänge für Reparaturvorgänge eingeblendet. Beim Szenario des Hubschraubers geht es dagegen um die Überlagerung der technischen Strukturen, die sich unter der Außenhaut des Hubschraubers befinden. So kann ein Mechaniker entscheiden, ob Beschädigungen der Außenhaut den Hubschrauber nachhaltig beeinträchtigen.

Weitere AR-Anwendungen in [AV04] werden zur Unterstützung des Services für Werkzeug- und Produktionsmaschinen genutzt. Die Unterstützung erfolgt dort durch das kontextsensitive Anzeigen von Informationen zu Maschinenkomponenten. Dazu wurde ein neuartiges Informationssystem entwickelt. Alle Informationen zu einer Maschine werden in Form von XML-Dateien bereitgestellt und kontextabhängig verknüpft. Zu Themen wie Bedienung, Wartung und Instandhaltung sind eigenständige Informationseinheiten hinterlegt. Diese bestehen aus Warnhinweisen, technischen Daten oder Vorgaben bei einzelnen Arbeitsschritten und können dem Servicemitarbeiter eingeblendet werden.

In diesem Zusammenhang ist auch der Einsatz von einem so genannten "Remote Expert" zu nennen. Ein Servicetechniker, der im internationalen Ausland eine Maschine warten muss, kann sich über eine ISDN-Verbindung mit einem Experten am Hauptsitz der Firma verbinden. Der Techniker trägt eine Videokamera, dessen Bild zu dem Experten am Hauptsitz übertragen wird. Der Experte kann nun in das Videobild lageabhängige Hinweise geben und dem Techniker das Videobild mit den darin überlagerten Hinweisen zurückspielen. Der Techniker erhält so direkte, im Videobild registrierte Hinweise zu der im Ausland herrschenden Situation.

### 3.1.8 Bewertung der Anwendungen

Bei Betrachtung der vorangegangenen Abschnitte wird deutlich, dass sich der Großteil der derzeitigen AR-Anwendungen nicht im produktiven Einsatz befindet, sondern in Form von vereinzelt Prototypen in der Erprobung ist. Das Militär, gefolgt von der Medizin, ist hierbei am weitesten fortgeschritten. Besonders die Unterstützung von Militär-Piloten befindet sich im praktischen Einsatz.

Hierfür ausschlaggebend sind neben den Defiziten von derzeitigen HMD-Systemen die aufwendigen, immer wieder kehrenden Kalibrier- und Registrierungen, die für den Einsatz von AR nötig sind. Weiterhin erschweren ergonomische und medizinische Anforderungen den Dauereinsatz von HMDs. Die hier genannten Anwendungen sehen für ein HMD keine Tragezeit von 8-10 Stunden vor, sondern ermöglichen einen kurzen vorübergehenden HMD-Einsatz.

## 3.2 AR-Anwendungen in der Automobilindustrie

Durch den hohen Einsatz von CAx und virtuellen Techniken entlang des Produktentstehungsprozesses sind viele Vorgänge denkbar, die mit Hilfe der AR-Technologie unterstützt werden können. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit liefert dieser Abschnitt eine Übersicht über die derzeitigen AR-Aktivitäten in der Automobilindustrie.

### 3.2.1 Produktion

Ford beschreibt in [AV04] die Montage eines manuellen Schaltgetriebes. Das Getriebe besteht aus ca. 40 Einzelteilen, die in der richtigen Reihenfolge zusammengebaut werden müssen. Dabei wird mit dem AR-System in der Abfolge der Montageschritte jeweils das nächste zu verbauende Teil augmentiert.

Ein ganz anderer Anwendungsbereich in der Produktion ist die Fabrik- und Anlagenplanung. Volkswagen benutzt hier AR-Technologien, um neue Fertigungsanlagen oder Umbauten direkt in der realen Anlagenhalle zu beurteilen. Der Vorteil dieser Art der Planung gegenüber einer rein virtuellen Planung ist die Absicherung in der real vorliegenden Halle. In der Regel liegt die reale Halle nicht in ihrer aktuellen Beschaffenheit als virtuelles Modell vor. Oft wurden in und an der Halle bauliche Veränderungen vorgenommen, die nicht im aktuellen Datenbestand dokumentiert sind. Ein kompletter Laserscan der Halle einschließlich der Überführung in ein virtuelles Modell wäre somit für die virtuelle Planungssicherheit nötig. Neben den hohen Kosten eines solchen Scans gibt es oft Beschränkungen durch die laufende Produktion, die einen Scan erheblich erschweren würden. Besonders in diesen Fällen zeigt sich das deutliche Potential der AR-gestützten Anlagenplanung.

### 3.2.2 Service

Der zunehmende Anteil an Elektronik und Vernetzung von Systemen innerhalb eines Fahrzeugs zieht eine stark steigende Komplexität bei der Instandsetzung eines Fahrzeuges mit sich. In [AV04] zeigt BMW zwei Szenarien einer AR-gestützten Instandsetzung und Fehlerbehebung.

Beim ersten Szenario geht es um eine reine Reparaturunterstützung. Der Fehler ist bereits bekannt und der Austausch des defekten Bauteils wird mit Hilfe der AR-Technologie unterstützt. Dabei wird zu jedem Arbeitsschritt eine Reparaturanleitung in Form einer Webseite augmentiert. Die Navigation zwischen den Schritten erfolgt durch Sprachsteuerung. Beim zweiten Szenario wurde das System erweitert und bezieht die Analyse des Fehlers mit ein. Nach Anzeige der Kundenbeanstandung kann der Fehlerspeicher des Fahrzeugs bzw. des zuständigen Systems ausgelesen werden. Nach weiteren Prüfschritten kann das Bauteil mit der AR-Unterstützung repariert oder getauscht werden. Die überlagerten Informationen basieren auf Dialogfenstern und Animationen.

BMW hat das zweite Szenario an 39 Servicetechnikern evaluiert und konnte neben einer positiven Bewertung des Systems signifikante Zeitvorteile feststellen.

### 3.2.3 Entwicklung

AR-Anwendungen in der Entwicklung sind prinzipiell entlang des ganzen Produktentstehungsprozesses denkbar. Derzeitige Anwendungsgebiete finden sich im Design, in der Konstruktion bzw. Montage und besonders im Prototypenbau als Vergleich zwischen virtuellen Entwicklungsdaten und realen Bauteilen.

#### Design:

Im Bereich des Produktdesigns ergeben sich Möglichkeiten, den Designer bei der Gestaltung eines Produkts bereits in der Ausgestaltung an einem Tonmodell neue Möglichkeiten zur Verfügung zu stellen. Canis hat in seiner Arbeit [CAN] eine AR unterstützte Anwendung im Design dargestellt. Bei weiteren Anwendungen wird ein zentrales Design-Modell aufgebaut und die unterschiedlichen Varianten einer Gestaltung als virtuelle Ergänzungen am Hardwaremodell augmentiert. Ein Beispiel hierfür ist die Augmentierung unterschiedlicher Felgendesigns an einem realen Fahrzeug [AV04].

#### Prototypenbau:

Im Prototypenbau bei Volkswagen gibt es eine Vielzahl von Szenarien, in denen AR Technik unterstützend eingesetzt werden kann. Ziel ist das Einblenden von Fahrzeugkomponenten im realen Fahrzeug bzw. Vorderwagen zur Unterstützung des Aufbauprozesses. Beim Aufbau eines Prototypen stehen nicht alle der zu verbauenden Komponenten in Hardware zur Verfügung. Die Komponenten sind zwar in CAD konstruiert, jedoch noch nicht fertig produziert, da die Herstellung dieser Komponenten in aufwendigen Einzelanfertigungen erfolgt. Zusätzlich verzögert der hohe Anteil von Handarbeit die Fertigung. Die Monteure können so den Prototyp nicht weiter aufbauen, und es entstehen ineffektive, kostenreiche Leerzeiten im Aufbauprozess.

Durch die Möglichkeit, mit Hilfe von AR Technik fehlende Komponenten lagerichtig in den aktuellen Baustand des Prototypen einzublenden, kann der Monteur die Einbausituation besser überblicken und beurteilen. Er ist so in der Lage, den Prototyp weiter aufzubauen, auch ohne die Komponenten in Hardware vor Ort zu haben, und baut quasi um die eingeblendeten Komponenten herum. Abbildung 3.1 zeigt das Einblenden des Bremskraftverstärkers beim Aufbau eines Vorderwagens.

Ein weiterer Anwendungsfall in diesem Zusammenhang ist die Anfertigung von Haltern und kleinen Montageträgern, die selbst noch nicht als Geometriedaten vorliegen bzw. konstruiert sind. Hierzu wird das Bauteil lagerichtig an der Montageposition eingeblendet und der fehlende Halter bzw. Träger möglichst passgenau gefertigt. Je nach Komplexität des so improvisierten Bauteils ist sogar angedacht, dieses Bauteil dem Konstrukteur als Vorlage zur Verfügung zu stellen. Die Überlagerung eines Antriebstranges an einer Rohkarosse wird in Abbildung 3.2 gezeigt.

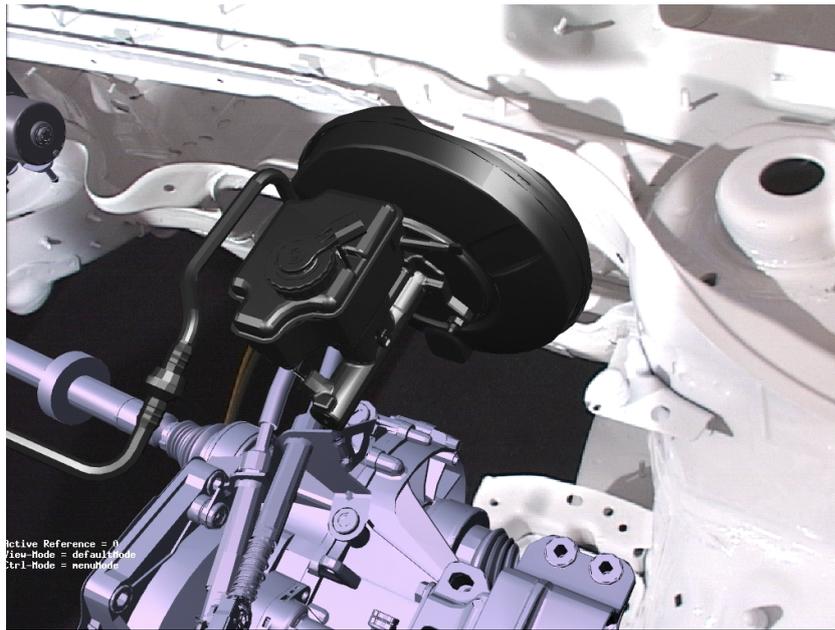


Abbildung 3.1: Augmentierter Bremskraftverstärker



Abbildung 3.2: Augmentierter Antriebstrang

**Anmerkung:** Bei dieser Art der Anwendung wird oft von Anwendern der CAD-Technik darauf hingewiesen, dass solche Analysen auch rein virtuell realisiert werden könnten. Dazu sei jedoch gesagt, dass beim Prototypenbau viel improvisiert werden muss und der vorliegende Prototyp meist von der Konstruktion leicht abweicht. Der Monteur braucht die Unterstützung direkt vor Ort in der vorherrschenden Situation des aktuellen Prototypen. Genau diese Situation lässt sich rein virtuell nicht abbilden und kann nur mit Hilfe der AR-Technologie realisiert werden.

### 3.2.4 Bewertung der Anwendungen

Analog zum Abschnitt 3.1 dieses Kapitels wird deutlich, dass sich der wesentliche Anteil derzeitiger AR-Anwendungen in der Automobilindustrie nicht im produktiven Einsatz befindet, sondern in Form von Prototypen zur Erprobung vorliegt. In der Automobilindustrie lässt sich kaum der Einsatz von AR in der Serienproduktion finden, wenn von Prototypen abgesehen wird.

BMW als eine der wenigen Ausnahmen unterstützt das Setzen von Bolzen an einer Karosse mit Hilfe von Techniken aus dem Augmented Reality Bereich. Die Anwendung ist von der Technischen Universität München entwickelt worden und wird in [ECH] beschrieben.

Durch die geringeren Anforderungen bezüglich Ergonomie ist ein Serieneinsatz der AR-Technologie zuerst in der Entwicklung zu erwarten. Eine Anwendung kommt dort nur ca. 30 min. zum Einsatz und muss sich nicht während einer kompletten Schicht bewähren. Im Entwicklungsbereich werden die ersten Anwendungen im Design vermutet, da hier die Anforderungen an die Genauigkeit nicht so hoch sind. Dafür ist im Gegenzug die visuelle Qualität der Darstellung ein wichtiger Faktor. Mit steigender Genauigkeit der formtreuen Überlagerung werden sich zunehmend Anwendungen im Prototypenbau etablieren. Auch die Arbeiten und Ergebnisse dieser Arbeit sind ausschließlich im Bereich der Entwicklung angesiedelt.

## 3.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Überblick über bekannte industrielle Anwendungen gegeben, die mit Hilfe der AR-Technologie unterstützt werden. Es hat sich herauskristallisiert, dass der wesentliche Teil der AR-Anwendungen in Form von Prototypen vorliegt. Lösungen mit hohem Reifegrad lassen sich besonders in militärischen Anwendungen finden. In der Automobilindustrie sind kaum AR-Anwendungen im produktiven Einsatz zu finden. Prototypische AR-Anwendungen lassen sich dort oft im Bereich der Entwicklung antreffen.

# Kapitel 4

## Tracking und Registrierung

Für das lagerichtige, formtreue Überblenden zwischen realen und virtuellen Objekten benötigt das AR-System nicht nur die exakten Positionen und Orientierungen aller Objekte, sondern insbesondere die richtigen Bezüge zwischen realen und virtuellen Objekten innerhalb der Welt koordinaten des AR-Systems. Bei der Registrierung werden alle benötigten Bezüge in Form von Transformationen bestimmt. Neben der exakten Vorgabe der virtuellen Objektdaten ist der Einsatz der richtigen Trackingtechnologie für die Güte der Registrierung entscheidend. Nach einer Übersicht und der Wahl eines geeigneten Trackingsystems für die AR-Anwendungen in dieser Arbeit werden für den benötigten Registrierungsprozess schrittweise alle nötigen Transformationen hergeleitet und Methoden zur Berechnung beschrieben.

### 4.1 Übersicht Trackingsysteme

Das Tracking ist eine wesentliche Schlüsseltechnologie für die Augmented Reality Anwendungen. Tracking bedeutet die Bestimmung und Verfolgung der Position eines Objektes von einem vorher festgelegten Ausgangs- oder Ursprungspunkt. Eine einzelne Position wird dabei als Punkt im Raum mit 3 Koordinaten oder auch 3 Degrees Of Freedom (DOF) angegeben. Ist auch die Orientierung, d.h. die Ausrichtung eines Objektes um seine Hauptachsen relevant, so werden 6 DOF Werte angegeben. Werden weniger Freiheitsgrade vom Trackingsystem ermittelt, besteht im Allgemeinen keine Eindeutigkeit, was für einige Aufgaben und Anwendungen durchaus akzeptabel und ausreichend sein kann. Beispielsweise reichen zum "Tracken" eines idealen Zylinders bereits 5 DOF Informationen aus, da die Rotation um die Zylinderlängsachse im Allgemeinen nicht relevant ist. Wie in [MUD] beschrieben, kann beim Tracking grundsätzlich zwischen drei Vorgehensweisen unterschieden werden, abhängig davon, wo die Sender (Referenzpunkte) und die Empfänger (Sensoren) befestigt sind:

- Bei dem so genannten **Outside-In** Tracking werden die Sender (Referenzpunkte) an den zu trackenden Objekten befestigt. Der oder die Empfänger (sensoren) zu den Sendern sind an festen Positionen um das Objekt herum installiert

und definieren damit zugleich das Volumen, in dem die Positionen der Objekte getrackt (verfolgt) werden können. In diesem Trackingvolumen gibt es einen festgelegten Ursprung einschließlich einer Orientierung. Die Trackinginformationen zu den Objekten werden typischerweise absolut zu diesem Ursprung angegeben.

- Bei dem so genannten **Inside-Out** Tracking befindet sich der Empfänger (Sensor) am Objekt selbst und in der Umgebung sind beliebig viele Sender (Referenzpunkte) befestigt. Hier erfolgt die Positionsbestimmung eines Objektes immer relativ zu den Sendern, die gerade erfasst werden. Durch die geschickte Anordnung der Sender, kann das Trackingvolumen größer sein, als die Reichweite des Empfängers zu einem einzelnen Sender vorgibt.
- Bei dem **Inside-In** Tracking befinden sich sowohl Empfänger als auch der Sender an dem zu trackenden Objekt. Dieses Tracking dient zur Verfolgung von Bewegungen oder Änderungen am Objekt selbst unabhängig von einem externen Referenzsystem. Hat das Objekt beispielsweise ein Gelenk mit einem mechanischen Arm, so kann über das Inside-In Tracking die Endposition des Arms berechnet werden, falls die Position des Objekts bereits bekannt ist. Da mit dem Inside-In keine absoluten Positionen ermittelt werden können, wird es auch relatives Tracking genannt.

Die "klassische" Aufgabe eines Trackingsystems in einer AR-Anwendung ist das Erfassen der Position und Orientierung vom Kopf des Anwenders (auch HMD-, Head- oder Kopftracking genannt). Aus diesen Informationen wird die Sicht des Anwenders auf die Szene ermittelt und so die entsprechend perspektivisch richtige Augmentierung angezeigt. Mögliche Fehler in Qualität und Quantität, die bei dem Kopftracking entstehen, haben daher besonders starke Auswirkungen auf die Qualität (insbesondere Genauigkeit) der Augmentierung des AR-Systems. Weitere Aufgaben des Trackingsystems für AR-Anwendungen sind das Tracking von beliebigen Objekten und Interaktionsgeräten.

Nach [MAB] und [BHA] können Trackingsysteme anhand der folgenden Kriterien bewertet und verglichen werden:

- **Genauigkeit:** Die gegebene Anforderung einer Aufgabe impliziert die zu erzielende Genauigkeit. Äußere Einflüsse (etwa Interferenzen oder Verdeckungen der zu erfassenden Objekte) können sich negativ auf die Genauigkeit der zu ermittelten Position und Orientierung auswirken. Dies gilt für den gesamten Zeitraum der Anwendung. Die Trackingergebnisse wiederholter Messungen unter gleichen Voraussetzungen sollten keine Abweichungen untereinander zeigen (auch Wiederholgenauigkeit genannt) und keinen Drift aufweisen. Die Auflösung des Systems sollte möglichst so hoch sein, dass auch kleine Änderungen der zu trackenden Objekte erkannt werden. Auch das angewandte Trackingverfahren selbst sollte keine negativen Effekte hervorrufen, die sich z.B. störend durch ein "Zittern" (Jitter oder Jittering) der Trackingwerte bemerkbar machen.

- **Echtzeitfähigkeit:** Da ein Trackingsystem oft "Basisinformationen" generiert, die von anderen Systemkomponenten weiterverarbeitet werden müssen, zeigen sich Fehler beim Tracking besonders stark, da sie sich in den anschließenden Systemkomponenten quasi "fortpflanzen". Die essentielle Berechnung der Sicht des Anwenders ist in diesem Zusammenhang zu nennen. Eine zu geringe Wiederholrate genügt nicht den Anforderungen der Anwendbarkeit. Eine zu hohe Latenz trägt zur Ungenauigkeit und zum "Nachziehen" (oder "swimming") der Anwendung bei.
- **Skalierbarkeit:** Viele Anwendungen erfordern, dass mehrere Objekte gleichzeitig getrackt werden müssen. Das Trackingsystem sollte dies unterstützen und aus dieser Anforderung sollten keine negativen Auswirkungen auf andere Leistungsmerkmale des Systems entstehen. Oft wirkt sich aber die Erhöhung der Anzahl der zu trackenden Objekte negativ auf die Geschwindigkeit oder Genauigkeit eines Systems aus. Auch das Arbeitsvolumen, das durch die gegebene Anwendung benötigt wird, muss vom Trackingsystem erfassbar sein. Idealerweise ist das Trackingvolumen eines Systems für unterschiedliche Anforderungen skalierbar. In der Regel sind bei ein und demselben Trackingsystem Einbußen bei der Trackinggenauigkeit gegeben, sobald das Trackingvolumen vergrößert wird.

Es existieren im AR- und insbesondere im VR-Bereich bereits viele, zum Teil sehr unterschiedliche Trackingsysteme. Jedes System zeichnet sich durch bestimmte Vor- und Nachteile aus. Ein ideales, universelles System, das gemäß oben genannten Bewertungskriterien nur positive Eigenschaften aufweist, existiert derzeit nicht (siehe auch [AUR]). Im AR-Bereich besitzt Tracking daher immer noch ein enormes Entwicklungs- und Erforschungspotential und ist eines der am häufigsten diskutierten Themen.

Trackingsysteme sollten immer in Abhängigkeit von einer vorgegebenen Anwendung ausgewählt werden. Nur so können möglichst viele Anforderungen erfüllt werden, die durch die Anwendung impliziert sind. Um für die Anwendung in dieser Arbeit die zu treffende Systemauswahl zu erleichtern, wird hier zunächst eine Klassifizierung von derzeit verfügbaren Trackingsystemen vorgenommen.

Der häufigste Ansatz für solch eine Klassifizierung bezieht sich direkt auf die Technologie, die dem Trackingsystem zugrunde liegt. Siehe auch [APP, MAB, BHA] und [KAL]. Die Technologien, um ein Trackingsystem zu realisieren, lassen sich nach den folgenden physikalischen Prinzipien klassifizieren:

- Mechanisch
- Elektromagnetisch
- Optisch
- Akustisch

- Inertial
- Hybrid
- Sonstige

### 4.1.1 Mechanisch

Mechanisches Tracking zeichnet sich durch eine sehr hohe Genauigkeit aus. Der zu trackende Sensor ist - ähnlich wie bei einem Industrieroboter - an einem Arm mit mehreren Gelenken befestigt. An den Gelenken sind Winkelgeber angebracht, um so über die Anordnung der Armsegmente anhand einer Kinematik die Position des Sensors berechnen zu können [FAK].

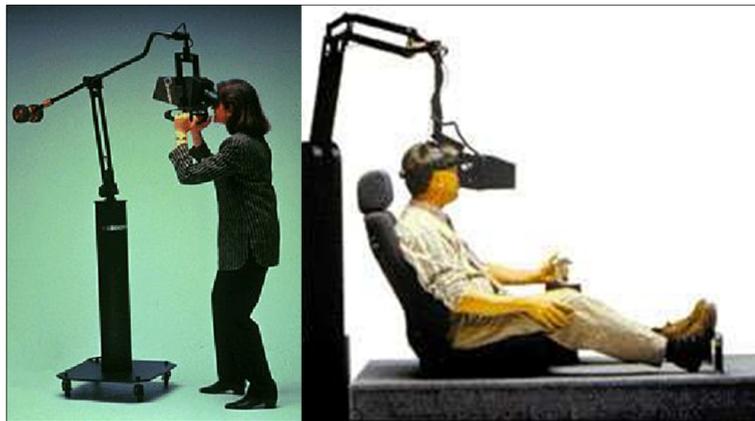


Abbildung 4.1: BOOM der Firma Fakespace [FAK]

Mechanische Trackingsysteme sind meist für den Einsatz im VR-Bereich konzipiert und fallen in die mittlere Preiskategorie. Geräte, die für spezielle Aufgaben entwickelt werden, können hingegen sehr kostenintensiv sein. In der Automobilindustrie werden derartige Systeme z.B. zur dreidimensionalen Vermessung von Fahrzeugteilen eingesetzt. Die entsprechenden Geräte sind in der Lage, Objektpunkte mit einer Genauigkeit deutlich unter 1mm zu erfassen. Sie sind für einen allgemeinen Einsatz für den AR-Bereich ungeeignet, können jedoch als Referenzgeräte bzgl. Genauigkeit für andere Systeme benutzt werden. Wie auch bei [MÜL] werden folgend die Vor- und Nachteile zusammengefasst:

*Vorteile:*

- Hohe Genauigkeit
- Hohe Wiederholrate, geringe Latenz
- Geeignet für haptische Feedback-Mechanismen
- Wohlbekannte Verfahren (z.B. Aus der Telerobotik)

*Nachteile:*

- Begrenzte Reichweite durch die Armkonstruktion
- Keine Skalierbarkeit
- Prinzipiell kann nur ein Objekt getrackt werden
- Starke Störung/ Einschränkung des Messvolumens durch den Arm (Durchdringbarkeit)

### 4.1.2 Elektromagnetisch

Im VR-Bereich sind elektromagnetische Trackingsysteme (oder kurz Magnettracker) sehr stark verbreitet. Ihre Trackinginformationen können bereits standardmäßig von vielen Softwarepaketen verarbeitet werden. Das Protokoll, in dem die Daten geliefert werden, wird daher auch von einigen anderen Herstellern unterstützt oder emuliert (simuliert), deren Systeme nicht auf dieser Technologie basieren. Viele andere Hardwarekomponenten für den VR- und AR-Bereich (HMDs, Datenhandschuhe, usw.) sind bereits mit Anschlussmöglichkeiten für Magnettracker ausgestattet (Abbildung 4.2). Der niedrige Preis dieser Systeme trägt ebenfalls zur starken Verbreitung bei.

Die bekanntesten Systeme für elektromagnetisches Tracking kommen von den Firmen Polemus [POL] und Ascension [ASC] - letzteres zeigt Abbildung 4.2:



Abbildung 4.2: Ein Trackingsensor der Firma Ascension [ASC]

Das Prinzip bei diesem Tracking ist die Erzeugung eines Magnetfelds durch drei senkrecht aufeinander stehenden Spulen, die nach einer bestimmten Taktung mit Strom durchflossen werden. In den Sensoren sind ebenfalls drei Spulen senkrecht aufeinander angeordnet. Die Position der Sensoren wird anhand der Stromstärke in den Spulen gemessen. Da die drei Spulen unterschiedlich vom Sender getaktet werden, können auch die Rotationen ausgewertet werden.

Im Gegensatz zum mechanischen Tracking fallen die Anschaffungskosten deutlich geringer aus. Der größte Nachteil dieser Technologie ist die Anfälligkeit gegenüber Störungen des Magnetfeldes. Sind im Messvolumen Metalle, Monitore, Stromquellen

oder Stromleitungen vorhanden, sind sofort Störungen zu bemerken, die sich negativ auf die Messgenauigkeit auswirken. Magnettracker unterteilen sich in Systeme, deren Magnetfelder durch Wechselstrom (AC) oder getakteten Gleichstrom (DC) erzeugt werden. Bei den DC-Systemen wird versucht, die Störanfälligkeit gegenüber Metallen zu verringern. Dies bestätigt sich in den Analysen von [NMF], die den Einfluss verschiedener Störfaktoren auf AC- und DC-Systeme untersuchen.

AC-Systeme sind weniger anfällig gegenüber Störungen, die durch Stromquellen und Stromleitungen entstehen. Zusammenfassend alle Vor- und Nachteile von elektromagnetischen Trackingsystemen:

*Vorteile:*

- Unterstützung vieler Soft- und Hardwareprodukte
- Empfänger sind klein und leicht (siehe Abbildung 4.2)
- Kostengünstig
- Verfahren zur Entzerrung gestörter Magnetfelder vorhanden [ZAC]
- Verfügbarkeit

*Nachteile:*

- Genauigkeit wird von Störungen des Magnetfeldes beeinflusst
- Genauigkeit verringert sich mit zunehmender Entfernung vom Sender
- Geringe Skalierbarkeit
- Sensoren müssen stets verkabelt werden
- Die Trackinggeschwindigkeit und die Anzahl der zu trackenden Objekte verhalten sich antiproportional zueinander

### 4.1.3 Optisch

Optische Trackingverfahren lassen sich sehr gut nach der obigen Unterscheidung in die Kategorien der Outside-In und Inside-Out Systeme aufteilen:

#### 4.1.3.1 Äußeres Tracking (Outside-In)

Grundlage bei dieser Art von optischen Trackingsystemen sind photogrammetrische Verfahren mit einer Stereoanalyse der Bildinformationen von zwei oder mehr Kameras. In den Kamerabildern werden einzelne Objektpunkte, spezielle Formen oder Merkmale zwischen den Kameras zugeordnet und über Triangulation eine dreidimensionale Position für die Punkte oder Merkmale berechnet. Die Kameras sind dabei ortsfest positioniert und begrenzen damit das mögliche Messvolumen [LIV]. Dabei lässt sich zwischen aktiven und passiven Verfahren unterscheiden:

- **aktiv:** An dem zu trackenden Objekt werden spezielle Markierungen (Marker) angebracht, die explizit von den Kameras erfasst werden (auch "markerbasierte Verfahren" genannt). Die Marken selber können wiederum selbst aktiv oder passiv sein.

Aktive Marken können beispielsweise aus Light-Emitting-Diodes (LEDs) im Infrarotlichtbereich konzipiert sein, bei passiven Marken werden kleine Kugeln mit einer retroreflektierenden Beschichtung verwendet. Die Kugeln werden dann mit Infrarotlichtblitzen beleuchtet, die direkt in die Kameras integriert sind. Durch die Retroreflexion ist im Kamerabild nur eine starke Lichtreflexion an den beschichteten Kugeln zu sehen. Die folgende Abbildung 4.3 zeigt ein Infrarotbasiertes Trackingsystem mit zwei Kameras und die dazugehörigen retroreflektierenden Kugeln.



Abbildung 4.3: Infrarottrackingsystem mit passiven Marken [ART]

In beiden Varianten heben sich im Kamerabild die Marker von der Umgebung stark ab. Die zweidimensionalen Positionen aus den unterschiedlichen Kamerabildern werden durch Triangulation in 3 DOF Informationen umgewandelt. Durch eine feste Konstellation von mindestens 4 Markern (ein so genannter Rigid Body) erlaubt die Ermittlung von 6 DOF Informationen.

- **passiv:** Bei passiven Verfahren wird das Objekt mit keinerlei Zusatzinformation - wie etwa Markern - versehen. Vielmehr wird das zu trackende Objekt selbst mit Mitteln der Stereorekonstruktion von Objektoberflächen aus der Photogrammetrie und Mustererkennung rekonstruiert.

#### 4.1.3.2 Inneres Tracking (Inside-Out)

Die Kamera ist entweder am Anwender oder an einem Objekt angebracht und ist nicht ortsfest. Das System versucht, in der Umgebung spezielle Muster oder Markierungen zu finden, an denen es sich orientiert und die 6 DOF Informationen berechnen kann. Dabei kann die Kamera relativ zur Umgebung getrackt werden (anhand von ortsfesten Markierungen in der Umgebung) und zugleich ein Objekt mit einem Marker relativ zur Kamera (Inside-In) getrackt werden. Auch hier kann wieder zwischen aktiven und passiven Systemen unterscheiden werden:

- **aktiv:** Am Objekt oder in der Umgebung werden Markierungen angebracht. Die Markierungen zeigen in der Regel eine Referenzgeometrie, die oft in Form eines Quadrates gewählt wird und im Innern ein spezielles Muster zur Identifikation zeigt. Anhand einer Bildverarbeitung werden diese Markierungen erkannt. Anhand der Größe, der Position und der Verzerrung der bekannten Markierung im Kamerabild können die Position und die Orientierung der Kamera relativ zur Markierung bestimmt werden. [KAT, STR]. Abbildung 4.4 zeigt die Marken, die im Leitprojekt ARVIKA zum Tracken benutzt wurden. Ein weiteres, stark verbreitetes System dieser Art ist das Tracking vom AR-Toolkit [ATK].

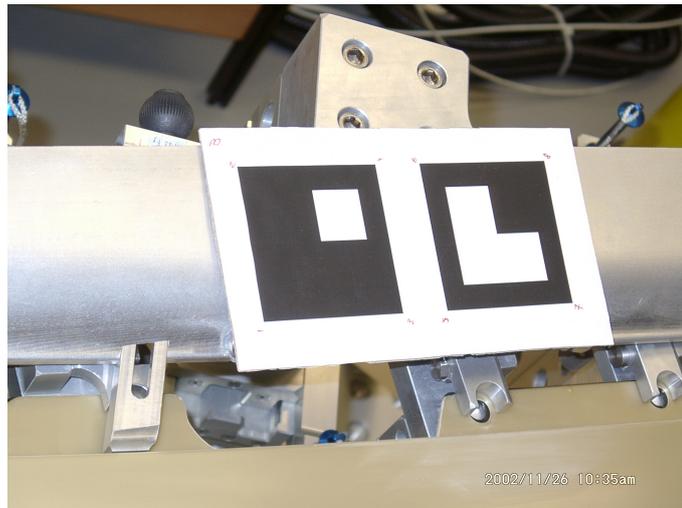


Abbildung 4.4: Marken eines optischen Inside-Out Trackingsystems [AV04]

- **passiv:** Ähnlich wie beim passiven Outside-In-Verfahren wird im Kamerabild nach der Geometrie des zu trackenen Objekts gesucht. Im Vergleich zum passiven Outside-In-Verfahren steht hierfür jedoch nur ein einziges Kamerabild zur Verfügung. Oft werden am Objekt nach auffälligen Merkmalen, wie Punkten, Kanten oder Ecken, gesucht und diese Merkmale auf eine vorab abgelegte Referenzgeometrie des Objektes projiziert. Dieses markerlose ("markerless") Tracking wird ausführlich in [STR] erläutert. Auch die metaio GmbH [MET] bietet ein markerloses Tracking an.

Optische Trackingsysteme sind mittlerweile stark verbreitet und in allen Preiskategorien vertreten. Sie können extrem hohe Genauigkeitsanforderungen erfüllen. Beispielsweise erreicht das kommerzielle optische Meßsystem der Firma Krypton [KRY] eine garantierte Genauigkeit bis zu 0,1 mm. Die starke Verdeckungsproblematik (auch "line of sight" genannt) ist ein wesentlicher Nachteil optischer Trackingsysteme. Folgend sind alle Vor- und Nachteile gegenübergestellt:

*Vorteile:*

- Hohe Genauigkeit

- Hohe Geschwindigkeit
- Große Messvolumen möglich
- Viele Objekte gleichzeitig trackbar
- Marken in der Regel klein und leicht
- Viele Ausführungen der Systeme für unterschiedliche Anforderungen erhältlich

*Nachteile:*

- Keinerlei Trackinginformationen bei Verdeckung
- Aktive Marker benötigen eine Verkabelung
- Rigid Bodies können groß und unergonomisch sein
- Genauigkeit verringert sich mit zunehmender Entfernung von der(den) Kamera(s)
- Inbetriebnahme bei Outside-In-System kann aufwendig sein

#### 4.1.4 Akustisch

Beim akustischen Tracking emittiert eine Sendeeinheit ein Signal mit einer Frequenz, die typischerweise im Ultraschallbereich liegt (oberhalb 20 kHz) und damit vom menschlichen Gehör nicht wahrgenommen wird. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des akustischen Signals bekannt ist, kann eine Empfangseinheit (ein spezielles Mikrofon) bei Signaldetektion aus der Zeitdifferenz die Entfernung zum Sender bestimmen. Beim Einsatz von drei Sende- oder Empfangseinheiten kann über Triangulation die 3D-Position bestimmt werden. Für 6 DOF Werte sind sowohl drei Sende- als auch drei Empfangseinheiten nötig. In der Regel wird mit weiteren redundanten Sendern und/ oder Empfängern die Ausfallsicherheit des Systems erhöht. Dies ist notwendig, da viele akustische Effekte negativ auf die Messgenauigkeit einwirken. Als Effekte lassen sich (akustische) Verdeckung und Schwankungen der Temperatur, des Luftdrucks und der Luftfeuchtigkeit nennen, die allesamt einen Einfluss haben.

Prinzipiell können akustische Trackingsysteme so konfiguriert werden, dass die Sendeeinheiten auf den zu trackenden Objekten montiert werden und die Empfangseinheiten stationär positioniert sind (Outside-In-Anordnung). Auch die umgekehrte Inside-Out-Anordnung ist möglich.

Zwei unterschiedliche Methoden kommen beim akustischen Tracking zum Einsatz, die in der Literatur die Namen Time of Flight (TOF) und PhaseCoherent (PC) tragen [KAL]. Bei der TOF-Methode wird auf der Empfängerseite die "Flugzeit" der eingetroffenen Akustiksignale gemessen und daraus die absolute Entfernung zum Sender bestimmt.

Beim Einsatz der PC-Methode wird auf der Empfängerseite die Phasenverschiebung eines eingetroffenen Signals relativ zum letzten Signal gemessen und so die Entfernungsänderung ermittelt.

Um zu absoluten Werten zu kommen, ist ein derartiges System auf externe Referenz- bzw. Korrekturmessungen angewiesen. Die Sender müssen so synchronisiert sein, dass sie ihr akustisches Signal zeitlich eineinander verschränkt aussenden. Gängige Methoden zur Synchronisierung sind infrarote Lichtimpulse oder elektrische Impulse, die eine Verkabelung der Sender mit sich bringen.

Trotz eines niedrigen Preises, besitzen rein akustische Trackingsysteme im VR- und AR-Bereich einen kleinen Verbreitungsgrad. In der folgenden Abbildung sind zwei dieser Systeme dargestellt, deren Produktion inzwischen eingestellt worden ist. Hingegen haben sich in anderen Anwendungsbereichen akustische Verfahren etabliert. So sind nach [DOR] Ultraschalluntersuchungen des Herzens (Echokardiographie) aus der Medizin nicht mehr wegzudenken.



Abbildung 4.5: Akustisches Trackingsystem von Logitech (bei VRDepot [VRD])

Bei akustischen Trackingsystemen überwiegen die Nachteile:

*Vorteile:*

- Kleine, leichte Empfänger- und Sendeeinheiten
- Kostengünstig

*Nachteile:*

- Genauigkeit wird von Umgebungslärm und akustische Verdeckungen gestört
- Genauigkeit ist abhängig von Temperatur, Luftdruck und Feuchtigkeit
- Kaum kommerziell verfügbar
- PC-Methode kann Drift aufweisen
- Latenzzeit wächst mit zunehmender Entfernung zwischen Sender und Empfänger
- Die Trackinggeschwindigkeit und die Anzahl der zu trackenden Objekte verhalten sich antiproportional zueinander

### 4.1.5 Inertial

Inertiale Systeme werden seit Jahren zur Navigation in der Raumfahrt, bei U-Booten, Flugzeugen und Raketen eingesetzt [SEN]. Die Sensoren werden am Objekt befestigt und messen die translatorische und rotatorische Beschleunigung [FER]. Da die Sensoren keine weiteren Empfänger benötigen, gehört das inertiale Tracking zur Kategorie der Inside-In Systeme.

Die Technologie ist damit auch unanfällig gegenüber Problemen durch Verdeckung. Wenn die erzeugten Daten außerdem kabellos von den Sensoren zur Auswerteeinheit transferiert werden, ergibt sich für die Sensoren das Potential, beliebig große Versuchsvolumen abzudecken. Im VR- und AR-Bereich stellt die Firma Intersense [INT] kommerzielle Systeme zur Verfügung, siehe auch Abbildung 4.6. Xsens [XSE] ist ein weitere Firma, die interiale Trackingsysteme anbietet.

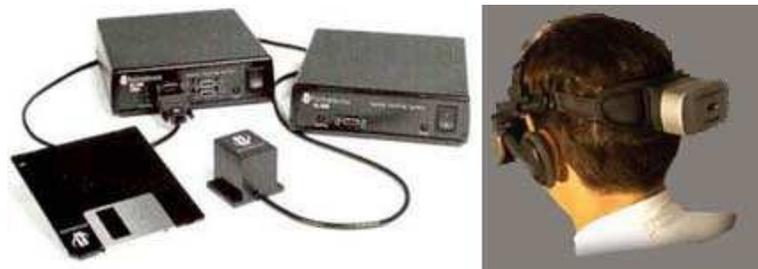


Abbildung 4.6: Inertiales System (Gyroskop) von Intersense [INT]

Typischerweise entsteht ein System zum Erfassen von 6 DOF Informationen aus zwei Arten inertialer Sensoren [VER]. Die Raumposition eines Objekts lässt sich aus den Ergebniswerten drei orthogonal zueinander angebrachter Beschleunigungsmesser über zweifache Integration ermitteln. Die Orientierung ergibt sich über die Integration der Ergebniswerte von drei orthogonalen Gyroskopen, die als Ergebniswerte die Änderungen der Objektorientierung liefern.

Beide Sensorarten liefern nur relative Daten. Erst die Integration über die Zeit ermöglicht die Berechnung absoluter Werte. Durch die Integration entsteht eine Drift bei den Trackinginformationen inertialer Systeme, die sich bei längerem Einsatz des Systems zunehmend verstärkt. Abschließend die Vor- und Nachteile dieser Systeme:

*Vorteile:*

- Keine Signalgeber/ Sender erforderlich
- Unabhängig von der Größe des Messvolumens
- Keine Verdeckungsproblematik
- Beliebige große Objektanzahl

*Nachteile:*

- Starke Drift
- Genauigkeit ist von Einflüssen, wie Vibrationen und Temperatur, abhängig
- Bewegungen mit kleinen Beschleunigungen sind schwer zu erfassen

#### 4.1.6 Hybrid

Beim hybriden Trackingansatz werden verschiedene Systeme und Technologien miteinander kombiniert (die so genannte Sensorfusion), um im Vorfeld definierte Mängel eines Trackingsystems zu kompensieren. Nach [WAG] lässt sich die Sensorfusion in drei grundsätzliche Fusionsarten unterteilen:

- **Verbesserung der Genauigkeit:** Bei dieser Fusionsarbeit werden Informationen von unterschiedlichen Trackingsystemen benutzt, um die Gesamtgenauigkeit des Trackings zu erhöhen. Etwas lässt sich bei einem optischen Outside-In-Tracking die Genauigkeit der Objektorientierung durch optisches Inside-Out-Tracking verbessern.
- **Verbesserung der Ausfallsicherheit:** Hier werden mehrere unterschiedliche Trackingsysteme parallel betrieben und tracken allesamt dasselbe Objekt. Kommt es bei einem Trackingsystem zu einem Ausfall (z.B. durch Verdeckungen), so sind durch die anderen Trackingsysteme weiterhin Informationen verfügbar. Es ergibt sich ein sehr robustes Trackingsystem, das in einem stark gestörten Umfeld zum Einsatz kommen kann.
- **Vergrößerung des Messvolumens:** Kombiniert man mehrere Trackingsysteme derart, dass sich ihre Messvolumen am Rand überlappen, kann mit diesem System in einem vergrößerten Messvolumen getrackt werden, ohne dass die Übergänge der Volumina in den Trackinginformationen bemerkbar sind. Auch ein "Umschalten" zwischen grobem und feinem Tracking lässt sich mit hybridem Tracking realisieren. Beispielsweise wird bei einer großen Distanz zu einem Objekt nur die Richtung übermittelt, während in direkter Objektumgebung genau 6 DOF Informationen verfügbar sind.

Bis auf das in der nächsten Abbildung 4.7 gezeigte System der Firma Intersense [INT] gibt es derzeit wenig kommerzielle Produkte in diesem Bereich.

Beim Intersense-System werden ein inertiales und ein akustisches System miteinander kombiniert. Das für inertielle Systeme typische Problem des Drifts wird anhand der, in regelmäßigen Intervallen gemessenen, absoluten Positionswerte des akustischen Systems eliminiert. Das System liegt in der mittleren Preiskategorie. In Forschungseinrichtungen existieren einige prototypische Systeme. An der Technischen Universität Graz ist ein System entwickelt worden, das aus der Kombination eines elektromagnetischen und eines optischen Verfahrens besteht [AUR].

In [SHC] ist ein ähnliches System beschrieben, das am Department of Computer Science der University of North Carolina entwickelt worden ist. In [YNA] ist hingegen ein System beschrieben, das aus der Kombination eines inertialen und optischen Subsystems besteht.



Abbildung 4.7: Ein Intersense IS-600 Mark2 System [INT]

Vor- und Nachteile von hybriden Trackingsystemen sind:

*Vorteile:*

- Kombination der Vorteile unterschiedlicher Technologien
- Modellierung des Systems nach speziellen Anforderungen
- Hohe Robustheit durch Ausnutzung von Redundanzen
- Erhöhung des Messvolumens
- Skalierbarkeit

*Nachteile:*

- Kaum kommerziell verfügbar
- Deutlich erhöhte Systemkomplexität bezüglich Hard- und Software
- Die Systemergonomie sinkt durch das Verwenden vieler Systeme

### 4.1.7 Sonstige

Die folgenden Systeme spielen für heutige AR-Systeme keine wesentliche Rolle und werden hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt:

- **Laser Tracking:** Beim Lasertracking wird ein ausgesandtes Lasersignal von mehreren, unterschiedlich positionierten Stationen (Empfangseinheiten) zu unterschiedlichen Zeiten empfangen. Jede dieser Stationen sendet dann eine Bestätigung aus. Aus der zeitlichen Abfolge des Empfangs dieser Bestätigungen durch den Empfänger kann eine Position berechnet werden. (siehe [MÜL] und [MTI]). Lasertracker ermöglichen derzeit die höchste Positionsgenauigkeit.
- **Global Positioning System (GPS):** GPS-Systeme empfangen Signale verschiedener ortsfester Sender (= Satelliten in geostationärer Umlaufbahn). Die Position des Empfängers wird durch die Signallaufzeiten und Triangulation berechnet. In Analogie werden bei lokalen GPS-Installationen (Local GPS) mehrere ortsfeste Antennen zur Positionsbestimmung verwendet [MÜL].
- **IR-Balken:** Infrarot-Balken sind fest installierte Sender, die einem festlegbaren Umfeld eine Identifikationsnummer übermitteln. Eine Empfangseinheit, die etwa an einem PDA oder mobilen wearablen PC montiert ist, zeigt die entsprechend erkannten Identifikationsnummern an. Die Systeme erreichen geringe Genauigkeit; zweidimensionale Positionsbestimmungen sind möglich. (auch [LES] und [MÜL]).
- **RFIDs:** Radio Frequency Identification Device (RFID) sind kleine, flache Aufkleber mit einer Induktionsspule und einem kleinen Sender. Sobald sich ein elektromagnetisches Feld in einer bestimmten Frequenz dem RFID nähert ( $< 50\text{cm}$ ), wird der Sender durch Induktion mit ausreichend Strom versorgt und sendet eine Identifikationsnummer und bei Bedarf weitere Informationen. RFID werden in der Produktion und Logistik zur Identifikation von Teilen und Komponenten benutzt. Soll die Reichweite über 50cm hinausgehen, so müssen die RFIDs mit einer Stromversorgung (z.B. Batterie) ausgestattet werden.

## 4.2 Trackingsysteme für die Anwendung dieser Arbeit

Die Anforderungen an das Trackingsystem sind bei Augmented Reality Anwendungen sehr hoch. Insbesondere benötigen AR-Anwendungen eine hohe Trackinggenauigkeit. Für die Echtzeit eines AR-Systems sind eine hohe Wiederholrate und eine möglichst geringe Latenz zwischen einer realen Bewegung und dem Zeitpunkt der dazu entsprechend zur Verfügung gestellten Trackinginformation des Trackingsystems erforderlich.

In Kapitel 4.1 wurde eine Übersicht über die derzeitigen Trackingsysteme gegeben. Aufgrund der geringen Genauigkeit sind elektromagnetische und inertielle Trackingsysteme nicht für die in dieser Arbeit beschriebenen AR-Anwendungen geeignet. Rein akustische Systeme sind kaum noch verbreitet und unterliegen im industriellen Umfeld starken Störgeräuschen. Lasertrackingsysteme erreichen zwar extrem hohe Genauigkeiten, sind jedoch sehr kostspielig und aufwendig in der Handhabung.

Für den Einsatz in AR-Anwendungen verbleiben noch mechanische und optische Trackingsysteme:

Mechanische Trackingsysteme spielen besonders für VR-Anwendungen eine wichtige Rolle, da mit Ihnen ein Force-Feedback realisiert werden kann. Wird der mechanische Trackingarm mit Kraftgebern versehen, können dem Anwender haptische Informationen zur Verfügung gestellt werden. Ein großes Anwendungsfeld für haptische Systeme stellen Montageuntersuchungen dar, bei denen der Anwender mögliche Kollisionen im Montageraum nicht nur sehen, sondern auch spüren kann. Das vom BMB+F gefördertes Leitprojekt iViP hat sich dieses Themas angenommen [IVP].

Mechanische Trackingsysteme bieten zwar in einem geeigneten Kostenrahmen gute Genauigkeiten, doch schränkt der Messarm des Systems die Ergonomie und Flexibilität der Anwendung stark ein. Zusätzlich können an einem mechanischen Trackingsystem nicht mehrere Objekte gleichzeitig getrackt werden, was die Realisierung von Interaktionen erschwert.

Folglich sind optische Trackingsysteme für die AR-Anwendungen in dieser Arbeit zu bevorzugen. Auch außerhalb dieser Arbeit kommen derzeit in AR-Systemen überwiegend optisch basierte Trackingsysteme zum Einsatz. Diese Systeme haben sich im AR-Bereich bewährt.

Im Rahmen der Realisierungen dieser Arbeit werden ein Inside-Out sowie ein Outside-In Tracking zum Einsatz kommen. Als Inside-Out Tracking wird das Vision Based Tracking (VBT) aus dem ARVIKA Leitprojekt [ARV] eingesetzt. Das kommerzielle Trackingsystem DTrack der Firma Advanced Realtime Tracking (A.R.T.) GmbH kommt als Outside-In System zum Einsatz [ART].

### 4.2.1 Das Vision Based Tracking System

Das Vision Based Tracking (VBT) des ARVIKA-Projekts wurde am Zentrum für Graphische Datenverarbeitung (ZGDV) in Darmstadt entwickelt [KOL, STD, STR, AV04]. Ähnliche Konzepte wie das ARToolKit [ATK] wurden zeitgleich auch in anderen Laboren in der U.S.A. entwickelt.

Bei diesem Tracking wird das Videobild, auf dem die Überlagerung erfolgt, ausgewertet und ist somit ideal für eine AR-Anwendung im video-see-through-Prinzip. Im Videobild wird nach speziellen quadratischen Marken (meist aus Papier) gesucht. Ein Marker besteht aus einem schwarzen Quadrat mit einer weißen Umrandung. Innerhalb des Quadrats befindet sich ein Muster zur Unterscheidung und zur Festlegung der Rotationsausrichtung des Markers. Links in der Abbildung 4.8 ist solch ein Marker dargestellt.

Anhand der Größe, der Position und der Verzerrung der Marken im Videobild, können die Position und die Orientierung der Videokamera relativ zu den Marken bestimmt werden. Die quadratische Form eines Markers erweist sich dabei als besonders günstig, da sich so aus nur einem Marker die komplette 3-dimensionale Position und Orientierung der Videokamera ermitteln lässt.

Mehrere Marker lassen sich anhand des inneren Aussehens unterscheiden und können auch unabhängig voneinander zur Bestimmung der Kameraposition und Orientierung herangezogen werden oder zum Tracken von Objekten relativ zur Kamera verwendet werden. Dabei werden die Marker z.B. in Form einer 4x4-Matrix aus weißen und schwarzen Unterquadranten codiert, um sie eindeutig zuordnen zu können. Stets muss beachtet werden, dass die Codierungen keine Symmetrien aufweisen und somit rotationsvariant sind, weil sonst keine eindeutige Zuordnung in der Orientierung erfolgen kann. In der rechten Hälfte von Abbildung 4.8 ist ein Verbund aus zwei unterschiedlich codierten Markern zu sehen.

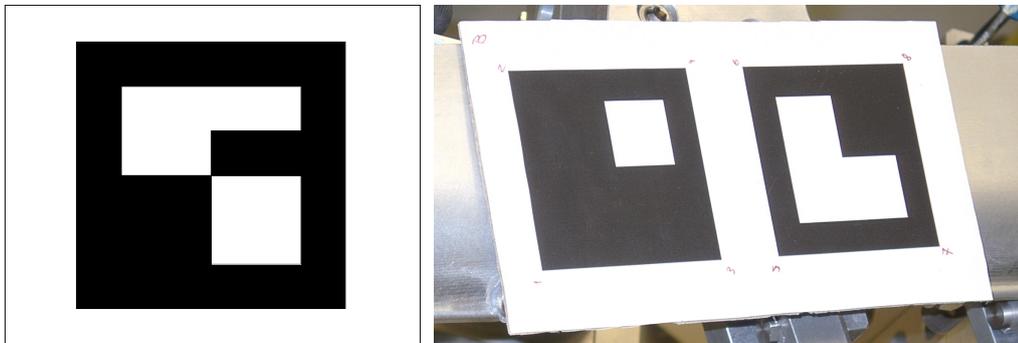


Abbildung 4.8: VBT-Marker einzeln [STR] und in einem Verbund

Ein wesentlicher Vorteil dieses Trackingsystems ist, dass die ermittelte Position der Videokamera direkt die Position und Orientierung des CCD-Chips der Videokamera ist, da das Videobild selbst der Ausgangspunkt für die Berechnung der Position ist. Bei einem AR-System mit video-see-through-Prinzip wird für eine möglichst formtreue Überlagerung genau diese Position und Orientierung des CCD-Chips der Videokamera benötigt. Die Informationen des Trackingsystems können so unmittelbar und ohne weitere Berechnungen zur Generierung einer Überlagerung übernommen werden. Da das Tracking an die Auswertung der Bildinformation der Videokamera gebunden ist, legt die Bildrate der Videokamera auch die mögliche Wiederholrate des Trackings fest. Mit 25-30 Hz ist jedoch die Trackinggeschwindigkeit für die Anwendungen in dieser Arbeit benötigte Echtzeit ausreichend.

Ein erheblicher Nachteil dieses Systems ist der Sachverhalt, dass immer mindestens ein Marker im Videobild sichtbar sein muss, um die Position der Videokamera zu bestimmen. Die Kamera ist somit in der Ansicht des Objekts eingeschränkt. Durch mehrere, unterschiedlich angeordneter Marken lässt sich zwar der Bereich möglicher Ansichten vergrößern, dann müssen jedoch die Marken untereinander in Bezug gesetzt bzw. registriert werden, was neue Problematiken aufwirft. Durch die Auflösung des Videobildes ist zusätzlich die Entfernung zum Objekt begrenzt, da der Marker im Rahmen der Pixelauflösung des Bildes identifiziert werden muss.

### 4.2.2 Das A.R.T.-System

Beim optischen Tracking der A.R.T. GmbH, werden mehrere Infrarot-Trackingkameras um die Szene verteilt, so dass jede Kamera das Messvolumen in ihrem Sichtfeld erfassen kann. Im Messvolumen werden entweder einzelne, retroreflektierende Kugeln für 3D-Positionen oder Rigid Bodies für 6 DOF getrackt. Diese bestehen aus einem festen Verbund mehrerer retroreflektierender Kugeln.

Dabei wird aus mindestens 3 Kugeln ein Koordinatensystem aufgespannt, das die Orientierung des Rigid Bodies festlegt. Abbildung 4.9 zeigt einen typischen Rigid Body aus 5 Kugeln. Die zwei zusätzlichen Kugeln dienen als Redundanz zur Erhöhung der Trackingstabilität, falls es zu Verdeckungen einzelner Kugeln kommt.

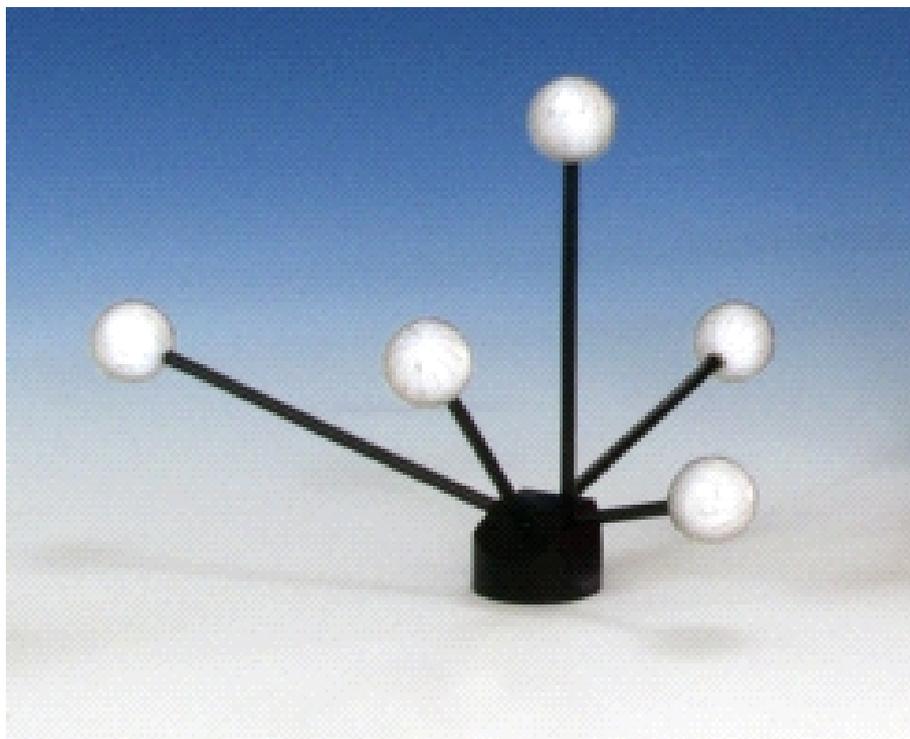


Abbildung 4.9: Rigid Body des A.R.T.-Systems mit 5 Kugeln [ART]

Die 3-dimensionale Position einer Kugel wird über Triangulierung berechnet. Durch die retroreflektierende Eigenschaft der Kugeln zeichnet sich nach der Aussendung des infraroten Blitzes jede Kugel als eine runde Scheibe im Bild der Trackingkamera ab. Der Mittelpunkt jeder Scheibe wird dem Gesamtsystem als 2-dimensionale Position einer Kugel aus Sicht dieser Kamera übermittelt.

Da der Bezug aller Trackingkameras zueinander bekannt ist, kann mittels Triangulation zu jeder Kugel eine 3-dimensionale Position im Raum bestimmt werden. Durch die feste Anordnung mehrerer Kugeln in Form eines Rigid Bodies kann zu jedem Rigid Body zusätzlich die Orientierung berechnet werden. Abbildung 4.10 verdeutlicht diesen Vorgang.

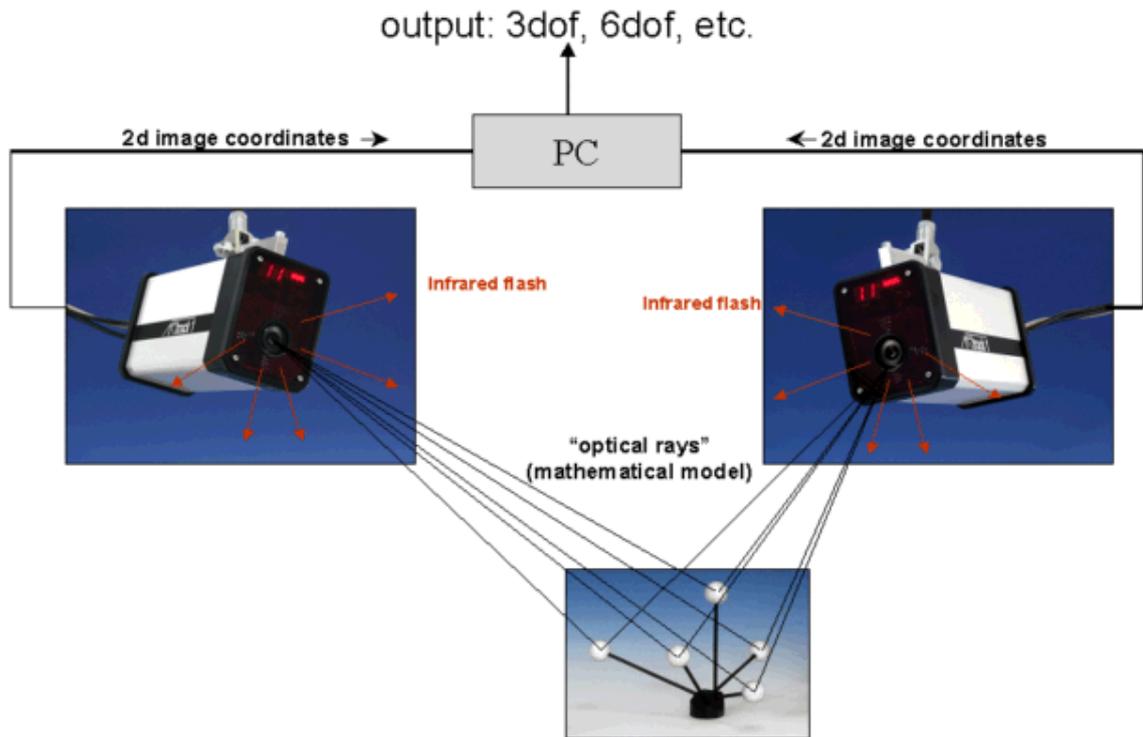


Abbildung 4.10: Funktionsweise des A.R.T.-Systems [ART]

Das System ist unabhängig von der Wiederholrate des AR-Systems bzw. der Videokamera, die zur Überlagerung die reale Umgebung erfasst. Vielmehr hat das System einen eigenen Takt, der in der Regel bei einer Rate von 60Hz liegt und für die Anforderungen der Anwendungen dieser Arbeit echtzeitfähig ist.

Wird nun ein Rigid Body an der Videokamera zur Erfassung der Umgebung des AR-Systems befestigt, so kann über den Rigid Body indirekt die Position und Orientierung der Videokamera an das AR-System übermittelt werden. Zusätzlich können weitere Rigid Bodies zum Tracking von Objekten und Interaktionsgeräten eingesetzt werden.

Ein Vorteil bei diesem Trackingsystem ist die hohe Genauigkeit im ganzen Messvolumen, das sich wie folgt erklären lässt: Die Positionsbestimmung einer Kugel erfolgt mittels Triangulierung von 2D-Positionen aus den Bildern der Trackingkameras. Dabei ist es nicht relevant, an welcher Stelle sich im Bild der Trackingkamera die kreisförmige Reflexion der Kugel befindet. Lediglich die Größe der Reflexion ist für die Genauigkeit der (im Bild der Trackingkamera) ermittelten 2D-Position entscheidend. Da nur in dem Messvolumen getrackt werden kann, das von Kameras überlappt wird, ist das nur in einer begrenzten Entfernung zwischen Kugel und Trackingkameras möglich. Für die maximale Entfernung kann so eine konstante Mindestgenauigkeit im Trackingvolumen angegeben werden. Ein weiterer Vorteil ist die beliebige Positionierung der Videokamera, die zur Überlagerung die reale Umgebung erfasst. Da diese Videokamera selbst nicht zum Tracken verwendet wird, muss sie keine speziellen Marken erfassen und kann alle erdenklichen Sichtrichtungen auf das zu überlagernde Objekt einnehmen.

Ein wesentlicher Nachteil dieses System ist der Umstand, dass vom Trackingsystem lediglich die Position und Orientierung des Rigid Bodies übermittelt werden, der an der Videokamera, die zur Überlagerung die reale Umgebung erfasst, befestigt ist. Für die Überlagerung wird jedoch die Position und Orientierung des CCD-Chips dieser Videokamera benötigt. Folglich ist hier noch die Berechnung eines speziellen Offsets bzw. Versatzes (der so genannte Kameraoffset) nötig, um eine möglichst formtreue Überlagerung zu realisieren.

### 4.2.3 Vergleich der Trackingsysteme

In den beiden vorangegangenen Abschnitten wurden bereits kurz Vor- und Nachteile jedes Systems angerissen. Die Unterschiede und Eigenschaften der beiden Systeme ergeben sich grundsätzlich aus dem Inside-Out und Outside-In-Ansatz der Systeme. Die AR-Anwendungen dieser Arbeit haben eine möglichst passgenaue Überlagerung eines realen Objekts mit seinem virtuellen Pendant in einem begrenzten Trackingvolumen von z.B. 3x3x2m zum Ziel. Dies impliziert eine hohe Trackinggenauigkeit in Position und Orientierung der Videokamera, die das Bild zur Überlagerung liefert.

#### 4.2.3.1 Vergleich der Rotationsgenauigkeit

Zur Veranschaulichung sei das folgende Experiment aus Abbildung 4.11 gegeben:

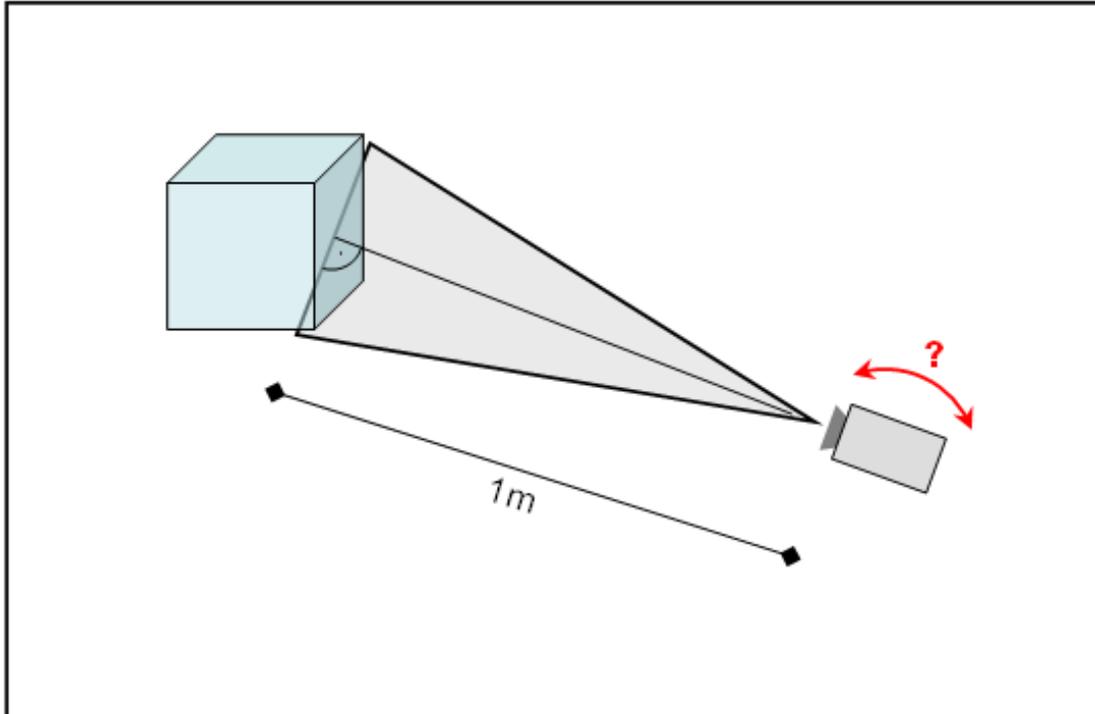


Abbildung 4.11: Experiment zur Berechnung der Rotationsgenauigkeit

Eine Videokamera betrachtet ein beliebiges Objekt aus einer Entfernung von 1m. Der Öffnungswinkel der Videokamera beträgt 30 Grad in der Horizontalen.

Es wird eine Videokamera im PAL-Format<sup>1</sup> mit einer Auflösung von 768x576 verwendet. Über den Tangens des halben Öffnungswinkels der Kamera (15 Grad) und die Entfernung lassen sich 55,59 cm als Breite des ganzen Bildausschnitts berechnen. Teilt man nun die Breite durch die horizontale Kameraauflösung von 768 Pixeln, so ergibt sich 0,698mm  $\sim$  0,7mm als Breite eines Pixels in der Mitte der Sichtachse der Kamera und in der Entfernung von 1m.

Da die formtreuen Überlagerungen möglichst passgenau sein sollten, müssten sie entsprechend auf einen Pixel genau erfolgen. Eine Abweichung von einem Pixel bedeutet bereits eine Qualitätseinbuße der hier angestrebten Überlagerung - auch wenn dies nicht unmittelbar vom Anwender erkannt wird.

Rechnet man die Breite eines Pixels von 0,7mm über den Tangens und die Entfernung von 1m zurück, so ergibt sich ein Toleranzwinkel von etwa 0,04 Grad. Das heißt, ab einem Fehler von 0,04 Grad in der horizontalen Rotation der Videokamera ist die Überlagerungsqualität bereits um 1 Pixel fehlerhaft. Eine extrem hohe Winkelauflösung des Trackingsystems ist dementsprechend erforderlich.

Das Inside-Out Tracking ist hier dem Outside-In Tracking überlegen. Bhatagner hat dazu in [BHA] Berechnungen zur Orientierungsgenauigkeit angestellt, die im Folgenden dem Leser genauer erörtert und anhand zusätzlicher Abbildungen veranschaulicht werden:

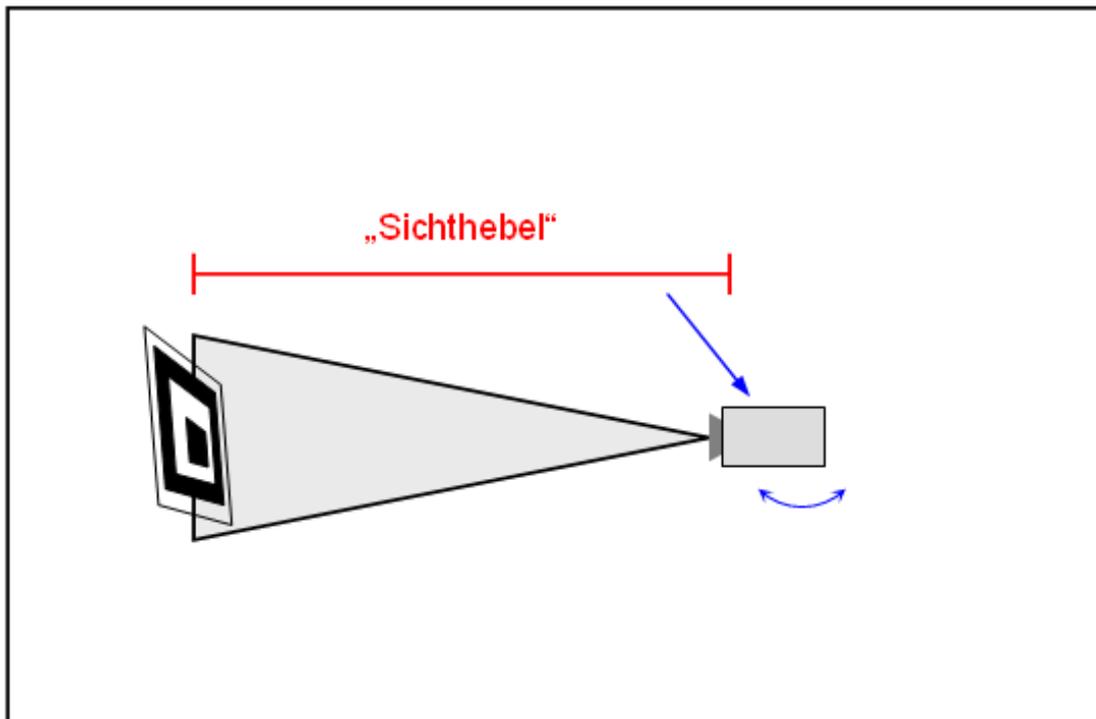


Abbildung 4.12: Rotationsgenauigkeit beim Inside-Out Tracking

<sup>1</sup>PAL (Phase Alternative Line) ist ein Verfahren zur Farbübertragung bei analogen Fernsehsignalen. In Europa wird es auch als Fernsehnorm verstanden.

Durch das Prinzip beim Inside-Out Tracking, die Marken nicht an der Kamera, sondern außerhalb in der Umgebung zu platzieren, ergibt sich salopp formuliert ein langer "Sichthebel" zwischen Kamera und Marker durch den die Orientierung genau fixiert wird. Abbildung 4.12 zeigt diese Hebelwirkung.

Diese Hebelwirkung ergibt sich in der horizontalen und vertikalen Achse der Videokamera. Die Rotationsgenauigkeit um die dritte Achse (entlang der Sichtachse) der Kamera ergibt sich durch die Pixelauflösung der Kamera und die Größe, die der Marker im Bild einnimmt.

Beim Outside-In Tracking befindet sich dagegen dieser "Sichthebel" zwischen den fest positionierten Trackingkameras und dem getrackten Rigid Body. Dies hat zur Folge, dass die Orientierungsgenauigkeit an der zu trackenden Videokamera allein durch die Größe des Markers (Rigid Body) und dessen Entfernung zu den Trackingkameras bestimmt wird. Über die Trackingkameras ergibt sich damit ein Hebel am Rigid Body. Je größer die Basis oder die Größe des Markers ist, umso genauer kann die Orientierung bestimmt werden. Analog zum vorherigen Abschnitt ist in der Abbildung 4.13 der Zusammenhang zu sehen.

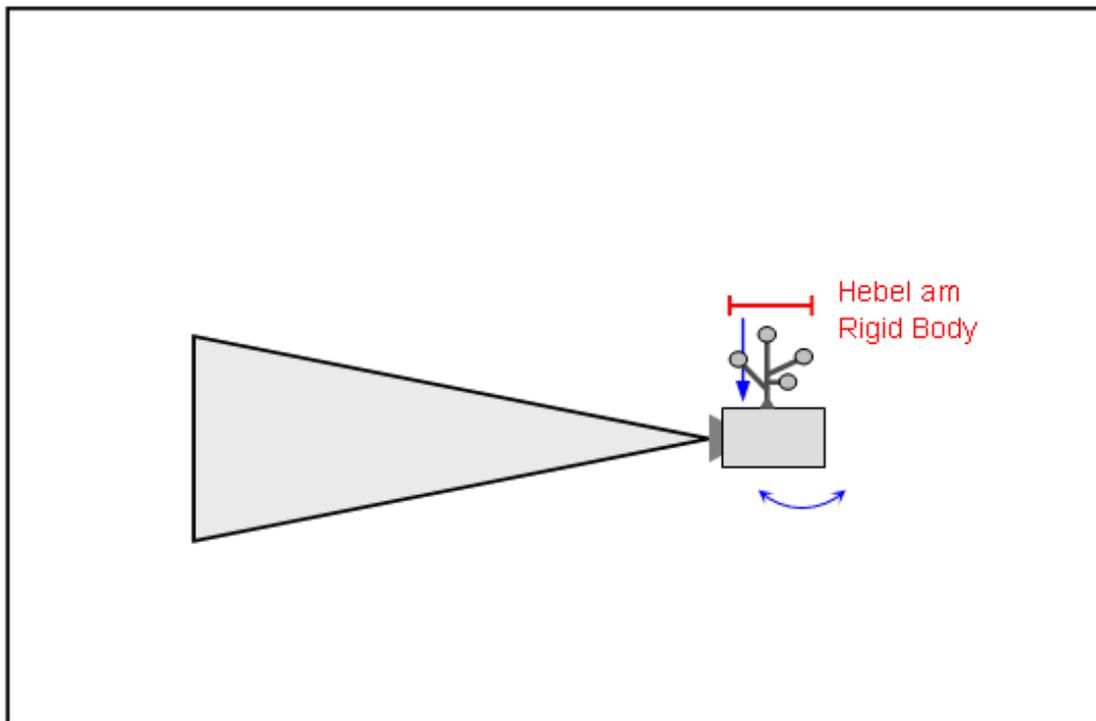


Abbildung 4.13: Rotationsgenauigkeit beim Outside-In Tracking

#### 4.2.3.2 Vergleich der Positionsgenauigkeit

Auf die Positionsgenauigkeit lassen sich die Überlegungen zur Genauigkeit der Orientierung nicht übertragen. Das Outside-In Tracking erreicht eine hohe Positionsgenauigkeit des Rigid Body. Zusätzlich ist diese Genauigkeit nahezu unabhängig von der Position des Rigid Body im Trackingvolumen (Erläuterungen Abschnitt 4.2.2).

Das Inside-Out Tracking ermittelt seine Position dagegen aus dem Marker im Videobild der Kamera. Je kleiner die Fläche ist, die der Marker im Videobild einnimmt, desto weniger Pixel bzw. Auflösung wird vom Marker beansprucht. Die Entfernung der Videokamera wird über die Größe des Markers ermittelt. Bedeckt der Marker nur noch wenige Pixel, ergibt sich eine große Entfernung zur Videokamera.

Befindet sich nun die Kante eines realen Markers nicht genau auf dem Rand eines Pixels sondern zwischen zwei Pixeln im Videobild der Kamera, so kann die exakte Größe des Markers nicht genau abgebildet werden. Es entsteht ein erheblicher Fehler in der Entfernungs- und Positionsschätzung der Videokamera zum Marker. Durch das natürliche Grundrauschen des Kamerasensors kann die Kante des Markers zwischen zwei Pixelkanten hin und her springen. Es ergibt sich in der Überlagerung durch die daraus resultierende, ständig wechselnde Größe des überlagerten Objekts, ein Art "pumpender" Effekt.

Analog gibt es neben der Tiefe auch Unsicherheiten in der horizontalen und vertikalen Position der Videokamera, die durch ähnliche Effekte entstehen. Mit der Entfernung zwischen Kamera und Marker werden die Effekte stärker. Da jedoch hier die Orientierung mit der Position anhand des im Abschnitt 4.2.3.1. beschriebenen Sichthebels miteinander korreliert ist, fallen diese Ungenauigkeiten in der Überlagerung kaum auf. Es ergibt sich quasi etwas Spiel in der Position, das durch eine minimale Änderung in der Orientierung ausgeglichen wird.

Durch die Technik der Rückprojektion ist es möglich, die Positionsungenauigkeiten des Inside-Out Trackings zu verbessern. Ausgehend von der ermittelten Position der Videokamera wird in das Videobild ein virtueller Marker an die berechnete Position des realen Markers gezeichnet. Anhand der ermittelten Abweichung zwischen realem und virtuellem Marker kann die Position der Videokamera korrigiert und optimiert werden. Die genaue Vorgehensweise erläutert Thomas Auer in seiner Dissertation [AUR]. Solche Rückprojektionen können auch mehrfach durchgeführt werden, was aus Gründen von Einbußen in der Performanz nicht zu empfehlen ist.

### 4.2.3.3 Sonstige Unterschiede

Wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, arbeitet das optische Inside-Out Tracking unmittelbar auf dem Bild der Videokamera. Dies hat zur Folge, dass die Trackinginformationen ohne zeitliche Abweichungen für die Generierung der Überlagerung im aktuellen Videobild verwendet werden können. Zu jedem Videobild steht die passende Trackinginformation zur Verfügung. Es ergibt sich so nur eine Gesamtlatenz, die sich aus der Bereitstellung des Videobildes und der Berechnung der Trackinginformation zusammensetzt.

Demgegenüber steht die starke Einschränkung durch die nötige Sichtbarkeit der Trackingmarken. Durch die Abbildung des realen Markers auf die Pixelstruktur der Videokamera sind unmittelbar Grenzen gesetzt. Die Berechnung der Position und Orientierung anhand des Markers im Videobild ist nicht aus allen Perspektiven möglich. Sehr flache Sichtwinkel und schlechte Lichtverhältnisse führen zum Fehlverhalten des Trackingsystems.

Aus Anwendersicht ist es nicht immer erwünscht oder sogar möglich die Marken an Objekten oder in der Umgebung anzubringen. Das Designempfinden könnte gestört und relevante Teile verdeckt werden.

Das Outside-In Tracking hingegen erlaubt dem Anwender viel Freiheit in der Gestaltung der Umgebung, sofern die Sichtbarkeit der Trackingkameras auf den Rigid Body an der Videokamera gegeben ist, die zur Überlagerung die reale Umgebung erfasst. Keinerlei Marken müssen am Objekt angebracht oder im Bild der Videokamera zu sehen sein. Dies ermöglicht auch eine nahezu beliebige Wahl der Blickrichtung und -position der Videokamera auf das Objekt. Solange sich der Rigid Body an der zu trackenden Videokamera im Trackingvolumen befindet, sind beliebige Positionen einschließlich größerer Entfernungen zum Überlagerungsobjekt möglich. Da dieses Trackingsystem im Gegensatz zum Inside-Out Tracking keinerlei Informationen von der Videokamera benötigt und mit dieser auch nicht gekoppelt ist, muss sichergestellt werden, dass die Trackinginformationen zum aktuellen Bild der Videokamera synchronisiert sind. Das Trackingsystem läuft als eigenes System unabhängig von der Überlagerung der Bildinformationen der Videokamera. Bei schnellen Bewegungen kann es wegen der fehlenden Synchronisation zu trackingbedingten Ungenauigkeiten in der Überlagerung kommen.

Der schwerwiegendste Nachteil bei der Verwendung eines Outside-In Trackings bei einer AR-Anwendung mit video-see-through-Prinzip ist der fehlende Bezug zwischen Trackingsensor und Bildebene der Videokamera. Eine möglichst passgenaue Überlagerung kann nur dann erreicht werden, wenn der Mittelpunkt der Bildebene der Videokamera, mit der die reale Szene betrachtet wird, bekannt ist. Dieser Punkt ist nach Nölle die Grundlage für die Berechnung einer perspektivisch korrekten Überlagerung [ALT].

Ausgehend von der Position und Orientierung des Koordinatenursprungs eines Rigid Body an der Videokamera muss von hier aus eine Transformation zum Mittelpunkt der Bildebene der Videokamera bestimmt werden. Die Güte dieser Transformation ist zusätzlich und maßgeblich entscheidend für die Gesamtqualität der Überlagerungsgenauigkeit. Die exakte Bestimmung dieser Transformation wird in Abschnitt 4.4 dieses Kapitels erläutert.

## 4.3 Objektregistrierung

Die im weiteren Verlauf dieses Kapitels verwendeten Bezeichnungen für Matrizen, Vektoren und Punkte beziehen sich auf die Definitionen im Anhang A am Ende dieser Arbeit. Ein großes  $\mathbf{T}$  bezeichnet dabei eine  $4 \times 4$ -Transformationsmatrix in der erweiterten oder homogenen Koordinatenschreibweise, die sich aus einer  $3 \times 3$ -Rotationsmatrix und einem  $1 \times 3$ -Translationsvektor zusammensetzt. Die in diesem Kapitel ermittelten Transformationen entsprechen dem Vorgehen gängiger Registrierungsprozesse bei AR-Systemen und sind in der Literatur unter dem Begriff "absolute Orientation" bekannt. Hierfür stellvertretend sei auf die Ausführungen von Chien-Ping Lu verwiesen [CHN]. Die Erörterung und Bestimmung der hier benötigten Transformationen sind dabei an Erläuterungen und Abbildungen von [WHI] und [TUC] angelehnt.

### 4.3.1 Hintergrund

Damit in einem AR-System ein virtuelles Objekt formtreu über sein reales Pendant überlagert werden kann, müssen im virtuellem Weltkoordinatensystem des AR-Systems die Position und Orientierung des virtuellen und realen Objektes bekannt sein. Das reale Objekt bezieht seine Position jedoch in seinem realen Weltkoordinatensystem, das sich vom virtuellen Weltkoordinatensystem unterscheiden kann. In der Regel ist das reale Weltkoordinatensystem durch das Trackingsystem gegeben. Neben der Position und Orientierung des realen Objektes im Trackingsystem muss noch der Bezug zwischen dem Koordinatensystem des Trackingsystems und dem virtuellen Weltkoordinatensystem hergestellt werden. Zur Veranschaulichung der folgenden Abbildung 4.14 sind die Koordinatensysteme und ihre Bezüge zueinander dargestellt.

Ein AR-System bezieht alle Angaben auf das virtuelle Weltkoordinatensystem  $V$  - dieses ist die Referenz des AR-Systems. Daher wird im AR-System die Transformation  $\mathbf{T}_{V-R}$  zum realen Objekt  $R$  benötigt, die in der Abbildung 4.14 durch den rot gestrichelten Pfeil dargestellt ist. Da die Transformation  $\mathbf{T}_{V-R}$  selbst nicht bekannt ist, muss sie über die Transformationen  $\mathbf{T}_{V-W}$  und  $\mathbf{T}_{W-R}$  berechnet werden. Der Zusammenhang ergibt sich in Abbildung 4.14 mit

$$\mathbf{T}_{V-R} = \mathbf{T}_{V-W} \cdot \mathbf{T}_{W-R} \quad (4.1)$$

$\mathbf{T}_{W-R}$  gibt dabei die Lage und Ausrichtung des realen Objekts im realen Weltkoordinatensystem  $W$  an, dessen Ursprung typischer Weise durch ein Trackingsystem festgelegt wird. Der Bezug zwischen virtuellem Weltkoordinatensystem  $V$  des AR-Systems und Trackingsystem wird durch die Transformation  $\mathbf{T}_{V-W}$  festgelegt (grüner Pfeil in Abbildung 4.14).

Die Bestimmung der Transformation  $\mathbf{T}_{V-R}$ , die die Position und Orientierung des realen Objekts  $R$  im virtuellen Koordinatensystem  $V$  angibt ist das **Ziel** der **Objektregistrierung**.

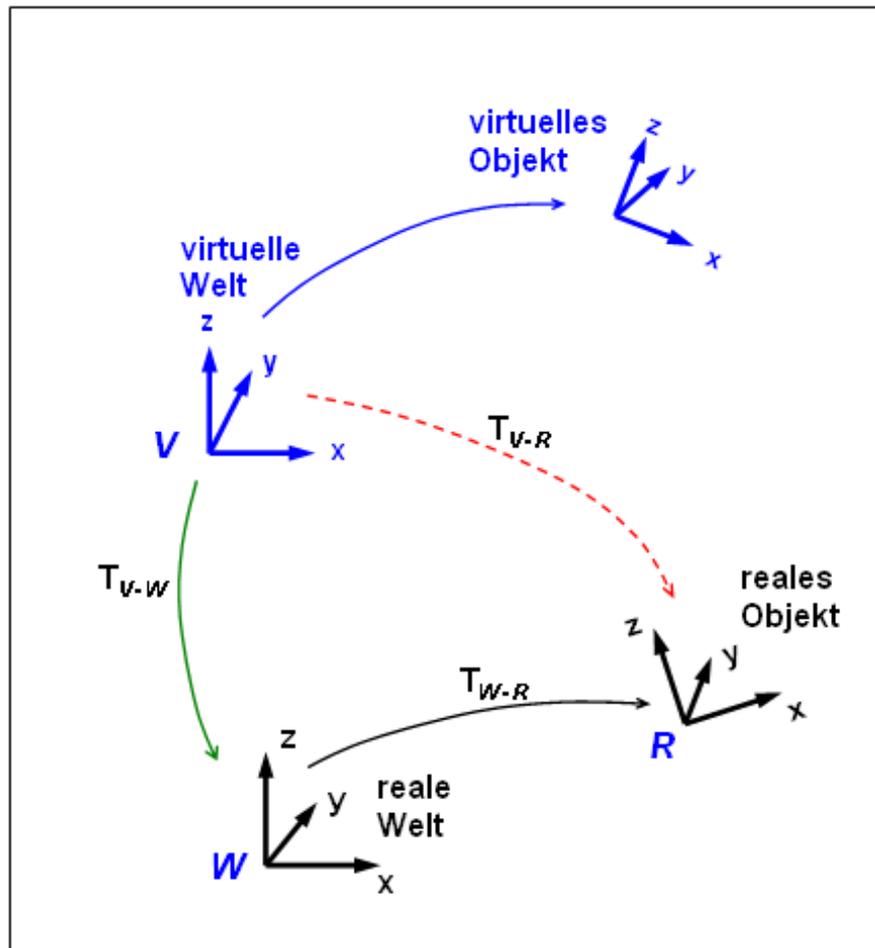


Abbildung 4.14: Schaubild der Koordinatensysteme

### 4.3.2 Objektregistrierung für das Vision Based Tracking

Im Abschnitt 4.2.1 dieses Kapitels wurde das Prinzip des VBT erläutert: Die Position und Orientierung der Videokamera erfolgt in Relation zu einem erkannten Marker. Der Marker definiert somit das Weltkoordinatensystem. Die Trackinginformationen des Systems beschreiben die Lage der Videokamera im Koordinatensystem, das vom Marker aufgespannt wird. Soll nun mit dem VBT eine möglichst formtreue Überblendung zwischen einem realen Objekt und seinem virtuellen Pendant realisiert werden, muss zuerst der Marker fest am Objekt angebracht werden, um während der Anwendung einen festen Bezug zum realen Objekt zu erhalten.

Da das virtuelle Objekt in dem Objektkoordinatensystem oder Fahrzeugkoordinatensystem vorliegt, muss nun die Transformation zwischen dem Koordinatensystem des Markers und dem Koordinatensystem des realen Objekts bestimmt werden. In Abbildung 4.15 ist diese Situation veranschaulicht. Das reale Objekt mit seinem Koordinatensystem wird in der oberen Hälfte der Abbildung in Form eines türkisfarbenen Quaders dargestellt. Am Objekt ist ein Marker mit seinem Markerkoordinatensystem angebracht. Objekt und Marker werden von einer Videokamera erfasst.

Ihr Koordinatensystem liegt in der Videobildebene. Unten rechts in Abbildung 4.15 ist das Weltkoordinatensystem des AR-Systems zu sehen.

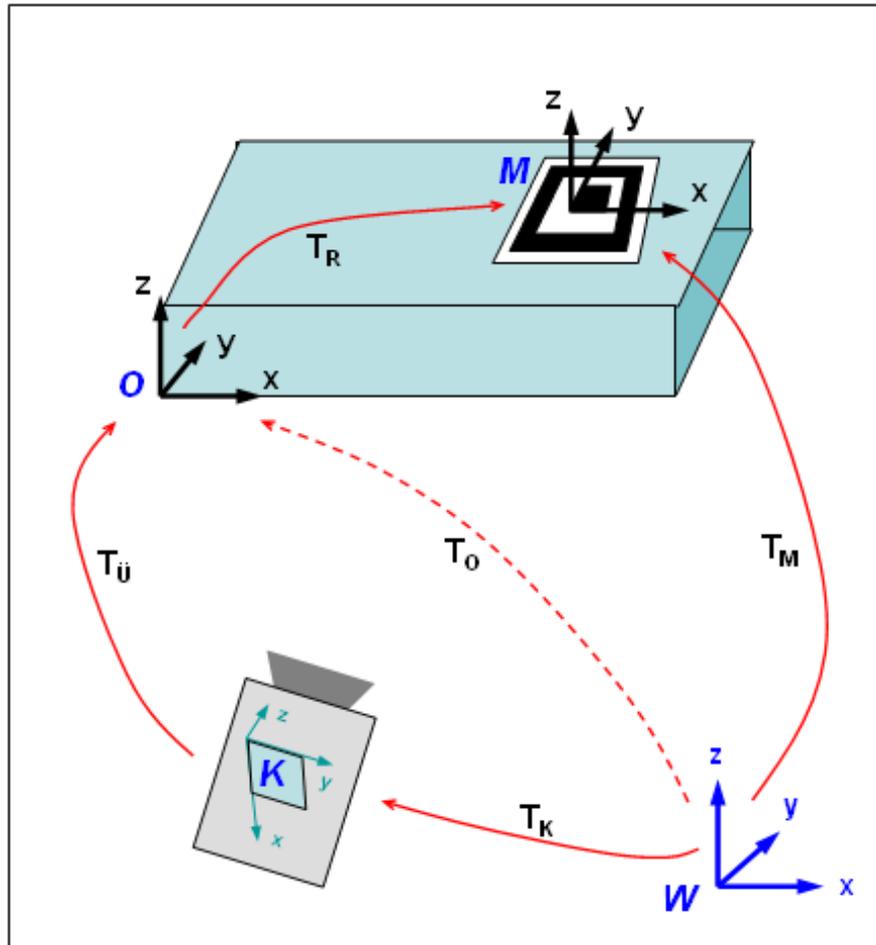


Abbildung 4.15: Schaubild Raumkalibrierung für VBT

$W$  sei die Referenz bzw. das (virtuelle) Weltkoordinatensystem des AR-Systems.

$M$  stellt das Markerkoordinatensystem dar (Ursprung des Trackings).

$O$  steht für das Koordinatensystem des Objekts.

$K$  sei das Koordinatensystem der Kamerabildebene.

$T_{\ddot{U}}$  sei die gesuchte Transformationsmatrix für die Transform, die zur Darstellung der Überlagerung benötigt wird.

$T_K$  sei die Transformationsmatrix für die Position und Orientierung der Kamerabildebene  $K$ , die im Weltkoordinatensystem  $W$  angegeben wird.

$T_R$  steht für die Transformationsmatrix, um von Objektkoordinaten ( $O$ ) zu Markerkoordinaten ( $M$ ) zu gelangen.

$T_M$  steht für die Transformationsmatrix zwischen Weltkoordinatensystem  $W$  und Markerkoordinatensystem  $M$ .

$T_O$  ist die Transformationsmatrix zur Beschreibung der Position und Orientierung des Objekts  $O$  im virtuellen Weltkoordinatensystem  $W$ .

Die Transformation  $\mathbf{T}_{\ddot{U}}$  muss zur korrekten Darstellung der Überlagerung im System berechnet werden. Überträgt man die Situation aus Abbildung 4.15 auf die allgemeine Beschreibung in Abbildung 4.14, so entspricht das Markerkoordinatensystem  $M$  als Ursprung des Trackingsystems dem realen Weltkoordinatensystem  $W$  aus Abbildung 4.14. Das reale Objekt  $R$  aus Abbildung 4.14 wird hier (in Abbildung 4.15) durch das Objekt  $O$  dargestellt. Die zu berechnende Transformation  $\mathbf{T}_{V-R}$  aus Gleichung 4.1 wird durch die (in der Abbildung 4.15 gestrichelte) Transformation  $\mathbf{T}_O$  repräsentiert.

Demnach entspricht die Transformation  $\mathbf{T}_M$  der Transformation  $\mathbf{T}_{V-W}$  und die Transformation  $\mathbf{T}_R^{-1}$  der Transformation  $\mathbf{T}_{W-R}$ . ( $\mathbf{T}_R^{-1}$  muss hier im Gegensatz zu  $\mathbf{T}_{W-R}$  als inverse Matrix verwendet werden, weil nicht das Objekt in Markerkoordinaten, sondern der Marker in Objektkoordinaten beschrieben ist). In Gleichung 4.1 eingesetzt ergibt sich

$$\mathbf{T}_O = \mathbf{T}_M \cdot \mathbf{T}_R^{-1} \quad (4.2)$$

Zur Berechnung von  $\mathbf{T}_O$  gilt es, die Transformationen  $\mathbf{T}_M$  und  $\mathbf{T}_R$  zu bestimmen.

Transformation  $\mathbf{T}_M$  wird im Rahmen einer Markerdefinition festgelegt, die auch Codierung und Abmaße des Markers beinhaltet. Mit der Transformation  $\mathbf{T}_R$  gelangt man vom Objekt- zum Markerkoordinatensystem. Beide Transformationen gilt es, folgend bei der Objektregistrierung zu bestimmen.

Die zur Überlagerung gesuchte Transformation  $\mathbf{T}_{\ddot{U}}$  ergibt sich nach Abbildung 4.15 mit:

$$\mathbf{T}_{\ddot{U}} = \mathbf{T}_K^{-1} \cdot \mathbf{T}_M \cdot \mathbf{T}_R^{-1} \quad (4.3)$$

Eine möglichst genaue Methode, um  $\mathbf{T}_R$  zu bestimmen, besteht darin, den Marker  $M$  im Koordinatensystem des realen Objekts  $O$  zu vermessen.

Hierzu werden herkömmliche Geräte zur Koordinatenvermessung, die vor Ort zur Verfügung stehen, verwendet (etwa ein taktiles Messarm der Fima Faro [FAO]). Idealerweise werden so die Eckpunkte des quadratischen Markers vermessen. Abbildung 4.16 zeigt als reales Objekt einen Kotflügel, an dem zwei Marker fest angebracht wurden. Die Punkte zum Einmessen wurden dabei rötlich beschriftet.

Liegen nach der Vermessung die Eckpunkte des Markers im Koordinatensystem  $O$  des realen Objekts oder Fahrzeugs vor, kann daraus die Transformation  $\mathbf{T}_R$  berechnet werden.  $\mathbf{T}_R$  beschreibt damit die Position und Orientierung des Markers ( $M$ ) im Objektkoordinatensystem ( $O$ ). Es ergeben sich nun prinzipiell zwei Varianten, um die Transformationen  $\mathbf{T}_R$  sowie  $\mathbf{T}_M$  in das AR-System einzubringen und den richtigen Bezug für eine Überlagerung herzustellen.

1. Im AR-System werden die Abmaße und Koordinaten des Markers in den zuvor gemessenen Koordinaten des Objektkoordinatensystems  $R$  angegeben. Damit werden die Trackinginformationen vom VBT-System im AR-System, die durch den Marker festgelegt werden, in das Koordinatensystem des Objekts transformiert, und die Trackingwerte für die Videokamera sind somit bereits Werte in Objektkoordinaten ( $O$ ). Die richtige Registrierung ist damit erfolgt.

- Die virtuelle Repräsentation des Objekts im AR-System wird anhand der in realen Objektkoordinaten ( $O$ ) bekannten Markerposition in das Koordinatensystem  $M$  des Markers transformiert. Im AR-System stellt somit der Marker den Ursprung des Weltkoordinatensystems  $W$  dar, und das virtuelle Objekt wird zu diesem Ursprung entsprechend positioniert. Folglich hat im AR-System das virtuelle Objekt sein ursprüngliches Objektkoordinatensystem bzw. seinen Bezug zum Fahrzeugkoordinatensystem verloren. Es bezieht nunmehr seine Referenz durch das Koordinatensystem des Markers, der am realen Objekt befestigt wurde. Die korrekte Registrierung ist auch hier erreicht, da virtuelles und reales Objekt für das AR-System richtig positioniert und orientiert sind.

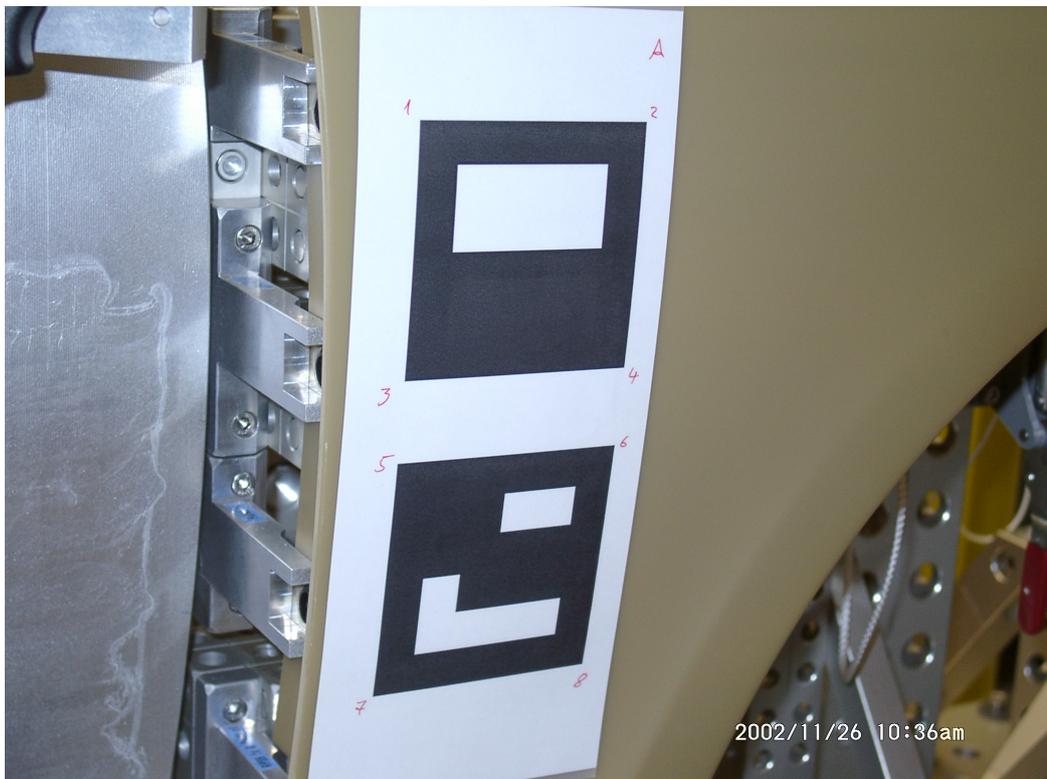


Abbildung 4.16: Vermessungspunkte an einem Kotflügel

#### Variante 1:

Grundsätzlich ist die erste Variante zu bevorzugen, da hier das virtuelle Objekt mit seinem Koordinatensystem nicht transformiert wird. Alle Daten, die zu diesem Objekt gehören, werden nicht verändert - alle nötigen Einstellungen werden nur im AR-System vorgenommen. Da bei dieser Methode durch die Angabe von Objektkoordinaten für die Definition des Markers die Transformation  $\mathbf{T}_R$  zur Identität wird, ist bereits der richtige Bezug hergestellt, und die Transformation  $\mathbf{T}_R$  kann als Einheitsmatrix  $\mathbf{E}$  entfallen.

Nach der Gleichung 4.3 ergibt sich:  $\mathbf{T}_{\ddot{U}} = \mathbf{T}_K^{-1} \cdot \mathbf{T}_M \cdot \mathbf{E}^{-1} = \mathbf{T}_K^{-1} \cdot \mathbf{T}_M$

Da  $\mathbf{T}_M$  die Markerposition in Objektkoordinaten angibt, können die dort gemessenen Positionen am Marker unmittelbar in der Markerdefinition angegeben werden.  $\mathbf{T}_M$  ist damit im AR-System bestimmt, und zur Berechnung der Überlagerung  $\mathbf{T}_{\dot{U}}$  verbleibt aus Abbildung 4.15 der Zusammenhang  $\mathbf{T}_{\dot{U}} = \mathbf{T}_K^{-1}$ , der keine weiteren Berechnungsschritte benötigt.

#### Variante 2:

Stricker beschreibt im Kapitel 5.3.4 seiner Dissertation [STR], dass bei den Berechnungen des VBT zur Vereinfachung die dritte Koordinatenkomponente als Null angenommen wird. Die Angabe der Abmaße des Markers, der das Weltkoordinatensystem der AR-Anwendung definiert, wird stets in der XY-Ebene erwartet. Folglich ist eine beliebige Angabe der Markerposition und Orientierung nicht möglich, und die Vorgehensweise der ersten Variante kann nicht umgesetzt werden. Wird nun der Marker in seiner Definition so angegeben, dass er im Ursprung des virtuellen Weltkoordinatensystems liegt und entlang der "Weltachsen" orientiert ist, wird die Transformation  $\mathbf{T}_M$  nicht mehr benötigt und kann als Identität entfallen. Dies bedeutet im Vergleich zur ersten Variante, dass hier umgekehrt zur Variante 1 das virtuelle Objekt im Koordinatensystem des Markers dargestellt und mittels  $\mathbf{T}_R$  transformiert werden muss. Für die zur Überlagerung gesuchte Transformation  $\mathbf{T}_{\dot{U}}$  ergibt sich mit Gleichung 4.3:

$$\mathbf{T}_{\dot{U}} = \mathbf{T}_K^{-1} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{T}_R^{-1} = \mathbf{T}_K^{-1} \cdot \mathbf{T}_R^{-1}$$

Alle Koordinatenwerte der Geometriebeschreibung des virtuellen Objekts werden entsprechend mit  $\mathbf{T}_R^{-1}$  multipliziert, um den richtigen Bezug des virtuellen Objekts bei der Verwendung im AR-System herzustellen. Aus den gemessenen Markerkoordinaten ins Objektkoordinatensystem kann die inverse Matrix  $\mathbf{T}_R^{-1}$  wie folgt berechnet werden:

Die  $4 \times 4$ -Transformationsmatrix  $\mathbf{T}_R^{-1}$  in homogenen Koordinaten setzt sich aus einer  $3 \times 3$ -Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  und einem 3-dimensionalen Translationsvektor  $\vec{t}$  zusammen. Da der Marker im Koordinatensystem des Objekts vermessen wurde, kann von einem beliebigen Punkt  $P_M$  im Markerkoordinatensystem wie folgt auf einen Punkt  $P_O$  im Objektkoordinatensystem geschlossen werden:

$$P_O = P_M \cdot \mathbf{R} + \vec{t}$$

Wird der Translationsvektor  $\vec{t}$  auf beiden Seiten subtrahiert und beidseitig von rechts mit  $\mathbf{R}^{-1}$  multipliziert, lässt sich die Gleichung umformen zu:

$$(P_O - \vec{t}) \cdot \mathbf{R}^{-1} = P_M \quad (4.4)$$

Liegen beispielsweise vom oberen Marker in der Abbildung 4.16 die Koordinaten der Punkte  $P_1$  bis  $P_4$  im Objektkoordinatensystem vor, so ergibt sich  $\vec{t}$  als arithmetisches Mittel der vier Punkte mit  $\vec{t} = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 P_n^T$ . Die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}^{-1}$  wird mit  $\mathbf{R}^{-1} = (\vec{r}_x \vec{r}_y \vec{r}_z)$  aus den drei Einheitsvektoren  $\vec{r}_x$  bis  $\vec{r}_z$  zusammengesetzt.

Einheitsvektor  $\vec{r}_x$ , der in diesem Zusammenhang die X-Richtung des Objektkoordinatensystems mittels Markerkoordinaten darstellt, ergibt sich als die normierte

Differenz zwischen  $P_3$  und  $P_1$ :  $\vec{r}_x = \frac{P_3^T - P_1^T}{|P_3^T - P_1^T|}$ . Analog ergibt sich  $\vec{r}_y = \frac{P_2^T - P_1^T}{|P_2^T - P_1^T|} \cdot \vec{r}_z$  wird abschließend anhand des Vektorprodukts mit  $\vec{r}_z = \vec{r}_x \times \vec{r}_y$  berechnet, und die Matrix  $\mathbf{R}^{-1}$  ist bestimmt.

Der Translationsvektor  $\vec{t}$  und die Matrix  $\mathbf{R}^{-1}$  können am Anfang der Geometriedatei mit der entsprechenden Befehlsstruktur des Geometrieformats als Translations- und Rotationsknoten eingebunden werden. Es gilt, die richtige Reihenfolge aus Gleichung 4.4 einzuhalten (Also erst die Translation, dann die Rotation). Das virtuelle Objekt ist damit im AR-System mit dem realen Objekt richtig registriert, die Überlagerung kann erfolgen.

**Zusammenfassung:** Ausgehend von der Gleichung 4.2 wurde in den Berechnungen der beiden Varianten jeweils eine der Transformationen  $\mathbf{T}_M$  oder  $\mathbf{T}_R^{-1}$  durch die Identität ersetzt. Dies konnte durch einen unterschiedlichen Aufbau der AR-Anwendung erreicht werden. Die verbleibende Transformation konnte mittels der Vermessung des Markers im Objektkoordinatensystem bestimmt werden und damit die Objektregistrierung durchgeführt werden.

### 4.3.3 Objektregistrierung beim A.R.T.-System

Generell sind die Positionen von virtuellen Objekten dem AR-System bekannt bzw. können im System exakt vorgegeben werden. Die Position eines realen und ungetrackten Objekts bezüglich des Ursprungs des Trackingsystems ist a priori unbekannt, da in der Regel das reale Objekt beliebig im Messvolumen des Trackingsystems positioniert und orientiert wurde. Abbildung 4.17 veranschaulicht diese Situation.

Die in Abbildung 4.17 gesuchte Transformation entspricht der Position und Orientierung des Objekts  $O$  im Trackingkoordinatensystem  $W$ . Analog zu Abschnitt 4.3.2 ergeben sich auch hier unterschiedliche Möglichkeiten, die Transformation zu bestimmen:

Ein Vorgehen, das ohne weitere Berechnungen auskommt, besteht darin, den Ursprung des Trackingkoordinatensystems  $W$  exakt im Ursprung des Objekts  $O$  zu platzieren - einschließlich derselben Ausrichtung der Koordinatenachsen. Hierbei wird sogar die Bestimmung der benötigten Transformation umgangen.

Dieses Vorgehen ist jedoch in der überwiegenden Anzahl der Fälle nicht möglich. Am Beispiel des A.R.T.-Systems wird mit einem Kalibriervorgang das Trackingkoordinatensystem  $W$  mit einem stabilen Metallwinkel in Form eines "L"s definiert. Der Winkel ist in Abbildung 4.17 unten links zu sehen. Dieser Winkel müsste direkt im Ursprung des realen Objekts platziert werden.

Da in der Regel bei der Konstruktion der Ursprung im Innern eines Objekts liegt, lässt sich der Winkel dort nicht positionieren. In der Automobilindustrie ist der Ursprung sogar ein imaginärer Ursprung und liegt in der Mitte der Vorderachse und wird am realen Fahrzeug von Getriebekomponenten umgeben.

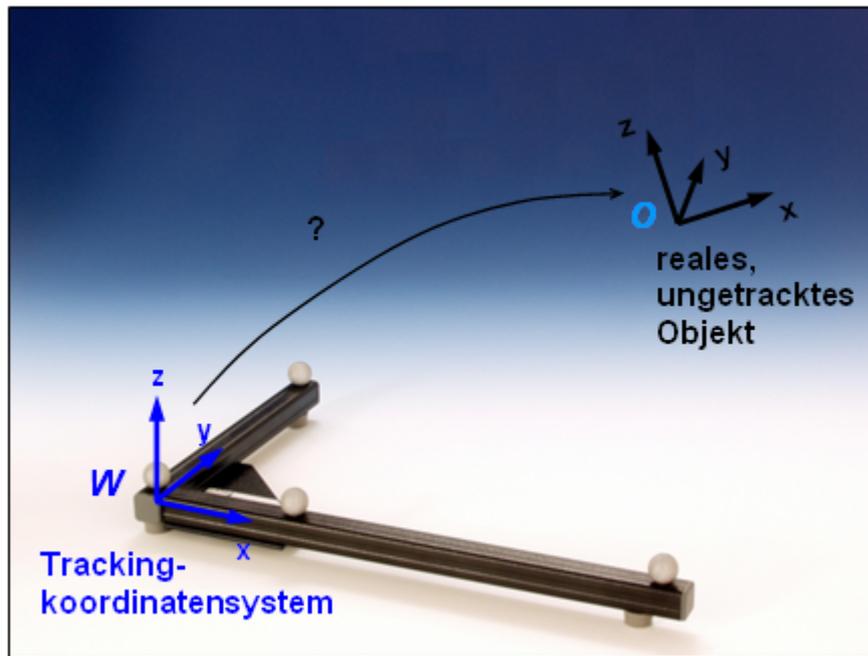


Abbildung 4.17: Reale und ungetrackte Objektposition

Daraus folgt, dass es nötig ist, die Position und Orientierung des realen Objekts  $O$  im Trackingkoordinatensystem  $W$  exakt zu bestimmen (Die unbekannt Transformation in Abbildung 4.17). Diese Bestimmung ist jedoch aufwendig, falls herkömmliche, reale Messmethoden eingesetzt werden, z.B. das Bemaßen durch Maßbänder. Selbst wenn die Position des Objekts im Trackingsystem vermessen wurde, wird weiterhin die Ausrichtung des Objekts zu den Koordinatenachsen des Trackingsystems benötigt. Eine praktikable und schnelle Lösung zur Bestimmung der Position und Orientierung des realen Objekts zum Trackingursprung ist die Verwendung des A.R.T.-Systems selbst.

Dazu werden mittels eines Konstruktionsprogramms am Objekt mindestens vier Positionen (Punkte), die sich auf exakte Lage im Fahrzeugkoordinatensystem beziehen, ausgewählt und deren Koordinatenwerte bestimmt. Die gleichen Positionen werden anhand eines geeigneten Trackingsensors (z.B. dem Messstift aus Abschnitt 6.1.2) am **realen Objekt** bezüglich des Ursprungs des Trackingsystems durch die getrackte Position des Sensors bestimmt.

Damit wurden zwei korrespondierende Punktwolken im Objekt- und Trackingkoordinatensystem festgelegt. Aus den Punktwolken lässt sich durch Lösen eines Gleichungssystems eine Koordinatentransformation berechnen, die jeweils einem Punkt des Trackingkoordinatensystems einen korrespondierenden Punkt im Objektkoordinatensystem zuordnet (siehe auch [CHN]).

Wird diese Transformation stets auf der vom Trackingssystem ermittelten Position und Orientierung der realen Kamera angewendet, so ergibt sich für das AR-System die Situation, dass die Trackingwerte in Objekt- bzw. Fahrzeugkoordinaten vorliegen. Damit wird auch die Kamera im Objektkoordinatensystem getrackt.

Da nun das reale und das virtuelle Objekt die gleiche Position und Orientierung im virtuellen Weltkoordinatensystem des AR-Systems aufweisen, kann die formtreue Überlagerung beider Objekte dargestellt werden. Die benötigte Registrierung ist erfolgt, und der Vorgang der Objektregistrierung ist abgeschlossen.

Folgend werden als Unterkapitel drei verschiedene Arten der Objektregistrierung für das A.R.T.-System vorgestellt.

#### 4.3.3.1 Die Objektregistrierung für CAD-Daten

Im Prototypenbau werden reale Fahrzeugkomponenten und Bauteile nach ihren Konstruktionsvorlagen (CAD-Master) gefertigt. Um alle Bauteile in einem Fahrzeug exakt zu referenzieren und in ihrer Konstruktionslage zu positionieren, wurde im Fahrzeugbau das so genannte "Reference Positioning System" (RPS) eingeführt. Dabei werden an jedem Bauteil RPS-Punkte festgelegt, mit denen das Bauteil im Fahrzeug eindeutig positioniert werden kann. Diese RPS-Punkte beinhalten in ihrer Definition eine Null-Toleranz, da sie zur exakten Positionierung der Bauteile im Fahrzeug dienen.

Mehrere RPS Punkte an einem Bauteil müssen in ihrer Position untereinander im Rahmen strenger Toleranzen eingehalten werden. Sonstige Punkte am Bauteil können durch den Fertigungsprozess größeren Toleranzen unterliegen, müssen jedoch der Vorgabe der Konstruktion entsprechen (z.B. bei Gussteilen).

Es ist somit anzunehmen, dass bei der Zuordnung von RPS-Punkten am virtuellen und am realen Objekt die geringsten Abweichungen zu erwarten sind und über diese Punkte die aus Abschnitt 4.3.3 benötigte Transformation exakt bestimmt werden kann.

Unglücklicherweise lassen sich am realen Prototyp oft die RPS-Punkte an Bauteilen nicht mit dem Messstift des A.R.T.-Systems anwählen. Entweder sind RPS-Punkte als Mittelpunkte von Bohrungen definiert, in denen bereits Schrauben oder Bolzen sitzen, oder die Art eines RPS-Punktes (wie Zylinder oder Langloch) kann nicht mittels eines einzelnen Punktes vom getrackten Messstift bestimmt werden. Um dennoch eine möglichst exakte Transformation berechnen zu können, wählt ein fachkundiger Anwender (etwa ein Entwicklungsingenieur) markante Punkte (Ecken, Kantenverbindungen, etc.), die entweder in der Nähe von RPS-Punkten liegen oder die sich nach Kenntnis des Anwenders noch in einem engen Toleranzbereich zur Konstruktionsvorgabe befinden.

Zusätzlich wird die Anzahl der korrespondierenden Punkte erhöht, um in der Ausgleichsrechnung den Einfluss möglicher Abweichungen einzelner Punkte zu begrenzen. Diese Punkte werden nachstehend auch **Passpunkte** genannt. Die Passpunkte müssen nicht nur mit dem Messstift des A.R.T.-Systems antastbar sein, sondern müssen auch im Konstruktionsprogramm des virtuellen Bauteils genau zu bestimmen sein.

Die benötigte Transformation in Form einer  $4 \times 4$ -Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$ , die das Trackingkoordinatensystem in das Bauteilkoordinatensystem transformiert, lässt sich nun wie folgt aufstellen:

$P_x$  sei ein beliebiger Punkt am realen Bauteil,  $Q_x$  sei der dazu korrespondierende Punkt am virtuellen Bauteil, der a priori bekannt ist bzw. vorgegeben wird. Die Transformation von  $Q_x$  nach  $P_x$  ist gegeben durch die Gleichung:

$$P_x = Q_x \cdot \mathbf{T} \quad (4.5)$$

Da mindestens 4 Punkte zur Bestimmung von  $\mathbf{T}$  benötigt werden, lässt sich mit  $n$  Punkten für  $n \geq 4$  die Punkte  $P_i$  mit  $i = 1, \dots, n$  eine  $n \times 4$ -Matrix  $\mathbf{P}$  aufstellen, deren Zeilen aus den Punkten  $P_i$  für  $i = 1, \dots, n$  bestehen. Die  $n \times 4$ -Matrix  $\mathbf{Q}$  wird analog aus den Punkten  $Q_i$  für  $i = 1, \dots, n$  gebildet. Basierend auf Gleichung 4.5 ergibt sich die folgende Gleichung 4.6, die die komplette Punktwolke transformiert.

$$\mathbf{P}^{n \times 4} = \mathbf{Q}^{n \times 4} \cdot \mathbf{T}^{4 \times 4} \quad (4.6)$$

$\mathbf{Q}$  ist a priori bekannt,  $\mathbf{P}$  wird mittels Messungen des A.R.T.-Systems bestimmt, und die benötigte Transformation  $\mathbf{T}$  gilt es zu berechnen. Um nach  $\mathbf{T}$  aufzulösen wird, von links mit der zu  $\mathbf{Q}$  inversen Matrix multipliziert:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{P} &= \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{T} \\ \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{P} &= \mathbf{E} \cdot \mathbf{T} \\ \mathbf{T} &= \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{P} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Um  $\mathbf{T}$  zu berechnen, muss folglich  $\mathbf{Q}$  invertiert werden. Für  $n = 4$  ist  $\mathbf{Q}$  quadratisch, und die Inverse  $\mathbf{Q}^{-1}$  ist definiert. Für  $n > 4$  kann für  $\mathbf{Q}$  eine so genannte Pseudoinverse  $\mathbf{Q}^+$  der Dimension  $4 \times n$  gebildet werden.

Mit Hilfe einer Singulärwertzerlegung (SWZ)  $\mathbf{Q}^+ = \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}^+ \cdot \mathbf{U}^T$  kann die Pseudoinverse  $\mathbf{Q}^+$  numerisch berechnet werden (siehe auch Abschnitt A.3 des Anhangs A). Da durch einer Anzahl von  $n > 4$  Punkten die Lösung überbestimmt sein kann, wird mit der SWZ (durch die Eigenschaft einer Ausgleichsrechnung) eine bestmögliche Näherung von  $\mathbf{Q}^+$  bestimmt.

Wird die so berechnete Matrix  $\mathbf{Q}^+$  in die Gleichung 4.7 eingesetzt, kann zusammen mit der Matrix  $\mathbf{P}$  aus den real gemessenen Passpunkten die gesuchte Transformation  $\mathbf{T}$  bestimmt werden. Die Objektregistrierung ist somit erfolgt und damit der richtige Bezug zwischen realen und virtuellen Objekten gegeben.

#### Einschätzung des Registrierungsergebnisses

Wünschenswert ist neben der Berechnung eine Aussage über die Güte der berechneten Transformation. Durch die vielen Freiheitsgrade (Translation, Rotation, Skalierung, Streckung, etc.), die bei einer beliebigen Transformation auftreten können, ist die Bewertung einer Transformationsgüte nicht unmittelbar möglich. Über eine Matrixnorm kann ein erster Anhaltspunkt gegeben werden, der mittels einer Rücktransformation der Passpunkte erfolgt, die zur Berechnung der Transformation benutzt wurden. Dazu sei  $\mathbf{T}^*$  die aus Gleichung 4.7 berechnete Transformationsmatrix mit absoluten Werten. Mit Gleichung 4.6 wird die Punktwolke aus  $\mathbf{Q}$  mittels  $\mathbf{T}^*$  zu der Punktwolke  $\mathbf{P}^*$  transformiert.

Die Differenzpunktwolke  $\mathbf{D}$  zwischen der transformierten Punktwolke  $\mathbf{P}^*$  und der vorgegebenen Punktwolke  $\mathbf{P}$  ergibt sich mit:

$$\mathbf{D} = \mathbf{P}^* - \mathbf{P} \quad (4.8)$$

Mit der Frobenius Norm für Matrizen kann ein Fehlerwert  $\delta$  ermittelt werden.

$$\delta = \|\mathbf{D}\|_F$$

Der Anwender kann so versuchen, durch Wiederholen der Objektregistrierung den Wert von  $\delta$  zu minimieren, oder die so ermittelte Objektregistrierung wird bei der Überschreitung von  $\delta$  über einen vorher festgelegten Schwellwert erst gar nicht anerkannt. Weiterhin kann die Differenzmatrix  $\mathbf{D}$  der rückprojizierten Passpunkte spaltenweise analysiert werden und so die Abweichungen entlang der einzelnen Koordinatenachsen betrachtet werden. Damit lassen sich beispielsweise systematische Fehler am Bauteil erkennen.

Ein gutes Ergebnis einer Objektregistrierung zeigt die Abbildung 2.1 im Abschnitt 2.1.5 auf Seite 15. Die folgende Abbildung 4.18 zeigt dagegen einen Kotflügel, dessen Objektregistrierung durch eine schlechte Wahl der Passpunkte deutlich schlechter ausfällt. Links unten in der Abbildung ist zu erkennen, wie der Verlauf des Kotflügels am Radhaus nicht zu der formtreu überlagerten Geometrie passt. Analog ergeben sich oben in der Abbildung Abweichungen in der Höhe der zu augmentierenden Geometrie. Eine Abweichung im Bauteil konnte nach einer messtechnischen Prüfung nicht bestätigt werden.



Abbildung 4.18: Ungenaue Objektregistrierung eines Kotflügels

#### 4.3.3.2 Die Objektregistrierung für FEM-Daten

Werden zur Überlagerung keine Konstruktionsdaten, sondern Daten, die aus einer FEM Simulation gewonnen wurden, benutzt, können die Annahmen zur Berechnung der Transformation aus Abschnitt 4.3.3.1 nicht vergleichbar getroffen werden.

Die Berechnungsergebnisse können an einzelnen Stellen stark vom realen Objekt abweichen, obwohl das Gesamtergebnis der Berechnung dem Realen bereits qualitativ sehr nahe kommt. Folglich gibt es a priori keine Passpunkte, die wie beim RPS fest zugeordnet werden können. Prinzipiell können zwar wieder RPS Punkte identifiziert werden, diese weichen jedoch deutlich voneinander ab.

Ein Grund hierfür ist der heutzutage Einsatz neuer Materialien wie Verbundwerkstoffe, Aluminiumlegierungen und hochfeste Stahllarten im Fahrzeugbau. Nach [ROH] kommt insbesondere an den crash-relevanten Stellen hochfester Stahl zum Einsatz. Diese Stahllarten zeichnen sich durch ihre hohe Rückfederung aus, die auf das hohe Speichervermögen von elastischer Energie zurückzuführen ist. Diese Energie wird durch plastische Formgebung und Formveränderung im Material gespeichert. Diese Formgebungen sind durch Umformprozesse wie Tiefziehen oder Crashvorgänge gegeben. Eine Beurteilung der zu erwartenden Formveränderung durch Rückfederung erfolgte zum Beispiel in [DAV]. Siegert hat in [SIE] die Probleme bei der Verarbeitung von Aluminium diskutiert.

Um eine möglichst realitätsnahe Crashberechnung durchführen zu können, ist es nötig, bereits den Herstellungsprozess der Komponenten aus diesen Materialien zu berücksichtigen. Die Crashberechnung von bereits umgeformten Komponenten wird in [SCH] und [LAN] erläutert. Insgesamt ist derzeit die Vorhersage von Bauteilen mittels einer FEM Simulation, die eine hohe Rückfederung aufweist, noch nicht vollends zufriedenstellend [ROL].

Das Vorgehen wie bei der Objektregistrierung von CAD-Daten aus Abschnitt 4.3.3.1 bietet sich dennoch an, da wegen der Eigenschaft einer Ausgleichsrechnung eine sehr gute Näherung erreicht wird (auch "best fit" genannt). Die Wahl von geeigneten Passpunkten ist für die Güte der Näherung besonders entscheidend. Durch die folgende Vorgehensweise lassen sich die (für die Registrierung) geeigneten Passpunkte automatisch bestimmen:

Zuerst wird vom Anwender eine größere Anzahl  $n$  von Punkten festgelegt (etwa 10), die bereits nach dem Fachwissen des Anwenders für die Objektregistrierung geeignet erscheinen. Nach dem Lösen der Gleichung 4.7 mittels der SWZ wird jeder einzelne Punkt  $P_i$  für  $i = 1, \dots, n$  mittels der berechneten Transformation  $\mathbf{T}^*$ , die aus absoluten Werten besteht, zurück transformiert:

$$P_i^* = Q_i \cdot \mathbf{T}^*$$

Zu jedem Punkt  $P_i^*$  gibt  $d_i$  die Länge der Differenz zwischen rückprojizierten und vorgegeben Punkt  $P_i$  an und ist eine Angabe dafür, wie weit ein virtueller Passpunkt von seinem korrespondierenden realen Passpunkt nach der genäherten Transformation abweicht.

$$d_i = |P_i^* - P_i|$$

Für alle Punkte  $P_i$  für  $i = 1, \dots, n$  wird derjenige Punkt  $P_i$  ermittelt, der den größten Abstand  $d_i$  aufweist. Da dieser Punkt durch die genäherte Transformation die größte Abweichung zeigt, wird dieser Punkt aus der Berechnung herausgenommen. Mit den verbleibenden Punkten  $P_i$  für  $i = 1, \dots, n - 1$  wird nach der Gleichung 4.7 die Transformation neu berechnet.

Es werden nun wiederum alle Punkte zurück transformiert und die zugehörigen Abstände  $d_i$  für  $i = 1, \dots, n-1$  berechnet. Abermals wird der Punkt  $P_i$  zum größten Abstand  $d_i$  aus den Berechnungen herausgenommen, und das Verfahren wiederholt sich mit der Berechnung von  $\mathbf{T}$  nach Gleichung 4.7 unter der Verwendung von nun  $n-2$  Punkten. Für den Abbruch und damit die Erreichung einer Transformation für eine gute Näherung der Objektregistrierung lassen sich zwei Kriterien aufstellen:

1. Das Verfahren wird sukzessive wiederholt, bis nur noch vier Passpunkte für die Berechnung von  $\mathbf{T}$  verbleiben. Die endgültige Transformation wird allein aus diesen vier Punkten berechnet.
2. Für den Abstand  $d_i$  zu einem zurück transformierten Punkt  $P_i$  wird a priori eine feste Schwelle vorgegeben. Es werden solange Punkte aus der Berechnung herausgenommen, bis ihre zugehörigen Abstände über der Schwelle liegen. Verbleiben dem Verfahren nur noch drei Punkte zur Berechnung, bricht das Verfahren mit einer Fehlermeldung ab.

Bei Kriterium 1 liefert das Verfahren stets ein Ergebnis und der Anwender hat neben der Festlegung der Passpunkte keine weiteren Angaben zu leisten. Durch die Starrheit des Vorgehens ist keine Aussage oder Kontrolle über die Güte der ermittelten Näherung möglich.

Bei Kriterium 2 kann die Güte der Näherung anhand der Schwelle kontrolliert werden. Dadurch können auch mehr als vier Passpunkte zur Berechnung herangezogen werden. Auch der umgekehrte Fall ist möglich, und das Verfahren bricht ohne Ermittlung einer Näherung ab, wenn nicht genügend Passpunkte zur Berechnung verbleiben. Das zweite Kriterium ist grundsätzlich zu bevorzugen. Die Schwelle muss jedoch vom Anwender experimentell ermittelt werden und hängt zusätzlich von der Art und Schwere der Verformung der Objekte ab.

Für die Objektregistrierungen in den Abbildung 4.19 und 4.20 wurden ca. 12 Passpunkte gewählt. In Abbildung 4.19 wurde das Verfahren aus dem Abschnitt 4.3.3.1 angewendet. Alle Passpunkte wurden zur Berechnung der Objektregistrierung herangezogen. Das Registrierungsergebnis ist zwar eine gute Näherung, es zeigt sich jedoch oben rechts am Türholm von Abbildung 4.19 eine deutliche Verdrehung in den augmentierten Berechnungsergebnissen. Für Abbildung 4.20 wurde die Objektregistrierung mit dem zweiten Kriterium aus Abschnitt 4.3.3.2 ermittelt. Sie zeigt eine deutliche Verbesserung des Registrierungsergebnisses gegenüber der Abbildung 4.19. Der angesprochene Türholm wird nunmehr nahezu formtreu in der Abbildung 4.20 überlagert.

### 4.3.3.3 Interaktive Objektregistrierung

Der im vorangegangenen Abschnitt 4.3.3.2 erläuterte Effekt der Rückfederung kann bei großen und komplexen Berechnungsmodellen eine Abweichung von bis zu 5% betragen. Bei einem Frontalcrash eines kompletten Fahrzeugs ergibt dies mindestens 20cm Abweichung, bezogen auf die Gesamtlänge des Fahrzeugs. Eine geeignete Näherung für diesen Fall zu berechnen, erscheint wenig sinnvoll.

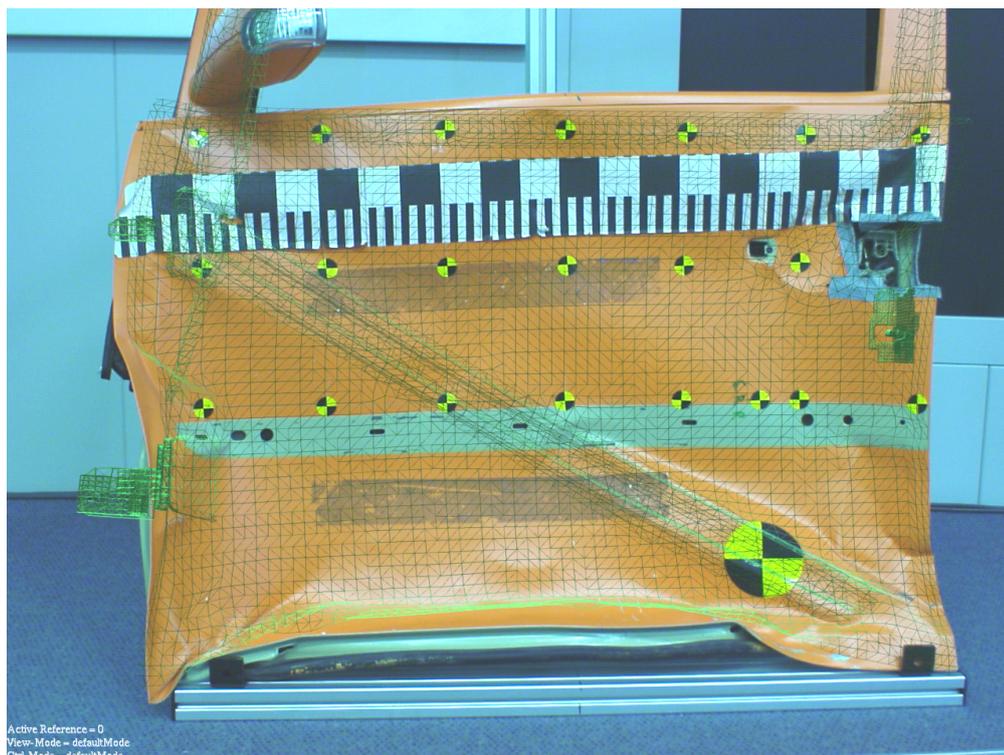


Abbildung 4.19: Ungeeignetes Ergebnis einer Objektregistrierung

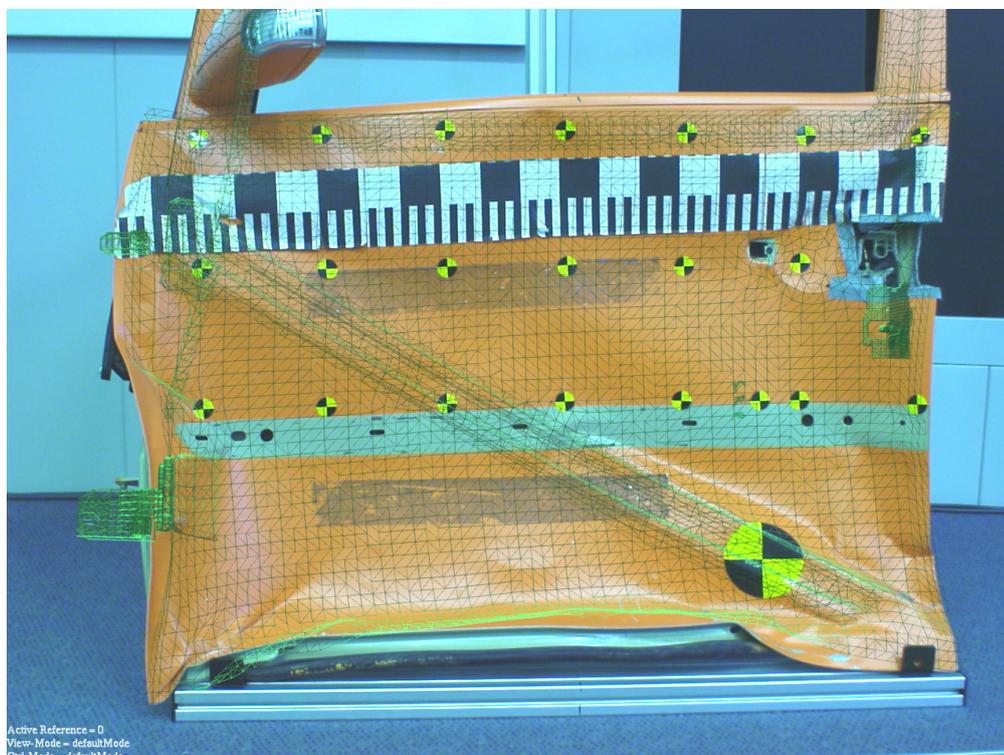


Abbildung 4.20: Geeignetes Ergebnis einer Objektregistrierung

In Zusammenarbeit mit dem Anwender wird bei der Anwendung von solchen Fällen ein interaktives Verfahren zur Bestimmung der Objektregistrierung gewählt. Dabei kann der Anwender mittels eines geeigneten 6 DOF-Interaktionsgerätes (wie Spacemouse oder getracktem Messstift) das virtuelle Objekt selbständig im Sinne der formtreuen Überlagerung ausrichten. Um den Anwender in der Interaktion mit sechs Freiheitsgraden nicht zu überfordern, ist es sinnvoll, gleichzeitig nur wenige Freiheitsgrade zu kontrollieren und jeweils zwischen den benötigten Freiheitsgraden zu wechseln. Die obige Berechnungsmethode für die Näherung durch Passpunkte kann dabei eine initiale Startausrichtung als Ausgangslage liefern.

Am Beispiel des Fahrzeugcrashs kann der Betrachter zuerst über eine Näherung von Passpunkten an der Heckpartie des Fahrzeugs für die formtreue Überlagerung am Heck fluchten. In dieser Ausrichtung lassen sich etwa an der Front des Fahrzeugs die Gesamtabweichungen der Verformungen beurteilen. Danach richtet der fachkundige Anwender die Überlagerung möglichst formtreu entlang der A-Säule an der Fahrerseite des Fahrzeugs aus, um so die Abweichungen im Bereich des Lenkrades und der Schalttafel zu beurteilen. Diese Vorgehensweise ist nach Ansicht des Anwenders für den Vergleich zwischen realem Crashfahrzeug und Simulationsergebnissen ausreichend.

**Anmerkung:** Die hier beschriebene, interaktive Vorgehensweise zur Bestimmung der Objektregistrierung kann auf die Verwendung des VBTs übertragen werden. Analog lassen sich so in einem AR-System auch Simulationsergebnisse einer FEM-Berechnung mittels des VBTs formtreu überlagern. In Kapitel 7, Abschnitt 7.3.1 ist dazu ein Beispiel aus einer Anwendung zu finden (Druckversuch, Fahrzeugsitz).

## 4.4 Der Kameraoffset

In diesem Abschnitt wird die Funktion und Bedeutung des Kameraoffsets erläutert. Grundsätzlich entspricht die Berechnung des Kameraoffsets der in der Literatur wie [TSA] bekannten "Hand-Eye Calibration".

### 4.4.1 Hintergrund

In einem wie in dieser Arbeit vorgesehenen AR-System, das auf dem video-see-through-Prinzip basiert, wird die reale Umgebung mit einer Videokamera "live" aufgenommen. Direkt auf diesem Videobild werden dann unmittelbar die computergenerierten Objekte überlagert bzw. augmentiert. Derzeit projizieren Computer die virtuellen Objekte nach dem Prinzip einer Lochkamera. Eine deckungsgleiche Überlagerung kann nur dann entstehen, wenn die reale Videokamera mit der virtuellen Kamera, die der Computer intern zur Berechnung der Augmentierung verwendet, übereinstimmt. Dazu müssen die so genannten "äußeren" und "inneren" Kameraparameter bestimmt werden (siehe Nölle in [ALT]).

Die äußeren Parameter beschreiben die genaue Position und Orientierung der Kamera. Dabei ist hier die Kamerabildebene gemeint, nicht etwa eine Position am Gehäuse der Kamera. Die Kamerabildebene ist bei einer Videokamera eine Position auf dem CCD-Sensor bzw. befindet sich in der Regel innerhalb des Objektivs, da durch das Linsensystem eine Verlagerung vor den CCD-Sensor entsteht.

Idealerweise benötigt man genau diese Position und Orientierung in der Kamerabildebene, um eine deckungsgleiche Überlagerung zu realisieren. Die computergenerierte Projektion der virtuellen Objekte benötigt genau diese Position und Orientierung als so genannten Point of View.

### 4.4.2 Problematik bei der Bestimmung des Kameraroffsets

Da der gerade beschriebene Point of View innerhalb der Kamera liegt, kann dieser Punkt nicht bestimmt werden, wenn das in Abschnitt 4.2.2 beschriebene A.R.T.-System verwendet wird. Die Position der Kamera wird nicht über ihr Videobild ermittelt, sondern anhand eines am Kameragehäuse montierten Rigid Body. Die Trackinginformation zu der getrackten Kamera beziehen sich auf die Position und Orientierung des Kameragehäuses und nicht auf die benötigte Kamerabildebene.

Folglich können die Trackinginformationen nicht unmittelbar für die virtuelle Projektion der virtuellen Objekte verwendet werden. Ausgehend vom Rigid Body ergibt sich ein Offset in Position und Rotation zu der gewünschten Position in der Kamerabildebene. Der in dieser Arbeit so genannte Kameraoffset muss a priori für die AR-Anwendung bestimmt werden, um eine formtreue Überlagerung zu realisieren. Die folgende Abbildung 4.21 veranschaulicht die Zusammenhänge und stellt den Kameraoffset dar.

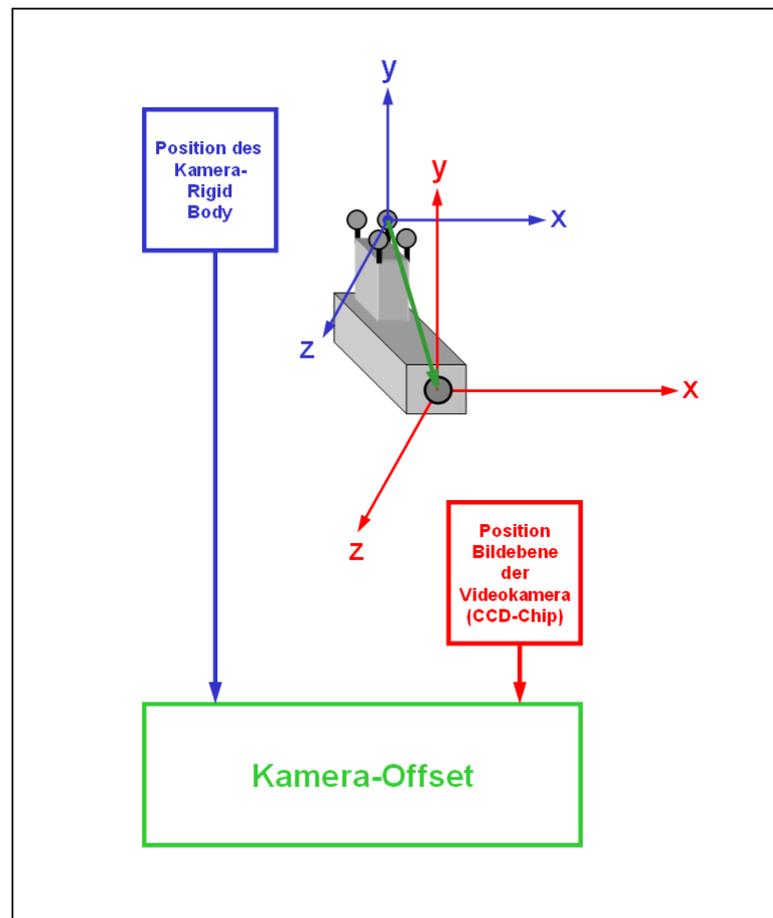


Abbildung 4.21: Der Kameraoffset

Die Problematik ist die exakte Bestimmung des Kameraoffset, da vom Gehäuse der Videokamera keinerlei Rückschlüsse auf die Position des CCD-Chips bzw. des Orts der Kamerabildebene gezogen werden können.

Selbst wenn Herstellerangaben über die Position des CCD-Chips verfügbar sind oder durch eine Demontage der Kamera die Position vermessen werden könnte, ergibt sich der Umstand, dass die benötigte Position der Kamerabildebene nicht direkt in der CCD-Chip-Ebene liegt, sondern ein imaginärer Punkt vor der Ebene ist.

Derzeit wird der Kameraoffset entweder experimentell bestimmt oder durch Verfahren der Bildverarbeitung abgeschätzt. Die Ergebnisse dieser Verfahren sind recht ungenau und für eine formtreue Überlagerung in keiner Weise ausreichend.

### 4.4.3 Lösungsansatz zur Berechnung des Kameraoffsets

Können beide Trackingsysteme, die im Abschnitt 4.2 beschrieben sind, gleichzeitig und simultan eingesetzt werden, so ergibt sich die Möglichkeit, beide Systeme direkt zu kombinieren und damit den benötigten Kameraoffset automatisch und möglichst genau zu bestimmen.

Hierzu wird der quadratische Papiermarker für das Vision Based Trackingsystem exakt im Ursprung des A.R.T.-Systems positioniert. Die Positionierung sollte recht genau durchgeführt werden.

Es ist auch zu überlegen, ob man nicht direkt den Marker des Vision Based Tracking-systems am "L"-förmigen Rahmen positioniert, mit dem das A.R.T.-System seinen Trackingursprung vorgibt. Solch eine Marker-Einmessrahmen-Kombination muss nur einmal hergestellt werden und kann immer wieder verwendet werden.

Es gibt derzeit bereits kommerzielle AR-Systeme, die beide Typen von Tracking-systemen angebunden haben. Beispielsweise der AR-Browser von der metaio GmbH [MET] und das Virtual Design 2 von der vrcom GmbH [VRC].

Da in diesen Systemen jeweils die Positionen und Orientierungen des Papiermarkers und des Rigid Bodys des A.R.T.-Systems an der Videokamera vorhanden sind, kann einfach von der getrackten Position und Orientierung des Rigid Bodys (Gehäuse der Videokamera) auf die Markerposition des Vision Based Trackingsystems (CCD-Chip der Videokamera) geschlossen werden. Durch eine Multiplikation zweier Transformationsmatrizen wird der benötigte Kameraoffset bestimmt. Anschließend kann die AR-Anwendung mit dem ermittelten Offset und durch die alleinige Verwendung des A.R.T.-Systems autark betrieben werden. Anhand des bestimmten Offsets lässt sich nach dem Vorgang der Objektregistrierung aus Abschnitt 4.3 eine formtreue Überlagerung erreichen.

#### 4.4.4 Automatisierte Berechnung des Kameraoffsets

##### 4.4.4.1 Direkter Berechnungsweg

Man betrachte die folgenden Transformationen aus Abbildung 4.22:

$\mathbf{T}_A$  sei die Transformationsmatrix des Kameratrackingensors des A.R.T.-Systems.

$\mathbf{T}_V$  sei die Transformationsmatrix der Kamerabildebene vom Vision Based Tracking.

$\mathbf{T}_O$  sei der gesuchte Kameraoffset in Rotation und Position, ebenfalls als Transformationsmatrix.

Es ergibt sich somit als Zusammenhang:

$$\mathbf{T}_V = \mathbf{T}_A \cdot \mathbf{T}_O \quad (4.9)$$

Jetzt muss  $\mathbf{T}_O$  separiert werden. Dies erreicht man mit einer Matrizenmultiplikation von links mit  $\mathbf{T}_A^{-1}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_A^{-1} \cdot \mathbf{T}_V &= \mathbf{T}_A^{-1} \cdot \mathbf{T}_A \cdot \mathbf{T}_O \\ \mathbf{T}_A^{-1} \cdot \mathbf{T}_V &= \mathbf{E} \cdot \mathbf{T}_O \\ \mathbf{T}_A^{-1} \cdot \mathbf{T}_V &= \mathbf{T}_O \end{aligned} \quad (4.10)$$

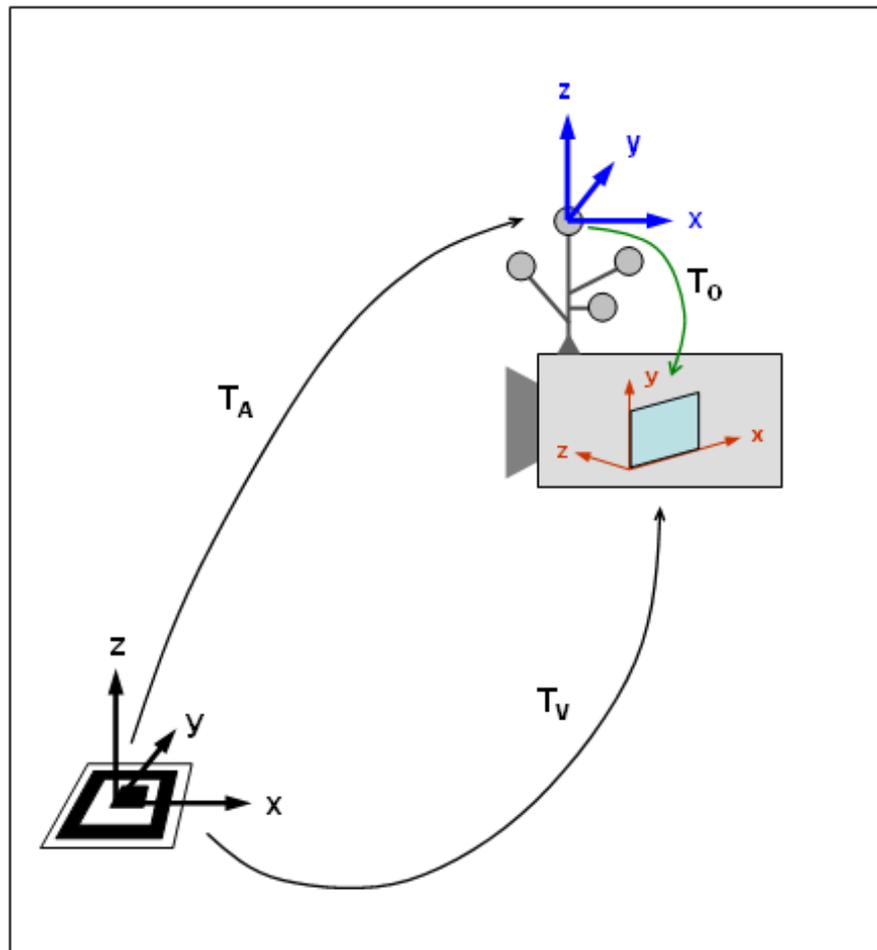


Abbildung 4.22: Transformationen zum Kameraoffset

Somit ist der Trackingoffset eindeutig bestimmt. Wird nun die Transformationsmatrix  $\mathbf{T}_O$  durch die Berechnungen aus Gleichung 4.10 mit absoluten Werten aus einer konkreten Anwendung besetzt, verliert die Matrix  $\mathbf{T}_O$  ihre hier abstrakte Bedeutung. Die Repräsentation einer absoluten, berechneten Matrix wird mit der Bezeichnung  $\mathbf{T}_O^*$  gekennzeichnet.

Durch die Bestimmung von  $\mathbf{T}_O$  nach Gleichung 4.10 zu  $\mathbf{T}_O^*$  ist es anschließend möglich, nur noch mit dem A.R.T.-System allein zu arbeiten. Mit der Ausgangsgleichung 4.9 und dem berechneten Trackingoffset  $\mathbf{T}_O^*$  ergibt sich für das AR-System:

$$\mathbf{T}_{\text{Kamerabildebene}} = \mathbf{T}_A \cdot \mathbf{T}_O^*$$

#### 4.4.4.2 Verallgemeinerter Fall der Berechnung

In der Regel ist der quadratische Marker des Vision Based Trackings nicht direkt im Trackingursprung des A.R.T.-Systems, da dies eine recht genaue, mechanische Positionierung des Markers erfordert. Vielmehr ist am Marker ein Trackingsensor bzw. Rigid Body des A.R.T.-Systems angebracht.

Bei dieser Konfiguration ergibt sich ein zusätzlicher Zwischenschritt. Man betrachte dazu die zusätzlichen Transformationen in Abbildung 4.23:

- $\mathbf{T}_A$  sei die Transformationsmatrix des Kameratrackingsensors des A.R.T.-Systems.
- $\mathbf{T}_V$  sei die Transformationsmatrix der Kamerabildebene vom Vision Based Tracking.
- $\mathbf{T}_O$  sei der gesuchte Kameraoffset in Rotation und Position, ebenfalls als Transformationsmatrix.
- $\mathbf{T}_M$  sei die Transformationsmatrix des A.R.T.-Systems vom Trackingsensor, der am quadratischen Papiermarker angebracht ist.
- $\mathbf{T}_B$  sei die Transformationsmatrix der Kamerabildebene aus Weltkoordinatensicht.

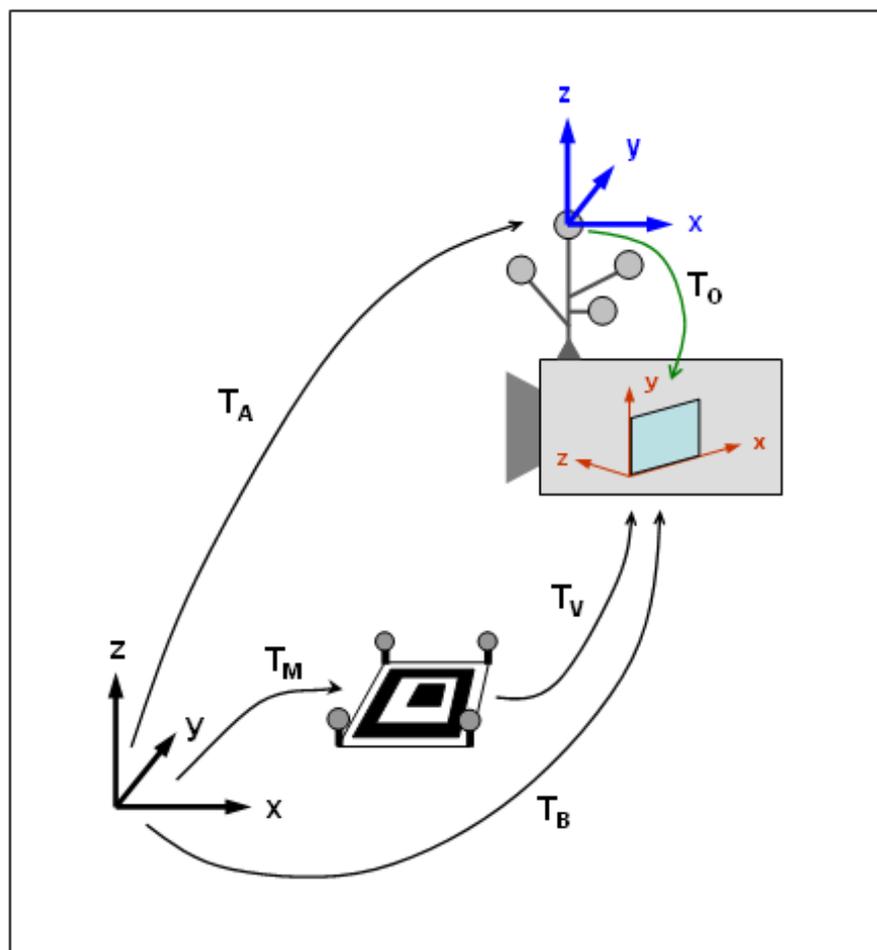


Abbildung 4.23: Transformationen zum Kameraoffset (allgemeiner)

Damit ergibt sich als neue Situation:

$$\mathbf{T}_B = \mathbf{T}_M \cdot \mathbf{T}_V$$

$$\begin{aligned}\mathbf{T}_B &= \mathbf{T}_A \cdot \mathbf{T}_O && \text{/analog zu oben} \\ \mathbf{T}_A^{-1} \cdot \mathbf{T}_B &= \mathbf{T}_O && \text{/}\mathbf{T}_B \text{ ersetzen} \\ \mathbf{T}_A^{-1} \cdot \mathbf{T}_M \cdot \mathbf{T}_V &= \mathbf{T}_O\end{aligned}$$

Die Bestimmung von  $\mathbf{T}_O$  unterscheidet sich zum vorangegangenen Abschnitt lediglich durch die zusätzliche Transformation  $\mathbf{T}_M$ . Entsprechend der bekannten Vorgehensweise basierend auf Gleichung 4.9 und 4.10 ergibt sich mit einer konkret bestimmten Transformation  $\mathbf{T}_O^*$  für das AR-System wiederholter Zusammenhang:

$$\mathbf{T}_{\text{Kamerabildebene}} = \mathbf{T}_A \cdot \mathbf{T}_O^*$$

**Anmerkung:** Wurde der Kameraoffset einmal exakt berechnet, gilt er solange wie die Befestigung des Rigid Bodies an der Videokamera nicht verändert wird. In der AR-Anwendung muss so nur die Objektregistrierung durchgeführt werden und der a priori ermittelte Kameraoffset kann für alle Anwendungen fest im AR-System verankert werden.

Ein Beispiel für einen fehlerhaften Kameraoffset lässt sich in der Abbildung 4.24 erkennen.

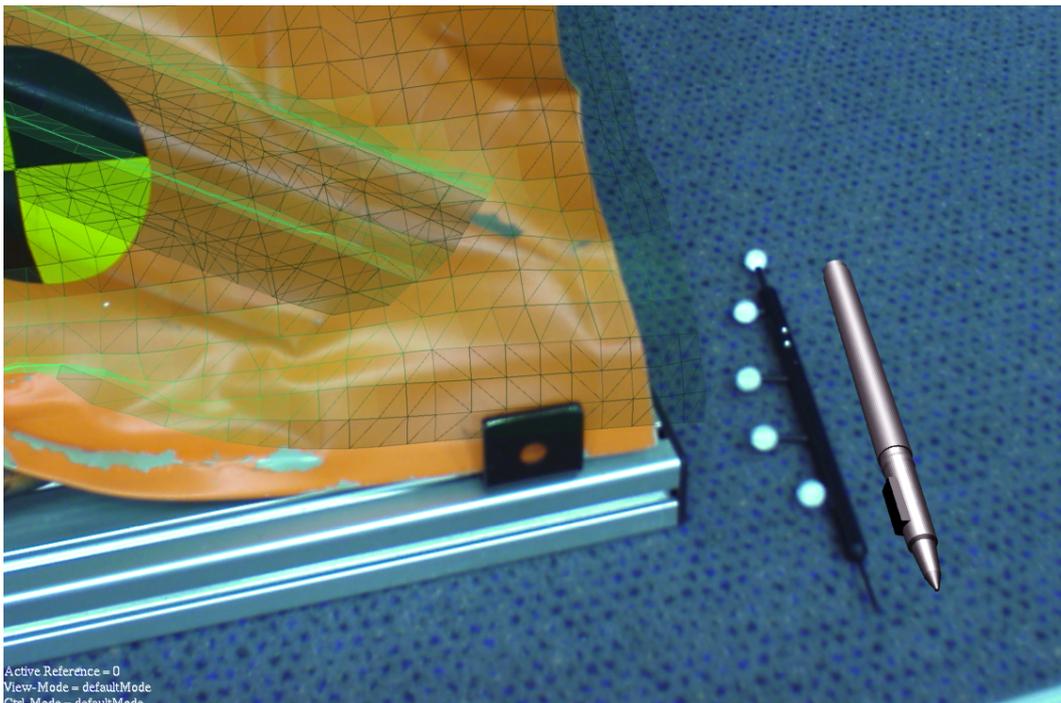


Abbildung 4.24: Fehler beim Kameraoffset

Deutlich sind in der Abbildung 4.24 alle augmentierten Geometrien nach rechts und etwas nach oben verschoben. Ein Fehler in der Objektregistrierung kann hier ausgeschlossen werden, da sich dieser nur auf die Geometrien der FE-Berechnung auswirken würde. Da auch der Messstift des A.R.T.-Systems mit einer Verschiebung augmentiert wurde, ist hier ein falsch berechneter Kameraoffset angezeigt.

## 4.5 Interne Kameraparameter

Die AR-Systeme für die Anwendungen in dieser Arbeit erfassen die reale Umwelt mit einer Videokamera. Da die Kamera nicht nach dem Prinzip der Lochkamera arbeitet, sondern ein Objektiv aus mehreren Linsen besitzt, kommt es auf dem CCD-Chip der Videokamera zu optischen Verzeichnungen.

Nach Luhmann [LUH] lässt sich für jede Kamera ein Satz so genannter innerer Kameraparameter ermitteln. Diese bestehen aus der Brennweite, der Position der Bildmitte in Pixelkoordinaten des CCD-Chips und einer horizontalen sowie vertikalen Pixelskalierung. Bei der Verwendung eines Objektivs ergeben sich radiale und tangentielle Verzeichnungen.

Die radiale (genauer: radialsymmetrische) Verzeichnung ist eine grundsätzliche Eigenschaft einer Linse und tritt bei jedem Objektiv auf. Sie stellt den größten Anteil eines Abbildungsfehlers dar und wächst in Abhängigkeit zum Abstand eines Bildpunktes zum Bildhauptpunkt. Tangentielle Verzeichnungen wirken sich deutlich geringer aus und entstehen durch leichte Schiefstellungen einer Linse zur Bildebene im Objektiv.

Werden die Verzeichnungen, die durch die Linsen des Systems entstehen im Videobild nicht korrigiert, entstehen in der formtreuen Überlagerung zusätzliche Abweichungen. Durch die radialen Verzeichnungen wirken sich die Abweichungen am Rand besonders stark aus und sind hinderlich, wenn ein Objekt möglichst bildfüllend überlagert werden soll. Besonders bei Anwendungen wie den Augmentierten Meisterbock (Siehe Abschnitt 2.1.5) ist es daher notwendig, die inneren Kameraparameter möglichst genau zu bestimmen und entsprechend die Darstellung des Videobilds zu korrigieren.

### 4.5.1 Kalibrierung von internen Kameraparametern

Interne Kameraparameter lassen sich durch einen Kalibriervorgang mit Hilfe eines Kameramodells numerisch bestimmen. Es gibt verschiedene Kalibrieremethoden und damit verbundene Algorithmen. Ein Verfahren von Zhang [ZHA] lässt sich bei vielen AR-Systemen antreffen. Das Verfahren ist jedoch nur zur Ermittlung radialsymmetrischer Verzeichnungen geeignet.

Ein sehr umfassendes Kameramodell einschließlich einer Kalibrierung von diesem bietet das kommerzielle Unternehmen AICON an [AIC]. Die internen Kameraparameter werden durch eine so genannte Testfeldkalibrierung ermittelt. Dazu wird mit der Videokamera ein Testfeld aus mehreren unterschiedlichen Ansichten möglichst bildfüllend aufgenommen. Das Testfeld besitzt genau vermessene und codierte Markierungen in Form von weißen Kreisen. Zusätzlich ist das Material (Kohlefaser) des Testfelds in seiner Ausdehnung sehr temperaturinvariant. Abbildung 4.25 zeigt das Testfeld.

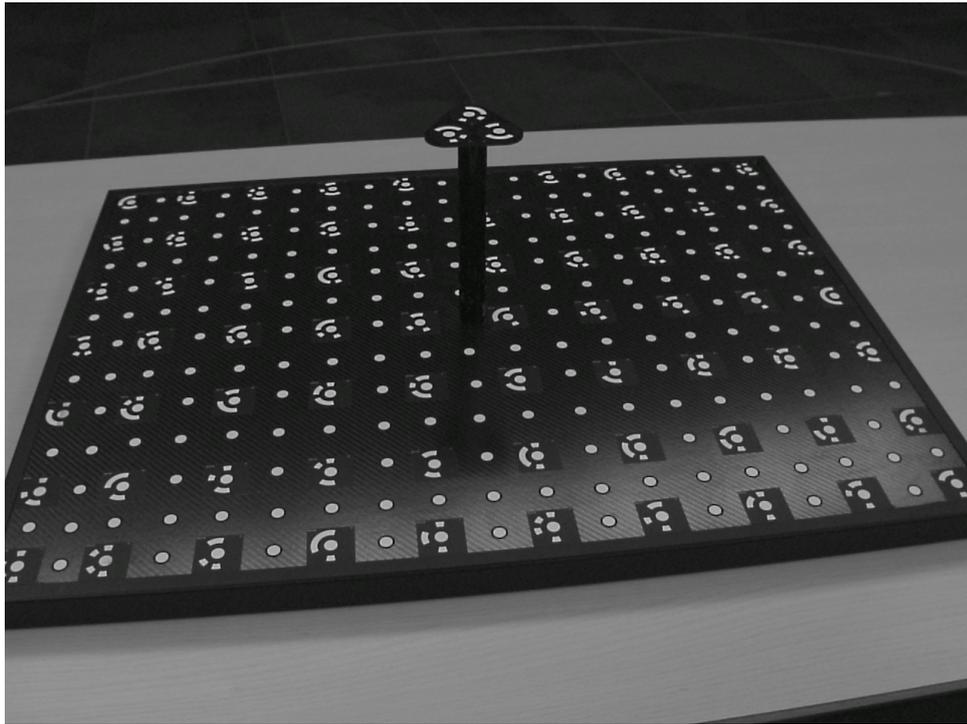


Abbildung 4.25: AICON Testfeld zur Kamerakalibrierung

### 4.5.2 Ergebnisse der Kamerakalibrierung

Das Verfahren von AICON liefert nicht nur die internen Kameraparameter, sondern auch die externen, die die Position und Orientierung der Videokamera zur Testtafel beschreiben. Dies ermöglicht in Form einer Rückprojektion eine Überprüfung der Kalibrierung, indem beispielsweise die vermessenen Kreise virtuell in das Videobild aus der ermittelten Perspektive gezeichnet werden.

In der nächsten Abbildung 4.26 wurden die Kreise des Testfeldes aus der ermittelten Perspektive (externe Kameraparameter) virtuell in das Videobild eingezeichnet. Bei der Darstellung der blauen Kreise wurde keine Korrektur der ermittelten inneren Parameter vorgenommen - die Abweichungen sind sehr stark und deutlich zu erkennen. Die blauen Kreise befinden sich auf einer weiter nach unten verschoben Kreisreihe, besonders auffällig bei den drei Kreisen auf der erhöhten Plattform.

Der größte Anteil der Abweichung ergibt sich durch die verschobene Hauptpunkt-lage. Diese gibt an, in wie weit die optische Achse des Objektiv zum Mittelpunkt des CCD-Chips verschoben ist. In Abbildung 4.27 wurde somit erst einmal nur die Hauptpunkt-lage korrigiert und die Rückprojektion neu bewertet.

Die dargestellten virtuellen Kreise passen nunmehr in ihrer Position erwartungsgemäß sehr gut zu den Kreisen des Testfelds. Insbesondere in der Mitte ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Zum Rand zunehmend wird die Übereinstimmung ungenauer. Etwa in der Abbildung 4.27 links unten sind die Kreise fast nebeneinander statt deckend angeordnet. Dies deutet auf die typischen radial-symmetrischen Verzerrungen hin, die zum Rand des Videobildes stärker werden.

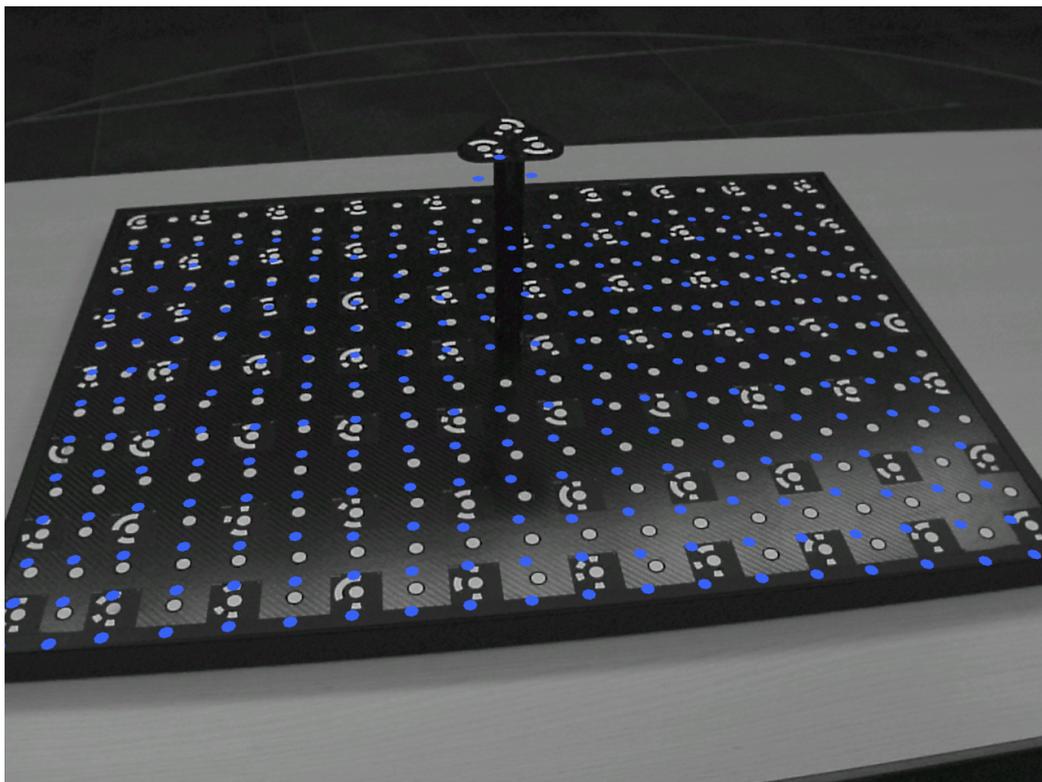


Abbildung 4.26: Rückprojektion des Testfelds ohne Korrekturen [JUN]

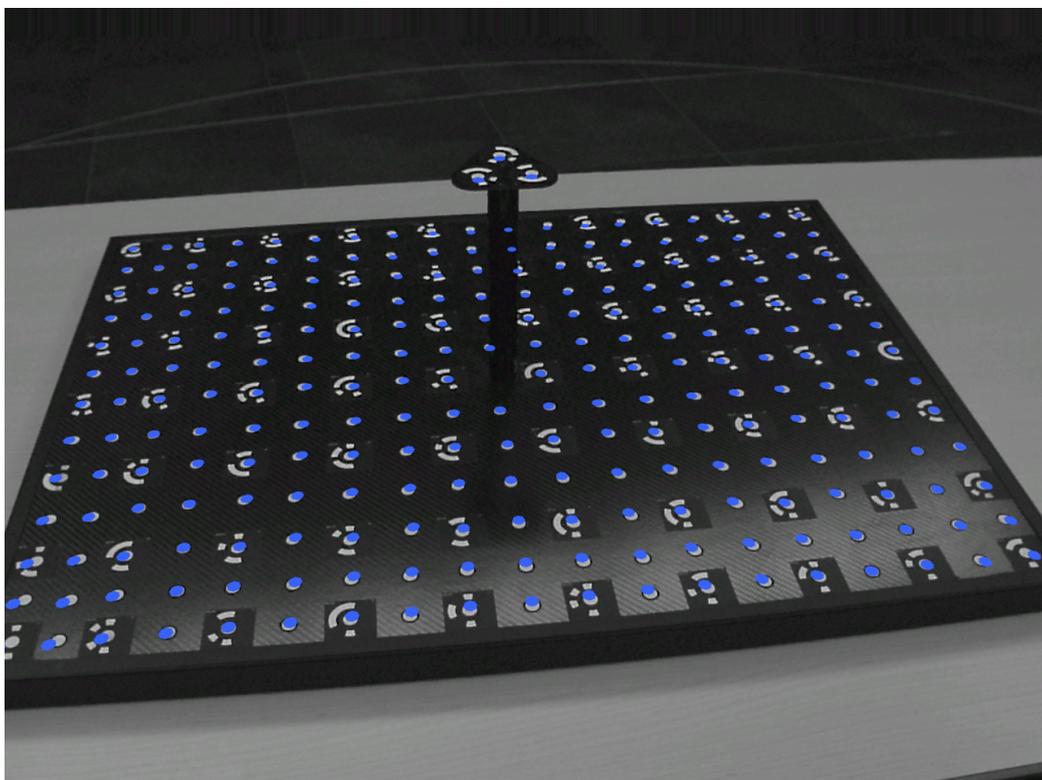


Abbildung 4.27: Rückprojektion des Testfelds mit Hauptpunktverschiebung [JUN]

Werden abschließend auch die radialen und tangentialen Verzeichnungen korrigiert, so ergibt sich in der Abbildung 4.28 eine lückenlose Überdeckung aller rückprojizierten Kreise zu ihren korrespondierenden Kreisen des Testfeldes. Vergleicht man Abbildung 4.27 mit 4.28 fällt auf, dass nach der radialen Korrektur die Kanten des Testfeldes gradlinigen Strecken entsprechen. Das gesamte Videobild erscheint etwas aufgefächert.

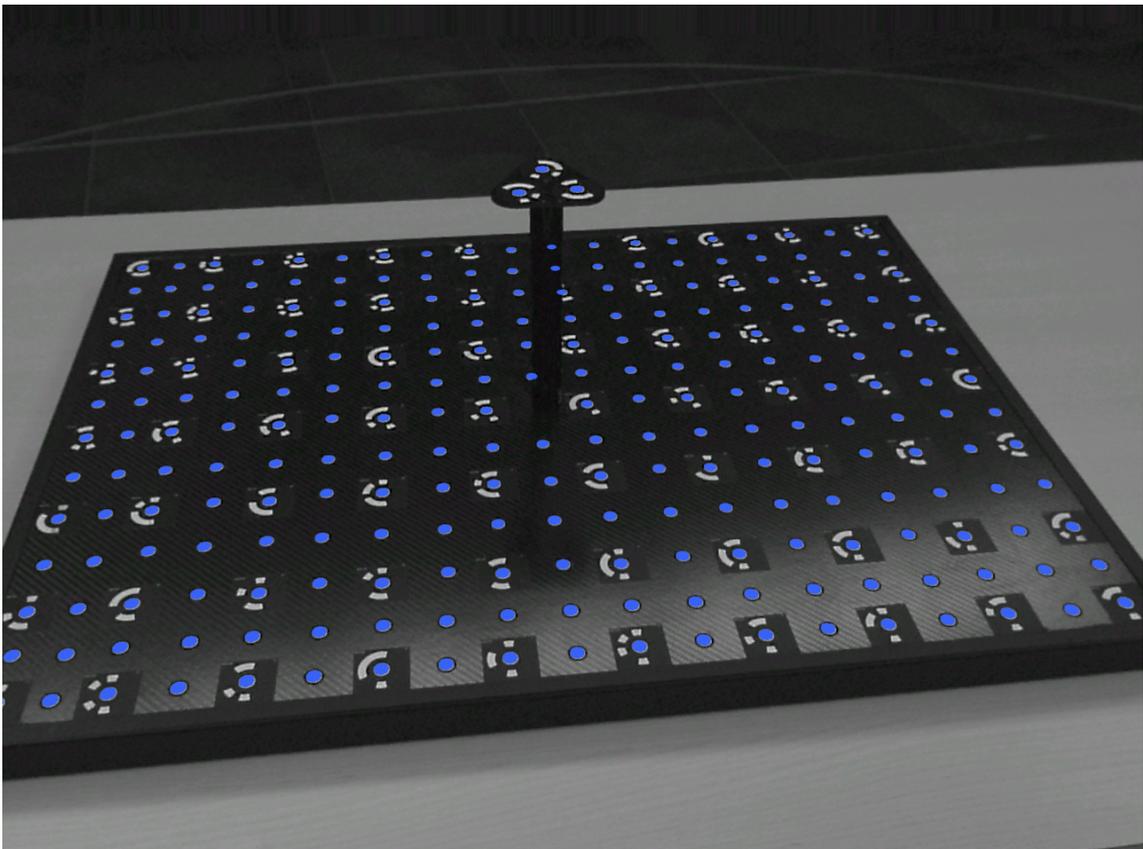


Abbildung 4.28: Rückprojektion mit kompletter Verzeichniskorrektur [JUN]

**Anmerkung:** Das AR-System auf der Grundlage des Vision Based Trackings aus Abschnitt 4.2.1 realisiert eine Korrektur der Hauptpunktverschiebung entsprechend der Abbildung 4.27. Es hat sich gezeigt, dass die Güte dieser Korrektur für viele Anwendungen (wie auch die Überlagerung von FEM-Daten) ausreicht, insbesondere bei der Verwendung eines Objektivs mit größerer Brennweite, bei dem radiale Verzeichnungen deutlich geringer ausfallen.

Für Anwendungen wie dem Augmentierten Meisterbock, die besonders hohe Anforderungen an die Überlagerungsqualität stellen, müssen mindestens auch radiale Verzeichnungen korrigiert werden. Dies kann im AR-System basierend auf dem A.R.T.-System realisiert werden, das im Abschnitt 4.2.2 erläutert wurde.

## 4.6 Zusammenfassung

Am Anfang dieses Kapitel wurde eine Übersicht von derzeitigen Trackingtechnologien und -systemen gegeben. Für die Umsetzung der Anwendung in dieser Arbeit wurden optische Trackingsysteme ausgewählt. Die Trackingsysteme wurden miteinander verglichen und weisen zum Teil konkurrierende Eigenschaften auf.

Der Prozess der Registrierung wurde in zwei Berechnungsschritte aufgeteilt: Die Objektregistrierung und die Bestimmung des Kameraoffsets. Die Objektregistrierung ist ein wesentlicher Bestandteil der hier beschriebenen AR-Anwendung und ist entscheidend für die Analysegenauigkeit, die mit der Anwendung zu erreichen ist. Es wurde für verschiedene Anwendungsfälle jeweils eine Methode zur Objektregistrierung vorgestellt. Die Berechnung des Kameraoffsets ist nur bei der Verwendung eines A.R.T.-Systems notwendig. Die beschriebene Berechnungsmethode basiert auf der simultanen Nutzung des A.R.T.-Systems zusammen mit dem VBT. Interne Kameraparameter wurden bestimmt und korrigiert.

# Kapitel 5

## Aspekte der Darstellung

Entsprechend den zentralen Fragen dieser Arbeit sollen reale Objekte mit sich selbst, also ihrem virtuellen Pendant möglichst formtreu überlagert werden. Hierfür ist eine spezielle Art der Darstellung nötig, um das reale und zugleich des virtuelle Objekt erkennen zu können. In diesem Kapitel werden systematisch gängige sowie auch neue Möglichkeiten, computergenerierte Informationen zu überlagern, evaluiert. Einflüsse wie Beleuchtung der realen und virtuellen Szene werden dargestellt und ein geeignetes Medium zur Ausgabe der Überlagerung bereitgestellt.

### 5.1 Darstellung der Überlagerung

Im Laufe dieses Abschnitts soll ein Verstärkungsteil einer B-Säule aus hochfestem Stahl mit der CAD-Vorgabe möglichst formtreu überlagert werden. Abbildung 5.1 zeigt als Ausgangssituation diese B-Säulenverstärkung als reales Bauteil gänzlich ohne Überlagerung.

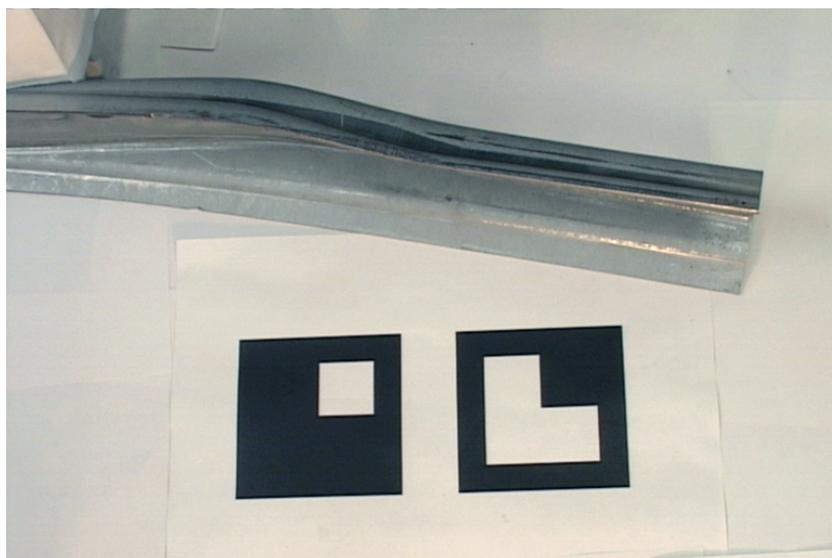


Abbildung 5.1: Reale B-Säulenverstärkung

### 5.1.1 Soliddarstellung

Die Solid-Darstellungsart ergibt das qualitativ beste Erscheinungsbild virtueller Objekte. Durch den Einsatz von Gouraud-Shading und Environment Mapping (siehe [FOL]) erreichen die virtuellen Objekte eine sehr realistische Darstellung. Objekte in rein virtuellen Welten werden oft in dieser Weise erzeugt. Abbildung 5.2 zeigt in der linken Hälfte eine B-Säulenverstärkung, die vollständig mit einer virtuellen B-Säulenverstärkung überlagert wird.



Abbildung 5.2: B-Säulenverstärkung als "solid" mit und ohne Verschiebung

Die Soliddarstellung eignet sich hervorragend für eine vollständige Überdeckung von realen Komponenten mit virtuellen Objekten. Dies ist jedoch zugleich der größte Nachteil bei diesem Vorgehen, da die realen Objekte vollständig überzeichnet werden und nicht mehr für einen direkten Vergleich erkennbar sind. Somit eignet sich diese Methode nur dann für einen Vergleich eines virtuellen Objektes mit seinem virtuellen Pendant, wenn das virtuelle Objekt verschoben wird und quasi neben dem realen Objekt überlagert wird. Durch die Verschiebung ändert sich auch die Perspektive, und das virtuelle Objekt ist nicht mehr entsprechend formtreu zum realen Objekt. Zu erkennen in der rechten Hälfte von Abbildung 5.2.

### 5.1.2 Wireframedarstellung

Bei der Wireframe- bzw. der Liniendarstellung werden nur die Kanten der Polygone, aus denen das virtuelle Objekt besteht, gezeichnet. So werden insbesondere die Konturen und die Struktur des virtuellen Objekts sichtbar. Da in dieser Strukturdarstellung alle Kanten von allen Polygonen gezeichnet werden, kann bei komplexen Objekten ein dichtes Netz aus Linien entstehen. Ein virtuelles Objekt mit einer Überlagerung in der so genannten "wireframe" Darstellungsart zeigt Abbildung 5.3.

Bei der Wireframedarstellung ist das reale Objekt noch gut zu sehen, und es lassen sich insbesondere die Konturen des virtuellen zum realen Objekt vergleichen.

Nachteilig ist das Fehlen der virtuellen Flächen des Objekts. Ist das virtuelle Objekt sehr komplex, ist die Objektoberfläche der virtuellen Geometrie schwer zu erkennen und lässt sich kaum abschätzen. Zusätzlich behindert die Vielzahl von Linien innerhalb der Geometrie die Sicht auf das reale Objekt.

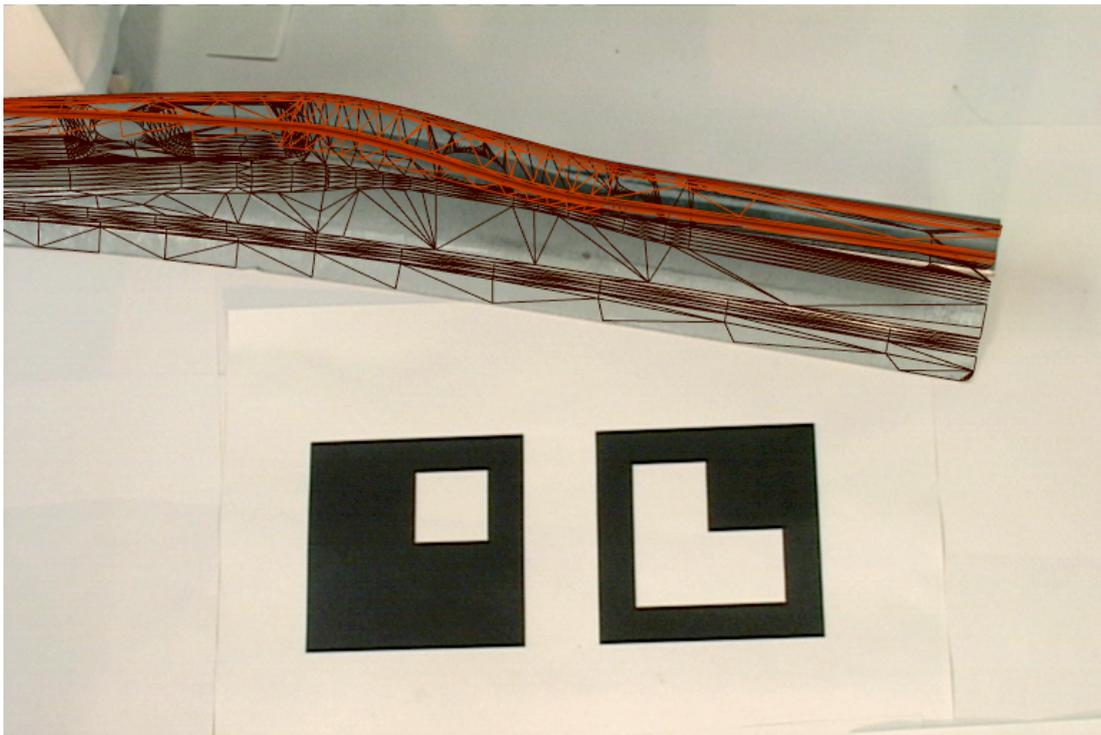


Abbildung 5.3: B-Säulenverstärkung in Wireframedarstellung

### 5.1.3 Transparente Darstellung

Um die Sichtbarkeit des realen Objekts zu verstärken, lässt sich durch den Einsatz von Transparenz das virtuelle Objekt in der sichtbaren Intensität der Überlagerung abschwächen. Der Einsatz der Transparenz ist bei beiden vorherigen Darstellungsarten möglich. Durch die Wahl eines geeigneten Transparenzwertes lassen sich virtuelle und reale Objekte zu gleichen Anteilen gut erkennen. Mehr noch: Durch interaktives Variieren des Transparenzwertes lässt sich ein beliebiger Überblendungsgrad zwischen den Objekten erreichen. Es kann nach Belieben das virtuelle oder das reale Objekt bei der Überlagerung hervorgehoben werden. Die Abbildung 5.4 zeigt eine transparente Darstellung der B-Säulenverstärkung.

In dem Abbild lässt sich der Nachteil dieser Darstellungsmethode erkennen: Die Schattierungen des Gouraud-Shadings der Soliddarstellung werden in ihrer Sichtbarkeit abgeschwächt. Die Flächen wirken nahezu einfarbig und nicht mehr plastisch. Das nun ermöglichte Erkennen von verdeckten Flächen am und innerhalb des virtuellen Objekts erschwert das Erfassen der Formgebung des Objekts. Hierdurch ergibt sich eine mangelnde Abgrenzung der Objektflächen. Zusätzlich ist keine Tiefenstufelung der Flächen mehr zu erkennen. Das virtuelle Objekt weist so wenig Tiefeneindruck auf. Es erscheint als ein gleichmäßiger, zweidimensionaler "Farbklecks", der das reale Objekt überzieht.

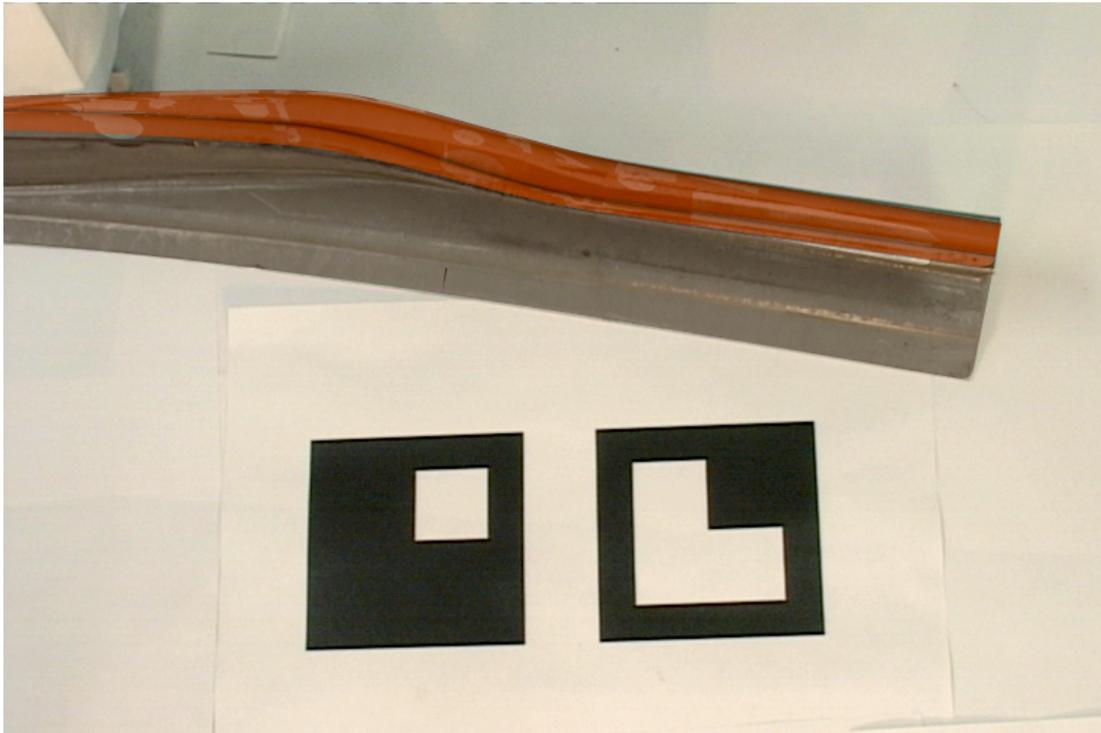


Abbildung 5.4: B-Säulenverstärkung in transparenter Darstellung

Bei einer Wireframedarstellung ist die Transparenz von Vorteil, da sich die Intensität der überlagerten Linien (zum realen Objekt hin) anpassen lässt. Die Wireframedarstellung in Abbildung 5.3 aus Abschnitt 5.1.2 wird in der folgenden Abbildung 5.5 zusätzlich mit Transparenz dargestellt.

**Anmerkung:** Transparente Flächen müssen für eine korrekte Darstellung nach ihrer Tiefe zur Betrachterposition sortiert werden. Einige Renderer<sup>1</sup> sortieren in der Hierarchie nach Geometrieobjekten und nicht nach Polygonen, was deutlich effizienter und damit schneller im Bildaufbau ist. Dadurch können Fehler in der Darstellung entstehen und einzelne Polygone heben sich in der Darstellung ab. Dieser Effekt ist auch im oberen Bereich der B-Säulenverstärkung in Abbildung 5.4 zu erkennen.

#### Realisierungen

Die Darstellungsarten der Überlagerung aus den Abschnitten 5.1.1 bis 5.1.3 sind bereits standardmäßige Optionen eines Renderers, der zur Darstellung dreidimensionaler Geometrien zum Einsatz kommt. Es sind somit keine speziellen Umsetzungen für diese Darstellungsweisen nötig.

<sup>1</sup>Der Renderer ist für die Erzeugung des zweidimensionalen Ausgabebildes aus einer dreidimensionalen Beschreibung von Objekten und Geometrien verantwortlich. Mit ihm wird für jedes einzelne Pixel der Ausgabe ein zugehöriger Farbwert berechnet.

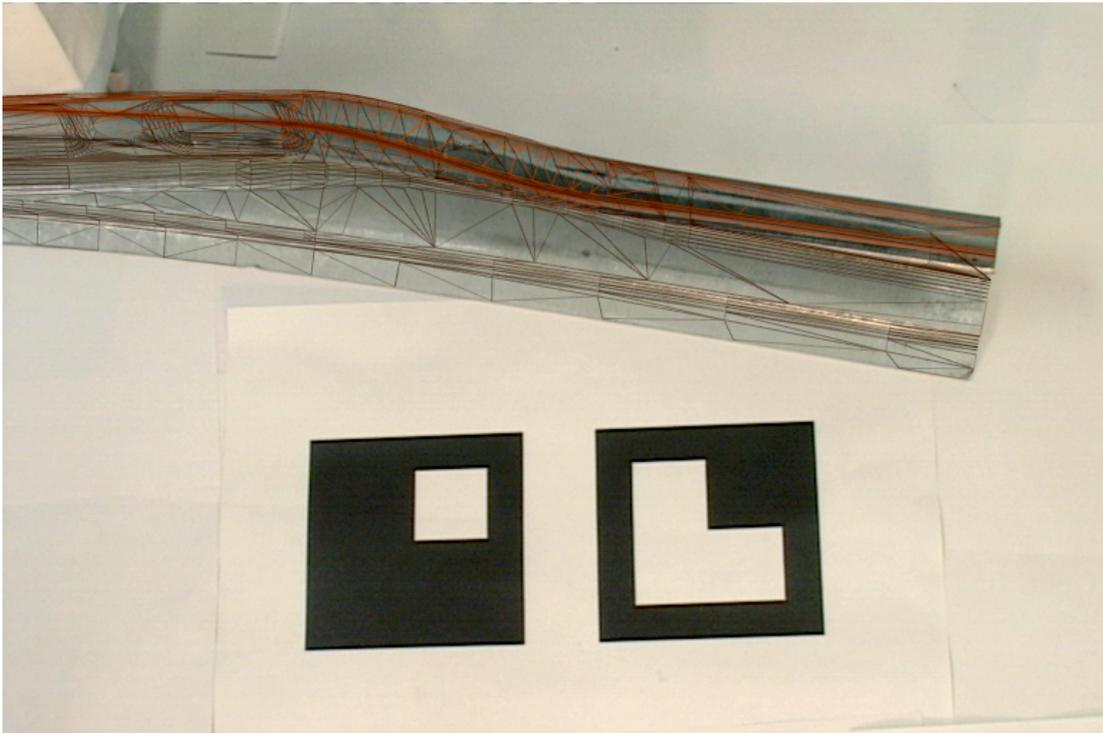


Abbildung 5.5: B-Säulenverstärkung in transparente Wireframedarstellung

#### 5.1.4 Shutter-Darstellung

Eine Möglichkeit, die Nachteile der transparenten Darstellung zu reduzieren und trotzdem ein Überblenden zwischen realen und virtuellen Objekten zu erreichen, bietet die Technik des so genannten Shutterns. Dabei werden schnell alternierend jeweils das reale Objekt (ohne einer Überlagerung) und das virtuelle Objekt in der Soliddarstellung angezeigt.

Ist die erreichbare Bildrate des AR-Systems hoch genug (= 60fps), entsteht so der Eindruck, als ob beide Objekte zur gleichen Zeit erkennbar seien. Die Wahrnehmung des Anwenders kann die einzelnen Objekte nicht mehr richtig trennen. Je höher die Bildrate ist, umso deutlicher zeichnet sich der Effekt einer Überblendung ab.

Da die Bildrate der Anwendung jedoch von mehreren Faktoren wie Tracking, Interaktion, Modellgröße oder Ausgabemedium abhängt, ist diese Darstellung nur für spezielle Anwendungsfälle möglich. Da sich hierbei immer ein Flimmern der Darstellung ergibt, ist dieses Verfahren wegen der einhergehend schlechten Ergonomie nur kurzzeitig anwendbar.

Ist die Bildrate zu gering, beginnt die menschliche Wahrnehmung die dargestellten Objekte zu trennen, und das gewünschte Vermischen (Überblenden) der Objekte ist nicht mehr gegeben.

### 5.1.5 "Schachbrett"-Darstellung

Versucht man das Verfahren der Shutterdarstellung weiter zu verbessern, so besteht eine mögliche Optimierung darin, das Alternieren der Darstellung weiter herunter zu brechen - auf die Pixelebene. Das heißt, dass nicht mehr die kompletten Bilder gewechselt werden, sondern abwechselnd jeweils ein Pixel der Ausgabe das reale und ein Pixel das virtuelle Objekt darstellen.

Es ergibt sich ein sehr feines Schachbrettmuster, in dem beide Objekte zu gleichen Teilen zu sehen sind. Abbildung 5.6 zeigt zur grundsätzlichen Anschauung eine Bildmontage der B-Säulenverstärkung im Schachbrettverfahren einschließlich eines vergrößerten Ausschnitts. Das Verfahren konnte zum Zeitpunkt der Arbeit nur mit einfachen geometrischen Primitiven realisiert werden.

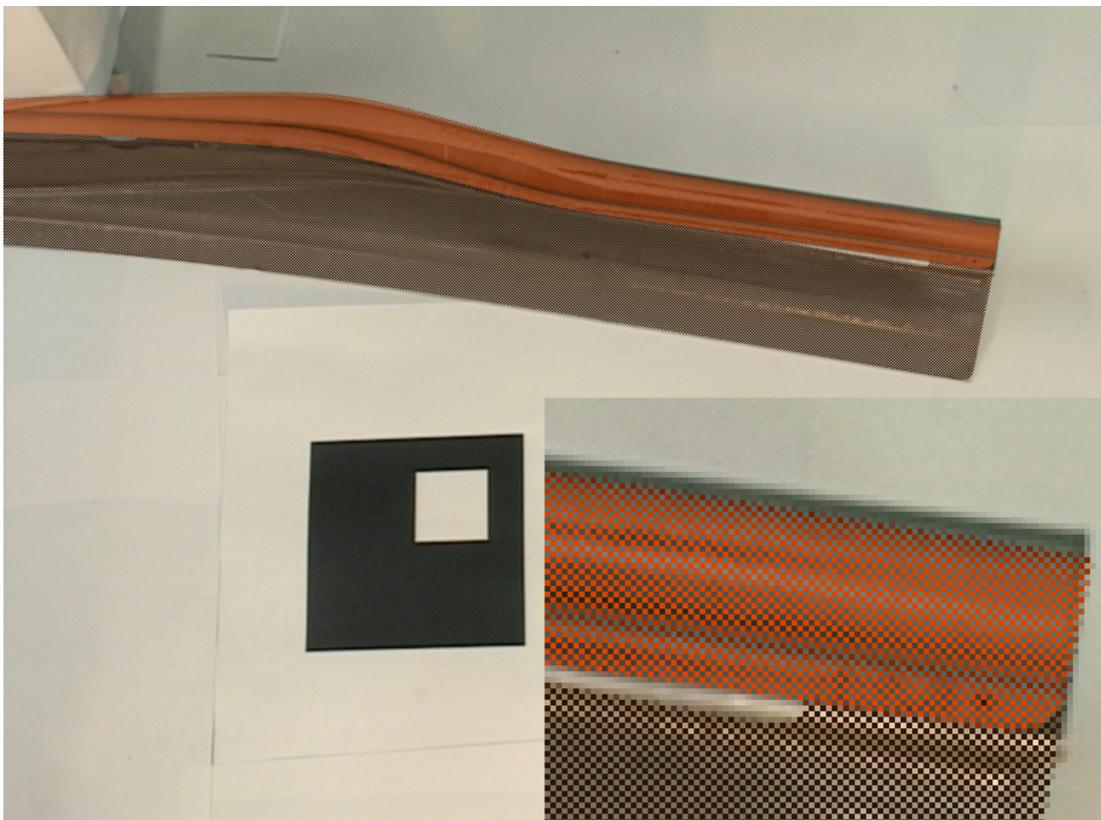


Abbildung 5.6: B-Säulenverstärkung in der Schachbrettdarstellung (Bildmontage)

Da bei diesem Verfahren dem virtuellen und dem realen Objekt jeweils nur die Hälfte der möglichen Bildschirmpunkte zur Verfügung steht, werden bei dieser Darstellung Details der Objekte unterschlagen. Insbesondere an Kanten ergeben sich Aliasingeffekte<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Mit Aliasing wird der so genannte "Treppeneffekt" bezeichnet. Durch die Diskretisierung der Objektgeometriebeschreibungen auf das Pixelraster des Ausgabemediums ergibt sich eine Unterabtastung. Besonders bei schrägen Kanten und Linien ergeben sich durch die rechteckigen Pixel störende Treppeneffekte.

Gerade bei überlagerten Objekten, die einen kleinen Bildausschnitt überdecken, kann die verminderte Pixelanzahl entscheidend sein. Es gilt: Je kleiner die Gesamtauflösung der Ausgabe, desto deutlicher ist das Schachbrettmuster zu erkennen.

Eine mögliche Abhilfe ist der Wechsel der Pixelverteilung mit jedem neuen Bildaufbau ähnlich der Shutterdarstellung. Es wird jedoch nur das Pixelmuster gewechselt, nicht die Darstellung der Objekte. Hierbei ergibt sich jedoch ein recht starkes Flimmern - das Objekt scheint regelrecht zu vibrieren. Eine hohe Bildrate ( $>60$ ) wirkt diesem flimmernden Effekt entgegen. Ein Vorteil dieser Darstellung gegenüber der Verwendung von Transparenz ist der Aspekt, dass keine Vermischung des virtuellen Pixels mit der Hintergrundfarbe erfolgt. Das virtuelle Objekt wirkt so etwas plastischer als in einer transparenten Darstellung, und die Pixel der realen Objektbeschreibung behalten ihre ursprüngliche Farbgebung aus dem Videobild.

Zusammenfassend ist dieses Verfahren nur bei hohen Auflösungen zu empfehlen, während die virtuellen Objekte einen großen Bildausschnitt überdecken. Das Verfahren (sowie auch das Shutterverfahren) vereinen die Vorteile der Solid- und transparenten Darstellung auf Kosten der Ergonomie.

#### Realisierung

Das Schachbrett wird im Renderer mit einer speziellen Maske in den Alphawerten (zuständig für Transparenz eines Pixels) eingebracht. Dazu steht im OpenGL<sup>3</sup> die Funktion "Stippling Polygons" zur Verfügung (GL-Befehl: `glPolygonStipple`). Das Verfahren wurde bei der metaio GmbH [MET] als Test umgesetzt. Dabei konnten keine komplexeren Geometriedateien verarbeitet werden, vielmehr hat das Testsystem selbst eine primitive Geometrie erzeugt. Die Darstellungen in Abbildung 5.6 wurden durch eine Bildmontage erzeugt. Die Ergebnisse lassen sich jedoch grundsätzlich auf beliebig komplexe Objekte übertragen, da das Darstellungsergebnis unabhängig vom Weg der Erzeugung ist und sich daher gleich gestaltet.

### 5.1.6 Stereo Darstellung

Die bisherigen Visualisierungsarten zeigen die Überlagerungen nur zweidimensional. Der Eindruck von Tiefe kann hierbei lediglich durch plastische Darstellung (Schattierungen), Verdeckungen und Bewegungsparallaxen erzeugt werden. Um die Überlagerung noch realistischer zu gestalten und den Tiefeneindruck überzeugender zu visualisieren, wird eine stereoskopische Darstellung benötigt. Dabei wird für jedes Auge eine eigene Ansicht der Überlagerung generiert. Abbildung 5.7 zeigt diese Ansichten.

Die Stereodarstellung lässt sich mit den vorherigen Darstellungsarten kombinieren. Die Solid- und Wireframedarstellung gewinnen durch diese zusätzliche Tiefendimension und bieten damit eine bessere Vergleichsmöglichkeit.

---

<sup>3</sup>OpenGL (Open Graphics Library) ist eine Spezifikation für ein plattform- und programmiersprachenunabhängiges API zur Entwicklung und Steuerung von 3D-Grafiken.

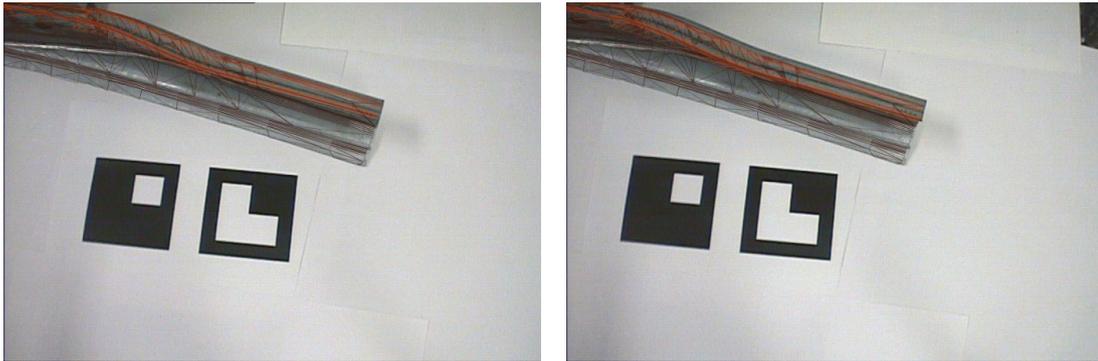


Abbildung 5.7: B-Säule in der Ansicht für linkes und rechtes Auge

Das Erkennen der Form des virtuellen Objekts in der Wireframedarstellung ist wesentlich erleichtert. Der zusätzliche Einsatz der Transparenz bei der Stereovisualisierung wird in den nächsten beiden Abschnitten erläutert.

#### Realisierung

Die Stereodarstellung wird durch zwei vollständig getrennte AR-Systeme umgesetzt. Jedes System hat eine eigene Videokamera, mit der das reale Objekt erfasst wird. Für die richtige Darstellung müssen die beiden Videokameras der Systeme richtig positioniert und ausgerichtet werden. Dazu werden die Kameras auf einem Stativ im Augenabstand des Menschen (ca. 6,5 cm) montiert und in ihren Sichtachsen auf das Objekt gerichtet. Für die Montage müssen die Kameras entsprechend kleine Abmessungen aufweisen. Das Setup wurde bereits in [NÖL] vorgestellt und hier weiter verfeinert. 5.8 zeigt den Montageaufbau der Kameras.

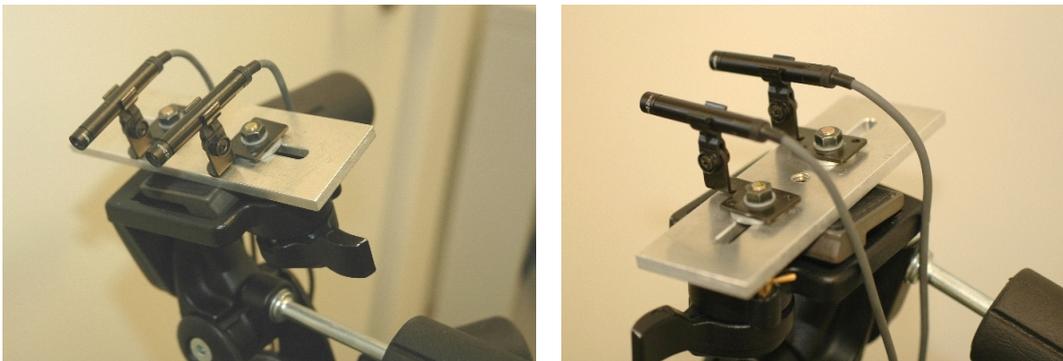


Abbildung 5.8: Montage zweier Micro-Kameras für eine Stereodarstellung

### 5.1.7 Transparente Darstellung in Stereo

Gerade hier gewinnt die Darstellung der virtuellen Objekte durch zusätzliche Tiefeninformation, da in der transparenten Darstellung durch die fehlende Schattierung die Objekte sehr platt und formlos erscheinen. Besonders die Position in der Tiefe, die das virtuelle Objekt einnimmt, wird durch die Stereodarstellung besser herausgestellt.

Weiterhin bleiben jedoch die mangelnde Staffelung und Abgrenzung der virtuellen Objektflächen bestehen. Die Objekte erscheinen immer noch als ein farblicher Überzug des realen Objekts. Eine bessere Begrenzung der virtuellen Objektflächen führt zur letzten hier untersuchten Visualisierungsart.

### 5.1.8 Wireframe-Stereodarstellung mit zusätzlichen transparenten Flächen

Diese Darstellungsart ermöglicht den qualitativ höchsten Vergleich zwischen realem und virtuellem Objekt. Durch die Wahl von transparenten Flächen für die Überlagerung des virtuellen Objekts entsteht eine gute Überblendung zwischen den Objekten, so dass sie beide zu gleichen Anteilen zu sehen sind.

Die zusätzliche Wireframedarstellung grenzt die virtuellen Objektflächen zueinander ab und ermöglicht ein gutes Erfassen der Form des virtuellen Objekts. Die Stereodarstellung erzeugt schließlich den Tiefeneindruck, mit dem das virtuelle Objekt an Plastizität gewinnt und zusätzlich eine Position in der Tiefe einnimmt.

Diese Darstellungsart vereinigt somit die Vorteile der einzelnen Darstellungskomponenten. Abbildung 5.9 zeigt die B-Säulenverstärkung in dieser Weise überlagert.

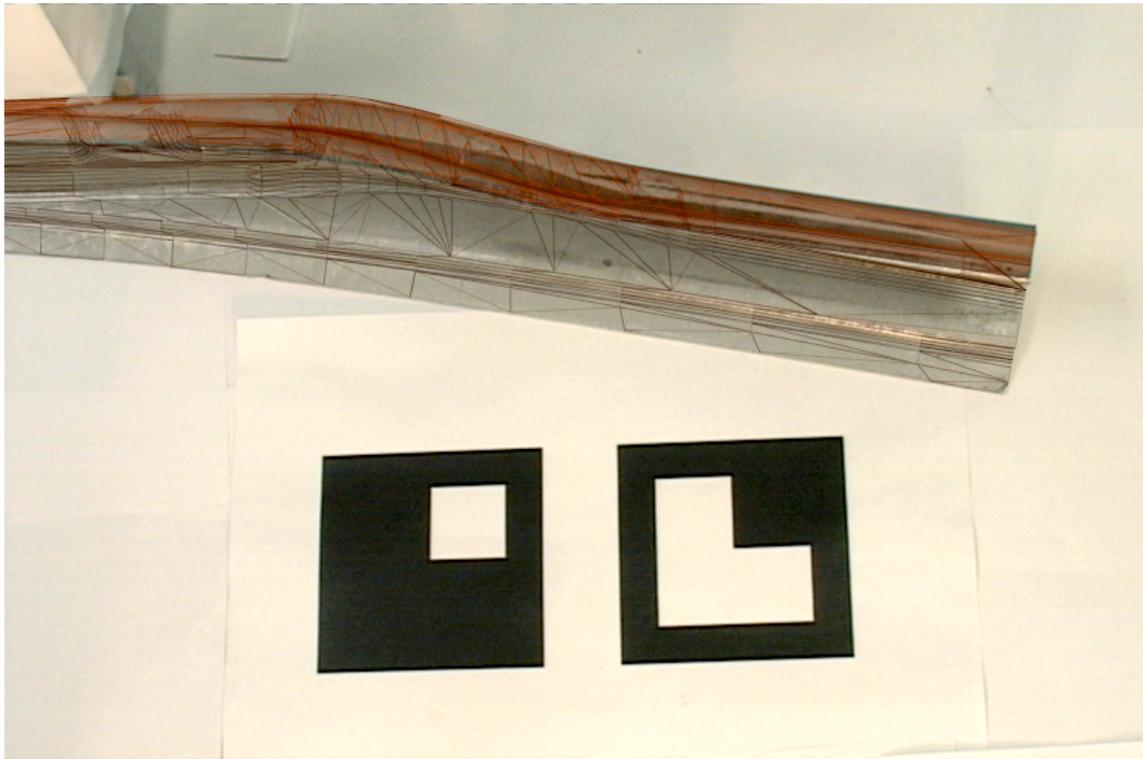


Abbildung 5.9: B-Säulenverstärkung in transparenter Wireframedarstellung kombiniert mit transparenter Soliddarstellung

### Realisierung

Je nach dem verwendeten Darstellungssystem und Renderer ist es möglich, dass der Renderer die Polygone von Vorder- und Rückseite darstellt. Dann ließen sich die Polygone von der Hinterseite als transparente Fläche und von der Vorderseite als wireframe darstellen.

Hat man keine Möglichkeit, diese Option des Renderers zu nutzen oder anzusteuern, besteht auch die Möglichkeit, die Geometriedaten zu verdoppeln. Dazu wird die Geometriedatei kopiert, und in der kopierten Datei werden alle Polygon-Beschreibungen durch Linien-Beschreibungen ausgetauscht. In der Anwendung werden dann beide Geometriedateien eingelesen und verwendet. Hierbei muss jedoch vom Renderer die doppelte Anzahl von Polygonen dargestellt werden, was die Performanz des Systems reduzieren kann.

Neben den Visualisierungsarten, die in den vorherigen Abschnitten beschrieben wurden, gibt es weitere Möglichkeiten und Hilfsmittel, den Vergleich zwischen realem und virtuellem Objekt zu unterstützen, die in den folgenden Abschnitten beleuchtet werden.

### 5.1.9 Darstellung mit Schnittebenen

Das Einbringen von Schnittebenen ermöglicht es, das virtuelle Objekt teilweise abzuschneiden oder nur in Teilen zu überlagern. Dabei wird an der Trennlinie der Schnittebene die Darstellung der virtuellen Geometrie unterbunden und stattdessen das reale Objekt gezeigt. So kann bei einer variablen Schnittebene regelrecht zwischen realen und virtuellen Objekten durchgeschnitten werden. Abbildung 5.10 zeigt eine variable Schnittebene an der Designhaube an zwei Positionen.

Da hier der Anteil der Überlagerung durch die Position der Schnittebene beeinflusst wird, eignen sich die Schnittebenen besonders für die Solid-Darstellung der virtuellen Objekte.



Abbildung 5.10: Überlagerte Designhaube mit variabler Schnittebene

### 5.1.10 Verdeckungsobjekte

Ohne Stereodarstellung ist es schwierig, das virtuelle Objekt einer Tiefenposition zuzuordnen. Besonders bei einer realen Szene, in der die realen Objekte in der Tiefe einer komplexen Staffelung unterliegen, ist keine Einschätzung für den Anwender möglich. Dieser Effekt wird zusätzlich durch das stetige Überlagern der virtuellen Objekte verstärkt. Genauer: Die Überlagerung wird immer überdeckend in den Vordergrund gezeichnet, auch wenn von der Tiefe her die dortigen realen Objekte das virtuelle überdecken müssten.

Idealerweise sollten auch die realen Objekte virtuelle Objekte überlagern können, falls sie entsprechend hinter den realen Objekten liegen. Da aus einem einzelnen Videobild der realen Szene keine Tiefeninformation extrahiert werden kann, müssen extra Objekte definiert werden, die die virtuellen Objekte in der Überlagerung wieder verdecken. Solche Verdeckungsobjekte werden auch als "Ghostobjects" bezeichnet. Dabei dürfen die Verdeckungsobjekte selbst kein Erscheinungsbild haben, sondern müssen bei einer Überdeckung der virtuellen Objekte quasi die reale Szene im Hintergrund wieder sichtbar machen.

Abbildung 5.11 zeigt auf der rechten Seite die reale Designhaube mit Ölstab und die fehlerhafte Überlagerung eines virtuellen Objekts ohne Verdeckungsobjekt. Der reale Ölmesstab ist nicht zu sehen. Auf der linken Seite von Abbildung 5.11 ist zum Vergleich die rein reale Designhaube mit eingeführtem Ölstab zu sehen.



Abbildung 5.11: Designhaube ohne Verdeckungsobjekt

Wird das Verdeckungsobjekt eingebracht, lässt sich der reale Ölmesstab deutlich in der virtuellen Abdeckung erkennen. Zur besseren Anschauung zeigt Abbildung 5.12 den Ölmesstab aus einer weiteren Perspektive.

Bei dem beschriebenen Vorgehen der Verdeckungsobjekte, wird das Verdeckungsobjekt wie ein virtuelles Objekt behandelt. Lediglich die Art der Darstellung unterscheidet sich.

Die Verdeckungsobjekte müssen als vollständige, dreidimensionale Geometriebeschreibung vorliegen. Folglich bedeutet der Einsatz von Verdeckungsobjekten, dass die Beschreibung und Position der realen Objekte, die virtuelle überdecken könnten, genau bekannt sein müssen.



Abbildung 5.12: Designhaube mit Verdeckungsobjekt

Diese Information steht nicht bei jeder möglichen Anwendung zur Verfügung; somit ist das Einbringen von Verdeckungsobjekten nur in speziellen Fällen von Anwendungen möglich, etwa wenn die reale Szene genau bekannt ist und sich während der Zeit der Anwendung nicht verändert.

Ähnlich wie bei dem Einsatz von Schnittebenen können auch variable bzw. bewegliche Verdeckungsobjekte verwendet werden. In der Abbildung 5.13 wird ein Würfel aus Papier mit der Kantenlänge von 10cm über die Designhaube bewegt.



Abbildung 5.13: Designhaube mit einem bewegten Papierwürfel als Verdeckungsobjekt

### Realisierung

Verdeckungsobjekte können nicht mit Standardtechniken gängiger Renderer dargestellt werden. Die Umsetzung kann unterschiedlich erfolgen. In der Regel kommt ein "Multi-pass-Rendering" zum Einsatz. Zuerst werden alle Verdeckungsgeometrien nur in den Tiefenpuffer (Z-Buffer) gerendert, ohne die Pixel der Ausgabe mit Farbwerten zu versehen. Danach werden in einem weiteren Durchgang des Renderers alle übrigen Geometrien dargestellt. Durch die bereits gesetzten Werte im Tiefenpuffer ergeben sich automatisch die gewünschten Verdeckungen.

## 5.2 Beleuchtungseinflüsse

Die Anwendungen in dieser Arbeit dienen hauptsächlich zum Abgleich von realen Objekten mit ihren virtuellen Pendanten. In einigen Fällen von Anwendungen, wie beim augmentierten Meisterbock (siehe Abschnitt 2.1.5, Seite 15), ist die Analyse von Fugen und Kanten an Karosseriekomponenten erwünscht. Da die Karosseriekomponenten keine scharfkantigen Abgrenzungen haben, sondern immer mit entsprechenden Abrundungen bzw. Fugenradien produziert werden, ergeben sich an den Fugen keine klar abgegrenzten Reflexionen des Lichtes. Salopp gesagt, läuft der Lichtwurf etwas an der Kante entlang. Die Effekte, die dadurch entstehen können, sind durchaus für den Analyseprozess der Komponenten der Karosserie relevant und werden im Folgenden vorgestellt.

### 5.2.1 Beleuchtung der virtuellen Objekte

Die heutige Graphik-Hardware benutzt ein vereinfachtes Verfahren, um Beleuchtung und Schattierungen nachzubilden. Wie auch in [FOL] beschrieben, werden die virtuellen Objekte überwiegend nach dem so genannten Gouraud-Verfahren eingefärbt. Dieses Verfahren produziert weiche Farbübergänge und kann starke, punktuelle Lichtreflexionen ("Glanzlichter") nicht darstellen. Um diese Effekte nachzubilden zu können, wäre ein Phong- oder ein Ray Tracing Verfahren nötig. Diese Verfahren sind jedoch derzeit auf einem einzelnen Rechnersystem noch zu rechenintensiv.

Die Beleuchtung und Schattierung der virtuellen Objekte lässt sich beliebig konfigurieren. In der Regel werden die Art und der Ort der Lichtquellen definiert, die die virtuelle Szene beleuchten. Idealerweise sollten die virtuellen Lichtquellen möglichst so gestaltet und positioniert werden, wie die Lichtverhältnisse in der realen Umgebung vorzufinden sind.

Weichen die Lichtverhältnisse der virtuellen Szene stark von den Begebenheiten der realen Szene ab, so ergeben sich Effekte in der Schattierung und Farbgebung, die die Ergebnisse aus der Anwendung verändern können. Dazu ein Beispiel eines Fugenverlaufs am augmentierten Meisterbock.

Abbildung 5.14 zeigt den Fugenverlauf zwischen Kotflügel und Beifahrertür an einem Fahrzeug. Die grüne linke Fläche zeigt dabei die Beifahrertür, die virtuell augmentiert ist. Die rechte bräunliche Fläche zeigt den realen Kotflügel.

Im obersten Viertel der Abbildung 5.14 zeigt sich in der augmentierten Beifahrertür neben der Fuge noch der horizontale Verlauf einer Kante. Der reale Kotflügel wird von oben beleuchtet, was durch die helle Farbgebung oberhalb der Kante sowie die untere, eher dunklere Färbung bestätigt wird.

Die Flächen der virtuellen Seitentür sind dagegen oberhalb der Kante deutlich dunkler als unterhalb der Kante eingefärbt. Dies deutet auf eine frontale, aus Blickrichtung kommende Beleuchtung hin. Auf den ersten Blick scheint die Analyse, wie die Bauteile zueinander liegen, nicht durch die Unterschiede in der Beleuchtung beeinträchtigt zu sein, weil nur eine unterschiedliche Farbgebung zu erkennen ist.

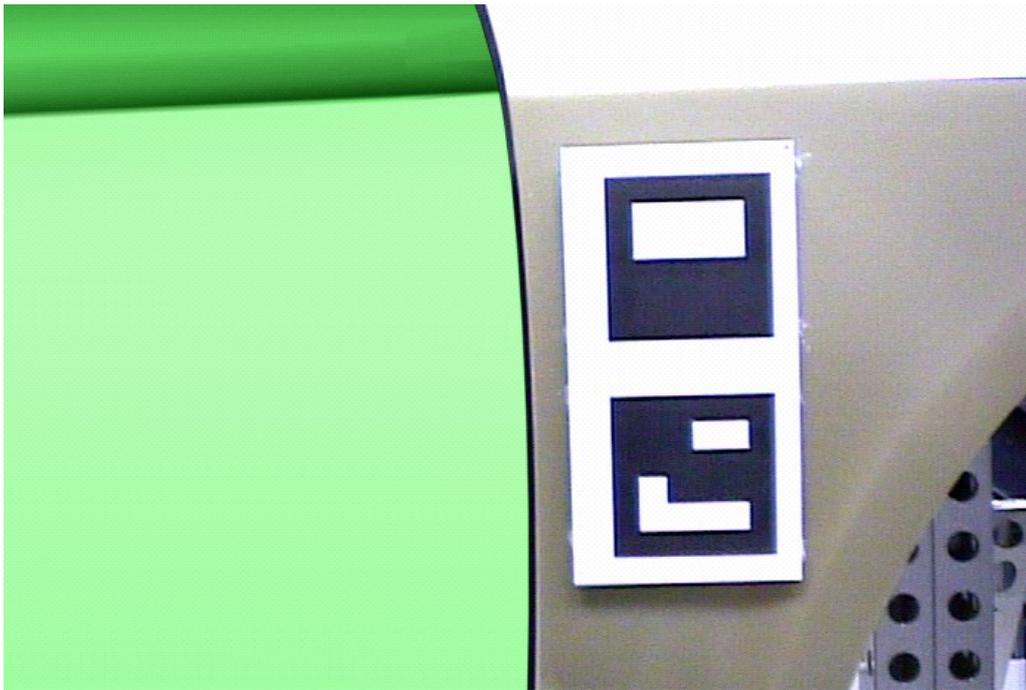
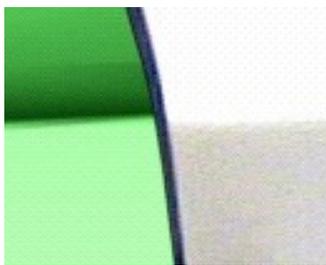


Abbildung 5.14: Realer Kotflügel mit augmentierter, virtueller Beifahrertür



Beim Betrachten des oberen Kantenverlaufs fällt jedoch auf, dass die linke, virtuelle Kante scheinbar etwas höher liegt als die reale. Im rechts vergrößertem Ausschnitt lässt sich dies erkennen. Ein wahrscheinliches Ergebnis des Analyseprozesses dieser Anwendung wäre somit, dass die Kante am realen Kotflügel zu tief ausgeformt ist und das Herstellungswerkzeug (bzw. die Presse) eine entsprechende Anpassung benötigen würde.

Mit derselben Anwendung einschließlich desselben, realen Kotflügels wird nun die Perspektive geändert und der Fugenverlauf aus einer anderen - mehr von oben - Blickposition betrachtet. Da die virtuelle Beleuchtung an die reale Blickrichtung gekoppelt ist, wird nun die virtuelle Szene, ähnlich der realen Beleuchtungssituation, mehr von oben beleuchtet. Die Farbgebung der virtuellen und realen Flächen wirkt nahezu identisch. Oberhalb des gerade analysierten Kantenverlaufs ist die Färbung beim realen Kotflügel sowie bei der virtuellen Seitentür deutlich heller, wie Abbildung 5.15 zeigt.



Wird der Kantenverlauf abermals in der Vergrößerung betrachtet, so scheint nun die Höhe der Kante der virtuellen Seitentür exakt mit der Höhe der Kante beim realen Kotflügel überein zu stimmen. Die Analyse dieser Anwendung würde somit ergeben, dass die Formgebung des realen Kotflügels hinsichtlich dieses Kantenverlaufs passgenau ist. Da hier die Beleuchtungssituation zwischen real und virtuell nahezu gleich ist, wird dieses Analyseergebnis als zutreffend bewertet.



Abbildung 5.15: Realer Kotflügel mit augmentierter, virtueller Beifahrertür (andere Perspektive)

Zusammenfassend können folglich unterschiedliche Konfigurationen in der Beleuchtung zu unterschiedlichen Rückschlüssen in der Formgebung bzw. in der Erscheinung einer Form in ein und derselben Anwendung führen. Sollen verlässliche Aussagen gemacht werden, muss somit stets darauf geachtet werden, dass die virtuelle Beleuchtungssituation entsprechend der realen angepasst ist.

Trotz einer entsprechenden Anpassung der virtuellen Beleuchtung können noch weitere Effekte gerade bei der Beleuchtungssituation der realen Objekte entstehen, die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

### 5.2.2 Beleuchtung der realen Objekte

In der Anwendung des augmentierten Meisterbocks geht es primär um die Analyse der Form und Kanten- bzw. Fugenverläufe eines realen Bauteils. Da diese Analyse rein optisch vollzogen wird, ist es entscheidend, wie gut sich die Flächen und Kanten der Form von der Umgebung abheben.

Gerade bei gekrümmten Flächen, die seitlich betrachtet werden, ist die Abschätzung der Formoberfläche nicht immer eindeutig gegeben. Auf der folgenden Abbildung 5.16 ist von der Seite ein realer Kotflügel im vorderen Bereich um die Scheinwerfer zu sehen.



Abbildung 5.16: Frontpartie eines realen Kotflügels



Abbildung 5.17: Frontpartie des Kotflügels mit überlagerten Anbauteilen

Oberhalb des Kotflügels ist ein Anbauteil aus Aluminium, das einen Teil der Motorhaube darstellen soll. Dieses Anbauteil erzeugt einen starken Lichtreflex, mit dessen Hilfe man augenscheinlich die Form des dunklen Kotflügels zum hellen Anbauteil abgrenzen kann. Werden nun die Anbauteile (einschließlich der Motorhaube) augmentiert, ist der Kotflügel anscheinend an der linken Seite in der Angrenzung zur Motorhaube zu niedrig geraten. Es entsteht ein kleiner Spalt (siehe Abbildung 5.17), der in Abbildung 5.18 nochmal vergrößert dargestellt wird.



Abbildung 5.18: Spalt am Kotflügels im linken Bereich (beleuchtet)

Selbst in der Vergrößerung ist nun nicht eindeutig zu erkennen, ob der helle Spalt das Anbauteil aus Aluminium im Hintergrund darstellt und somit der Kotflügel zu niedrig geformt ist, oder ob evtl. der glatte Lack des Kotflügels das helle Anbauteil nur reflektiert und damit in seiner Form noch passend ist.

Um die Formgebung am Spalt besser beurteilen zu können, wird das Anbauteil aus Aluminium mit dunklem Stoff abgedeckt. Die helle Reflektion des Anbauteils wird somit verhindert - auch zu sehen in der nächsten linken Abbildung 5.19. In der Augmentierung ist folglich ein dunkler Spalt entstanden, zu sehen in der rechten Hälfte von Abbildung 5.19.



Abbildung 5.19: Frontpartie des Kotflügels - mit und ohne Überlagerung

In der Vergrößerung des Spaltes lässt sich in Abbildung 5.20 am Verlauf von Schlieren im Lack und an dem dortigen Farbübergang erkennen, dass der Kotflügel direkt an die Kante der überlagerten Motorhaube angrenzt und somit von der Formgebung passgenau ist.



Abbildung 5.20: Spalt am Kotflügel im linken Bereich (unbeleuchtet)

Die folgenden Abbildungen 5.21 und 5.22 verdeutlichen diesen Effekt. Hier soll die Abgrenzung des Kotflügels zur A-Säule analysiert werden. Das nächste Bild zeigt erneut eine helle Reflexion am Kantenverlauf zur A-Säule und Motorhaube, wodurch die Abgrenzung der Form des Kotflügels nicht sicher bestimmt werden kann.

In der Abbildung 5.21 ist zusätzlich zu erkennen, dass die Beleuchtungsverhältnisse zwischen dem realen und dem virtuellen Objekt bereits angeglichen wurden, zu erkennen an den dünnen Lichtreflexen auf dem unteren Kantenverlauf.

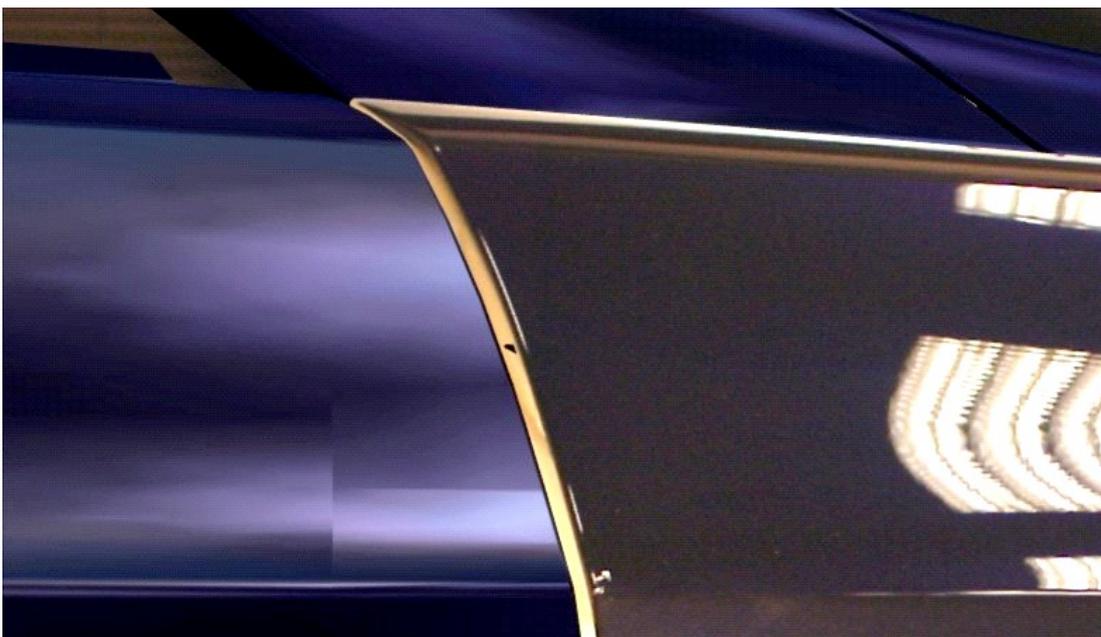


Abbildung 5.21: Abgrenzung des Kotflügels zur A-Säule (beleuchtet)

Werden die hellen Reflektionen auf dem Lack des Kotflügels im Bereich der A-Säule eliminiert, so ergibt sich in Abbildung 5.22 erneut die Situation, dass der Kotflügel passgenau an die A-Säule grenzt.

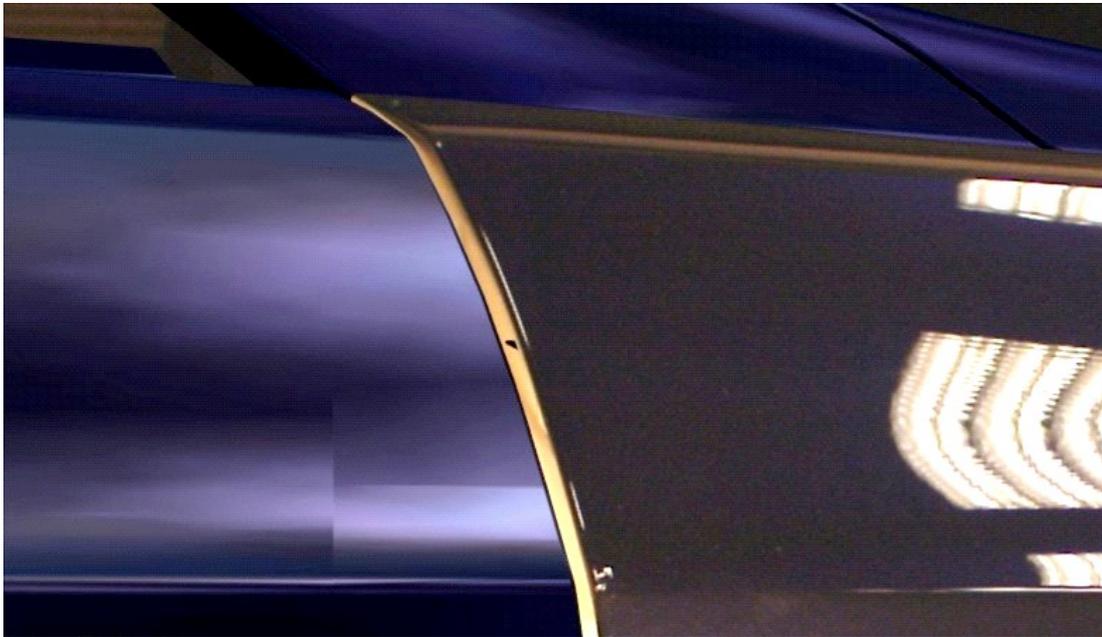


Abbildung 5.22: Abgrenzung des Kotflügels zur A-Säule (unbeleuchtet)

Zusammenfassend ist deutlich geworden, dass die virtuelle und reale Beleuchtungssituation entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse einer Analyse mit Hilfe einer AR-Anwendung hat. Sollen reale Objekte mit virtuellen verglichen oder in Zusammenhang gebracht werden, so haben die Effekte der Beleuchtung Auswirkung auf Qualität und Quantität.

Um unerwünschte Effekte möglichst zu reduzieren, sollte zuerst die reale Beleuchtung für den aktuellen Anwendungsfall optimiert und bei einer Analyse von Objekten mit stark reflektierender Oberfläche eine gleichmäßige Ausleuchtung angestrebt werden. Danach ist die virtuelle Beleuchtungssituation soweit wie möglich der realen Beleuchtung anzupassen.

## 5.3 Ausgabe der Darstellung

### 5.3.1 Monitor und Projektionswand

Augmented Reality-Anwendungen werden typischerweise mit einem HMD realisiert [AZU, KAT]. Dies ist u. a. auch auf die frühen Arbeiten von Sutherland [SUT] zurückzuführen, der maßgeblich an der HMD Entwicklung beteiligt war. In der Regel wird dabei die Sicht des Anwenders bzw. das HMD getrackt. Diese Anwendungen sind jedoch nur für einen einzelnen Anwender gedacht. Es kann dieser die Überlagerung nur allein sehen.

Bei der Überlagerung von virtuellen Objekten zu ihren realen Pendanten hat sich gezeigt, dass es von Vorteil ist, wenn mehrere Anwender die Augmentierung gleichzeitig sehen können, um vor Ort die Erkenntnisse an der Überlagerung zu diskutieren oder an weitere, fachübergreifende Personen zu kommunizieren [NÖL].

Dies kann besonders bei einer Monodarstellung durch die Darstellung auf einem Monitor oder einer Projektionswand realisiert werden. Zusätzlich ermöglicht der Einsatz eines Monitors die Augmentierung in einer höheren Auflösung darzustellen als ein HMD dies anzeigen könnte - ein erheblicher Vorteil, wenn hochauflösende Videokameras verwendet werden. Es können mehr Details in der Überlagerung wiedergegeben werden. Ist die Auflösung der Videokamera nicht bildfüllend kann der verbleibende Bereich des Bildschirms für Zusatzinformationen oder Symbole zur Interaktion genutzt werden. Auch aus Sicht der Ergonomie bei einer zeitlich längeren Dauer der Anwendung ist eine Projektionswand zu bevorzugen.

### 5.3.2 Stereodarstellung in einem HMD

Wird die Überlagerung in Stereo dargestellt, so ist die Auswahl der Anzeigemedien begrenzt. Da mittlerweile einige HMDs in Stereo verfügbar sind, wird der überwiegende Teil der Augmented Reality Stereo-Anwendungen mit diesen HMDs realisiert. Diese Form der Darstellung ist nur für eine Person zugänglich. Weiterhin ist die Qualität des Stereo- bzw. Tiefeneindrucks bei der Verwendung eines HMDs deutlich schlechter als bei hochwertigen Stereo-Projektionssystemen. Zusätzlich störend bei dieser Art von HMDs ist das derzeit noch kleine Field of View (FOV), das für einen Vergleich der zu überlagernden Objekte hinderlich ist (Stichwort Tunnelblick).

### 5.3.3 Stereodarstellung auf einer Projektionswand

Analog zu einer Monodarstellung lässt sich auch die Stereodarstellung auf einer - dafür ausgelegten - Projektionswand visualisieren. Bei einer passiven Stereoprojektion wird mit Hilfe von zwei Beamern für jedes Auge die richtige Ansicht projiziert. An den Beamern sind Polarisationsfilter angebracht, die das Licht in unterschiedliche Richtungen polarisieren [3DI]. Der Anwender selbst trägt eine Brille mit polarisierten Filtergläsern, um die projizierten Bilder der Beamer auf das linke und rechte Auge entsprechend aufteilen.

Auch hier haben mehrere Anwender die Möglichkeit, die Überlagerung gleichzeitig zu sehen und zu analysieren. Für Vergleiche zwischen realen und virtuellen Objekten anhand einer Überlagerung kann somit die Stereoprojektionswand als geeignetes Visualisierungsmedium angesehen werden [NÖL].

Bisher ist die Visualisierung mittels einer Projektionswand stark örtlich gebunden, HMD-Systeme sind dagegen durch ihre Mobilität überall einsetzbar. Mittlerweile werden auch mobile Stereoprojektionssysteme angeboten, die in kurzer Zeit an einem beliebigen Ort aufgebaut werden können [3DI]. Damit lässt sich auch mit Projektionswänden teilweise der Bereich von mobilen Augmented Reality-Anwendungen abdecken. Beispielsweise kann in einer Produktionshalle ein System auf Abruf stehen, das dann zu den jeweiligen Stationen gebracht wird.

## 5.4 Anwenderbericht

Die Darstellungsarten der Überlagerung aus Abschnitt 5.1 dieses Kapitels wurden einigen Anwendern vorgestellt, um die geeignete Form der Darstellung in der AR-Anwendung umzusetzen. Die Bewertung der Darstellungsarten folgt hier in Form einer anekdotischen Berichterstattung der Anwender.

Die auf dem ersten Blick ungeeignete Soliddarstellung stieß durch die Kombination mit anderen Darstellungsarten auf Zustimmung. Dabei wurde einerseits die Soliddarstellung entlang einer Hauptachse schrittweise abgeschnitten; die Anwender achteten etwa auf den Unterschied zwischen realem und virtuellem Objekt, der sich besonders am Schnittrand vergleichen lässt. Oder das überlagerte Objekt wurde andererseits mittels eines stetigen und fließenden Wechsels des Transparenzwertes zwischen Soliddarstellung und einer vollständigen Unsichtbarkeit ein- und ausgeblendet. Der Vergleich konnte hier durch die noch präsente Erinnerung an das reale Objekt vollzogen werden.

Die Wireframedarstellung zeigte sich nur bei einfach gestalteten Objekten im Sinne einer kleinen Polygonanzahl geeignet. Diese Darstellung lässt insbesondere einen Vergleich der Objektkontur zu, da in der Überlagerung der Rand eines Objektes durch feine Linien dargestellt wird. Bei komplexen Objekten, die sich aus einer großen Anzahl von Polygonen zusammensetzen, ergibt sich im Innern der Objekte eine Vielzahl von Linien, die das Objekt zunehmend unkenntlich machen und den Anwender beim Vergleich der Objekte behindern.

Die transparente Darstellung findet allgemein größeren Anklang bei den Anwendern, da hier am Besten die Idee des formtreuen Überblendens zwischen realen und virtuellen Objekten erreicht werden kann, solange Objekte mit größeren und gleichmäßigen Flächen augmentiert werden. Die Einbußen in der Präsenz von Schattierungen und die somit recht flächig wirkende Darstellung erschweren das Erkennen der Tiefe einer Fläche. Besonders bei komplexeren Objekten können in der Tiefe verschachtelte Flächen nicht mehr visuell getrennt werden.

Um das Manko zu beheben, wurde die Wireframedarstellung gemischt mit transparenten Flächen vorgestellt. Laut den Anwendern beinhaltet diese Darstellungsart viel Potential, um reale Objekte ihren virtuellen Pendanten formtreu zu überlagern. Die Stärke der Transparenz muss dabei exakt eingestellt und für jede Anwendung experimentell ermittelt werden.

Wird diese gemischte Darstellungsart noch zusätzlich mit einer Stereodarstellung kombiniert, kann durch den zusätzlich gewonnenen Tiefeneindruck der Darstellung die Plastizität der augmentierten Objekte deutlich erhöht werden. Alle Anwender hielten diese Darstellungsart für am besten geeignet, um einen Vergleich zwischen realen und virtuellen Objekten mittels einer formtreuen Überlagerung durchzuführen. Unglücklicherweise lässt sich die Augmentierung in Stereo bei den meisten Anwendern nicht durchführen, da neben den zusätzlichen Justagen zwischen den beiden Videokameras wenig Infrastruktur für eine Stereodarstellung (z.B. Projektionswand) vor Ort ist.

Der Einsatz von Verdeckungsobjekten wird von den Anwendern vorausgesetzt. Der Zugewinn an Realismus bei der Vermischung realer und virtueller Objekte wird von den Anwendern begrüßt. Besonders in komplexen Umgebungen (z.B. Motorraum) kann ohne Einsatz von Verdeckungsobjekten keine sinnvolle Überlagerung erreicht werden.

Die verbleibenden Darstellungsarten spielten für die Anwender eine untergeordnete Rolle. Die Shutterdarstellung missfiel durch das starke Flimmern. Die Schachbrettdarstellung konnte nicht in Echtzeit präsentiert werden. Die Anwender sprachen jedoch dieser Darstellungsart eine bessere Visualisierung der Plastizität der Objekte gegenüber der transparenten Darstellung zu.

## 5.5 Zusammenfassung

Für die formtreue Überlagerung eines realen Objekts mit seinem virtuellen Pendant wird eine spezielle Form der Darstellung benötigt. Dieses Kapitel nahm sich dieser Fragestellung an. Eine Vielzahl von Darstellungsmethoden heutiger Grafiksysteme wurde evaluiert. Es hat sich dabei herauskristallisiert, dass eine Mischung von unterschiedlichen Darstellungsmethoden für die Frage zielführend ist. Besonders der Einsatz von transparenter Darstellung ist für das Überblenden zwischen realen und virtuellen Objekten geeignet. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Art der Darstellung für jede Anwendung unterschiedlich ausfallen und derzeit noch keine "allgemeingültige" Lösung angegeben werden kann.

Neben der geeigneten Darstellung wurden Analysen durchgeführt, inwieweit unterschiedliche Beleuchtungssituationen von realer und virtueller Umgebung sich auf die formtreue Überlagerung auswirken. Dabei wurde festgestellt, dass besonders für die Analyse und den Abgleich von Kanten und Rändern der Objekte die reale und die virtuelle Beleuchtung möglichst ähnlich zu gestalten sind. Die visuelle Erscheinung von realem und virtuellem Objekt sollte allgemein möglichst gleich sein.

# Kapitel 6

## Interaktion

In diesem Kapitel werden zuerst die benötigten Interaktionen identifiziert. Es werden geeignete Interaktionsgeräte gewählt und die benötigten Funktionalitäten für einen Soll-/ Ist-Vergleich umgesetzt.

### 6.1 Gestaltung der Interaktion

In [BOW] werden viele Aspekte und Methoden zur Interaktion in dreidimensionalen und AR Umgebungen erörtert. Die Methoden lassen sich jedoch schwer übertragen, da die vor Ort herrschende Hard- und Software vorgegeben ist. Ziel ist somit, im Rahmen der vorhandenen Mittel eine möglichst anwenderorientierte Umsetzung zu realisieren.

#### 6.1.1 Anforderungen

Bei einem Soll-/ Ist-Vergleich besteht die wesentliche Anforderung darin, die vorhandenen Abweichungen zu lokalisieren, wenn möglich auch zu quantifizieren, und diese Informationen zu dokumentieren.

Die Funktion der Lokalisierung von Abweichungen kann durch ein Markieren der relevanten Positionen mittels Pfeilen oder Marken realisiert werden. Die Quantität einer Abweichung kann durch eine Distanzmessung zwischen Soll und Ist umgesetzt werden.

Die Interaktionsgeräte sollten entsprechend dieser Funktionen geeignet ausgewählt werden. Da der Anwender am realen Objekt arbeitet und in der Regel nicht Tastatur und Maus griffbereit vor sich hat, müssen im Weiteren die benötigten Funktionen direkt mit den Interaktionsgeräten aufgerufen und ausgeführt werden können. Da noch nicht klar ist, ob es sich um ein einzelnes Interaktionsgerät oder um mehrere Geräte handeln wird, wird erst einmal versucht, alle benötigten Funktionen durch ein einziges Interaktionsgerät zu realisieren.

Es wird somit ein Interaktionsgerät benötigt, das von seiner Formgebung her so gestaltet ist, dass sich einzelne Positionen am Objekt markieren lassen und zusätzlich Funktionen ausgewählt und aktiviert werden können. Idealerweise sollte das Interaktionsgerät kabellos sein, um möglichst viel Bewegungsfreiheit während des Markiervorgangs von Positionen zu erhalten.

### 6.1.2 Wahl der Interaktionsgeräte

Ein Interaktionsgerät, das die soeben genannten Anforderungen erfüllt, ist der kommerziell erhältliche Flystick von der A.R.T. GmbH. Um den Flystick tracken zu können, ist ein Rigid Body fest montiert. Es gibt neben einem Feuerknopf drei weitere Druckknöpfe, um Funktionen auszulösen. Für spezielle Anwendungen ist zusätzlich ein kleiner Steuerknüppel (auch Joystick genannt) vorhanden, der zur Aktivierung weiterer Funktionen dienen kann. Abbildung 6.1 zeigt den Flystick aus unterschiedlichen Ansichten.

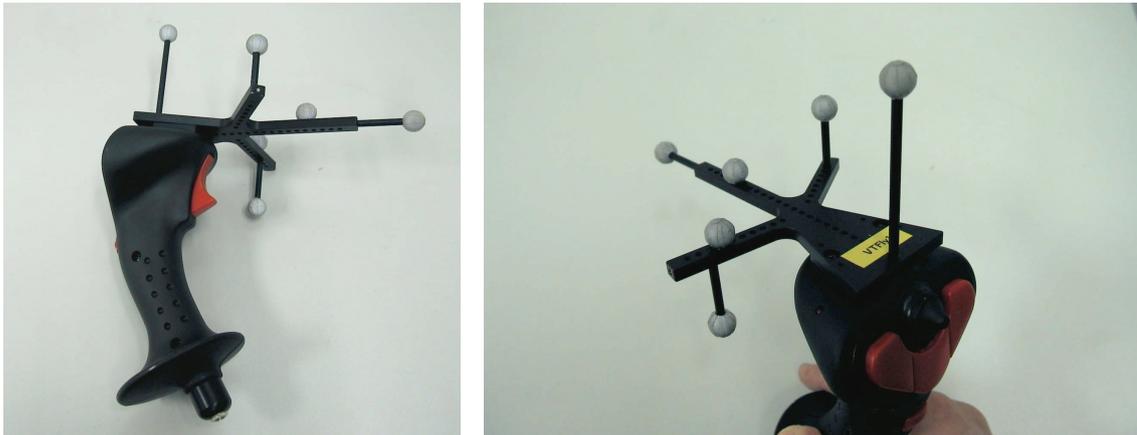


Abbildung 6.1: Flystick des A.R.T.-Systems

Im A.R.T.-System lässt sich der lokale Ursprung des Rigid Bodies des Flysticks auf die vordere, herausstehende und retroreflektierende Kugel justieren (Kugel am rechten Bildrand im linken Bild der Abbildung 6.1). Das Trackingsystem liefert so als Position des Flysticks die Position dieser retroreflektierenden Kugel. Damit ergibt sich die Möglichkeit, beliebige Punkte am Objekt anhand der Kugel zu markieren.

Beim Umgang mit dem Flystick stellt sich schnell heraus, dass dieser allein die gewünschten Anforderungen nicht erfüllen kann. Folgende Nachteile sind zu erkennen:

- Die retroreflektierende Kugel ist zu ungenau, um Positionen exakt zu markieren.
- Die retroreflektierende Kugel sowie der Flystick selbst verdecken die Sicht auf Stellen, die zu markieren sind - insbesondere wenn mehrere Markierungen eng bei einander liegen.

- Die retroreflektierende Kugel ist zu groß, um Positionen in Spalten und Fugen zu erreichen.
- Die mechanische Einwirkung auf den Flystick, die durch das Betätigen eines Druckknopfs des Flysticks entsteht, führt oft zu einem "Verreißen" der Position der retroreflektierenden Kugel.

Aus den genannten Nachteilen lassen sich unmittelbar zwei Erkenntnisse ableiten:

1. Die retroreflektierende Kugel ist zu groß, um genaue Positionen markieren zu können; die Kugel sollte möglichst klein sein - idealerweise eine Spitze, um auch Positionen in Spalten zu erreichen.
2. Der Auslöseknopf, mit dem Positionen markiert werden, sollte vom Flystick getrennt oder entkoppelt werden, um keine mechanischen Störungen zu erhalten, die durch Betätigen der Druckknöpfe des Flysticks entstehen können.

Die A.R.T. GmbH bietet neben dem Flystick auch einen Messstift an, der die Form eines Stiftes mit einer getrackten Messspitze aufweist. Die linke Hälfte von Abbildung 6.2 zeigt den Messstift.

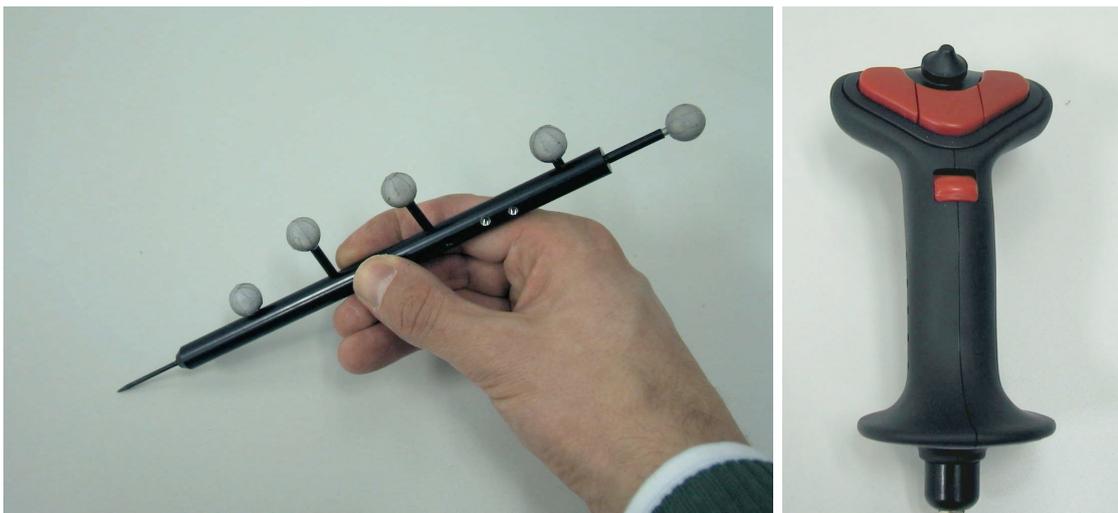


Abbildung 6.2: A.R.T.-Messstift und Flystick ohne Rigid Body

Da der Messstift keinerlei Vorrichtungen zum Aktivieren von Funktionen aufweist, muss auch weiterhin der Flystick verwendet werden, um seine Druckknöpfe zur Steuerung von Funktionen nutzen zu können. Der Rigid Body des Flysticks ist dagegen nicht mehr nötig, weil bereits der Messstift durch seine getrackte Spitze die nötigen Informationen zur Bestimmung von Positionen am Objekt zur Verfügung stellt. Damit liegen nun zwei Interaktionsgeräte vor, dessen Aufgaben klar getrennt sind: Der Flystick zur Steuerung der Funktionen und der Messstift zum genauen Markieren von Positionen.

Bei Rechtshändern hat sich die Benutzung des Messstifts in der rechten Hand bewährt - das Markieren von Positionen ist so deutlich genauer und schneller zu beherrschen.

### 6.1.3 Wahl des Interaktionsmenüs

Die Software Virtual Design 2 von der vrcom [VRC] stellt für immersive Anwendungen ein 2D-Menü zur Verfügung. Dieses Menü lässt sich auf zwei unterschiedliche Arten darstellen. Zum einen als so genanntes "Pie"-Menü (Kuchen), zum anderen als klassisches Menü mit herkömmlicher Popup-Struktur. In der linken Hälfte von Abbildung 6.3 ist das Pie-Menü, in der rechten Hälfte von Abbildung 6.3 das klassische Menü zu sehen.

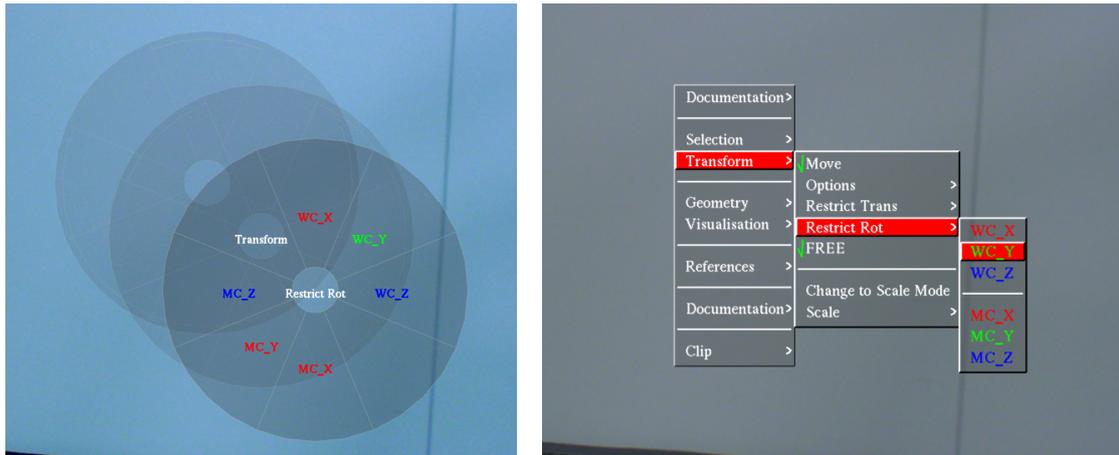


Abbildung 6.3: Menüformen

Das Menü kann über die Tastatur oder Druck auf einen vorher definierten Knopf des Flysticks geöffnet werden. Die Navigation innerhalb des Menüs kann entweder anhand eines getrackten Objekts (z.B. A.R.T.-Messstift) oder durch die Tastatur bzw. durch Druckknöpfe des Flysticks erfolgen.

Bei der Navigation anhand eines getrackten Objekts werden bei Aktivierung des Menüs relativ zur derzeitigen Position des Objektes die Bewegungen des Objektes auf den Auswahlzeiger des Menüs übertragen. Diese Art der Navigation wird im Pie-Menü verwendet. Durch die Bewegung des getrackten Objekts in einem Abschnitt des Kreises ("Kuchens") mit anschließender Knopfbetätigung am Flystick wird die Menüfunktion aufgerufen. Falls es zu der aufgerufenen Funktion ein Untermenü gibt, entsteht - wie links in Abbildung 6.3 zu sehen - ein neues Pie-Menü direkt über dem aktivierten Abschnitt des Kreises.

Da innerhalb des Kreises der Auswahlzeiger mittels des getrackten Objekts in jede beliebige Richtung bewegt werden kann, können die möglichen Funktionen in einem Kreis ohne Umwege und innerhalb von einem einzigen Schritt aktiviert werden. Mit etwas Übung lassen sich so die Funktionen des Menüs recht schnell aufrufen.

Der wesentliche Nachteil bei dieser Navigation im Menü ist die Verwendung eines getrackten Objekts zur Auswahl der Menüfunktionen. Wie im Abschnitt 6.1.2 beschrieben, steht allein der Messstift der A.R.T. GmbH als getracktes Interaktionsobjekt zur Verfügung. Da dieser Messstift verwendet wird, um relevante Positionen für Messungen und Dokumentationen zu markieren, ist es so nicht möglich, denselben Messstift für die Navigation im Menü zu verwenden.

Die zu markierende Position würde folglich umgehend durch die Navigation innerhalb des Menüs verändert werden. Damit ist diese Form der Menünavigation für die - in dieser Arbeit vorgestellten - Anwendungen ungeeignet und wird an dieser Stelle verworfen.

Soll der Messstift nicht zur Menüsteuerung verwendet werden, bleibt allein der Flystick für die Aktivierung und Navigation des 2D-Menüs. Der Flystick weist neben den Druckknöpfen einen kleinen Steuerknüppel auf. Dieser lässt sich horizontal und vertikal auslenken. Abbildung 6.4 zeigt diesen Steuerknüppel.

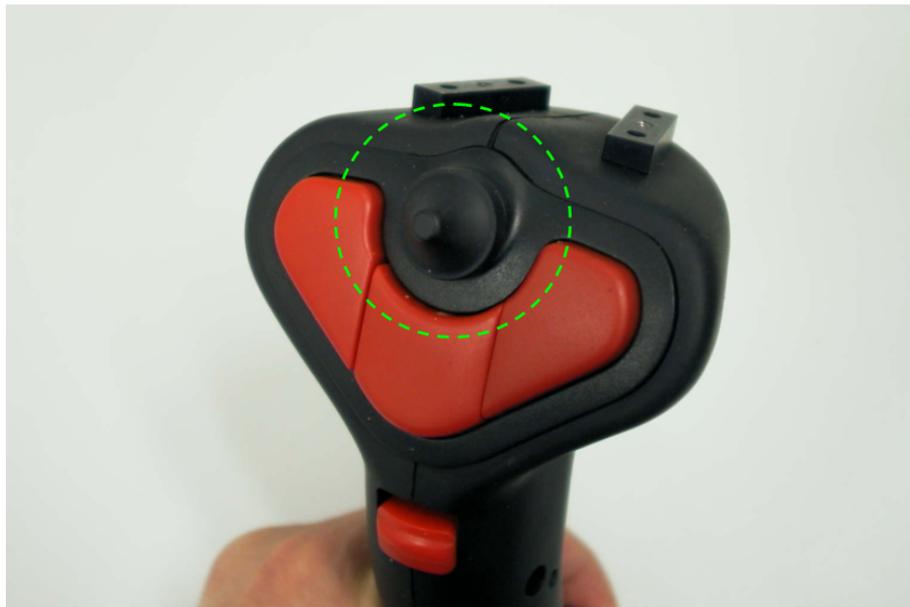


Abbildung 6.4: Steuerknüppel des Flysticks

Da über den Steuerknüppel nur vier Richtungsinformationen realisiert werden können, eignet er sich nicht unmittelbar für die Navigation im Pie-Menü aus dem vorangegangenen Abschnitt. Vielmehr ist hierfür das klassische Menü in Popup-Struktur aus der rechten Hälfte der Abbildung 6.3 geeignet.

Eine Auslenkung des Steuerknüppels in eine beliebige Richtung aktiviert das Menü. Innerhalb des Menüs kann mit dem Steuerknüppel in der vertikalen Menüleiste hoch und runter navigiert werden. Eine Auslenkung des Steuerknüppels nach rechts aktiviert die Menüfunktion oder öffnet ein Untermenü. Durch eine Auslenkung nach links wird in eine höhere Menüebene zurück verzweigt oder das 2D-Menü wieder beendet. Neben der Auslenkung nach rechts führt innerhalb des Menüs auch das Betätigen des Feuerknopfs des Flysticks zu einer Aktivierung der Menüfunktion.

Das klassische 2D-Menü in VD2 ist intuitiv bedien- und schnell beherrschbar, weil es der Menüform gängiger Betriebssysteme gleicht. Die Verzweigungstiefe des Menüs ist gering gehalten und ermöglicht dem Anwender so neben der leichten Handhabung ein schnelles Agieren. Sobald das Menü aktiviert wird, wird die Anwendung einschließlich des im Hintergrund laufenden Videobildes eingefroren, um den Anwender bei der Navigation im Menü nicht zu irritieren.

## 6.2 Messen in einer AR-Umgebung

Sind bei einem Soll-/ Ist-Vergleich, der mit Hilfe einer formtreuen Überlagerung durchgeführt wird, Abweichungen erkennbar, sollten diese idealerweise quantifiziert werden. Eine Quantifizierung von Abweichungen erfolgt typischerweise durch Messungen. **Messfunktionen** in einer AR-Umgebung sind somit die wichtigste Kerntechnologie für einen Soll-/ Ist-Vergleich mit Hilfe der Augmented Reality.

Soll in einem AR-System gemessen werden, muss vorher spezifiziert werden, zwischen welchen Objekten eine Messung stattfinden soll, und in welcher Umgebung bzw. Welt die Objekte sich befinden. Führt sich der Leser erneut das Reality-Virtuality-Continuum in Abbildung 1.1, Abschnitt 1.3 auf Seite 4 vor Augen, so wird deutlich, dass in einer AR-Umgebung prinzipiell Messungen innerhalb des gesamten Kontinuums denkbar sind. Im Wesentlichen kristallisieren sich drei prinzipielle Fälle heraus:

1. Messungen zwischen "real" und "real",
2. Messungen zwischen "virtuell" und "virtuell",
3. Messungen zwischen "real" und "virtuell".

Im Folgenden werden für diese drei Fälle Lösungsansätze für das Vorgehen bei einer Messung erörtert, wobei sich auch mehrere und unterschiedliche Vorgehensweisen ergeben können.

**Anmerkung:** Zur Vereinfachung wird hier vorausgesetzt, dass die Tessellierungsgenauigkeit der virtuellen Geometrie stets der von der Messung geforderten Genauigkeit bzw. Toleranz genügt.

### 6.2.1 Messungen zwischen realen Objekten

Das Messen zwischen realen Objekten ist ein klassisches Problem, das für sich selbst genommen keinen speziellen Bezug zu einem AR-System aufweist. Die heutigen Lösungen von Messsystemen sind vielschichtig, beliebig genau und weisen einen hohen Reifegrad auf.

Hier stellt sich vielmehr die Frage, wie sich Messungen zwischen realen Objekten in einem AR-System realisieren und insbesondere darstellen lassen. Eine Kopplung zwischen dem verwendeten Mess- und AR-System ist dazu notwendig.

Ein intuitiver Lösungsansatz benutzt daher zum Messen direkt das Trackingsystem, das verwendet wird, um Interaktionsgeräte und die Sicht des Anwenders (Videokamera) zu tracken. Die Informationen stehen dem AR-System unmittelbar zur Verfügung. Die **Messgenauigkeit** beschränkt sich somit auf die Genauigkeit des verwendeten Trackingsystems.

Um mit einem Trackingsystem Messungen durchführen zu können, muss das System einen geeigneten Sensor haben, mit dem sich Positionen zum Messen am realen Objekt kennzeichnen lassen.

Wie in Abschnitt 6.1.2 dargestellt, gibt es als Zubehör zum Trackingsystem der A.R.T. GmbH einen Messstift, der als Sensor geeignet ist (siehe links in Abbildung 6.2). Dieser Messstift ist so gestaltet, dass unabhängig von der Orientierung des Stiftes stets die Position der Spitze des Stiftes getrackt wird.

Mit diesem Stift lassen sich nun Positionen an realen Objekten markieren und umgehend im AR-System bekannt machen und darstellen. Dabei wird die Spitze des Stifts mit dem realen Objekt in Kontakt gebracht, wie in Abbildung 6.5 gezeigt. Die zu messende Position wird dann über die Betätigung eines Druckknopfes am Flystick dem AR-System übergeben.



Abbildung 6.5: Reale Messungen an einer Crashtür

Die Darstellung selbst ist wieder virtuell (z.B. ein computergeneriertes Kreuz) und wird genau an der Position überlagert, die am realen Objekt markiert wurde. Die reale Position wird somit in die virtuelle Szene übertragen. Werden auf diese Weise zwei Positionen ermittelt, so kann zwischen diesen Positionen die Distanz berechnet und angezeigt werden. Die Messung zwischen zwei realen Objekten ist somit im Rahmen der Genauigkeit des Trackingsystems realisiert und kann interaktiv während der Überlagerung in der AR-Anwendung durchgeführt werden.

### 6.2.2 Messungen zwischen virtuellen Objekten

Auch das Messen in einer rein virtuellen Umgebung ist kein Vorgang, der sich speziell auf die AR-Technik stützt; er muss jedoch hier im Zusammenhang betrachtet werden - genauso wie zuvor der rein reale Messvorgang. Das Messen zwischen virtuellen Objekten soll direkt in der AR-Anwendung realisiert werden. Dort müssen entsprechende Interaktionen implementiert werden, um Positionen an virtuellen Objekten markieren zu können.

Bietet das AR-System einen Editor an, mit dem sich die virtuellen Objekte betrachten und manipulieren lassen, so ließen sich im Editor beliebige Positionen am virtuellen Objekt markieren und zwischen diesen jeweils eine Distanz berechnen. Abbildung 6.6 zeigt in solch einem Editor einige Messungen an einem virtuellen Kotflügel.

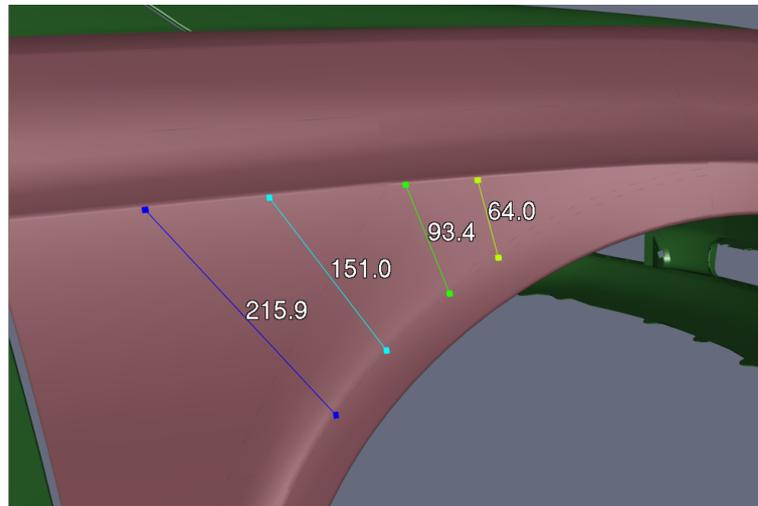


Abbildung 6.6: Virtuelle Messpunkte

Viel wünschenswerter ist es, in einem AR-System eine Interaktion zu benutzen, die ohne zusätzlichen Editor auskommt und während der Überlagerung zu handhaben ist. Das Vorgehen kann dazu ganz analog zur Messung von realen Positionen gestaltet werden. Als Eingabegerät wird wieder der Messstift der A.R.T. GmbH verwendet. Um mit dem Messstift einen Bezug zu den virtuellen Objekten herzustellen, wird der Mechanismus des Selektionsstrahls eingeführt.

#### Der Selektionsstrahl

Um mit dem realen Messstift des A.R.T.-Systems auch Positionen an und auf der virtuellen Geometrie zu markieren, gibt es den Mechanismus des Selektionsstrahls, der auch in [BOW] beschrieben wird.

Da Position und Orientierung des Messstifts bekannt sind, lässt sich aus der Spitze des Stifts ein virtueller Strahl (auch Beam genannt) "schießen". Der Strahl hat die Orientierung entlang des Stiftes und beginnt an der Stiftspitze. Genauer: In der Verlängerung des Stiftes wird ab der Spitze ein Strahl gezeichnet, der nur in der Überlagerung zu sehen ist.

Da es nicht nötig ist, den Strahl ins Unendliche reichen zu lassen, endet er entweder nach einer vorher festgelegten Distanz oder wird beim Schneiden mit einer virtuellen Geometrie zu einer Strecke. Der Schnittpunkt mit der virtuellen Geometrie kann dann als Position für die Funktionalitäten verwendet werden. Ein Beispiel zum Selektionsstrahl ist in Abbildung 6.7 zu sehen. Der Schnittpunkt wird in Form, eines kleinen Kreuzes angezeigt.

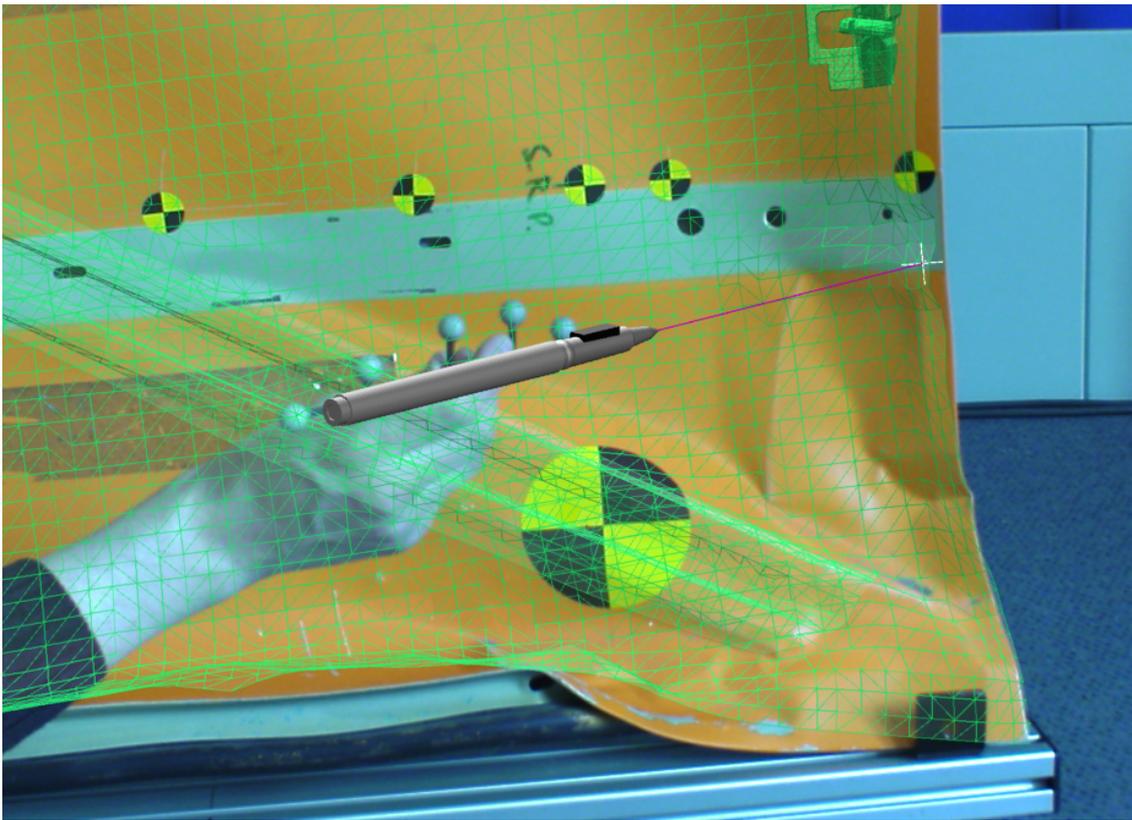


Abbildung 6.7: Selektionsstrahl mit Messstift

Wurden mit dem Selektionsstrahl zwei Positionen als Schnittpunkte festgelegt (zu sehen in Abbildung 6.8), so kann abschließend die Distanz zwischen diesen Positionen ermittelt werden.

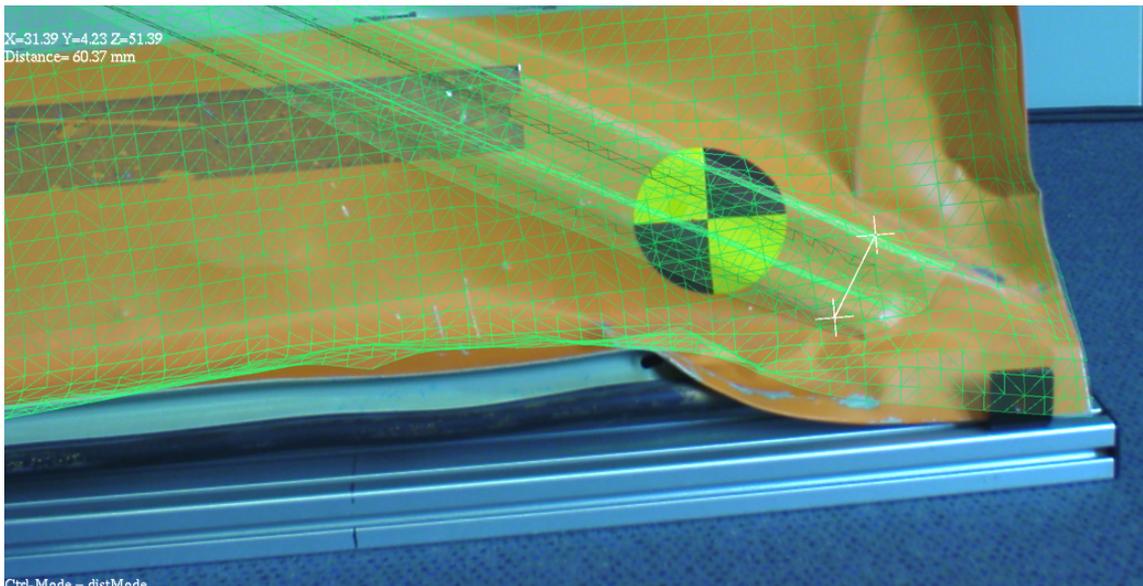


Abbildung 6.8: Strahl mit zwei markierten Schnittpunkten

### 6.2.3 Messungen zwischen realen und virtuellen Objekten

Die Messung zwischen realen und virtuellen Punkten in einer AR-Anwendung eröffnet neue Perspektiven und vielschichtige Möglichkeiten, Problemstellungen aus dem industriellen Umfeld zu lösen. Beispielsweise kann so in einem realen Motorraum ein virtuelles Bauteil eingepasst werden, ohne dass dieses Bauteil als Hardware gefertigt werden muss. Der benötigte Bauraum und verbleibende Freiräume können so frühzeitig im Produktionsprozess ermittelt werden.

Das Vorgehen für diese Form der Messung ist das konsequente Zusammenführen der oben beschriebenen Techniken aus den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 für das rein reale und das rein virtuelle Messen. Als Interaktionsgerät dient wieder der Messstift des A.R.T.-Systems. Durch direktes Antasten der Messspitze an das reale Objekt wird dem AR-System die reale Position übergeben. Die virtuelle Position wird danach durch den Schnitt des virtuellen Selektionsstrahls aus der Messspitze an der virtuellen Geometrie ermittelt.

Die Distanz zwischen beiden Messpunkten wird anschließend berechnet. Es wird somit die Distanz (oder der Abstand) zwischen einem realen und einem virtuellen Objekt bezogen auf die Messpunkte bestimmt. Abbildung 6.9 zeigt die Distanzmessung zwischen realer und virtueller Kante an einer gecrashten Fahrzeugtür.

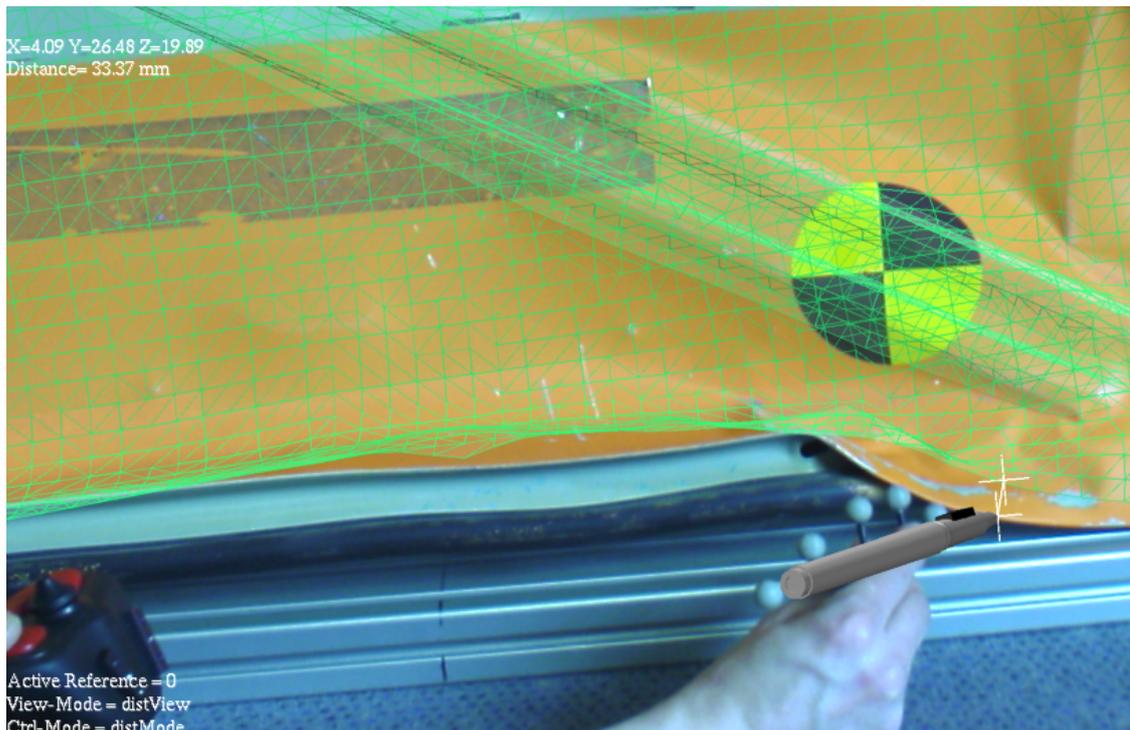


Abbildung 6.9: AR-Distanzmessung zwischen realem und virtuellem Objekt

**Anmerkung:** Es werden zwar beide Positionen virtuell angezeigt, jedoch ist die reale Position unmittelbar durch das Antasten am realen Bauteil ermittelt worden und ist folglich nicht virtuellen Ursprungs.

Bei Messungen an Spalten und Fugen sowie bei Bauraummessungen stößt der Interaktionsmechanismus mit dem virtuellen Selektionsstrahl an Grenzen bezüglich der Genauigkeit. Durch den langen Hebel, der sich durch den Strahl und die damit einhergehende Verlängerung des Stifts ergibt, ist das genaue Treffen bzw. Bestimmen der Schnittpunkte am virtuellen Objekt erschwert.

Da im System eine komplette Beschreibung des virtuellen Objekts hinterlegt ist, lässt sich eine Methode entwickeln, die von einer real markierten Position aus die kürzeste Verbindung zu einem gewählten, virtuellen Objekt ermittelt. Insbesondere am Randbereich von Flächen ist es mit dieser Methode möglich, eine Position exakt am Rand einer Fläche zu erhalten. In der Abbildung 6.10 wurde von einem vorher markierten Punkt die kürzeste Verbindung zum linken Fugenrand ermittelt.

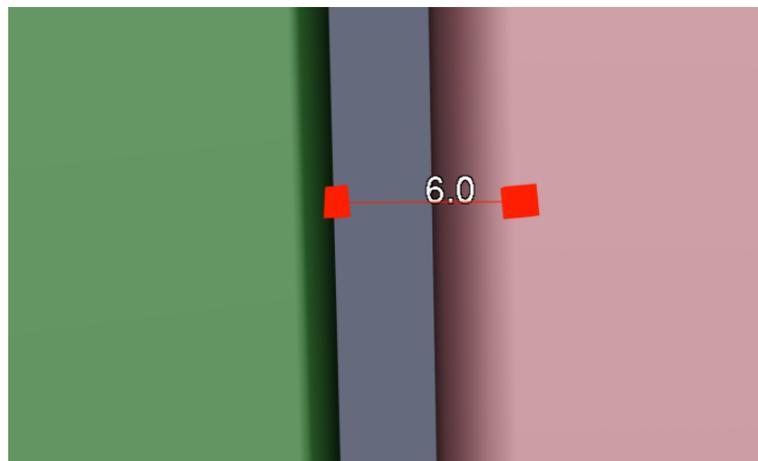


Abbildung 6.10: Fugenpunkt

Die bisherige Methode zur Messung liefert lediglich Distanzen und Abstände zwischen realen und virtuellen Positionen an Objekten. Für Untersuchungen im Bauraum oder an Spalten ist dies ausreichend. Soll jedoch ein virtuelles Objekt mit seinem realen Pendant verglichen werden, wie dies z.B. bei der Analyse von Crashsimulationen nötig ist, so spielt auch die Orientierung der Objekte eine relevante Rolle. Genauer: Das virtuelle Objekt kann im Vergleich zum realen Objekt leicht verdreht sein. Dies wird bei einer Distanzmessung zwischen zwei Punkten nicht berücksichtigt. Um auch die Unterschiede in der Orientierung zu messen, ist folgende Methode denkbar:

Das virtuelle Objekt wird in der virtuellen Welt mittels eines 6 DOF Eingabegerätes bewegt. Dies kann beispielsweise eine Spacemouse sein. Das Objekt wird mit der Spacemouse so lange verschoben und rotiert, bis es mit dem realen Objekt eine möglichst exakte, formtreue Überdeckung bildet. Die Transformationsmatrix, die entstanden ist, um das virtuelle Objekt an der neuen Position darzustellen, kann in eine Translationskomponente und in eine Rotationskomponente zerlegt werden. Die Rotationskomponente kann, bezogen auf die Achsen des virtuellen Weltkoordinatensystems, in entsprechende Gradwerte umgerechnet werden. Die Translationskomponente entspricht der Distanz.

## 6.3 Funktionalitäten

Neben den Messfunktionalitäten aus Abschnitt 6.2 benötigt der Anwender noch eine Reihe weiterer Funktionalitäten, um Abweichungen zu dokumentieren oder Änderungen an der Überlagerung vorzunehmen. Folgend werden alle Funktionalitäten des AR-Systems dargestellt, das in Abschnitt 7.1.1 des nächsten Kapitels beschrieben wird. Die Funktionen werden mittels des Flysticks und des in Abschnitt 6.1.3 beschriebenen 2D-Menüs gewählt und ausgeführt.

Im Rahmen des ARVIKA Projekts [ARV, AV04] sind die Funktionalitäten entwickelt worden. Mittlerweile sind die hier beschriebenen Funktionalitäten bei der vrcom im Produkt "Virtual Design 2" kommerziell verfügbar.

### 6.3.1 Darstellungsart der Augmentierung

Ausgehend von den Erläuterungen aus Abschnitt 5.1 sollte der Anwender zwischen unterschiedlichen Darstellungarten wählen können. Zur Verfügung stehen:

- Wireframedarstellung,
- schattierte Darstellung (Gouraud Shading),
- Transparente Darstellung, wobei der Grad der Durchsichtigkeit zwischen 30%, 50% und 75% gewählt werden kann.

Der Anwender hat zusätzlich die Möglichkeit, beliebige Flächen, Komponenten oder Teilobjekte der überlagerten Szene aus- und einzublenden. Die zu ändernde Geometrie wird mit dem Selektionsstrahl aus Abschnitt 6.2.2 markiert.

### 6.3.2 Dokumentation durch Generierung von Polygonen

Für den Anwender ist es gelegentlich notwendig, erkannte Abweichungen in ein Konstruktionsprogramm zu übernehmen. Dort können die Abweichungen evaluiert oder weiterverarbeitet werden. Dies lässt sich durch die Dokumentation von Abweichungen in Form von generierten Polygonen realisieren. Hierzu wird mit dem Messstift durch Abtasten von vier Punkten am realen Objekt ein Polygonzug in Form eines Rechtecks gezeichnet. Aus mehreren Rechtecken lassen sich auch kleinere Flächen darstellen.

### 6.3.3 Dokumentation von Markierungspunkten

Will der Anwender nur auf markante Stellen des Soll-/ Ist-Vergleichs hinweisen, bietet sich das Setzen von kleinen Markierungen in Form von Pfeilen an. Das Setzen von Markierungen wird im so genannten "Marker-Modus" durchgeführt, der mit dem Selektionsstrahl aus Abschnitt 6.2.2 arbeitet. Am Schnittpunkt von Strahl und Geometrie kann nun ein beliebiger Punkt markiert werden.

Die textuelle Dokumentation zu den Markierungspunkten erfolgt nach der AR-Anwendung, da während der Überlagerung die Benutzung einer Tastatur an einem separaten Monitor vom Anwender als störend empfunden wird. Die gesetzten Marken werden automatisch durchnummeriert. Rechts in der Abbildung 6.11 sind drei Markierungspunkte zu erkennen.

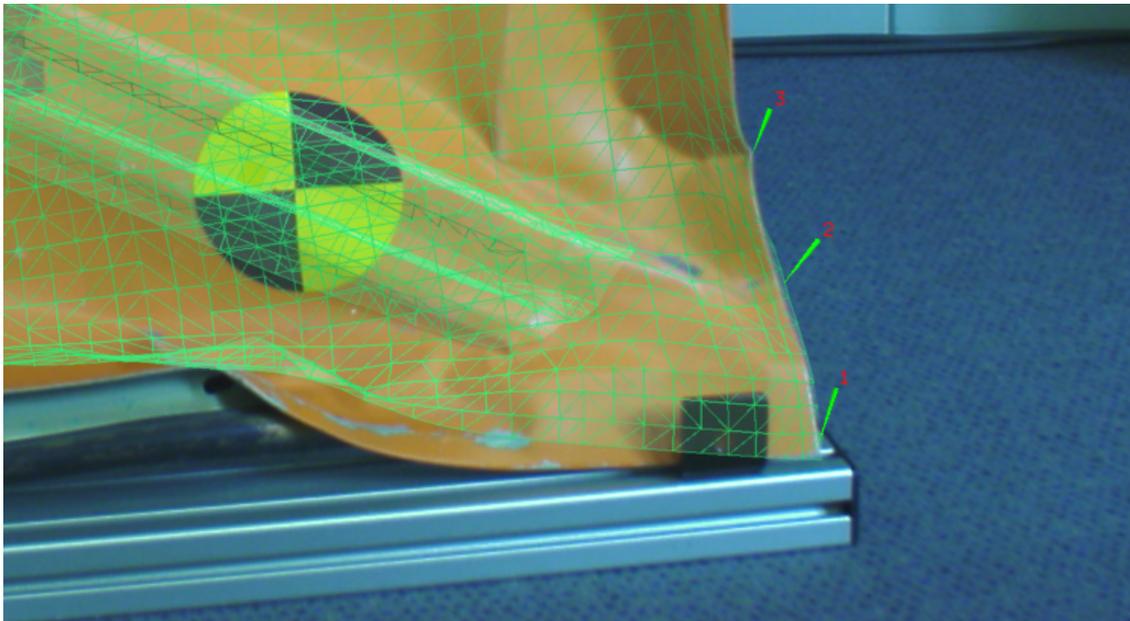


Abbildung 6.11: Markierungspunkte zur Dokumentation

Innerhalb des Marker-Modus kann zusätzlich die Quelle für die Position der Markierung geändert werden. Neben der Positionierung mittels des Selektionsstrahls kann auch eine Positionierung direkt an der getrackten Spitze des Messstifts erfolgen. Es ergibt sich somit ein virtueller Marker an einer realen (getrackten) Position. Dabei wird die Position unmittelbar aus dem Trackingsystem übernommen und dort ein Markierungspunkt erzeugt. So erzeugte Markierungen sind nur in der Überlagerung sinnvoll, da sie in der rein virtuellen Szene quasi ohne Bezug in der Luft schweben.

### 6.3.4 Dokumentation von Abweichungen mittels Distanzmessungen

Basierend auf der Methode in Abschnitt 6.2.3 lassen sich mit dem Messstift zwei Messpunkte setzen, die beliebig real oder virtuell sein können. Zwischen diesen lässt sich die Abweichung als einfacher Betrag des Differenzvektors (z.B. in mm) ermitteln und zusammen mit den Positionen der Messpunkte dokumentieren.

Die Dokumentation des Abstandes bei einer Distanzmessung erfolgt automatisch direkt als Textanzeige in der Augmentierung. Abhängig von der Farbgebung und Beleuchtung der umgebenden Szene ist die Anzeige unterschiedlich gut zu erkennen. Daher sind der Schrifttyp, die Farbe und die Position des angezeigten Textes beliebig konfigurierbar und im Vorfeld festzulegen.

Links oben in der Abbildung 6.9, die eine Distanzmessung zwischen realem und virtuellem Objekt zeigt, lässt sich die ermittelte Distanz ablesen.

Ein Meßpunkt am realen Fahrzeug wird durch direktes Berühren des Stifts am Objekt vorgegeben und durch das Drücken eines Knopfes am Flystick bestätigt. Beim virtuellen Fahrzeug wird aus der Stiftspitze ein Strahl erzeugt, der die virtuelle Geometrie schneidet. Analog wird durch eine Interaktion per Knopfdruck der Schnittpunkt bestätigt.

### 6.3.5 Wahl verschiedener Referenzpositionen

Ausgehend von den Erläuterungen zur Registrierung von FEM-Simulationsdaten in Abschnitt 4.3.3.2 kann bei zu starken Verformungen die formtreue Überlagerung nicht zufriedenstellend ermöglicht werden. Die interaktive Methode aus Abschnitt 4.3.3.3 wurde als zusätzliche Alternative zur Registrierung erörtert. Weiterhin wünscht der Anwender nur verschiedene Komponenten oder Baugruppen exakt zu überlagern und diese interaktiv als Referenz für aktuelle Messungen zu benutzen.

Eine Referenz wird durch das Bewegen des virtuellen Objekts an eine vom Anwender bestimmte Position über die Spacemouse oder den Messstift festgelegt. Um die freie Navigation zu erleichtern bzw. dem Anwender erst zu ermöglichen, können beliebige Bewegungsachsen bezüglich Translation und Rotation des Objekts gesperrt werden.

Es lassen sich mehrere Referenzen bestimmen, abspeichern und danach zwischen diesen wahlweise wechseln. Alle Dokumentationen beziehen sich stets auf die aktuelle Referenz. Aus den dokumentierten Referenzen kann anhand der zu einer Referenz korrespondierenden Transformationsmatrix eine Abweichung in Form einer Translation- und Rotationsangabe ermittelt werden.

### 6.3.6 Erstellung von Snapshots

Der Anwender möchte neben den möglichen Dokumentationen mittels Messungen und Markierungen die überlagerte Darstellung in Form eines Bildes dokumentieren. Durch die Verwendung eines AR-Systems nach dem video-see-through Prinzip lassen sich jederzeit von der augmentierten Darstellung so genannte Snapshots erzeugen.

Die Snapshots werden aus dem 2D-Menü heraus getätigt. Dabei wird erst das Menü ausgeblendet und danach die augmentierte Sicht (ohne Menü) als Bitmap in einem vorher definierten Pfad gespeichert. Bei mehrfachen Snapshots werden die Dateinamen durchnummeriert.

## 6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Fragestellung bearbeitet, wie der Anwender Abweichungen, die er bei der formtreuen Überlagerung erkannt hat, quantitativ bewerten und dokumentieren kann. Neben der Möglichkeit, Abweichungen zu markieren oder Snapshots zu erstellen, ist insbesondere die Funktionalität einer Distanzmessung notwendig. Um die Funktionalitäten zu realisieren, wurden im Rahmen der zur Verfügung stehenden Mittel Interaktionsgeräte und -metaphern ausgewählt, die eine Steuerung der Funktionen und Messungen ermöglichen.

Die Möglichkeit einer Distanzmessung wurde in rein realen, rein virtuellen und in real-virtuell gemischten Umgebungen realisiert. Reale Positionen werden mit einem getrackten Messstift markiert. Um Positionen am virtuellen Objekt zu markieren, wurde der Mechanismus eines Selektionsstahls umgesetzt.

Abschließend wurden alle Funktionen des AR-Systems motiviert und erläutert.

# Kapitel 7

## Anwendungsbeispiele

Dieses Kapitel beinhaltet einige konkrete Anwendungen für Soll-/ Ist-Vergleiche, die mit Hilfe der formtreuen Überlagerung realisiert wurden. Die in den vorangegangenen Kapiteln entwickelten Methoden kommen hier zum Einsatz und zeigen somit die Umsetzung von AR als Vergleichswerkzeug.

### 7.1 Aufbau der AR-Systeme

In diesem Abschnitt wird folgend der grundsätzliche Aufbau der beiden AR-Setups mit ihren jeweiligen Komponenten erläutert.

#### 7.1.1 Komponenten des AR-Systems basierend auf dem A.R.T.-System

Das AR-System, das mit dem Trackingsystem der A.R.T. GmbH umgesetzt wurde, besteht aus den Komponenten:

- Optisches Trackingsystem der A.R.T. GmbH,
- Wahlweise hochauflösende IEEE1394 Videokamera (Abbildung 7.2 auf Seite 118) oder PAL-Micro-Kamera (Abbildung 5.8 auf Seite 86),
- Monitor oder Projektionswand,
- Die Interaktionsgeräte aus dem Abschnitt 6.1.2,
- PC-System mit entsprechender AR-Software.

Im Folgenden wird jede dieser Systemkomponenten im Detail erklärt:

### *Das Trackingsystem der A.R.T. GmbH*

Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen, werden 4-6 Trackingkameras beim A.R.T.-System verwendet. Die Kameras werden entweder an den Eckpunkten eines rechteckigen Rahmens montiert oder unter der Decke eines VR-Studios befestigt. Die Höhe der Kameras beträgt etwa 2,5 - 3,5m, damit sich die Anwender unterhalb der Trackingkameras frei bewegen können. Ein typischer Aufbau ist in Abbildung 7.1 zu sehen.

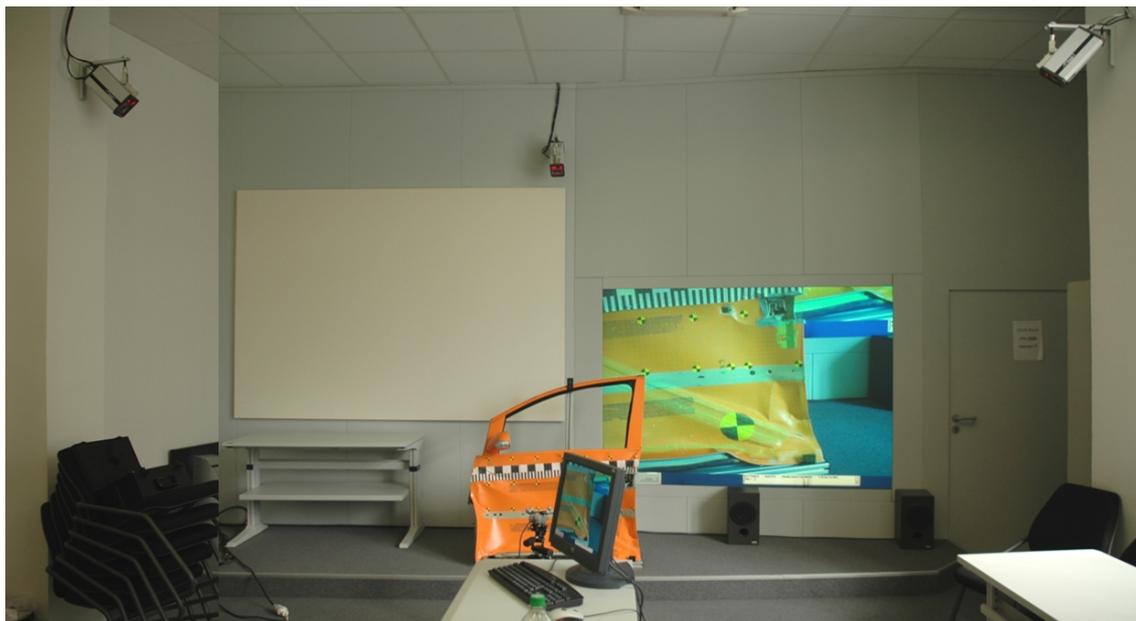


Abbildung 7.1: Aufbau des A.R.T.-Systems

### *Hochauflösende IEEE1394 Videokamera*

Bei den Analysen mit Hilfe der AR-Technologie hat sich gezeigt, dass die Auflösung einer Web- oder PAL-Kamera nicht ausreichend ist, um insbesondere Flächenkanten und Fugenverläufe zu beurteilen. Neben einem Grundrauschen der Kamera stören zusätzlich Aliasing-Effekte die zu beurteilenden Flächenkanten. Aus diesem Grunde kommt eine höherauflösende Industriekamera zum Einsatz. Ein Modell mit einer Auflösung von  $1280 \times 960$  Bildpunkten ist die Sony DFW-SX910 (siehe [SNY]).

Die Kamera wird über der standardisierten IEEE1394 Schnittstelle betrieben (auch als Firewire oder i-Link bekannt). Die Kamera verfügt über einen C-mount Gewindeanschluss für Objektive und wird hier mit einem Objektiv mit 8mm Brennweite verwendet. Die Schärfen- und Blendeneinstellung werden manuell justiert; es gibt somit keinen Autofokus, was entscheidend für den Einsatz einer Korrektur optisch bedingter Verzerrungen ist.

Abbildung 7.2 zeigt die Kamera, bereits mit einem montierten Rigid Body des A.R.T.-Systems. Der Rigid Body ist entsprechend groß, um die im Kapitel 4.2.3.1 erläuterte Rotationsgenauigkeit zu erreichen.



Abbildung 7.2: Sony Videokamera mit montiertem Rigid Body

Die Kamera wird typischerweise auf einem Stativ betrieben. Diese Vorgehensweise hat sich in der Anwendung bewährt. Der Anwender kann mit dem Stativ beliebige Betrachterpositionen einnehmen. Während die Kamera mit dem Stativ steht, ergibt sich durch den festen Stand nahezu kein "Jittering" oder "Swimming" in der Überlagerung.

#### *Monitor und Projektionswand*

Aufgrund der Erfahrungen von [NÖL] und der Erläuterungen im Abschnitt 5.3, wird das Ergebnis der Überlagerung auf einem Monitor oder einer Projektionswand ausgegeben. Der Monitor wird in Nähe des zu augmentierenden Objekts aufgestellt und sollte bei der Interaktion am realen Objekt entsprechend einsehbar sein.

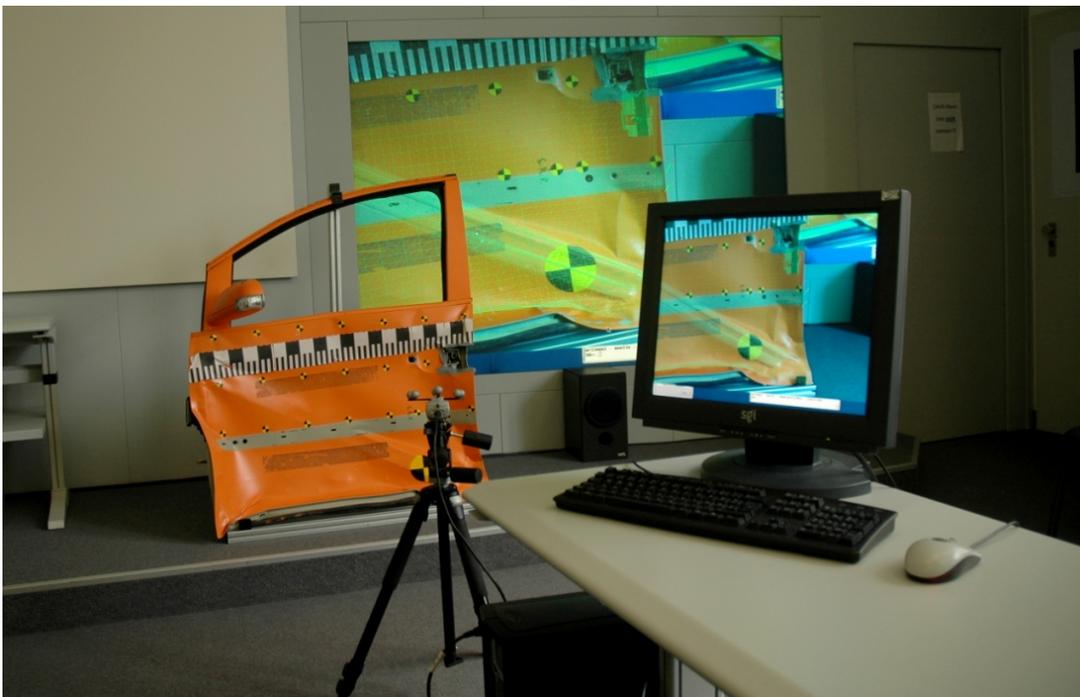


Abbildung 7.3: Aufbau mit Monitor und Projektionswand

Bei der Verwendung einer Projektionswand wird die Anwendung mit dem zu augmentierenden Objekt etwas seitlich versetzt vor der Projektionswand aufgebaut. Oft ist jedoch die Position bereits durch ein fest installiertes A.R.T.-System vorgegeben, das sich in der Regel vor der Wand befindet. Der Aufbau mit einem Monitor sowie mit einer Projektionswand ist in der Abbildung 7.1 und 7.3 zu sehen.

### *Interaktionsgeräte*

Entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 6.1.2 wird für die AR-Anwendung ein getrackter Messstift des A.R.T.-Systems verwendet. Zur Steuerung des Menüs und der Funktionen kommt ein ungetrackter Flystick des A.R.T.-Systems zum Einsatz.

### *PC-System mit AR-Software*

Für die Anwendung kommt ein handelsüblicher PC mit hochwertiger Grafikkarte zum Einsatz, etwa ein P4-System mit 3.2 GHz, 2 GB RAM und einer Nvidia FX4000 Grafikkarte. Das Betriebssystem ist Linux, Red Hat, Version WS3. Die AR-Software "Virtual Design 2" ist komplett kommerziell und stammt von der vrcom GmbH [VRC].

## **7.1.2 Komponenten des AR-Systems basierend auf dem VBT**

Das aus dem Leitprojekt ARVIKA entstandene Basissystem repräsentiert das AR-System mit dem Vision Based Tracking:

- eine Micro-Kamera in PAL-Auflösung (siehe Abbildung 5.8 auf Seite 86),
- Videograbberkarte für S-VHS Videosignale (z.B. [HAU]),
- Monitor oder Projektionswand (analog zu Abbildung 7.3),
- PC-System mit ARVIKA Basissoftware [AV04] (Der PC ist analog zum Setup in Abschnitt 7.1.1 zu wählen).

Die Beschreibungen zu den Komponenten können hier aus den Beschreibungen im Abschnitt 7.1.1 abgeleitet werden.

## **7.2 Anwendungsbeispiele für CAD-Überlagerungen**

In diesem Abschnitt werden Beispiele von Anwendungen mit formtreuen Überlagerung von Konstruktionsdaten beschrieben.

### 7.2.1 Überlagerungen im Motorraum

Vergleichbar mit der Vielzahl unterschiedlicher Fahrzeugmodelle eines Herstellers in der Automobilindustrie ergibt sich eine hohe Anzahl von Variationen eines Bauteils im Motorraum. Folgend wird die formtreue Überlagerung eines Ausgleichsbehälters für Kühlwasser und einer so genannten "E-Box" illustriert.

In Abbildung 7.4 ist dem realen Behälter seine virtuelle Konstruktionsvorgabe in Form einer grünlichen Wireframedarstellung formtreu überlagert.

Es ist sofort ersichtlich, dass das reale Bauteil einen veralterten Konstruktionsstand zeigt. Das grünliche Anbauteil links oben am virtuellen Behälter ist real nicht vorhanden. Weiterhin ist auch die Position des Bauteils nicht stimmig. Dies liegt an dem improvisierten, rechten Halter, mit dem der Behälter befestigt ist.

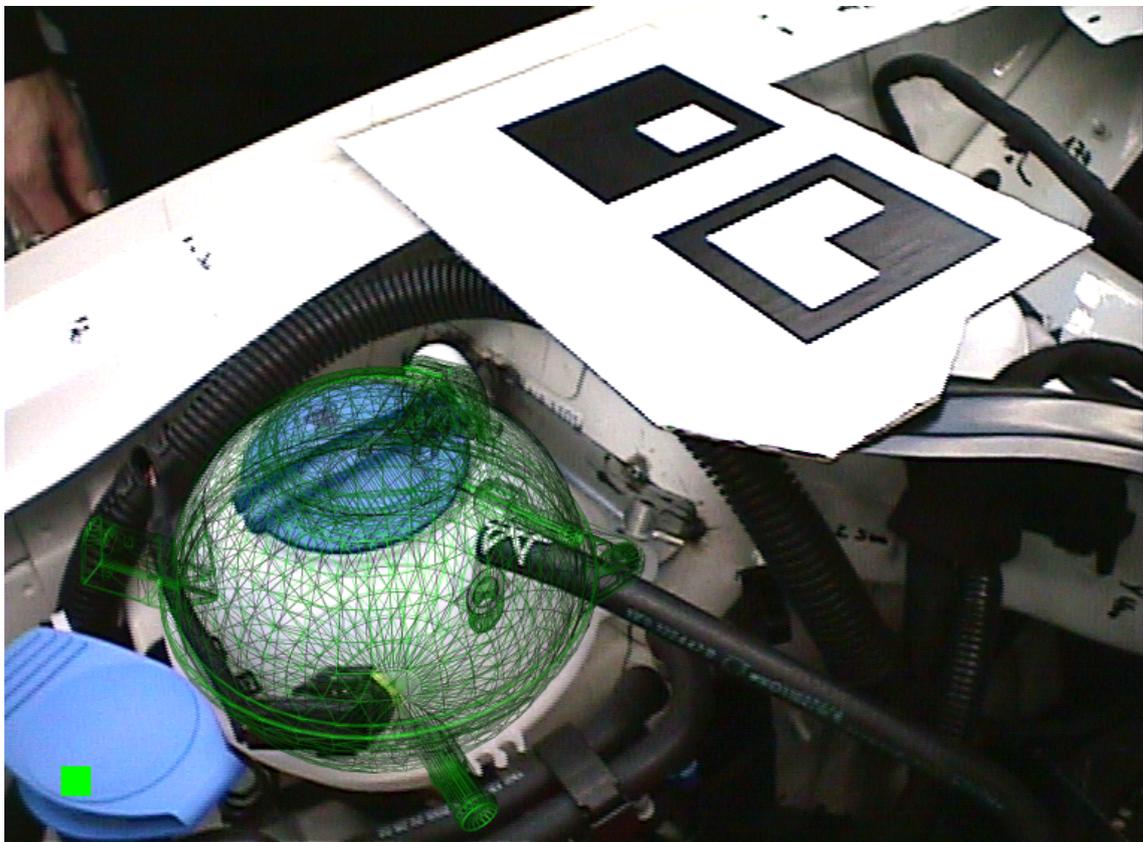


Abbildung 7.4: Augmentierter Ausgleichsbehälter im Motorraum

Die nächste Abbildung 7.5 zeigt die Positionierung einer E-Box neben der Starterbatterie; hier wurde eine transparente Darstellung gewählt.

Hier ist klar zu erkennen, dass die virtuell vorgegebene Konstruktionslage des Bauteils zu hoch ist. Rechts ragt die E-Box in der Höhe über den Rand der Karosserie hinaus. Dies ist eine der wenigen Ergebnisse eines Soll-/ Ist-Vergleichs, bei dem angezeigt ist, die virtuelle Konstruktionsvorgabe zu ändern.

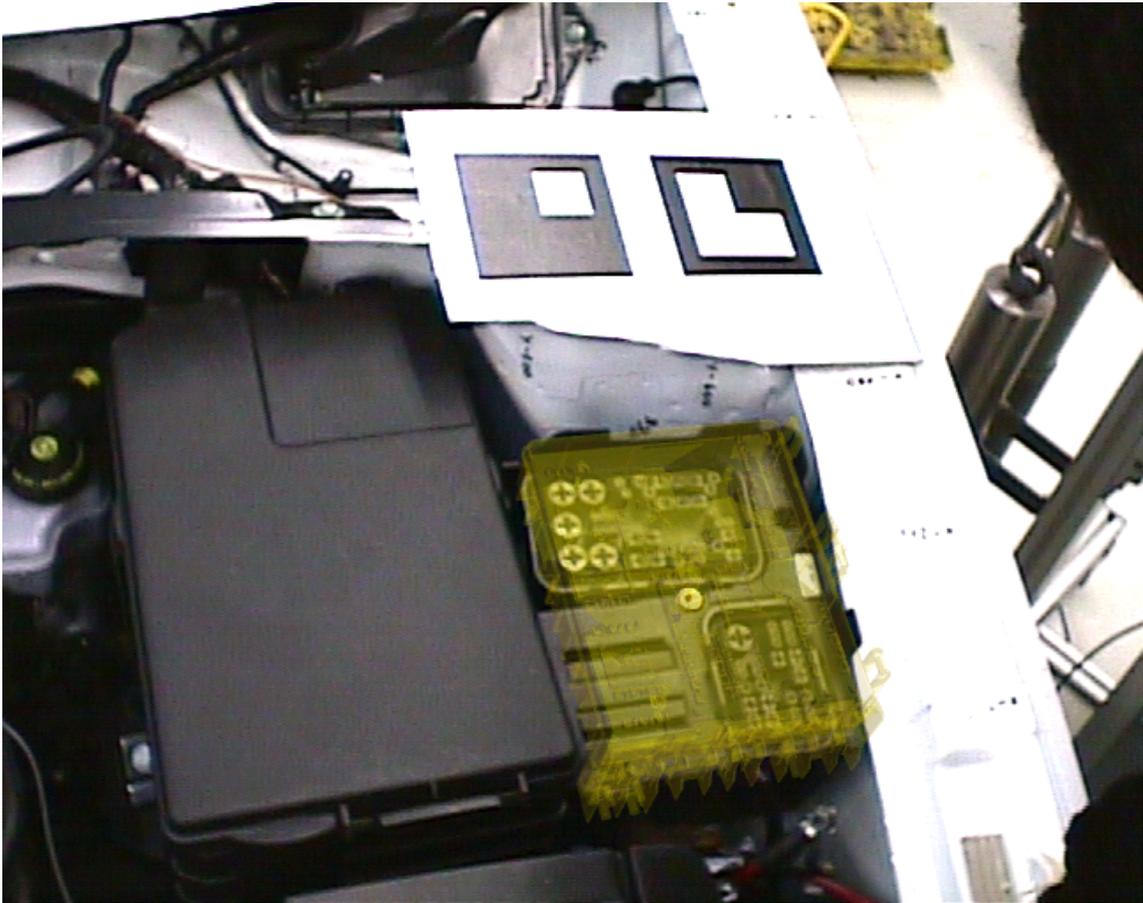


Abbildung 7.5: Augmentierte E-Box im Motorraum

## 7.2.2 Überlagerung von Verschlauchungen

Flexible Bauteile, wie Schläuche aus Gummi, nehmen im eingebauten Zustand oft eine andere Position ein als ihre gedachte Konstruktionslage. Mittels einer formtreuen Überlagerung kann geprüft werden, wie weit sich ein Schlauch von seiner Sollage entfernt hat und evtl. durch die Lageänderung unerwünschten Spannungen und Kräfteeinwirkungen ausgesetzt ist.

In Abbildung 7.6 ist die Augmentierung eines Schlauchkomplexes aus zwei Schläuchen zu sehen, die in Soliddarstellung überlagert wurden. Deutlich ist die gute Registrierung zu erkennen, da die Enden der Schläuche exakt in ihren korrespondierenden Anschlussstellen stecken.

In der Mitte des Bildes lässt sich feststellen, dass das Verbindungsstück zwischen den beiden Schläuchen verdreht ist. Dies weist auf das Auftreten einer Verspannung durch Kräfte am Schlauch hin.

Einen weiteren Schlauch, der von seiner Sollposition abweicht, zeigt Abbildung 7.7. Im rechtesten Bild ist zu erkennen, wie der Anwender versucht, den Schlauch in die richtige Konstruktionslage zu korrigieren. Die Abweichung stellt jedoch keinerlei Problem dar.

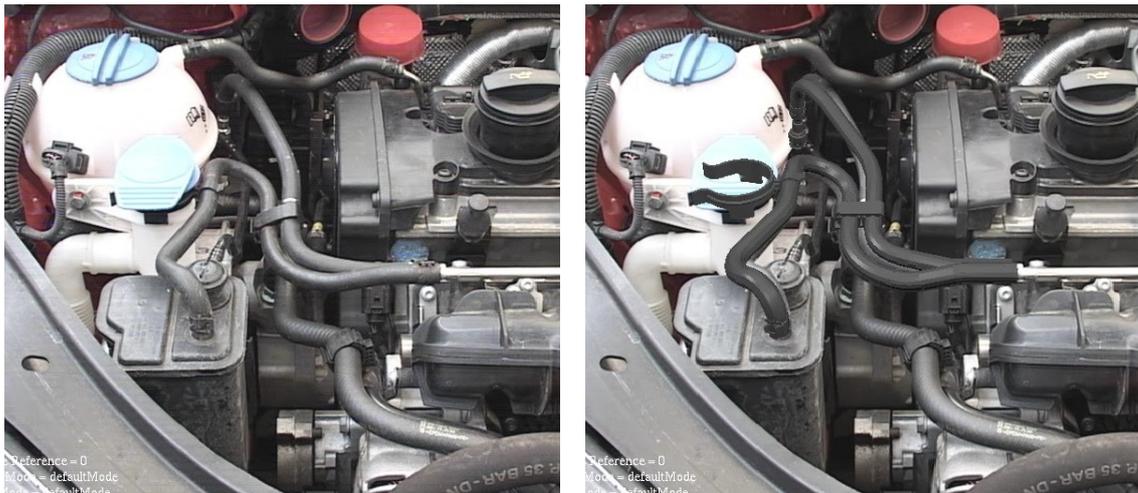


Abbildung 7.6: Augmentierter Schlauchkomplex im Motorraum

Zusätzlich ist in Abbildung 7.7 gut zu erkennen, wie notwendig die Darstellung von Verdeckungsobjekten ist. Der Schlauch wird links von einem realen Schlauch teilweise überdeckt. Im oberen Bereich legt sich der Schlauch hinter den Motorteilen. Somit erscheint der virtuelle Schlauch für den Anwender auch in der richtigen Tiefenposition.

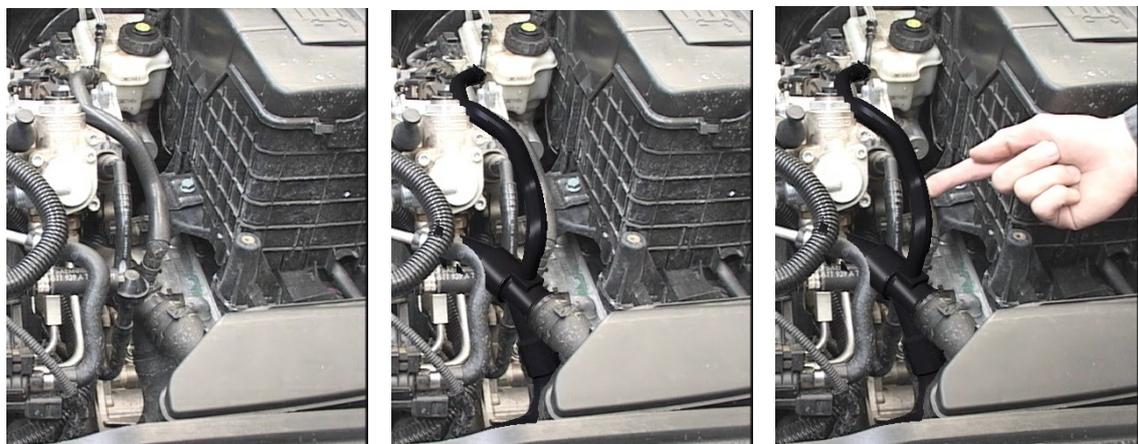


Abbildung 7.7: Augmentierter, leicht abweichender Schlauch

### 7.2.3 Augmentierter Meisterbock

Im Rahmen der vorangegangenen Kapitel, insbesondere im Abschnitt 5.2 wurden bereits viele Abbildungen zum Augmentierten Meisterbock (AM) gezeigt.

Der AM stellt derzeit die höchsten Anforderungen an die Genauigkeit der zu erreichenden, formtreuen Überlagerung. Es werden folgend drei Bilder, die mit beiden AR-Systemen erzeugt wurden, dargestellt. Der Soll-/ Ist- Vergleich wird an einem Beifahrerkotflügel veranschaulicht.

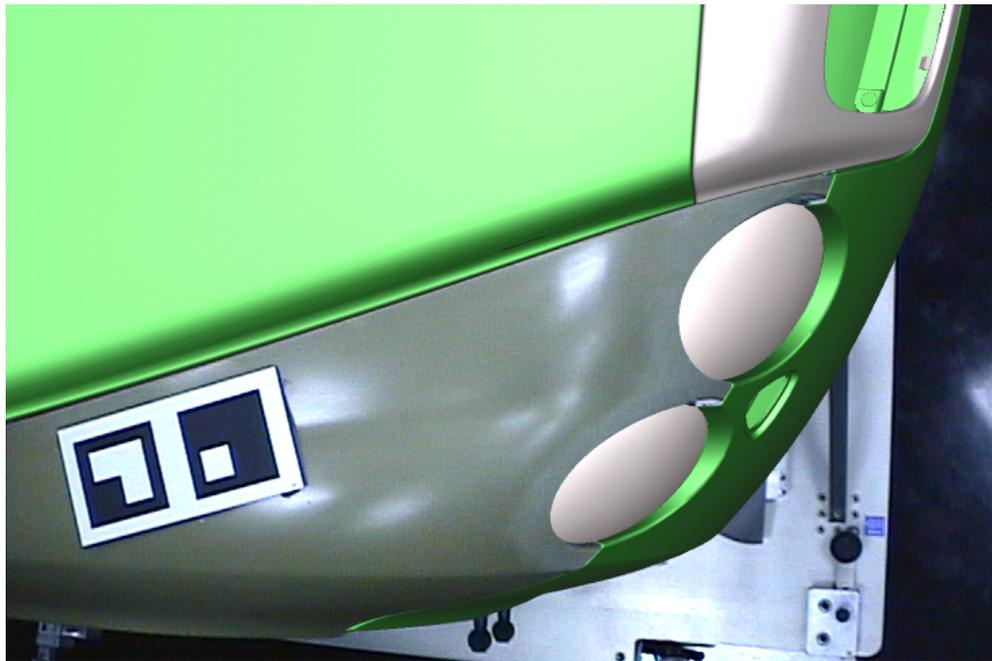


Abbildung 7.8: Augmentierter Meisterbock, Aufsicht

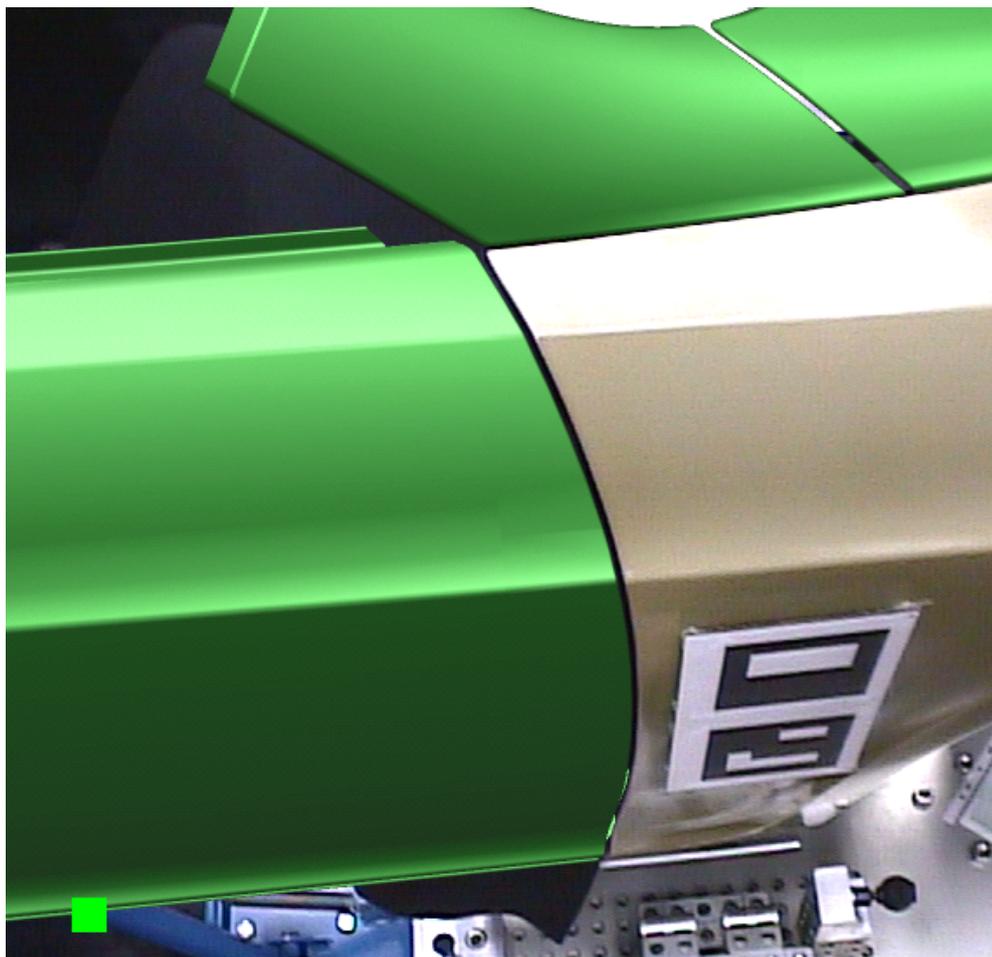


Abbildung 7.9: Augmentierter Meisterbock, Schrägansicht

In Abbildung 7.8 lässt sich neben der exakten Registrierung mit "scharfem" Blick erkennen, dass die Fugenverlauf zwischen Kotflügel und Motorhaube nicht konstant gleichmäßig ist. Zum linken Bildrand hin scheint sich die Fuge minimal zu vergrößern. Nachmessungen mit einer taktilen Messmaschine [FAO] konnten diese Erkenntnis bestätigen. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass der Kotflügel richtig gefertigt wurde und mit minimalen Verspannungen an den Bockaufbau montiert wurde.

In der Abbildung 7.9 ist zu sehen, wie am realen Kotflügel die virtuell augmentierte Beifahrertür und A-Säule zusammenlaufen. Der Türfugenverlauf weist keine Fehler auf, ebenso ist die Fuge zur A-Säule stimmig. Trotz des (für das VBT ) extremen Betrachterwinkels ist die Überlagerung höchst formtreu. An der Fuge zur A-Säule lassen sich Aliasingeffekte beobachten, die durch die geringe PAL-Auflösung der Videokamera bedingt sind. Ein Grund dafür, das AR-System mit der hochauflösenden Videokamera zu verwenden.

Die Registrierung nach der zweiten Variante im Abschnitt 4.3.2 wurde hier sehr genau berechnet, die Marker für das VBT wurden dazu verklebt und taktil vermessen.

Bei der Verwendung des AR-Systems mit Tracking der A.R.T. GmbH kann die Kamera beliebig nah an den Kotflügel positioniert werden, da keine speziellen Marken im Sichtbereich der Videokamera liegen müssen. In der Abbildung 2.1 auf Seite 15 ist dem Kotflügel eine formtreue Wireframedarstellung des CAD-Masters überlagert.

In der Vergrößerung von Abbildung 2.1 auf Seite 15 lassen sich in Abbildung 7.10 die Lage und Beschaffenheit von Bohrungen analysieren. Tendenziell scheinen die Bohrungen des realen Kotflügels in der Höhe tiefer zu liegen.

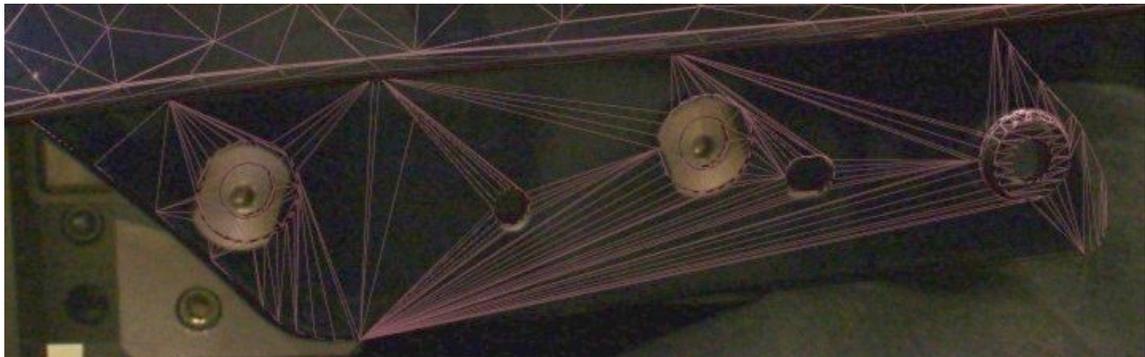


Abbildung 7.10: Augmentierter Meisterbock, Bohrungen

### 7.3 Anwendungsbeispiele für FEM-Überlagerungen

In diesem Abschnitt werden Beispiele von Anwendungen mit einer formtreuen Überlagerung von Simulationsdaten beschrieben.

### 7.3.1 Überlagerungen eines Fahrzeugsitzes beim Druckversuch

Durch die gleichmäßige Struktur der Geometrie von Simulationsergebnissen aufgrund der Elemente der FEM-Berechnung scheint für die Darstellung von Simulationsergebnissen die Wireframedarstellung geeignet zu sein. In der linken Hälfte der Abbildung 7.11 ist ein Fahrzeugsitz im Grundzustand zu sehen, in der rechten Hälfte der Abbildung wurde diesem Sitz die Ausgangssituation des FEM-Elementegitters formtreu überlagert.

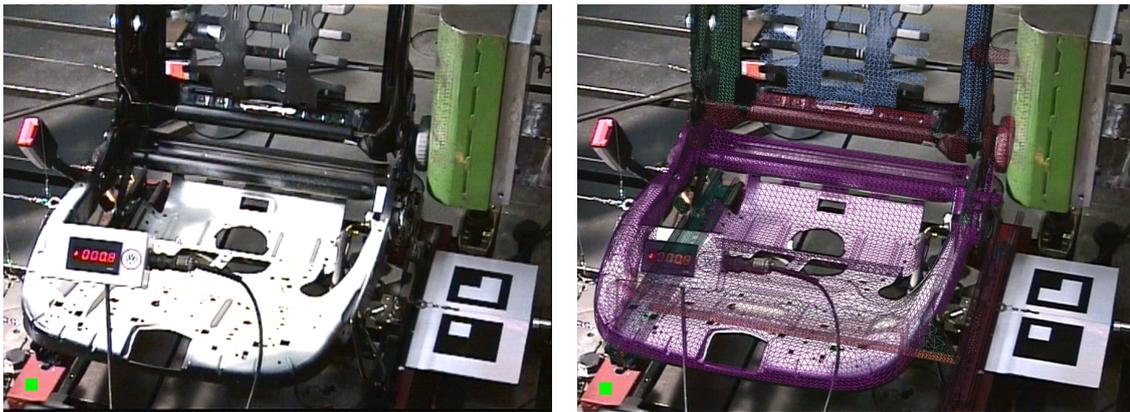


Abbildung 7.11: Sitz im Druckversuch, Ausgangssituation

Der grüne Stempel, der rechts in der Abbildung 7.11 zu sehen ist, drückt in einer Zeit von 10 Minuten von rechts gegen Sitz, um zu prüfen, wie sich der Sitz bei Krafteinwirkung verhält. In den Abbildungen 7.12 und 7.13 ist das Endergebnis des Versuches dargestellt.

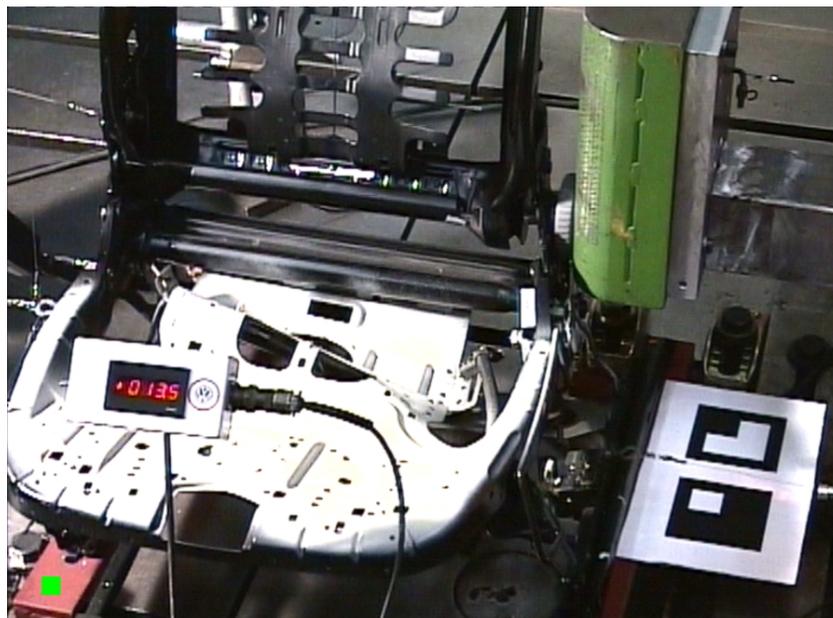


Abbildung 7.12: Realer Fahrzeugsitz nach Druckversuch

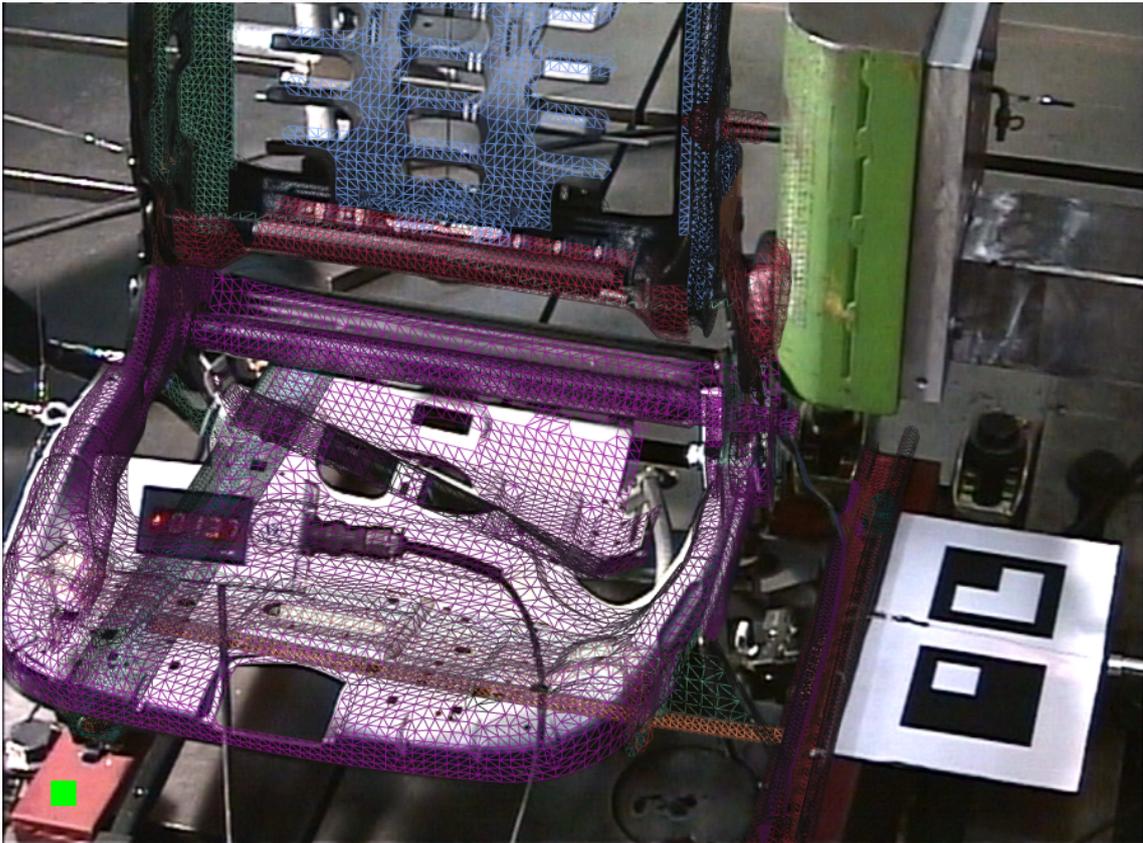


Abbildung 7.13: Augmentierter Fahrzeugsitz nach Druckversuch

Es ist zu erkennen, wie gut die Ergebnisse der FEM-Berechnung mit den realen Verformungen des Sitzes übereinstimmen. Selbst die Sitzplatte, die sich beginnt, sich in Falten zu legen, wird formtreu durch die Simulationsergebnisse überlagert. Einzig die rechteckige Aussparung im Sitz, die schräg orientiert in der Mitte der Abbildung 7.12 zu sehen ist, wird nicht exakt von den überlagerten Daten gefluchtet. Dies liegt jedoch innerhalb von Toleranzen, weil bereits die Qualität der Gesamtübereinstimmung entsprechend hoch ist.

Die exakte Registrierung wurde nach dem interaktiven Vorgehen aus Abschnitt 4.3.3.3 vorgenommen, wobei vorher bereits eine erste Näherung durch Passpunkte berechnet wurde.

### 7.3.2 Überlagerungen einer Fahrertür im Seitencrash

Bilder einer gecrashten Seitentür mit augmentierten Berechnungsergebnissen wurden bereits im Kapitel 4.3 und Kapitel 6 gezeigt. Die Überlagerung mittels der Darstellungsart von transparenter Soliddarstellung gemischt mit einer transparenten Wireframedarstellung ist für den Anwender die geeignete Visualisierung für einen Vergleich. In der Abbildung 7.14 (und wie auch in Abbildung 2.3 auf Seite 17) ist diese Art der Darstellung zu sehen.

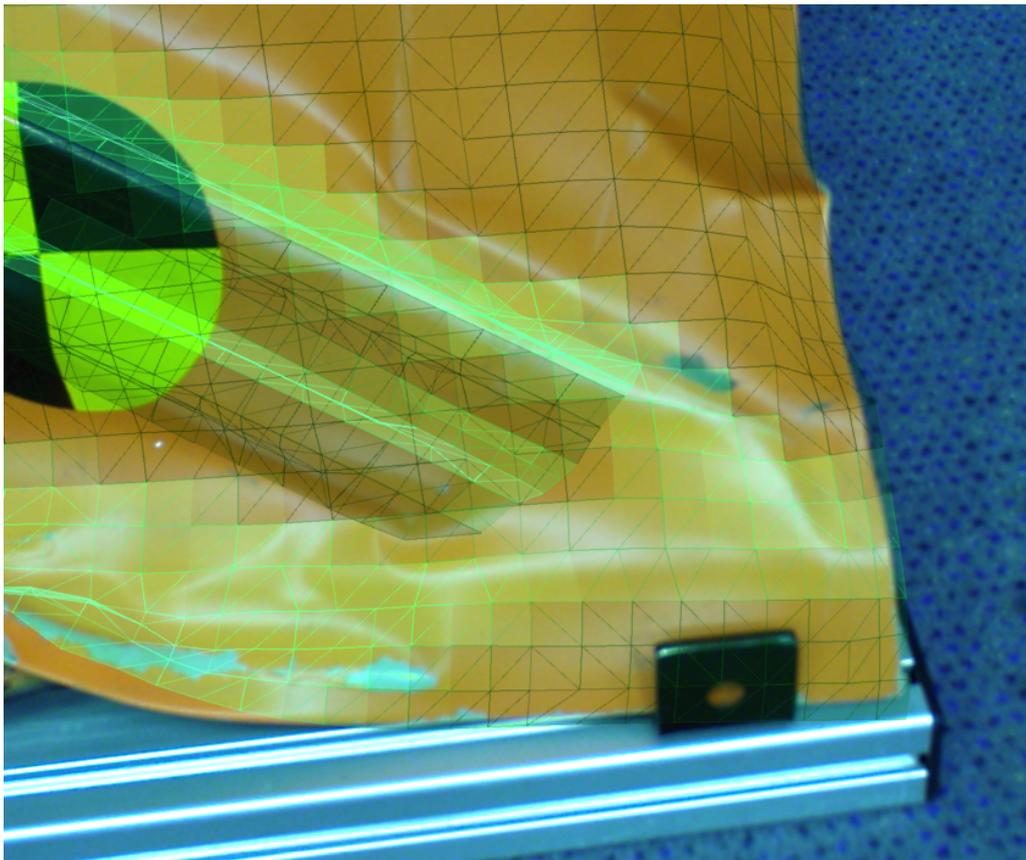


Abbildung 7.14: Crashtür in gemischt augmentierter Darstellung

Die Abbildungen 7.15 und 7.16 zeigen abschließend die gecrashte Fahrentür in der realen und in der formtreu augmentierten Ansicht.

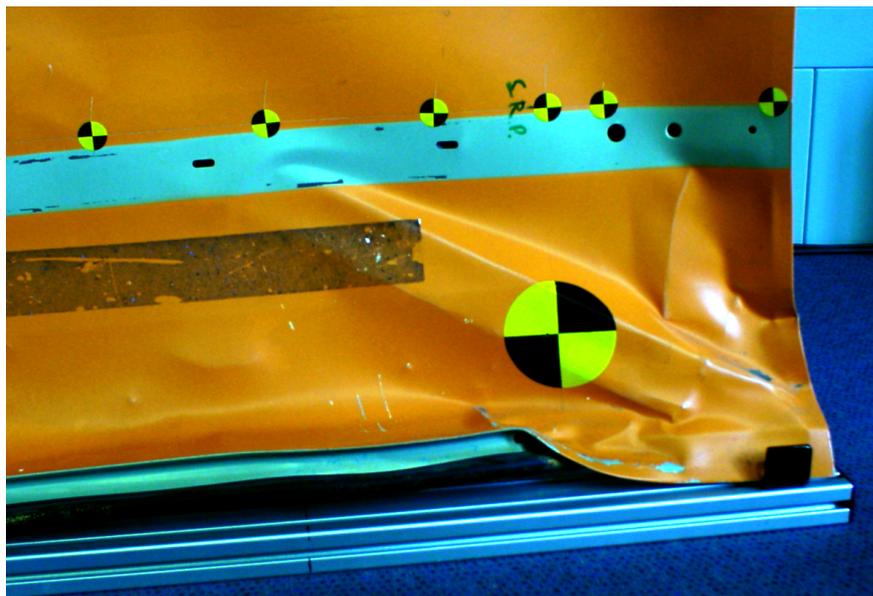


Abbildung 7.15: Crashtür ohne Augmentierung

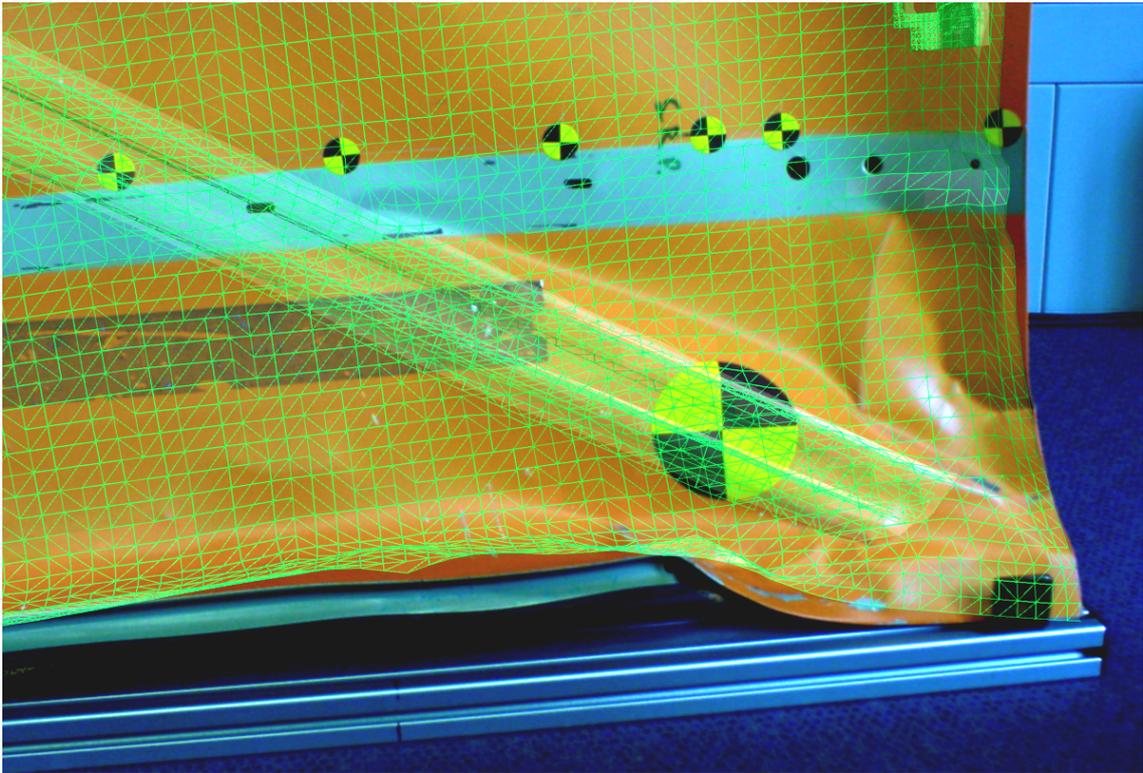


Abbildung 7.16: Crashtür mit Augmentierung

# Kapitel 8

## Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde untersucht, ob sich Augmented Reality als Vergleichswerkzeug in der Automobilindustrie einsetzen lässt.

Ausgehend von der Definition des Begriffs der "formtreuen Überlagerung", der die spezielle Form der Augmentierung in dieser Arbeit beschreibt, wurden nahezu alle Aspekte beleuchtet, die für einen Einsatz von AR als Werkzeug für einen Soll-/Ist-Vergleich nötig sind.

Es wurden für die Anwendung zwei geeignete Trackingsysteme identifiziert und bewertet. Die Registrierung zwischen realer und virtueller Welt wurde in zwei wesentliche Kalibrierungsaufgaben aufgeteilt: Zum Einen die Objektregistrierung, die reale Objekte innerhalb des virtuellen Koordinatensystems des AR-Systems in den richtigen Bezug setzt, und zum Anderen der Kameraoffset, der die Transformation zwischen Trackingsensor und Kamerabildebene beschreibt. Für beide Registrierungsvorgänge wurden für die zwei Trackingsysteme Methoden zur Bestimmung der benötigten Bezüge gefunden und umgesetzt.

Durch die spezielle Art der Augmentierung eines realen Objekts durch sein virtuelles Pendant musste eine neuartige Form der Visualisierung gefunden werden. Es wurde eine Übersicht möglicher Visualisierungsarten gegeben und zusammen mit Anwendern geeignete Arten bestimmt. Dabei hat sich gezeigt, dass der Einsatz von Liniendarstellungen und transparenten Flächen für viele Anwendungen zielführend ist. Die Rolle von Beleuchtungseinflüssen an realen und virtuellen Objekten wurde mit dem Ergebnis untersucht, dass Beleuchtungssituationen im Sinne eines exakten Soll-/Ist-Vergleichs berücksichtigt oder erstellt werden müssen.

Mit einem anwenderorientierten, pragmatischen Ansatz wurden Interaktionsgeräte und Metaphern erarbeitet und umgesetzt, mit denen die Anwendung gesteuert werden kann. Für eine Dokumentation von erkannten Abweichungen wurde eine Methode realisiert, um den Abstand zwischen realen und virtuellen Komponenten messen zu können. Weitere Funktionen zur Dokumentation von erkannten Abweichungen wurden entwickelt.

Die Anwendung wurde anhand von zwei AR-Systemen umgesetzt und prototypisch an Beispielanwendungen eingesetzt. Ergebnisse von formtreuen Überlagerungen wurden visualisiert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass AR als Vergleichswerkzeug in der Automobilindustrie grundsätzlich einsetzbar ist. Trotz der noch recht aufwendigen Kalibrier- und Registrierungen wird der Einsatz dieser Technologie vom Anwender mit Einsparungen an Kosten und Zeit bewertet. Der Anwendungsbereich befindet sich derzeit im Prototypenbau und allgemein in Konzeptphasen der Entwicklung. Für hochgenaue Anwendungen scheint die Technik noch nicht ausgereift genug. Die Genauigkeit der formtreuen Überlagerung lässt derzeit bei Anwendungen wie bei dem Augmentierten Meisterbock noch keine Entscheidungssicherheit zu.

## Zukünftige Arbeiten

Diese Arbeit ist in erster Linie als Machbarkeitsstudie und Realisierung einer möglichen, technischen Umsetzung zu verstehen. Einige Themen sind nur angerissen und müssen gesondert beleuchtet werden:

Für die "formtreue Überlagerung" sollte eine qualitative Einschätzung entwickelt werden. Es bedarf einer entsprechenden Metrik, um die Güte einer formtreuen Überlagerung zu klassifizieren.

Die Genauigkeit der eingesetzten Trackingsysteme ist nicht vollends zufriedenstellend. Insbesondere konkurrieren die Eigenschaften der beiden Trackingsysteme, die in der Arbeit zum Einsatz kommen. Als eine weiterführende Arbeit könnten beide Trackingsysteme in der Form eines hybriden Trackings kombiniert werden. Die Registrierung von Simulationsergebnissen sollte weiter verfeinert werden.

Die erörterten Arten der Darstellung der Überlagerung sollten weiter evaluiert werden - auch im Rahmen einer umfassenden Nutzerstudie. Verfahren, wie die Darstellung mittels Schachbrettmusters, sollten weiter verfeinert und zusammen mit anderen Darstellungsarten in ein System integriert werden. Für typische, wiederkehrende Anwendungen könnten Templates für die Visualisierungsart erstellt oder ein Autorensystem realisiert werden.

Die hier erarbeiteten Verfahren könnten auf ein AR-System im optical-see-through-Prinzip übertragen und evaluiert werden. Gemischte Anwendungen mit zusätzlicher video-see-through-Funktion sind denkbar.

Die erarbeiteten Interaktionsgeräte und -metaphern gilt es weiter zu verbessern. Derzeitige Anwender benötigen etwas Übung mit dem Umgang dieser Geräte. Hier sollten Nutzerstudien durchgeführt werden, um die Interaktion noch intuitiver zu gestalten. Weitere, denkbare Funktionalitäten sind zu implementieren.

Die Gestaltung möglicher Systeme sollte zusammen mit Anwendern erfolgen. Insbesondere sollten ergonomische Aspekte im Vordergrund stehen, um die Anwendungen zeitnah in bestehende Prozesse der Industrie zu integrieren.

# Anhang A

## Mathematische Grundlagen

Im Anhang sei auf die Quellen [ART, BRO, DFL, FOL, ZIS] Bezug genommen, ohne jedoch direkte Verweise anzugeben.

### A.1 Mathematik für Trackingsysteme

Ein Trackingsystem ermittelt von einem Objekt die Position im Raum in Form eines Punktes  $P = (x, y, z)$  bzw. eines Vektors  $\vec{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$ , der vom Ursprung des Trackingsystems zur Position des Objekts zeigt (auch als Ortsvektor bekannt). Die Orientierung des Objekts wird als Rotation um die jeweilige Hauptachse  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  des Ursprungs koordinatensystems ausgegeben.

Neben der Angabe von Rotationswinkeln ist es üblich, die Rotationen direkt in eine  $3 \times 3$ -Rotationsmatrix umzuformen. Diese wird durch drei aufeinander folgende elementare Rotationen um die Hauptachsen gebildet. Zu jeder Hauptachse wird eine Rotationsmatrix der Form  $\mathbf{R}_i(\text{Winkelangabe})$  bestimmt. Die gesamte Rotation, beschrieben durch die Matrix  $\mathbf{R}$ , berechnet sich mit:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x(\alpha) \cdot \mathbf{R}_y(\beta) \cdot \mathbf{R}_z(\gamma)$$

Mit trigonometrischen Funktionen ausgedrückt ergibt sich zusammengesetzt:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cdot \cos \gamma & -\cos \beta \cdot \sin \gamma & \sin \beta \\ \cos \gamma \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta + \cos \alpha \cdot \sin \gamma & \cos \alpha \cdot \cos \gamma - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma & -\cos \gamma \cdot \sin \alpha \\ -\cos \alpha \cdot \cos \gamma \cdot \sin \beta + \cos \alpha \cdot \sin \gamma & \cos \gamma \cdot \sin \alpha + \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma & \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{pmatrix}$$

Der gesamte Transformationsvorgang (Rotation und Translation) kann wie folgt beschrieben werden:

$$P_{Tracking\,sensor} = \mathbf{R} \cdot P_{Welt} + \vec{t}$$

Diese Gleichung transformiert einen beliebigen Punkt  $P_{Welt}$  in das lokale Koordinatensystem des zu trackenden Objekts. Zugleich beschreiben  $\mathbf{R}$  und  $\vec{t}$  die Orientierung und Position des Objekts im Welt- bzw. Trackingkoordinatensystem.

Soll umgekehrt ein Punkt aus dem lokalen Koordinatensystem des Objekts innerhalb der Weltkoordinaten dargestellt werden, so muss in der obigen Gleichung der Punkt  $P_{Welt}$  freigestellt werden:

$$\begin{aligned} P_{Tracking\,sensor} &= \mathbf{R} \cdot P_{Welt} + \vec{t} \\ P_{Tracking\,sensor} - \vec{t} &= \mathbf{R} \cdot P_{Welt} \\ \mathbf{R}^{-1} \cdot (P_{Tracking\,sensor} - \vec{t}) &= \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{R} \cdot P_{Welt} \\ \mathbf{R}^{-1} \cdot (P_{Tracking\,sensor} - \vec{t}) &= \mathbf{E} \cdot P_{Welt} \\ \mathbf{R}^{-1} \cdot (P_{Tracking\,sensor} - \vec{t}) &= P_{Welt} \end{aligned}$$

Es wird folglich die inverse Matrix (kurz: Inverse) zu  $\mathbf{R}$  benötigt. Da  $\mathbf{R}$  eine Rotationsmatrix ist, gilt  $\mathbf{R}^T = \mathbf{R}^{-1}$ . Es kann somit umgekehrt die Transponierte verwendet werden (Rotationsmatrizen sind orthogonal mit Determinante = 1).

*Man beachte:* Das Matrizenprodukt ist nicht kommutativ, die Reihenfolge spielt folglich eine entscheidene Rolle.

## A.2 Homogene Koordinaten

### A.2.1 Definition

Beim Berechnen von Koordinatentransformationen werden häufig Vektoren des  $\mathbb{R}^n$  als Punkte interpretiert und umgekehrt. Um diesen "Mißbrauch" zu vermeiden und Transformationen konsistent darstellen zu können, werden die so genannten *homogenen* oder *erweiterten Koordinaten* benutzt. Diese ermöglichen eine klare Trennung. Ein Punkt  $P = (p_x, p_y, p_z)$  im dreidimensionalen Raum wird durch das 4-Tupel  $P = (p_x, p_y, p_z, \mathbf{1})$  dargestellt.

Dagegen erhalten Vektoren des  $\mathbb{R}^3$  eine Null als vierte Komponente. Ein Vektor  $(v_x, v_y, v_z)^T \in \mathbb{R}^3$  besitzt dann die Darstellung  $(v_x, v_y, v_z, \mathbf{0})^T$ .

Formal wird eine Abbildung der Form  $f(x, y) \xrightarrow{\text{homogen}} (x, y, w)$  definiert, wobei  $w \in \mathbb{R}$  mit  $w \neq 0$  erfüllt sein muss. Die Rückgewinnung erfolgt dann mit  $f(x, y, w) \xrightarrow{\text{affin}} (\frac{x}{w}, \frac{y}{w})$  (Daher auch  $w \neq 0$ ). In der Regel (wie auch oben beschrieben) wird  $w = 1$  gesetzt.

Anschaulich wird jeder Punkt in einem affinen (nicht-homogenen) Koordinatensystem durch eine Gerade im homogenen Koordinatensystem dargestellt.

## A.2.2 Anwendung

In der Computergraphik werden homogene Koordinaten dazu benutzt, um die Berechnung von Transformationen zu vereinfachen bzw. eine Transformation in einem Schritt zu berechnen.

Eine getrennte Berechnung von Translation und Rotation (wie es im  $\mathbb{R}^3$  nötig ist) gestaltet sich, besonders bei einer verschachtelten Abfolge mehrerer Transformationen recht umständlich. Daher ist es vorteilhaft, Translation und Rotation mittels homogener Koordinaten in einer Matrix zusammenzufassen. Die komplette Transformation lässt sich so mit einer einzigen Matrix berechnen.

Mit dem Translationsvektor  $\vec{t} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$  und der Rotationsmatrix

$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_x & q_x & s_x \\ r_y & q_y & s_y \\ r_z & q_z & s_z \end{pmatrix}$  ergibt sich die zusammengesetzte, erweiterte

$4 \times 4$ -Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$  mit:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \vec{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{r} & \vec{q} & \vec{s} & \vec{t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x & q_x & s_x & t_x \\ r_y & q_y & s_y & t_y \\ r_z & q_z & s_z & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Für die Durchführung der Berechnungen werden Punkte wie  $P_{Welt}$  in ihrer internen Darstellung um eine Koordinate zu  $P_{Welt} = (x, y, z, 1)$  erweitert.

Gängige Trackingsysteme liefern in der Regel eine so zusammengesetzte Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$  für die Position und Orientierung des Trackingsensors.

$\mathbf{T}$  ist nun nicht mehr orthonormal, folglich ist  $\mathbf{T}^T$  nicht gleich  $\mathbf{T}^{-1}$ . Die Inverse lässt sich jedoch trotzdem recht einfach berechnen, da nur mit Hilfe des Skalarprodukts die Komponenten der Translation neu berechnet werden müssen:

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{pmatrix} r_x & r_y & r_z & -(\vec{r} \cdot \vec{t}) \\ q_x & q_y & q_z & -(\vec{q} \cdot \vec{t}) \\ s_x & s_y & s_z & -(\vec{s} \cdot \vec{t}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^{-T} & -(\vec{r} \cdot \vec{t}) \\ & -(\vec{q} \cdot \vec{t}) \\ & -(\vec{s} \cdot \vec{t}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

### A.3 Singulärwertzerlegung (SWZ)

Sei  $\mathbf{A}$  eine beliebige Matrix des  $\mathbb{R}^{n \times m}$ . Dann lässt sich  $\mathbf{A}$  stets zerlegen in eine Form:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^T \quad (\text{A.1})$$

mit  $\mathbf{U} = \mathbf{U}^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$  Orthogonalmatrix und  
mit  $\mathbf{V} = \mathbf{V}^T \in \mathbb{R}^{m \times m}$  Orthogonalmatrix.

Für die Matrix  $\mathbf{S}$  gilt:

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{V} = \text{diag}(s_1, \dots, s_p) \in \mathbb{R}^{m \times m}$$

Wobei  $p = \min(n, m)$  und  $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_p \geq 0$ .  $s_1, \dots, s_p$  sind die Singulärwerte zur Matrix  $\mathbf{A}$  und stellen das Ergebnis der Zerlegung dar.

In der Anwendung wird die SWZ zur Lösung von Gleichungssystemen der Form  $\mathbf{A} \cdot \vec{x} = \vec{b}$  oder zur numerischen Näherung der Minimierungsaufgabe  $\mathbf{A} \cdot \vec{x} - \vec{b} \rightarrow 0$  verwendet.

Die SWZ zeichnet sich gegenüber anderen Verfahren zur Minimierung von Fehlerquadraten durch eine sehr hohe numerische Stabilität aus und liefert auch bei singulären, rangdefekten Matrizen ( $\text{rang}(\mathbf{A}) < m$ ) eine Lösung. Daher ist die SWZ generell dann bei der Fragestellung einer Ausgleichs- oder Minimierungsrechnung zu bevorzugen, wenn im Vorfeld an die Matrix  $\mathbf{A}$  keinerlei Bedingungen gestellt werden.

Mit Hilfe der SWZ lässt sich auch die pseudoinverse Matrix  $\mathbf{A}^+$  zu einer Matrix  $\mathbf{A}$  berechnen. Ausgehend von der Gleichung A.1 ist die Pseudoinverse  $\mathbf{A}^+$  gegeben mit:

$$\mathbf{A}^+ = \mathbf{V} \cdot \mathbf{S}^+ \cdot \mathbf{U}^T \quad \text{mit} \quad \mathbf{S}^+ = \text{diag}(s_1^{-1}, \dots, s_p^{-1}, 0, \dots, 0)$$

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Eigener Entwurf des Reality-Virtuality-Kontinuums nach Milgram . . .	4
1.2	Grundprinzipien der Augmentierung . . . . .	7
1.3	Grundprinzipien der Augmentierung . . . . .	8
1.4	FEM Berechnung eines Fahrzeugcrashes . . . . .	10
2.1	Realer Kotflügel mit überlagertem CAD-Master . . . . .	15
2.2	Realer Kotflügel mit virtuellen Anbauteilen . . . . .	16
2.3	Crashtür mit augmentiertem FEM Berechnungsergebnis . . . . .	17
3.1	Augmentierter Bremskraftverstärker . . . . .	28
3.2	Augmentierter Antriebstrang . . . . .	28
4.1	BOOM der Firma Fakespace [FAK] . . . . .	33
4.2	Ein Trackingsensor der Firma Ascension [ASC] . . . . .	34
4.3	Infrarottrackingsystem mit passiven Marken [ART] . . . . .	36
4.4	Marken eines optischen Inside-Out Trackingsystems [AV04] . . . . .	37
4.5	Akustisches Trackingsystem von Logitech (bei VRDepot [VRD]) . . .	39
4.6	Inertiales System (Gyroskop) von Intersense [INT] . . . . .	40
4.7	Ein Intersense IS-600 Mark2 System [INT] . . . . .	42
4.8	VBT-Marker einzeln [STR] und in einem Verbund . . . . .	45
4.9	Rigid Body des A.R.T.-Systems mit 5 Kugeln [ART] . . . . .	46
4.10	Funktionsweise des A.R.T.-Systems [ART] . . . . .	47
4.11	Experiment zur Berechnung der Rotationsgenauigkeit . . . . .	48
4.12	Rotationsgenauigkeit beim Inside-Out Tracking . . . . .	49
4.13	Rotationsgenauigkeit beim Outside-In Tracking . . . . .	50
4.14	Schaubild der Koordinatensysteme . . . . .	54
4.15	Schaubild Raumkalibrierung für VBT . . . . .	55

---

4.16	Vermessungspunkte an einem Kotflügel . . . . .	57
4.17	Reale und ungetrackte Objektposition . . . . .	60
4.18	Ungenauere Objektregistrierung eines Kotflügels . . . . .	63
4.19	Ungeeignetes Ergebnis einer Objektregistrierung . . . . .	66
4.20	Geeignetes Ergebnis einer Objektregistrierung . . . . .	66
4.21	Der Kameraoffset . . . . .	69
4.22	Transformationen zum Kameraoffset . . . . .	71
4.23	Transformationen zum Kameraoffset (allgemeiner) . . . . .	72
4.24	Fehler beim Kameraoffset . . . . .	73
4.25	AICON Testfeld zur Kamerakalibrierung . . . . .	75
4.26	Rückprojektion des Testfelds ohne Korrekturen [JUN] . . . . .	76
4.27	Rückprojektion des Testfelds mit Hauptpunktverschiebung [JUN] . . . . .	76
4.28	Rückprojektion mit kompletter Verzeichniskorrektur [JUN] . . . . .	77
5.1	Reale B-Säulenverstärkung . . . . .	79
5.2	B-Säulenverstärkung als "solid" mit und ohne Verschiebung . . . . .	80
5.3	B-Säulenverstärkung in Wireframedarstellung . . . . .	81
5.4	B-Säulenverstärkung in transparenter Darstellung . . . . .	82
5.5	B-Säulenverstärkung in transparente Wireframedarstellung . . . . .	83
5.6	B-Säulenverstärkung in der Schachbrettdarstellung (Bildmontage) . . . . .	84
5.7	B-Säule in der Ansicht für linkes und rechtes Auge . . . . .	86
5.8	Montage zweier Micro-Kameras für eine Stereodarstellung . . . . .	86
5.9	B-Säulenverstärkung in transparenter Wireframedarstellung kombiniert mit transparenter Soliddarstellung . . . . .	87
5.10	Überlagerte Designhaube mit variabler Schnittebene . . . . .	88
5.11	Designhaube ohne Verdeckungsobjekt . . . . .	89
5.12	Designhaube mit Verdeckungsobjekt . . . . .	90
5.13	Designhaube mit einem bewegten Papierwürfel als Verdeckungsobjekt . . . . .	90
5.14	Realer Kotflügel mit augmentierter, virtueller Beifahrertür . . . . .	92
5.15	Realer Kotflügel mit augmentierter, virtueller Beifahrertür (andere Perspektive) . . . . .	93
5.16	Frontpartie eines realen Kotflügels . . . . .	94
5.17	Frontpartie des Kotflügels mit überlagerten Anbauteilen . . . . .	94
5.18	Spalt am Kotflügels im linken Bereich (beleuchtet) . . . . .	95
5.19	Frontpartie des Kotflügels - mit und ohne Überlagerung . . . . .	95

---

5.20 Spalt am Kotflügel im linken Bereich (unbeleuchtet) . . . . .	96
5.21 Abgrenzung des Kotflügels zur A-Säule (beleuchtet) . . . . .	96
5.22 Abgrenzung des Kotflügels zur A-Säule (unbeleuchtet) . . . . .	97
6.1 Flystick des A.R.T.-Systems . . . . .	102
6.2 A.R.T.-Messstift und Flystick ohne Rigid Body . . . . .	103
6.3 Menüformen . . . . .	104
6.4 Steuerknüppel des Flysticks . . . . .	105
6.5 Reale Messungen an einer Crashtür . . . . .	107
6.6 Virtuelle Messpunkte . . . . .	108
6.7 Selektionsstrahl mit Messstift . . . . .	109
6.8 Strahl mit zwei markierten Schnittpunkten . . . . .	109
6.9 AR-Distanzmessung zwischen realem und virtuellem Objekt . . . . .	110
6.10 Fugenpunkt . . . . .	111
6.11 Markierungspunkte zur Dokumentation . . . . .	113
7.1 Aufbau des A.R.T.-Systems . . . . .	117
7.2 Sony Videokamera mit montiertem Rigid Body . . . . .	118
7.3 Aufbau mit Monitor und Projektionswand . . . . .	118
7.4 Augmentierter Ausgleichsbehälter im Motorraum . . . . .	120
7.5 Augmentierte E-Box im Motorraum . . . . .	121
7.6 Augmentierter Schlauchkomplex im Motorraum . . . . .	122
7.7 Augmentierter, leicht abweichender Schlauch . . . . .	122
7.8 Augmentierter Meisterbock, Aufsicht . . . . .	123
7.9 Augmentierter Meisterbock, Schrägansicht . . . . .	123
7.10 Augmentierter Meisterbock, Bohrungen . . . . .	124
7.11 Sitz im Druckversuch, Ausgangssituation . . . . .	125
7.12 Realer Fahrzeugsitz nach Druckversuch . . . . .	125
7.13 Augmentierter Fahrzeugsitz nach Druckversuch . . . . .	126
7.14 Crashtür in gemischt augmentierter Darstellung . . . . .	127
7.15 Crashtür ohne Augmentierung . . . . .	127
7.16 Crashtür mit Augmentierung . . . . .	128

# Literaturverzeichnis

- [ABF] Azuma, R.; Baillot, Y.; Behringer, R.; Feiner, S.; Julier, S.; MacIntyre, B.: *Recent advances in augmented reality*. IEEE Computer Graphics and Applications, 21(6), 2001, S. 34-47
- [AGU] Agus, M.; Giachetti, A. ; Gobetti, E. ; Zanetti, G. ; Zorcolo, A.: *Realtime haptic and visual simulation of bone dissection*. In: IEEE Virtual Reality Conference, 2002
- [AIC] Internetauftritt der AICON 3D Systems GmbH, Braunschweig  
<http://www.aicon.de>
- [ALT] Alt, T.; Nölle, S.: *Weite Welt - Augmented Reality in der Automobilindustrie*. In: iX, Heise Verlag, Hannover, Ausgabe 5/2001, S. 142-145
- [AL02] Alt, T.: *Augmented Reality in der Produktion*. Dissertation an der Universität Magdeburg, Herbert Utz Verlag, 2002
- [APP] Applewhite, H., L.: *Position Tracking in Virtual Reality*. In S.K.Hessel: Proceedings of the Second Annual Virtual Reality Conference and Exhibition, 1991
- [ART] Internetauftritt der Firma Advanced Realtime Tracking (A.R.T.) GmbH, Weilheim  
<http://www.ar-tracking.com/>
- [ARV] Arvika: Internetauftritt des BMB+F geförderten Forschungsprojektes ARVIKA  
<http://www.arvika.de>
- [ASC] Ascension Inc.: Internetauftritt der Fa. Acension Inc.  
<http://www.ascension-tech.com>
- [ATK] Internetauftritt des ARToolKit Projekts (open-source)  
<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- [AUR] Auer, T.: *Hybrid Tracking for Augmented Reality*. Dissertation an der Technischen Universität Graz, 2002

- [AV04] Friedrich, W. (Hrsg.): *ARVIKA, Augmented Reality in Entwicklung Produktion und Service*. In: Siemens AG, Publics Corporate Publishing, Erlangen, 2004
- [AZU] Azuma, R. T.: *A Survey of Augmented Reality*. Presence, Vol. 6, Nr. 4, 1997, S. 355-385
- [BAN] Bangle, C.; Kehler, T.; Mischok, P.: *About catalytic design*. In: Proceedings of the International Conference Florence ATA, 1997,
- [BAR] Barakonyi, I.; Schmalstieg, D.: *Augmented Reality Agents in the Development Pipeline of Computer Entertainment*. In: Proceedings of the 4th International Conference on Entertainment Computing, Sanda, Japan, S. 345-356, 2005
- [BHA] Bhatnagar, D. K.: *Position trackers for Head-Mounted Display systems: a survey*. University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science (TR93-010), 1993
- [BIL] Billinghamurst, M.; Kato, H.; Poupyrev, I.; Imamoto, K.; Tachibana, K.: *Virtual objects manipulation on a table-top AR Environment*. IEEE, Proceedings of ISAR00, 2000, S. 111-119
- [BIM] Bimber, O.; Fröhlich, B.: *Occlusion Shadows: Using light to generate realistic occlusion effects for View-Dependent optical-see-through displays*. IEEE, Proceedings of ISMAR02, 2002, S. 186-195
- [BOS] BOSCH, *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Robert Bosch GmbH, 24. Auflage, 2002
- [BOW] Bowman, D. A.; Kruijff, E.; LaViola (Jr), J.; Pourpyrev, I.: *3D User Interfaces - Theory and Practice* Addison-Wesley, 2005
- [BRO] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.; Musiol, G.; Mühlig, H.: *Taschenbuch der Mathematik 3*. überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1997
- [CAN] Canis, D.: *Einsatz von Augmented Reality Technologie im Produktentwicklungsprozess (Automobildesign) - AR in progress*. Diplomarbeit an der Kunstschule für Kunst und Design, Halle, Studiengang Multimedia/VR-Design, 2004
- [CAU] Caudell, T.; Mizell, D.: *Augmented Reality: An application of Heads-UP Display technology to manual manufacturing processes*. Proc. IEEE Hawaii International Conference on Systems Sciences, IEEE Press, 1992
- [CHN] Chien-Ping Lu; Hager, G. D.; Mjoiness, E.: *Fast and Globally Convergent Pose Estimation from Video Images*. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 22, Issue 6, S. 610-622, Juni 2000

- [DAI] Dai, F. (Hrsg.): *Virtual Reality for Industrial Applications*. 1. Auflage, Berlin, Springer Verlag, 1998
- [DA96] Dai, F.; Felger, W.; Frühauf, T.; Göbel, M.; Reines, D.; Zachmann, G.: *Virtual Prototyping Examples for Automotive Industries*. In: Virtual Reality World '96, 1996, S. 1-11
- [DAV] Davis, R. G.: *Side-Wall Curl in High-Strength Steels*. Journal of Applied Metal-working, Vol. 3, No. 2, 1984, S. 120-126
- [DFL] Deufelhard, P.; Hohmann, S.: *Numerische Mathematik 1 - Eine algorithmisch orientierte Einführung* 3. Auflage, Folkmar Bornemann - Berlin; New York: Walter de Gruyter, 2002
- [DOR] J. Dormeier, M. Teistler: *Medizinische Transparenz durch Virtualisierung*. In: Virtualisierung und Virtualität Neue Technologien für die Medizinische Informatik. Technische Universität Braunschweig, Medizinische Informatik Spezial 2000
- [ECH] Echtler, E.; Sturm, F.; Kindermann, K.; Klinker, G.; Stilla, J.; Trilk, J.; Najafi, H.: *The Intelligent Welding Gun: Augmented Reality for Experimental Vehicle Construction*. in: Chapter 17 in Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing (VARAM), Ong S.K and Nee A.Y.C eds, Springer Verlag, 2003
- [FAK] Internetauftritt der Fake Space Laboratories.  
<http://www.fakespacelabs.com/products/boom3c.html>
- [FAO] Internetauftritt der FARO Technologies Inc.  
<http://www.faro.com/>
- [FEI] Feiner, S.; MacIntyre, B.; Seligmann, D.: *Knowledge-based augmented reality*. Z. Communications of the ACM, Vol. 36, Nr. 7 (1993), S. 52-62
- [FER] Ferrin, F.: *Survey of helmet tracking technologies*. Z. SPIE Large-Screen Projection, Avionic and Helmet-Mounted Displays, Vol. 14, Nr. 56 (1991), S. 86-94
- [FIU] FIU (Florida International University): *Aircraft Instruments*. Allstar Network of Florida University, Florida, USA, 2006  
(<http://www.allstar.fiu.edu/aero/instr.htm>)
- [FOL] Foley, J. D.; van Dam, A.; Feiner, S. K.; Hughes, J. F.: *Computer Graphics - Principles and Practice*. Addison-Wesley, 1997
- [FRÜ] Fründ, J.; Geiger, C.; Grafe, M.; Kleinjohann, B.: *The Augmented Reality Personal Digital Assistant*. Proceedings of the Second International Symposium on Mixed Reality (ISMAR2000), The Virtual Society of Japan, 2001

- 
- [FUC] Fuchs, H.; Livingston, M.; Raskar, R.; Colucci, D.; Keller, K.; State, A.; Crawford, J.; Rademacher, P.; Drake, S.; Meyer, A.: *Augmented Reality visualization for laparoscopic surgery*. Internet: <http://eee.cs.unc.edu/us/laparo.html>
- [GIU] Giusto, N.; Robinson, M.: *Computer aided styling at Stile/ Design Fiat*. In: Proceedings of the 24th FISTA Congress: Engineering for the Customer, 1992, S. 227-233
- [GOM] Internetauftritt der Firma GOM mbH, Braunschweig  
<http://www.gom.com>
- [GRA] Grau, O.; Prior-Jones, M.; Thomas, G. A.: *3D modeling and rendering of studio and sport scenes for TV applications*. In: Proceedings of the 6th Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services - WIAMIS 2005, Montreux, Switzerland, 2005
- [GRE] Grebner, K.; May, F.: *Applications of Virtual Reality Techniques in the Industry - Selected Examples*. In: Virtual Reality World 95, 1995, S. 451-468
- [GRI] Grimson, W.; Ettinger, G.; Kapur, T. ; Leventon, M. ; Wells, W. ; Kikinis, R. : *Utilizing segmented MRI data in image-guided surgery*. Proceedings: IJPRAI, 1996
- [HAU] Internetauftritt der Hauppauge Computer Works GmbH, Mönchengladbach  
<http://www.hauppauge.de>
- [HEN] Hennig, A.: *Die andere Wirklichkeit. Virtual Reality - Konzepte, Standards, Lösungen*. Addison-Wesley, 1997
- [INT] InterSense, 73 Second Avenue; Burlington, MA 01803, USA  
<http://www.isense.com>
- [IVP] Internetauftritt der BMB+F Leitprojekt IVIP  
<http://www.ivip.de/>
- [JAR] Homepage von Jaron Lanier  
<http://www.advanced.org/jaron/>
- [JUL] Julier, S.: *BARS: Battlefield Augmented Reality System*. Internet: <http://www.ait.nrl.navy.mil/vrlab/projects/BARS/BARS.html>
- [JUN] Jundt, Eduard: Bisher unveröffentlichte Arbeiten
- [KAL] Kalawsky, R. S.: *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*. Addison-Wesley, 1994

- [KAT] Kato, H.; Billinghurst, M.: *Marker Tracking and HMD calibration for a video-based Augmented Reality conferencing system*. Proceedings: Second international workshop on Augmented Reality. San Francisco, 1999, S. 85-94
- [KLI] Klinker, G.; Stricker, D.; Reiner, D.: *Augmented Reality for exterior construction applications*. In: Barfield, W. (Hrsg.); Caudell, T. (Hrsg.): *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2001, S. 379-427
- [KL97] Klinker, G.; Ahlers, H.; Breen, E.; Chevalier, Y.; Crampton, C.; Greer, S.; Koller, D.; Kramer, A.; Rose, E.; Tuceryan, M.; Whitaker, T.: *Confluence of computer vision and interactive graphics for Augmented Reality*. In: *Presence* Vol. 6, Nr. 4 (1997), S. 433-451
- [KOL] Koller, D.; Klinker, G.; Rose, E.; Breen, D.; Whitaker, R.; Tuceryan, M.: *Real-time vision-based camera tracking for augmented reality applications*. In: Proceedings of ACM Symp on Virtual Reality, Software and Technology (VRST'97), 1997
- [KRY] Krypton AG, Internetauftritt der Firma Krypton  
<http://www.krypton.de>
- [LAN] Lanzerath, H.; Schilling, R.; Ghouati, O.: *Crashsimulation von Umformdaten*. CADFEM User's Meeting, Friedrichshafen, September 2000
- [LAP] Lapeer, R.; Chen, M.; Villagrana, J.: *An Augmented Reality based simulation of obstetric forceps delivery*. Proceedings of ISMAR04, 2004, S. 252-253
- [LES] Lesswire AG: Internetauftritt der Firma Lesswire.  
<http://www.lesswire.com>
- [LIE] Lievin, M.; Keeve, E.: *Stereoscopic Augmented Reality system for computer assisted surgery*. Proceedings: Computer assisted radiology and surgery (CARS01), Berlin, 2001
- [LIV] Livingston, M.: *Vision-based tracking with dynamic structured light for video see through Augmented Reality*. Dissertation. University of North Carolina at Chapel Hill, Department of computer science, Chapel Hill, USA, 1998
- [LUH] Luhmann, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Herbert Wichmann Verlag, 1. Auflage, 2000
- [LUM] Internetauftritt der Firma Lumus Vision, Israel  
<http://www.lumus-optical.com/>
- [MAB] Meyer, K.; Applewhite H. L.; F.A. Biocca, F. A.: *A Survey of Position Trackers*. Presence, Vol. 1, No. 2, pp. 173-200, 1992

- [MET] Internetauftritt der Firma metaio GmbH, Garching bei München  
<http://www.metaio.com/>
- [MIL] Milgram, P.; Colquhoun H.: *A taxonomy of real and virtual world display integration*. In: Otha, Y. (Hrsg.); Tamura, H. (Hrsg.): *Mixed Reality: Merging real and virtual worlds*. Berlin, Springer, 1999
- [MI94] Milgram, P.; H. Takemura: *Merging Real and Virtual Worlds*. In: First Workshop on Networked Reality in Telecommunications (NR94), Tokyo, 1994
- [MIZ] Mizell, D.: *Boing's wire bundle assembly project*. In: Barfield, W. (Hrsg.); Caudell, T. (Hrsg.): *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. Mahwah: Lawrence Earlbaum Associates, 2001, S. 447-467
- [MOE] Möhring, M.; Lessing, C.; Bimber, O.: *Video See-through AR on Consumer Cell-Phones*. IEEE, Proceedings of ISMAR04, 2004, S. 252-253
- [MTI] MTI Research Inc.: Internetauftritt der Firma MTI Research.  
<http://www.mtir.com>
- [MUD] Mulder, A.: *Human movement tracking technology*. Simon Fraser University, School of Kinesiology, TR94-1, 1994
- [MÜL] Müller, S.; Lehmann, D.; Stricker, D.; Genc, Y.; Navab, N.: *Tracking technologies and roadmap for ARVIKA*. Fraunhofer Gesellschaft für grafische Datenverarbeitung, Darmstadt, 2000
- [NEU] Neumann, U.; Majoros, A.: *Cognitive, performance and systems issues for Augmented Reality applications in manufacturing and maintenance*. Proceedings: IEEE Virtual Reality annual international symposium, 1998, S. 411
- [NMF] M.A. Nixon, M. A.; McCallum, B. C.; Fright, W. R.; Price N. B.: *The Effects of Metals and Interfering Fields on Electromagnetic Trackers*. Presence, Vol. 7, No 2, S. 204-218, 1998
- [NÖL] Nölle, S.: *Stereo Augmentation of Simulation Results on a Projection Wall by Combining two Basic ARVIKA Systems*. IEEE, Proceedings of ISMAR02, 2002, S. 271-272
- [POL] Polhemous: Internetauftritt der Fa. Polhemous.  
<http://www.polhemus.com>
- [RHO] Rhodes, B.: *A brief history of wearable computing*. Massachusetts Institute of Technology, USA, 2006  
(<http://www.media.mit.edu/wearables/lizzy/timeline.html>)

- [ROH] Rohleder W.: *Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen*. Dissertation an der Universität Dortmund, 2001
- [ROL] Roll, L. Lemke, T.: *Simulation von Rückfederung und Kompensation - was ist heute möglich*. In: Behrens, B.-A. (Hrsg.), *Umformtechnik - Zukunftstechnologie mit Tradition*, 18. Umformtechnisches Kolloquium, Hannover, 2005, S. 249-265
- [RMR] Internetauftritt von ROMER CimCore  
<http://www.romer.com/>
- [SCH] Schilling, R.; Lock, A.; Kleiner, M.: *Crashberechnung von umgeformten Karosseriekomponten*. In: *Crash-Simulation: Fahrzeugsicherheit aus dem Computer*, Haus der Technik e.V., Essen, 1997
- [SEN] SensAble Technologies, Inc. 15 Constitution Way, Wobum, MA 01801, USA  
<http://www.sensable.com>
- [SHC] State, A.; Hirota, G.; Chen, D. T.; Garret, W.F.; Livingston M. A.: *Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking*. Proceedings of ACM SIGGRAPH '96, 1996
- [SIE] Siegert, K.: *Einsatz von Aluminium als Karosserieblech*. In: *Aluminium*, Band 56, 1980, S. 596-598
- [SIL] Sielhorst, T.; Obst, t.; Burgkart, R.; Riener, R.; Navab, N.: *An augmented reality delivery simulator for medical training*. In: *International Workshop on Augmented Environments for Medical Imaging - MICCAI Satellite Workshop*, 2004
- [SNY] Internetauftritt der Firma SONY  
<http://www.sony.com>
- [SOL] Internetauftritt der Firma SOLA-Messwerkzeuge GmbH  
<http://www.sola.de>
- [STA] State, A.; Livingston, M.; Hirota, G.; Garrett, W.; Whitton, M.; Fuchs, H.; Pisano, E.: *Technologies for Augmented Reality systems: Realizing ultrasound-guided needle biopsies*. Computer Graphics Proceedings, Annual conference series 1996, ACM SIGGRAPH, S. 439-446
- [STD] Stricker, D.; Klinker, G.; Reiners, D.: *A Fast and Robust Line-based Optical Tracker for Augmented Reality Applications*. In: *Proceedings of the 1rst International Workshop on Augmented Reality (IWAR'98)*, San Francisco, S. 31-46, 1998
- [STR] Stricker, D.: *Computer-Vision-basierte Tracking- und Kalibrierverfahren für Augmented Reality*. Dissertation, Fraunhofer Institut für graphische Datenverarbeitung, Darmstadt, 2002

- [STY] Stytz, M. R.: *Distributed Virtual Environments*. In: IEEE Computer Graphics and Applications 16, 1996
- [SUT] Sutherland, Ivan E.: *A Head-Mounted Three-Dimensional Display*. In: Proceedings of AFIPS Fall Joint Computer Conference, Washington D.C.: Thompson Books, 1968
- [TAP] Tappert, C.; Ruocco, A. ; Langdorf, K.; Mabry, F.; Heinemann, K.; Brick, T.; Cross, D.; Pellissier, S.: *Military applications of wearable computers and augmented reality*. In: Barfield, W. (Hrsg.); Caudell, t. (Hrsg.): Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. Mahwah: Lawrence Earlbaum Associates, 2001, S. 625-647
- [THO] Thomas, B.; Close, B.; Donoghue, J.; Squires, J.; De Bondi, P.; Morris, M.; Piekarski, W.: *ARQuake : An outdoor/indoor Augmented Reality first person application*. Proceedings: Fourth international symposium on Wearable Computers. IEEE, Atlanta, 2000
- [TRA] Traub, j.; Feuerstein, M.; Bauer, M.; Schirmbeck, E. U.; Najafi, H.; Bauernschmitt, R.; Klinker, G.: *Augmented Reality for Port Placement and Navigation in Robotically Assisted Minimally Invasive Cardiovascular Surgery*. In: Proceedings of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2004), Chicago, USA, 2004, S. 735-740
- [TSA] Tsai, R.Y.; Lenz, R.K.: *Real Time Versatile Robotics Hand/Eye Calibration using 3D Machine Vision*. Proceedings: Robotics and Automation 1998, IEEE International Conference on, 24-29 April 1988, S. 554-561
- [TUC] Tuceryan, M.; Navab, N.: *Single Point Active Alignment Method (SPAAM) for Calibrating an Optical See-through Head Mounted Display*. Proceedings IEEE International Symposium on Augmented Reality, ISAR '00, Germany, 2000.
- [VER] Verplaetse, C.: *Inertial proprioceptive devices: Selfmotion-sensing toys and tools*. IBM Systems Journal, Volume 35, NOS 3&4, 1996
- [VRC] Internetauftritt der vrcom Gesellschaft für immersive Visualisierungslösungen mbH, Darmstadt  
<http://www.vrcom.de>
- [VRD] Internetauftritt der VR Depot Vetrtriebsgesellschaft (Logitech Produkte)  
<http://www.vrdepot.com/vrteclg.htm>
- [WAG] Wagner, M.: *Tracking with Multiple Sensors*. Dissertation an der Technischen Universität München, Fakultät für Informatik, 2005
- [WAN] Wanstall, B.: *HUD on the head for combat pilots*. Z. Interavia Vol. 44 (1989), S. 334-338

- [WHI] Whitaker, R. T.; Crampton, C.; Breen, D. E.; Tuceryan, M.; Rose, E.: *Object Calibration for Augmented Reality*. Proceedings of Eurographics '95, Maastricht, 1995
- [XSE] Internetauftritt der Firma Xsens Technologies B.V.  
<http://www.xsens.com>
- [YNA] You, S.; Neumann, U.; Azuma, R.: *Hybrid Inertial and Vision Tracking for Augmented Reality Registration*. In Proceedings of the IEEE VR '99, pp. 260-267, 1999
- [ZAC] Zachmann G.: *Distortion correction of magnetic fields for position tracking*. Technical report, Fraunhofer Institute for Computer Graphics (IGD), 1997
- [ZEL] Zeltzer, D.: *Autonomy, Interaction and Presence*. In: Presence Nr. 1, 1992, S. 127-132
- [ZHA] Zhang, Z.: *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. Microsoft Research, One Microsoft Way, Redmond, USA, 1998
- [ZIM] Zimmermann, P.; Purschke, F.; Rabaetje, R.; Schulze, M.; Starke, A.; Symietz, M.: *Virtual Reality - New Methods of Improving and Accelerating Vehicle Development*. In: Proceedings of the International Conference Florence ATA 1997, S. 461-471
- [ZIS] Zisserman, A.; Hartley, R.: *Multiple View Geometry in computer vision*. 2. Auflage, Cambridge University Press, Cambridge, 2003
- [3DI] 3Dims: Internetauftritt der Firma 3Dims GmbH, Frankfurt  
<http://www.3dims.de>

Referenzen, die sich auf eine Angabe im World Wide Web beziehen, basieren auf dem Datenstand vom 21. April 2006.