

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen

Andreas A. Eursch

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. T. C. Lüth

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ.-Prof. R. Macián-Juan, Ph.D.

Die Dissertation wurde am 10.03.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.06.2010 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die Förderung und Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr. Rafael Macián-Juan, dem Leiter des Lehrstuhls für Nukleartechnik der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim Lüth danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich herzlich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des *iwb* sowie bei allen Studentinnen und Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, vor allem bei Frau Dipl.-Ing. Andrea Reiter, Herrn Dr.-Ing. Mark Harfensteller, Herrn Dipl.-Ing. Hendrik Schellmann und Herrn Dr.-Ing. Martin Prasch, sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Ma Du, Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Ulrich und Herrn Dipl.-Ing. Tobias Zeilinger.

Nicht zuletzt gilt ein ganz besonderer Dank meinen Eltern Marga und Andreas Eursch für ihre großzügige Förderung meiner Ausbildung sowie ihre stetige wohlwollende Unterstützung. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

München, im September 2010

Andreas Eursch

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
--------------------------------	----------

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	V
---	----------

1 Einleitung	1
---------------------------	----------

1.1	Ausgangssituation und Motivation	1
1.1.1	Krebs.....	1
1.1.2	Krebsdiagnose und -therapie auf der Basis radioaktiver Stoffe.....	1
1.1.3	Probleme bei der Versorgung mit radioaktiven Stoffen.....	2
1.2	Zielsetzung der Arbeit.....	3
1.3	Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit	5

2 Situationsanalyse	7
----------------------------------	----------

2.1	Überblick	7
2.2	Herstellung und Verwendung radioaktiver Substanzen	7
2.2.1	Grundlagen der Radioaktivität	7
2.2.2	Gefährdung des Menschen - Grenzwerte	9
2.2.3	Grundlagen zu Heißen Zellen.....	10
2.2.4	Medizinische Nutzung radioaktiver Substanzen	12
2.2.5	Alpha-Partikel-Immun-Therapie – Beispiel für Radiotherapeutika	14
2.2.6	Produktion von Radioisotopen	16
2.3	Problemanalyse bezüglich Arbeiten an einer Produktionsanlage	18
2.3.1	Anspruchsvolle Aufgaben	18
2.3.2	Hohe Komplexität der Produktionsanlage	20
2.3.3	Potentielle Gesundheitsgefährdung	20
2.3.4	Psychische Belastung	21
2.4	Notwendigkeit manueller Arbeit.....	23
2.4.1	Sinnvoller Automatisierungsgrad.....	23
2.4.2	Manueller Interaktionsbedarf bei vollautomatisierten Anlagen.....	23
2.4.3	Qualitäten der menschlichen Hand.....	24
2.5	Problemanalyse der Produktion in Heißen Zellen	26
2.5.1	Allgemeines.....	26
2.5.2	Der Arbeitsraum in der Heißen Zelle	27
2.5.3	Das Bleiglasfenster als Problemursache.....	28
2.6	Resumee	33

3 Stand der Forschung und Technik.....35

3.1	Allgemeines	35
3.2	Stand der Technik bei der Produktion radioaktiver Stoffe.....	35
3.2.1	Arbeitsumgebung für manuelle Tätigkeiten	35
3.2.2	Verfügbare Hilfsmittel	36
3.2.3	Unterstützung der Produktionsmitarbeiter.....	38
3.3	Stand der Forschung	38
3.4	Alternativen für das Bleiglasfenster	39
3.4.1	Dünneres Bleiglas mit zusätzlicher Blende	39
3.4.2	Kameras in radioaktiven Umgebungen	40
3.4.3	Verfügbare Kamerasysteme als Bleiglasfensterersatz.....	41
3.5	Verfügbare immersive Kamerasysteme.....	43
3.5.1	Allgemeines	43
3.5.2	Militärische Anwendungen.....	43
3.5.3	Computerspiele	43
3.5.4	Medizintechnik	44
3.6	Verwendung von Augmented Reality in radioaktiven Umgebungen	44
3.6.1	Überblick über den Abschnitt.....	44
3.6.2	Grundlagen von Augmented Reality	45
3.6.3	Augmented Reality für Heiße Zellen.....	46
3.6.4	Virtuelle Technologien in radioaktiven Umgebungen	46
3.7	Überblick über AR-Anwendungen.....	49
3.7.1	Anwendung von Augmented Reality allgemein.....	49
3.7.2	Anwendung von Augmented Reality in der Industrie	50
3.7.3	Augmented Reality in der Produktion	50
3.8	Zusammenfassung und Defizitbewertung	50

4 Konzept eines Assistenzsystems.....53

4.1	Überblick über das Kapitel	53
4.2	Anforderungen an die Produktionsumgebung.....	53
4.2.1	Allgemeines	53
4.2.2	Sicherheit für das Personal	53
4.2.3	Erfüllung gesetzlicher Vorschriften für medizinische Produkte	54
4.2.4	Niedrige Kosten	54
4.2.5	Zuverlässigkeit.....	55
4.2.6	Flexibilität und Erweiterbarkeit	55
4.2.7	Kurzfristige Realisierbarkeit.....	55

4.3	Lösungssuche	56
4.3.1	Allgemeines	56
4.3.2	Lösungen für die Probleme an der Heißen Zelle.....	57
4.3.3	Lösungen für die Unterstützung der Produktionsmitarbeiter	58
4.4	Konzept eines intelligenten Assistenzsystems	60
4.4.1	Allgemeines	60
4.4.2	Intelligente Assistenz.....	61
4.4.3	Realisierung einer optimalen Informationsversorgung	61
4.4.4	Konzept eines immersiven Kamerasystems	63
4.4.5	Assistenz auf Basis von Augmented Reality.....	65
4.4.6	Low-Cost-Ansatz.....	66
5	Immersives Kamerasystem.....	67
5.1	Überblick über das Kapitel.....	67
5.2	Komponenten des immersiven Kamerasystems.....	67
5.2.1	Kamera als Ersatz für das Bleiglasfenster	67
5.2.2	Ausgabegeräte	75
5.3	Steuerung des Kamerasystems	78
5.3.1	Allgemeines	78
5.3.2	Steuerprinzipen.....	79
5.3.3	Alternativen für die Hand als Steuerelement	80
5.3.4	Konzepte der Bewegungserfassung.....	81
5.3.5	Steuerung der Kamera-Zoomfunktion.....	83
5.4	Umsetzung und Validierung.....	85
5.4.1	Allgemeines	85
5.4.2	Vorauswahl.....	85
5.4.3	Erste Versuchsreihe	87
5.4.4	Zweite Versuchsreihe	103
5.5	Fazit und Gestaltungsempfehlung.....	116
6	Augmented-Reality-Unterstützung in Heißen Zellen	119
6.1	Überblick über das Kapitel.....	119
6.2	Gestaltungsansätze für die AR-Unterstützung	119
6.2.1	Optimale Informationsversorgung	119
6.2.2	Funktionen des Assistenzsystems	121
6.2.3	Tracking.....	133
6.2.4	Gestaltung der Benutzerschnittstelle	137
6.3	Unterstützung über den gesamten Produktlebenszyklus	139

6.3.1	Allgemeines	139
6.3.2	Planungs- und Entwicklungsphase	139
6.3.3	Realisierung der Anlage.....	140
6.3.4	Inbetriebnahme der Anlage.....	140
6.3.5	Umbau- und Änderungsarbeiten.....	141
6.3.6	Abbau und Recycling.....	142
6.4	Exemplarische Umsetzung der AR-Unterstützung	142
6.4.1	Allgemeines	142
6.4.2	Verwendete AR-Technologie	142
6.4.3	Realisierte Funktionen	144
6.5	Fazit	148
6.5.1	Nachhaltige Verbesserung der Situation möglich	148
6.5.2	Defizite.....	149
6.5.3	Risiken	149
6.6	Gestaltungsempfehlungen	150
6.7	Überleitung	151
7	Wirtschaftliche Bewertung und Verallgemeinerung	153
7.1	Überblick über das Kapitel	153
7.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	153
7.2.1	Allgemeines	153
7.2.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beim Kamerasystem	154
7.2.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beim AR-System	156
7.3	Verallgemeinerung	157
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	161
9	Literatur	165
10	Expertengespräche.....	187
11	Anhang	189
11.1	Abbildungsverzeichnis	189
11.2	Tabellenverzeichnis	193

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

Abk.	Bedeutung
AGS	American Glovebox Society
ALARA	As Low As Reasonably Achievable (dt. „so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar“)
AMG	Arzneimittelgesetz
APIT	Alpha-Particle-Immuno-Therapy (dt. Alpha-Teilchen-Immun-Therapie)
AR	Augmented Reality
ARRDS	Augmented Reality Radiation Display System
AtG	Atomgesetz
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge Coupled Device
CID	Charge Injection Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (dt. komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter)
DEXUS	Decommissioning Engineering Support System
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
GMP	Good Manufacturing Practice
GPS	Global Positioning System
HMD	Head Mounted Display
HPLC	High Performance Liquid Chromatography (dt. Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie)
IP-Kamera	Internet-Protokoll-Kamera, Netzwerkkamera

Abk.	Bedeutung
LCD	Liquid Crystal Display, dt. Flüssigkristallbildschirm
LED	Light Emitting Diode
MIBG	Meta-Jodbenzylguanidin
MSKCC	Memorial Sloan Kettering Cancer Center in New York
MTAs	Medizinisch Technische Assistenten
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OST	Optical-See-Through
PET	Positronen Emissions Tomographie
PPM	Pulsphasenmodulation
PTZ-Kamera	PTZ steht für pan, tilt, zoom (dt. schwenken, neigen, zoomen)
PWM	Pulsweitenmodulation
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STARS	Sticky Technology for Augmented Reality Systems
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SVGA	Super Video Graphics Array
TVL	TV-Linien
VGA	Video Graphics Array -> Bildauflösung
VR	Virtual Reality
VST	Video-See-Through
WHO	World Health Organisation

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

1.1.1 Krebs

Die Krankheit Krebs stellt eine der größten Bedrohungen für die Gesundheit und das Leben der Menschen dar. Allein in Deutschland erkranken Schätzungen des Robert-Koch-Institutes zufolge jedes Jahr mehr als 400.000 Menschen neu an einem bösartigen Tumor (BERTZ et al. 2006, ROBERT KOCH-INSTITUT 2006). Im Jahr 2005 waren weltweit 24,6 Millionen Menschen von der Krankheit betroffen, 7,6 Millionen Menschen starben daran. Das entspricht 13 % aller Todesfälle weltweit (WHO 2007a). In industrialisierten Ländern wie den USA oder den europäischen Staaten ist Krebs die zweithäufigste Todesursache nach den Herz-Kreislauf-Erkrankungen; für Menschen mittleren Alters ist es sogar der primäre Ablebensgrund (AMERICAN CANCER SOCIETY 2004, NIEDERLAENDER 2006). Experten erwarten einen weiteren starken Zuwachs bei den Betroffenen (VFA 2007). Die World Health Organisation (WHO) schätzt ihre Zahl für das Jahr 2020 auf 30 Millionen, was einem Anstieg um 22 % entspricht. Die Anzahl der jährlichen Todesopfer soll sich um 50 % bis auf 11,4 Millionen erhöhen (WHO 2007b). Diese Zahlen belegen den großen und weiter wachsenden Bedarf an medizinischen Verfahren, um Krebserkrankungen zu erkennen und zu behandeln.

1.1.2 Krebsdiagnose und -therapie auf der Basis radioaktiver Stoffe

Radioaktive Stoffe spielen bei der Diagnose und der Therapie von Krebs eine bedeutende Rolle (HÜBNER 2004, MACIAN 2006). Sie haben sich besonders in diesem Bereich der klinischen Medizin etabliert und sind nicht mehr wegzudenken (GRÜNWALD 2001). In den USA werden jährlich fast 20 Millionen nuklearmedizinische Anwendungen vorgenommen (IMV 2007, SNM 2007a).

Die Krebs-Diagnose ist eine der Hauptanwendungen der Nuklearmedizin (NEI 2009). Jedes Jahr finden allein in Deutschland knapp 4 Millionen nuklearmedizinische Untersuchungen statt (STAMM-MEYER et al. 2006). Zahlenmäßig seltener, aber nicht minder bedeutend, ist die Therapie der Krebserkrankungen mit radioaktiven Stoffen, die durch eine große Vielfalt gekennzeichnet ist. Mehr als 100 unterschiedliche Krebsarten sind bekannt, jeder Teil des Körpers kann betroffen sein (WHO 2007a). Daher existiert eine große Anzahl verschiedener Therapieformen, die in der

Regel nur die Behandlung einer oder weniger Krebsarten ermöglichen. Die klassischen Verfahren der Krebsbekämpfung sind operative Entfernung, Strahlentherapie und medikamentöse Tumortherapien, bei denen die Chemotherapie vorherrschend ist (SCHMITT 1998). Ein wesentlicher Vorteil der Chemotherapie besteht darin, dass auch verteilte Tumorzellen abgetötet werden, die zur gefährlichen Metastasenbildung in anderen Organen führen können und oft gar nicht mehr detektierbar sind (KID 2007c). Aufgrund schwerwiegender Nebenwirkungen und teilweise mangelhafter Wirksamkeit ist sie allerdings sehr umstritten (MOSS 1997). Experten erwarten aus diesem Grund eine Abkehr von unspezifischen Chemotherapien. An ihre Stelle sollen gezielte Therapieformen treten, die die tödliche Wirkung auf die Krebszellen beschränken und so die gesunden Zellen schonen (VFA 2007, NIERMANN 2005).

Ein vielversprechender Vertreter dieser neuen Krebsbehandlungsformen ist die Radioimmuntherapie. Spezifische Antikörper, an die Radioisotope gebunden werden, sorgen für eine gezielte und hoch wirksame Abtötung der Krebszellen, ohne das gesunde Gewebe zu schädigen. Für diesen Zweck eignen sich besonders kurzlebige Alphastrahler wie Wismut-213, da die Reichweite der Strahlung stark begrenzt ist und dadurch deren tödliche Wirkung im Wesentlichen auf die Krebszellen beschränkt werden kann. Die Verwendung von spezifischen Antikörpern ermöglicht, ähnlich wie bei der Chemotherapie, die Bekämpfung vereinzelter und verstreuter Krebszellen. (SCHRÖCK 2004, HUBER 2003, HÜBNER 2004, MILENIC & BRECHBIEL 2004)

Eine größere Anzahl neuer Therapien und Behandlungsformen mit zum Teil vollkommen neuartigen Ansätzen, besonders auch in Verbindung mit Radioisotopen, befindet sich in der Forschungs- und Erprobungsphase und könnte bereits in naher Zukunft für Behandlungen zur Verfügung stehen (TLB 2007, DZB 2007). Darin liegt neben dem weltweiten Anstieg der Neuerkrankungen ein Grund für die zu erwartende starke Zunahme bei der Nachfrage nach radioaktiven Stoffen. Eine Studie der Marktforschungsgesellschaft Frost & Sullivan kommt zu dem Ergebnis, dass sich das Volumen für therapeutische Radiopharmaka allein in den USA von 400 Mio. US-Dollar im Jahr 2001 auf knapp 4 Mrd. US-Dollar im Jahre 2010 verzehnfachen wird (DZB 2007).

1.1.3 Probleme bei der Versorgung mit radioaktiven Stoffen

Wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung der nuklearmedizinischen Diagnose- und Therapieverfahren ist die ausreichende Verfügbarkeit der

benötigten radioaktiven Stoffe. Angesichts des steigenden Bedarfs an Radiopharmazeutika kommt der Produktion von radioaktiven Stoffen eine besondere Bedeutung zu. Die Verbesserung der Herstellungsmöglichkeiten von Radionukliden und Antikörpern durch technische Fortschritte führte in den letzten Jahren bereits zu einer steigenden Beachtung der Radioimmuntherapie (SCHRÖCK 2004). In dieser Arbeit wird gezeigt, dass immer noch schwerwiegende Hemmnisse vorhanden sind. Sie stehen oftmals einer ausreichenden Versorgung im Wege und können im schlimmsten Fall die Einführung einer neuen Therapie verhindern (RALOFF 1999). Teilweise sind die verfügbaren Mengen nicht einmal für die Durchführung von klinischen Studien ausreichend, geschweige denn für Therapien in großem Maßstab (HARFENSTELLER 2006, MEYER 2005).

Das größte Hemmnis ist die permanent vorhandene radioaktive Strahlung, die mit einer hohen Aktivität und je nach verwendeten Radioisotopen auch mit einer langen Halbwertszeit verbunden sein kann. Dies ist besonders problematisch, da für die Herstellung der radioaktiven Stoffe zum Teil manuelle Tätigkeiten im Strahlungsfeld notwendig sind. Durch die radioaktive Strahlung sind die hiermit befassten Personen einer ständigen potentiellen Gefährdung ihrer Gesundheit ausgesetzt. Das Bewusstsein dieser Bedrohung führt außerdem zu einer psychischen Belastung, die in einem erhöhten Fehlerrisiko bei der Arbeit resultiert (FRIELING & SONNTAG 1987, HOUTS et al. 1988). Zusätzlich sind die erforderlichen Tätigkeiten oft sehr anspruchsvoll und stellen nicht selten eine Herausforderung für die Arbeitskräfte dar. Im radioaktiven Umfeld sind überdies Fehler zu vermeiden, da sie zu schwerwiegenden Konsequenzen wie einem Austritt von radioaktivem Material und dadurch zur Kontamination des Arbeitsbereiches oder der Produktionsanlage führen können. Die anspruchsvolle Arbeit mit radioaktiven Stoffen wird zusätzlich durch die ungünstigen Arbeitsbedingungen erschwert. Aufgrund der vorherrschenden Strahlung finden die Arbeiten in speziellen abgeschirmten Behältern aus Blei, den sogenannten *Heißen Zellen*, statt, welche die Bewegungsfreiheit der Produktionsmitarbeiter erheblich einschränken und sie zu einer ergonomisch ungünstigen und ermüdenden Haltung zwingen. Hauptgrund hierfür ist das dicke Bleiglasfenster, das zur Überwachung der Tätigkeiten im Behälter benötigt wird und für zahlreiche Nachteile verantwortlich ist.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Verbesserung der Arbeitsbedingungen für manuelle Tätigkeiten in radioaktiven Umgebungen, besonders in Heißen Zellen. Das Hauptaugenmerk liegt auf einem höheren Strahlenschutzniveau für die betroffenen Personen

durch die Verringerung der Exposition. Ein wesentliches Teilziel ist die Eliminierung der derzeit auftretenden Beeinträchtigungen bei der Arbeit, so dass die Aufenthaltsdauer der Hände im Strahlenfeld auf ein Minimum reduziert werden kann. Entscheidende Bedeutung kommt der Substitution des stark problembehafteten Bleiglasfensters zu, das durch ein immersives Kamerasystem ersetzt werden soll. Die Verwendung einer schwenk- und neigbaren Kamera mit Zoom-Funktion für detaillierte Bilder verspricht große Vorteile. Voraussetzung hierfür ist die intuitive Gestaltung der Steuerung von Kamerabewegung und Zoom, um die Konzentration auf die Hauptaufgaben zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept eines immersiven Kamerasystems entwickelt und der daraus resultierende Nutzen für den betrachteten Anwendungsfall untersucht.

Neben der Beseitigung der bestehenden Hemmnisse wird eine aktive Unterstützung der Produktionsmitarbeiter bei ihren anspruchsvollen Tätigkeiten in Heißen Zellen angestrebt, damit Fehler und Mehrarbeit bereits im Ansatz vermieden werden können. Bei der technischen Umsetzung eines Unterstützungssystems kommt der Visualisierung eine Schlüsselrolle zu, da aufgrund der vorgegebenen Rahmenbedingungen eine wesentliche Schwierigkeit darin besteht, dem Produktionspersonal die notwendigen Informationen und Anweisungen adäquat zugänglich zu machen. Diese Anforderung spricht für die Visualisierungstechnologie Augmented Reality, die es ermöglicht, Informationen auf vielfältige Art und Weise direkt in das Sichtfeld der Produktionsmitarbeiter¹ einzublenden und so die Realität zu erweitern. Im Rahmen der Arbeit werden Nutzen und Anwendungsmöglichkeiten dieser neuartigen, aber verfügbaren Technologie im Bereich der manuellen Arbeit mit radioaktiven Stoffen untersucht und Merkmale einer optimalen Gestaltung ermittelt.

Übergreifende Ziele der Arbeit sind zudem Wirtschaftlichkeit und Anwendbarkeit. Die entwickelten Lösungen sollen kurzfristig umsetzbar und einfach zu realisieren sein. Nur wenn der zusätzliche Aufwand und die entstehenden Kosten nicht zu hoch sind oder sogar finanzielle Vorteile erzielt werden können, haben technische Neuerungen eine Chance wirklich eingesetzt zu werden, auch wenn sie der Sicherheit der Mitarbeiter dienen.

Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, die Produktion von radioaktiven Substanzen wirtschaftlicher zu gestalten, um der Vision einer optimalen Versorgung der Menschheit näher zu kommen und dadurch die Bekämpfung von Krebs und anderer

¹ In dieser Arbeit wurde auf geschlechtsneutrale Formulierungen geachtet. Wo dies nicht möglich war, wurde wegen der besseren Lesbarkeit lediglich die männliche Form verwendet.

Krankheiten zu fördern sowie neue, vielversprechende medizinische Anwendungen auf der Basis radioaktiver Stoffe zu ermöglichen.

1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Nach der einleitenden Darstellung der Bedeutung radioaktiver Substanzen folgt in Kapitel 2 die Analyse der aktuellen Situation bei der Produktion radioaktiver Stoffe (siehe Abbildung 1). Es werden die dabei sehr ungünstigen Rahmenbedingungen in Heißen Zellen dargestellt und die Aufgaben sowie die auftretenden Probleme näher analysiert. Kapitel 3 gibt einen Überblick über den Stand der Forschung und Technik und zeigt die derzeit verfügbaren Lösungsansätze auf. Den Hauptteil der Arbeit bilden die Kapitel 4 bis 6, in denen der Lösungsansatz dieser Arbeit vorgestellt wird. Zunächst wird in Kapitel 4 das Konzept eines intelligenten Assistenzsystems als Gesamtsystem betrachtet, bevor in den Kapiteln 5 und 6 die beiden Hauptbestandteile, das immersive Kamerasystem und die Augmented-Reality-Unterstützung, detailliert erklärt werden. Auf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel 7 folgen Überlegungen zu einer verallgemeinerten Anwendung. Die Arbeit schließt mit einer kurzen Zusammenfassung der Ergebnisse und gibt einen Ausblick mit weiteren Entwicklungs- und Anwendungsmöglichkeiten.

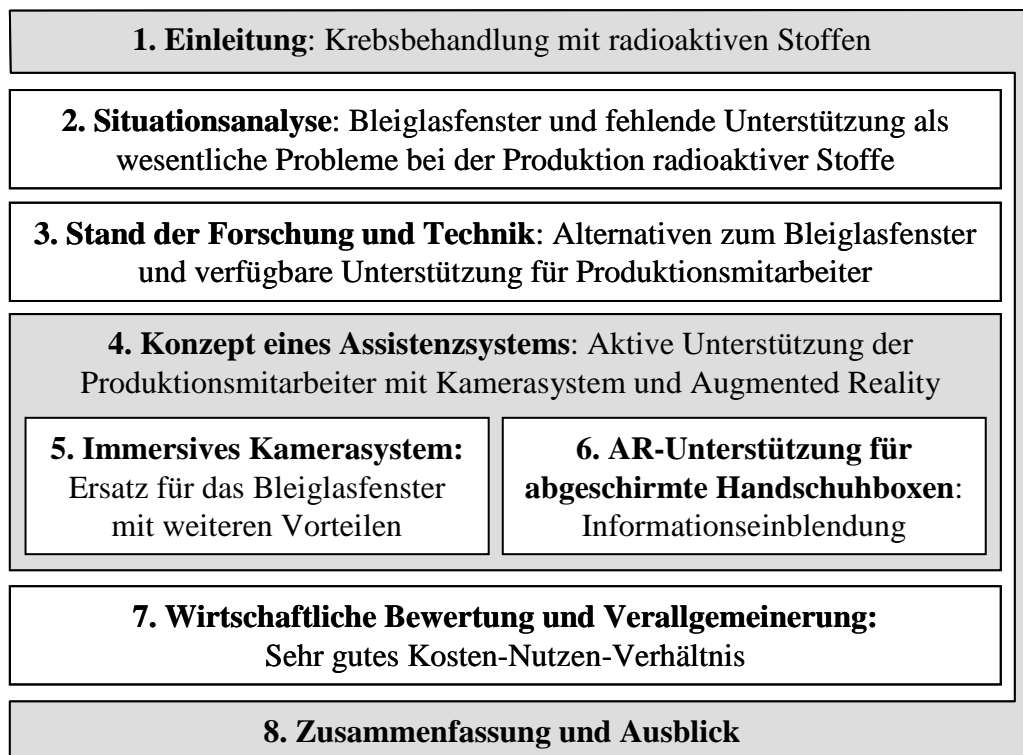


Abbildung 1: Gliederung der Arbeit

2 Situationsanalyse

2.1 Überblick

Dieses Kapitel dient der Erläuterung von notwendigem Grundlagenwissen sowie der Darlegung und Eingrenzung des Betrachtungsbereichs dieser Arbeit. Zunächst wird das Arbeitsumfeld vorgestellt, das bei der Produktion von Radioisotopen vorherrscht und für das im Rahmen dieser Arbeit Verbesserungen angestrebt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Analyse der derzeitigen Situation. Sie ist insbesondere durch die hohen Anforderungen an das Produktionspersonal einerseits und die erschwerenden Probleme und Hemmnisse andererseits gekennzeichnet. Abschließend werden die Defizite analysiert und der Handlungsbedarf abgeleitet.

2.2 Herstellung und Verwendung radioaktiver Substanzen

Das wesentliche Merkmal der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Arbeitsumgebung ist das Vorliegen von Radioaktivität, das auch die Hauptursache für Probleme und erhöhte Anforderungen an Mensch und Technik ist. Daher erfolgt zunächst eine Betrachtung der Grundlagen der Radioaktivität mit den wesentlichen Größen und Grenzwerten sowie der Auswirkungen für den Menschen mit den daraus resultierenden Schutzmaßnahmen.

2.2.1 Grundlagen der Radioaktivität

2.2.1.1 Definition und Strahlungsarten

Das Meyers Lexikon definiert Radioaktivität als *„die Eigenschaft bestimmter Atomkerne (Radionuklide), sich spontan, das heißt ohne äußere Einwirkung, in andere Atomkerne umzuwandeln (radioaktiver Zerfall), wobei Energie in Form von Teilchen, wie Alphateilchen (α -Strahlung), Betateilchen (β -Strahlung), Neutronenstrahlung und/oder elektromagnetischer Strahlung (Gammastrahlung, γ -Strahlung) frei wird.“* (MEYERS 2008)

2.2.1.2 Kenngrößen der Radioaktivität

Die Aktivität ist die physikalische Größe zur quantitativen Beurteilung der Strahlung. Sie ist definiert als die Anzahl der Zerfälle pro Zeiteinheit einer bestimmten Stoffmenge und wird in der Einheit Becquerel (Bq) angegeben. 1 Bq entspricht

einem Zerfall pro Sekunde (VON PHILIPSBORN 1995). Mit diesem Zahlenwert sind allerdings keine Aussagen zu radiologischen Risiken und deren Konsequenzen möglich. Für die Angabe der Strahlenexposition, der sog. Dosis, werden verschiedene weitere Kennzahlen verwendet. Die Energiedosis ist hierbei die zentrale Größe, da radioaktive Strahlung durch Ionisations- und Anregungsprozesse Energie in Materie einbringt. Sie ist definiert als die absorbierte Strahlungsenergie eines Volumenelements an Materie bezogen auf dessen Masse. Für den Strahlenschutz sind vor allem die Organdosis und die effektive Dosis von Bedeutung, da sie Aussagen zur Schädigungswirkung der Strahlung auf den Menschen zulassen. Die Organdosis gibt die gewichtete mittlere Energiedosis im Gewebe in Abhängigkeit von der Strahlenart an. Dadurch wird die unterschiedlich starke biologische Wirkung der verschiedenen Strahlungsarten berücksichtigt. Bei der effektiven Dosis wird zusätzlich die sich deutlich unterscheidende Strahlenempfindlichkeit der menschlichen Organe und Gewebe einbezogen, indem die Organdosis mit dem so genannten Gewebe-Wichtungsfaktor multipliziert wird (siehe Tabelle 1). Die Einheit beider Größen ist Sievert (Sv). (VEITH 2001, SCHICHA & SCHOBER 1997, DIN 6814 TEIL 1 2005)

Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R		Gewebe-Wichtungsfaktor w_T	
Art und Energiebereich	w_R	Gewebe oder Organ	w_T
Photonen, alle Energien	1	Keimdrüsen	0,20
Elektronen und Myonen	1	Knochenmark (rot)	0,12
Neutronen, Energie < 10 keV	5	Lunge	0,12
10 keV bis 100 keV	10	Leber	0,05
> 100 keV bis 2 MeV	20	Brust	0,05
> 2 MeV bis 20 MeV	10	Schilddrüse	0,05
> 20 MeV	5	Haut	0,01
Protonen	5	Knochenoberfläche	0,01
Alphateilchen (Heliumkerne)	20	Andere Organe und Gewebe	0,05

Tabelle 1: Strahlungs- und Gewebe-Wichtungsfaktor (aus VEITH 2001)

2.2.1.3 Schutzmaßnahmen bei der Arbeit mit radioaktiven Substanzen

Für Maßnahmen zum Schutz vor radioaktiver Strahlung ist die Organdosis relevant, die sich proportional zur Expositionszeit sowie der Aktivität der Strahlenquelle und umgekehrt proportional zur Abschirmung und dem Abstand zur Strahlenquelle

verhält. Es gilt folgende physikalische Gesetzmäßigkeit (DIN 25425 TEIL1 1995, HARFENSTELLER 2006):

$$H \sim t \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{1}{k} \cdot A$$

mit:	H:	Organdosis	Einheit: Sievert (Sv)
	t:	Aufenthalts-/Expositionszeit	Einheit: Sekunden
	r:	Abstand zur Strahlenquelle	Einheit: Meter
	k:	Abschirmung	Einheit: -
	A:	Aktivität	Einheit: Becquerel (Bq)

Daraus leiten sich die Schutzmaßnahmen gegen radioaktive Strahlung ab:

- Minimierung der Aufenthaltsdauer in einem Strahlenfeld
- Maximierung des Abstandes zur Strahlenquelle
- Maximierung der Abschirmung der Strahlenquelle
- Minimierung der Aktivität der Strahlenquelle
- Verhinderung einer Aufnahme (Inkorporation) radioaktiver Substanzen

Diese Leitsätze werden gemäß den Anfangsbuchstaben der Maßnahmen auch als 5-A-Regeln bezeichnet. Eine weitere grundlegende Richtlinie des Strahlenschutzes zur Dosisbegrenzung ist das ALARA-Konzept der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP 1993). Die Bezeichnung ist ein Akronym für „**A**s **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable“, das mit „so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar“ übersetzt wird. Es bedeutet, dass jede zusätzliche Einwirkung radioaktiver Strahlung auf den menschlichen Körper vermieden werden soll, so weit dies unter wirtschaftlichen und sozialen Aspekten sinnvoll möglich ist. (ICRP 1993)

2.2.2 Gefährdung des Menschen - Grenzwerte

In der Bundesrepublik Deutschland unterliegt der Umgang mit radioaktiven Stoffen strengen gesetzlichen Vorschriften, die im Atomgesetz (AtG) und in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) ihren Niederschlag finden. Bei der Festlegung der maximal zulässigen Dosis wird nach § 54 der StrlSchV zwischen beruflich strahlenexponierten Personen und der übrigen Bevölkerung unterschieden. Als beruflich strahlenexponiert gelten Personen, die bei ihrer Berufsausübung im Kalenderjahr eine höhere effektive Dosis als 1 mSv erhalten können. Für sie ist maximal eine effektive Dosis von 20 mSv in einem Jahr zulässig. Mit der Einstufung als strahlen-

exponierte Person sind umfassende Schutzmaßnahmen, wie regelmäßige ärztliche Untersuchungen und permanente Überwachung verbunden. (VEITH 2001, VOLKMER 2007a)

Da die einzelnen Organe und Körperpartien unterschiedlich sensibel auf Strahlung reagieren, bestehen zusätzlich Grenzwerte für einzelne Organe. Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass für die äußeren Extremitäten, wie die Hand, gegenüber den empfindlichen Fortpflanzungsorganen und dem roten Knochenmark eine um den Faktor 10 höhere Strahlung zulässig ist, da sie im Wesentlichen nur aus Haut, Knochen und Muskelgewebe bestehen. Auf dieser Besonderheit beruht das Prinzip der Abschirmmaßnahmen für radioaktive Arbeitsumgebungen, wie Heiße Zellen. Der größte Teil der Körpers, vor allem die sensiblen Körperregionen, befinden sich bei diesen im von einem strahlenabsorbierenden Material wie einer Bleiwand geschützten Bereich außerhalb des Strahlungsfeldes. Die robusten Hände können temporär durch die Abschirmung gehalten werden, um im radioaktiven Bereich Arbeiten auszuführen. Der Jahresgrenzwert für die Teilkörperdosis der Hände, die sogenannte Handdosis, beträgt 500 mSv für beruflich strahlenexponierte Personen. (VEITH 2001)

2.2.3 Grundlagen zu Heißen Zellen

Heiße Zellen sind Abschirmmaßnahmen der höchsten Schutzkategorie nach der Norm DIN 6814 TEIL 1 (2005). Sie werden für Arbeiten eingesetzt, bei denen radioaktive Strahlung mit hoher Dosisleistung sowie aggressive Gase und Säuredämpfe auftreten können und trotzdem manuelle Tätigkeiten erforderlich sind (VON GAHLEN 2009). Als Heiße Zellen werden auch große abgeschirmte Räume bezeichnet (siehe Abbildung 2 links), wie sie beispielsweise in Atomkraftwerken vorhanden sind. Sie sind für sehr hohe Strahlungsgefährdung konzipiert und verfügen daher über teilweise meterdicke Betonwände und aufwändige Manipulatoren für die Arbeit darin. In der vorliegenden Arbeit stehen kleinere Ausführungen der Heißen Zelle im Vordergrund, die hauptsächlich in Labors und Kliniken zu finden sind. Kernelement einer solchen kleinen Heißen Zelle ist in der Regel eine gasdichte Handschuhbox aus Kunststoff mit Handschuhen, über die im Inneren der Box gearbeitet werden kann, ohne den darin vorherrschenden Unterdruck zu beeinträchtigen (DIN 25412 TEIL 1 1988). Dort werden die Anlagen oder Vorrichtungen zur Arbeit mit radioaktiven Substanzen aufgebaut (siehe Abbildung 3). Ziel ist, die gefährdenden Stoffe einzukapseln, um ihre Ausbreitung über den Arbeitsbereich hinaus zu verhindern (DUNSTER 1958). Durch den Einsatz von Handschuhboxen wird neben einer Gesundheitsgefährdung durch toxische Stoffe auch eine Querkon-

tamination vermieden, die bei Experimenten, aber auch bei medizinischen Produkten unbedingt ausgeschlossen werden muss (WALTON 1958).



Abbildung 2: Heiße Zellen in großer (links, NLM 2009) und kleiner Ausführung (rechts, SCIENTIFIC INSTRUMENT SALES 2009)

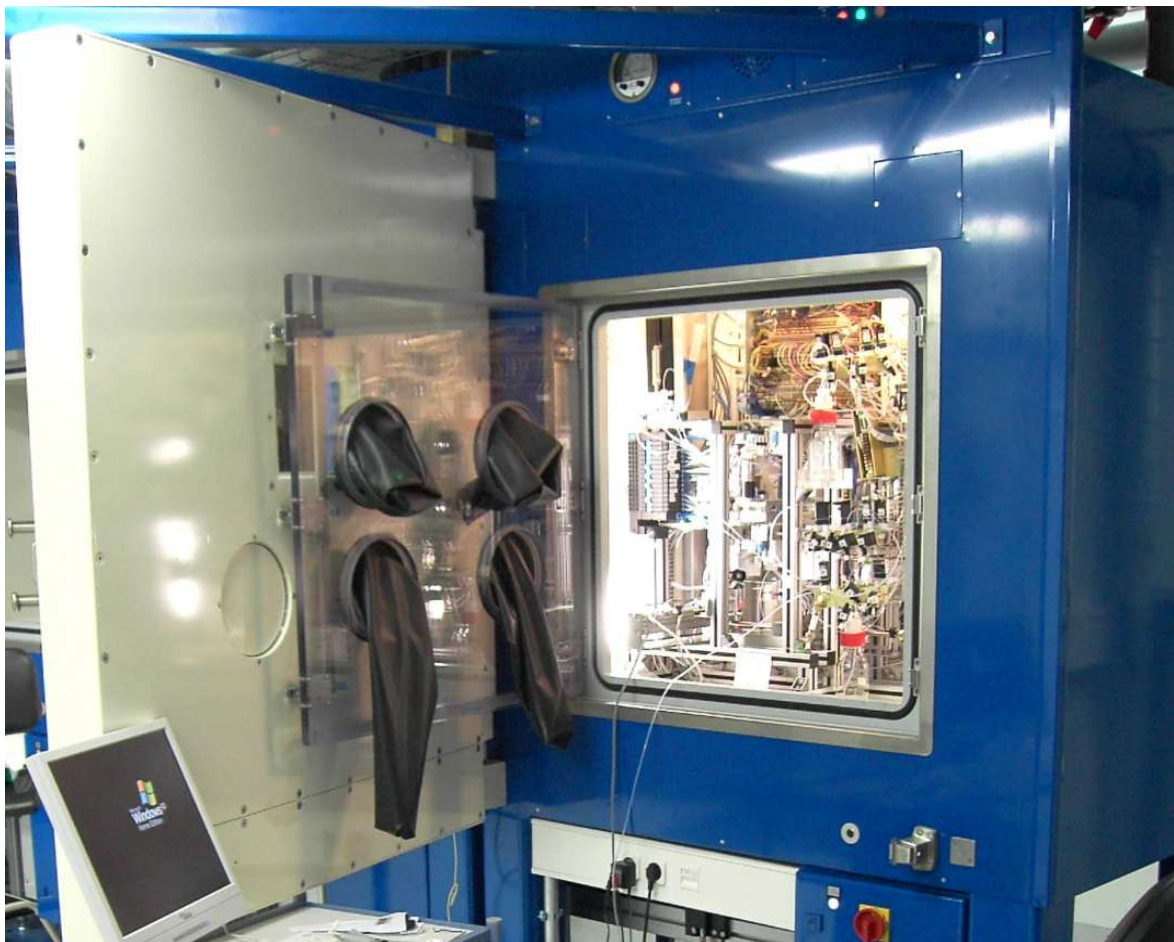


Abbildung 3: Geöffnete Heiße Zelle mit eingebauter Produktionsanlage. Links sind die durchsichtige Türe der Handschuhbox mit den vier Handschuhen und die dicke Türe der Bleiabschirmung mit Bleiglasfenster zu sehen

Aufgrund der potentiell hohen Aktivität ist die Kunststoffbox außen vollständig mit Bleiwänden abgeschirmt, um die Umgebung zu schützen. Als Zugang für die Arbeiten dienen Öffnungen in der Bleiabschirmung für die Hände des Arbeitspersonals und ein Fenster aus Bleiglas zur Koordination der Tätigkeiten in der Heißen Zelle.

Der Umfang der erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen, besonders die Dicke der Abschirmung, hängt nach DIN 25407 BEIBLATT 1 (1994) im Wesentlichen von der Aktivität und damit von Art und Menge der involvierten radioaktiven Stoffe ab. Es muss zwischen den Vorteilen wie dem verbesserten Schutz und den Nachteilen wie höheren Kosten und Komplexität sowie verlangsamtem Arbeiten abgewogen werden, wobei die Verwendung von Handschuhboxen auch zu Kostenvorteilen bezüglich der Gestaltung und dem Betrieb der sonstigen Ausrüstung und des Labors führen kann, da dann beispielsweise die zu erfüllenden Sicherheits- oder Reinheitsanforderungen geringer sind (DUNSTER 1958).

2.2.4 Medizinische Nutzung radioaktiver Substanzen

2.2.4.1 Allgemeines

Die Wirkung radioaktiver Strahlung auf menschliches Gewebe, die zur oben aufgezeigten Gefährdung führt, kann bei sachgemäßer Verwendung auch für positive Zwecke wie die Bekämpfung von Krankheiten genutzt werden. Radioaktive Stoffe finden daher in der Medizin vielfältige Anwendung. Die Nuklearmedizin bietet zahlreiche mittlerweile gut etablierte Untersuchungs- und Behandlungsverfahren (Diagnose und Therapie) für viele Bereiche der Medizin (DGN 2009a, MACIAN 2006). Im Folgenden werden Beispiele hierfür vorgestellt.

2.2.4.2 Diagnose von Tumoren

Die Hauptanwendung der Nuklearmedizin ist die Diagnose von Krebserkrankungen, wobei ein Großteil der nuklearmedizinischen Untersuchungen auf Szintigraphien entfällt. Das sind bildgebende Verfahren, mit denen das Innere des menschlichen Organismus dargestellt werden kann (NEI 2007, KID 2007a, MACIAN 2006). Einer der bekanntesten Vertreter der szintigraphischen Verfahren ist die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) (KID 2007b). Sie basiert auf kurzlebigen Positronen-Emittern wie den Isotopen Fluor-18 oder Gallium-68. Diese reichern sich aufgrund der Ähnlichkeit zu natürlichen Stoffwechselsubstanzen wie Glucose vermehrt in durchblutungsstarken Regionen wie Krebstumoren an und machen sie

dadurch detektierbar. Die Positronen-Emissions-Tomographie ermöglicht so eine sehr effektive Detektion und Lokalisierung von Krebstumoren (SNM 2007b).

Weitere Beispiele für Radionuklide, die sich in den zu untersuchenden Organen anlagern, sind (KIRCHGEORG 2009):

- Technetium, beispielsweise als Technetium-99m-Pertechnetat (m = metastabil) zur Untersuchung der Schilddrüse oder als Technetium-99m-Phosphat für die Skelettszintigraphie,
- Jod, z. B. Jod-123 oder Jod-131 ebenfalls für die Schilddrüsenszintigraphie und
- Thallium, z. B. Thallium-201 zur Untersuchung der Herzmuskeldurchblutung.

2.2.4.3 Behandlung von Tumoren

Ein ebenfalls bedeutender Anwendungsbereich für radioaktive Stoffe ist die Behandlung von Krebserkrankungen. Den größten Bekanntheitsgrad hat aufgrund ihrer häufigen Anwendung die Radio-Jod-Therapie, die auf Jod-131 basiert. Sie findet bei Schilddrüsenüberfunktion sowie bei einem Schilddrüsenkarzinom Anwendung. Das Radioisotop wird direkt verabreicht und lagert sich im Schilddrüsengewebe ab, wo es zu einer Reduzierung des kranken Gewebes führt. Für die sogenannte J-131-MIBG-Therapie wird anstelle der Jodspeicherung in Schilddrüsenzellen die Anreicherung von Meta-Jodbenzylguanidin (MIBG) in bestimmten neuroendokrinen Tumoren der Nebenniere sowie des Verdauungstraktes und in seltenen Tumoren wie dem medullären Schilddrüsenkarzinom genutzt (CHARITE 2009).

Darüber hinaus existiert eine größere Anzahl weiterer Isotope, die für Behandlungen eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind Yttrium-90, Rhenium-186, Kobalt-60 und Cäsium-137. Viele Radiotherapien befinden sich zudem noch im Forschungs- und Erprobungsstatus oder werden derzeit in klinischen Studien getestet (ALLEN 2005). Der Bereich der Krebstherapien wird in den folgenden Kapiteln noch näher betrachtet.

2.2.4.4 Schmerztherapie

Radioaktive Substanzen werden auch für Schmerztherapien eingesetzt, beispielsweise bei Skelettmetastasen. Hierbei stehen neben der Linderung der Schmerzen die Abschwächung der Folgen wie pathologische Frakturen und Knochenmarkverdrän-

gungen im Vordergrund. Die zurzeit am häufigsten verwendeten Radiopharmaka für diese Behandlung sind Rhenium-186-HEDP, Strontium-89-Chlorid sowie Samarium-153 EDTMP. (GRÜNWALD 2001)

Auch entzündliche Gelenkerkrankungen werden im Rahmen der Radiosynoviorthese mit radioaktiven Stoffen behandelt. Hierfür kommen beispielsweise Yttrium-90, Rhenium-186 und Erbium-169 zum Einsatz. Kleine Mengen der Betastrahler werden direkt in den Gelenkspalt injiziert, wo sie Schmerzen lindern und Entzündungen heilen. Welche Isotope verwendet werden, hängt vorwiegend von der Größe der Gelenke ab. (DGN 2009b)

2.2.4.5 Weitere Anwendungen

In der Nuklearmedizin existieren zahlreiche weitere Anwendungen. Ein etwas exotisches Beispiel, das die Vielfalt der Anwendungen verdeutlicht, ist das Heliprobe-System auf der Basis eines Kohlenstoffisotops. Hierbei handelt es sich um einen Atemtest zur Erkennung des Bakteriums *Helicobacter pylori*, das am häufigsten Gastritis und Magenkrebs verursacht (BDN 2009).

Rhenium-188 wird zur Hemmung der Narbenbildung nach einer Aufweitung eines verengten Gefäßes eingesetzt, die oft zu einer erneuten Verkleinerung des Durchmessers führt. Dazu wird das Isotop mit einem Ballonkatheter an die verengte Stelle gebracht und für eine gewisse Zeit dort belassen (TUM 2009). Darüber hinaus sind radioaktive Stoffe bei der Untersuchung des Gehirns und des Zentralen Nervensystems, bei Herzkrankheiten, Rheuma und Skelettkrankheiten und vielen anderen Indikationen nicht mehr wegzudenken (DGN 2009a).

2.2.5 Alpha-Partikel-Immun-Therapie – Beispiel für Radiotherapeutika

Therapien, die auf radioaktiven Stoffen basieren, machen sich die zelltötende Eigenschaft der radioaktiven Strahlung zu Nutze. Die Wirkungsweise von Radiotherapeutika wird anhand eines konkreten Beispiels aufgezeigt: Die Alpha-Partikel-Immun-Therapie (APIT) ist ein neuartiger Ansatz für die gezielte Behandlung von Krebserkrankungen. Es handelt sich um einen Vertreter der Immun-Therapien auf der Basis von Radioisotopen, bei denen Antigene an den Oberflächen der Krebszellen, die ein eindeutiges charakteristisches Merkmal darstellen, zur sicheren Selektion durch Immunzellen verwendet werden (PORTAL FÜR ORGANISCHE CHEMIE 2009). Den Krebspatienten wird ein sogenanntes Immunokonjugat verabreicht, das aus einem spezifischen, monoklonalen Antikörper besteht, an dem über einen

Chelator ein Alpha-Strahler angekoppelt ist. Die Antikörper spüren daraufhin die Krebszellen mit den betreffenden Antigenen im Körper auf und lagern sich dort mit dem Alpha-Strahler an (siehe Abbildung 4). Nach GEERLINGS et al. (1993) und GEERLINGS (1993) eignet sich Wismut-213 sehr gut für die Therapie. Wenn dieses kurzlebige Isotop über Alpha-Zerfälle zu stabilem Wismut Bi-209 zerfällt, werden durch die Strahlung die umliegenden Krebszellen zerstört und der Tumor abgetötet. (HUBER 2003, SCHRÖCK 2004)

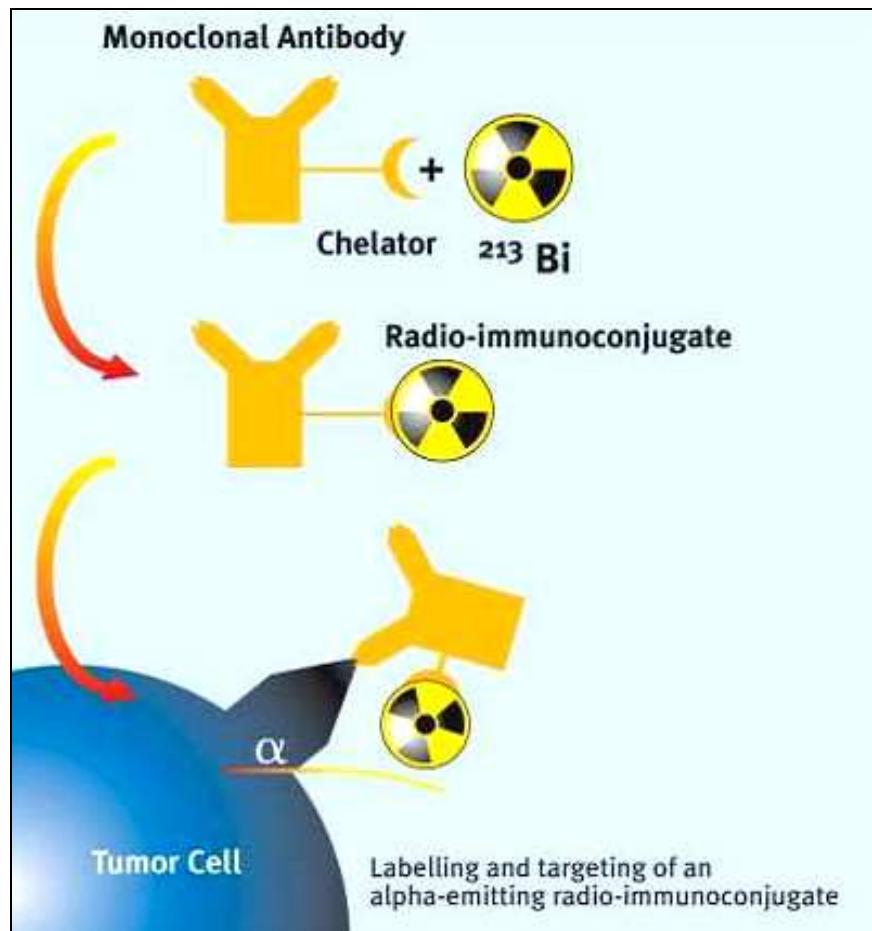


Abbildung 4: Funktionsprinzip der Alpha-Partikel-Immun-Therapie (APIT)
(EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE 2004)

Die Besonderheit bei der APIT ist die Nutzung von Alpha-Strahlern, die eine kurze Reichweite von ca. 72 µm aufweisen, was wenigen Zelldurchmessern entspricht (SCHRÖCK 2004). Dies ermöglicht eine im Gegensatz zur Chemotherapie und zur Strahlentherapie sehr selektive und schonende Behandlung, da die schädigende Wirkung im Wesentlichen auf die Krebszellen begrenzt bleibt. Ein weiterer Vorteil der Alphastrahler ist, dass die hohe Zerfallsenergie nur auf wenige Zellen verteilt wird, wodurch bei diesen die Apoptose, d. h. der kontrollierte Selbstzerstörungsmechanismus der Zelle, ausgelöst wird. (MCDEVITT et al. 1998, HÜBNER 2004, SCHRÖCK 2004, HUBER 2003)

Die APIT ist durch ihre spezifische Wirkung in der Lage, auch Mikrometastasen und Krebszellen, die sich im Blutkreislauf und im Lymphsystem bewegen, zu therapieren (MCDEVITT et al. 1998). Dies ist wichtig, da sich die Metastasen in anderen Organen ablagern und meist für einen erneuten Ausbruch der Krankheit und letztendlich tödlichen Verlauf von Krebserkrankungen verantwortlich sind. Besonders bei stark durchbluteten oder sich im Körper verteilenden Krebsarten kommen die Vorteile der APIT zur Geltung und es bestehen große Chancen auf eine Heilung. Die Therapie wurde unter anderem bereits erfolgreich an Patienten mit akuter myeloischer Leukämie, diffusem Magenkarzinom und Prostatakrebs getestet (JURCIC et al. 1997, HUBER 2003, MCDEVITT et al. 2000). Die APIT steht exemplarisch für eine zukunftsweisende Art von Therapie, da das Prinzip der Kopplung eines Antikörpers mit einem Radioisotop auch mit anderen Antikörpern und Radioisotopen für weitere Krebsarten angewendet werden kann (MCDEVITT et al. 1998, ALLEN 2005).

2.2.6 Produktion von Radioisotopen

2.2.6.1 Allgemeines

Die Betrachtungen in dieser Arbeit beschränken sich auf das Gebiet der Herstellung von Radioisotopen für medizinische Anwendungen. Kernstück einer Isotopenproduktion ist in der Regel eine Nuklearreaktion von Atomen in Teilchenbeschleunigern oder Kernreaktoren. Ein Probenkörper mit dem Edukt, das sogenannte Target, wird dazu in eine Reaktionskammer eingeschleust und bestrahlt. Anschließend erfolgt eine chemische Reinigung, bevor das Produkt für medizinische Anwendungen weiterverarbeitet werden kann. Die großtechnische Produktion zahlreicher Radionuklide wurde erst mit der Entwicklung des Kernreaktors durch Fermi im Jahre 1942 möglich. In der Folge wurde die medizinische Anwendbarkeit zahlreicher Radionuklide untersucht. Allerdings fanden nur verhältnismäßig wenige davon Verwendung (SCHUBIGER 2007). Die zunehmende Bedrohung durch Krebserkrankungen sowie die modernen, deutlich verbesserten technischen Möglichkeiten führen dazu, dass der Einsatz zahlreicher Isotope erneut geprüft wird (SCHMALJOHANN et al. 2005).

Der Produktionsablauf ist für jedes Isotop verschieden. Im Folgenden wird als konkretes Beispiel die Produktion von Actinium-225 betrachtet, das zur Herstellung eines Radiopharmakons für die Alpha-Partikel-Immun-Therapie benötigt wird. Hierbei tritt eine Reihe von Problemen und Beeinträchtigungen auf, die bei anderen Isotopen ebenfalls bestimmend sind.

2.2.6.2 Produktion von Actinium-225 als konkretes Beispiel

Eine weltweite Einführung der in Abschnitt 2.2.5 erläuterten Alpha-Partikel-Immun-Therapie setzt eine ausreichende Verfügbarkeit von Wismut-213 bzw. Actinium-225 voraus. Dies ist gegenwärtig nicht gewährleistet (BOLL et al. 2005, HUBER 2003). Das Isotop wird derzeit durch natürlichen Zerfall aus Uran-233 gewonnen (SCHUTZRECHT US 5355394 1994). Dieser Prozess ist nach HUBER (2003) nicht geeignet, ausreichende Mengen an Actinium-225 zu generieren, da die hierfür erforderliche Menge an spaltbarem Uran-233 nicht zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wurde ein neues Herstellungsverfahren entwickelt, das die Produktion in industriellem Maßstab ermöglichen soll. Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von Wismut-213 von ca. 46 Minuten wird in diesem Verfahren das Mutternuklid Actinium-225 produziert, das mit einer Halbwertszeit von ca. 10 Tagen gut hergestellt und zu den Kliniken transportiert werden kann. (SCHUTZRECHT DE102004022200B4 2006, HARFENSTELLER et al. 2006, MORENO et al. 2005)

Als Ausgangsmaterial für die Produktion von Actinium-225 dient das radioaktive Isotop Radium-226, das in einem speziellen Teilchenbeschleuniger, dem Zyklotron, über mehrere Tage mit Protonen bestrahlt wird. Hierfür muss das Radium in einen Targetträger eingebracht werden, der anschließend hermetisch verschlossen und über ein Transportsystem nach Art eines Fließbandes vollautomatisch zum Zyklotron gebracht und dort an der Bestrahlstation befestigt wird. Nach der Bestrahlung erfolgt auf gleichem Weg der Rücktransport zur Produktionsanlage, wo der Targetträger geöffnet, das Actinium extrahiert und das verbliebene Radium für die nächste Bestrahlung aufbereitet wird. Aufgrund der ionisierenden Strahlung der Edukte und der Produkte ist eine vollständige Automatisierung des Herstellungsprozesses zwingend erforderlich. (APOSTOLIDIS et al. 2005, ZÄH et al. 2005a, HARFENSTELLER et al. 2006)

Die hohe Strahlungstensität bei Anwesenheit des Eduktes und des Produktes macht eine Einhausung der Produktionsanlage mit Bleiwänden notwendig. Besonders problematisch ist das Ausgangsmaterial Radium, da bereits zu Beginn des Prozesses Radioaktivität in großen Mengen vorhanden ist. Die lange Halbwertszeit des Radiums von ca. 1600 Jahren erfordert bei der gesamten Produktionstechnik einen hohen Grad an Zuverlässigkeit. Zusätzlich entsteht bei der Verwendung von Radium das radioaktive Edelgas Radon, was für involvierte Personen die Gefahr einer Inkorporation erhöht. (HARFENSTELLER 2006)

In Abbildung 5 sind vier dieser Heißen Zellen in einem Nebenraum des bunkerartigen Zyklotrongebäudes der TU München in Garching zu sehen. Abbildung 3 und

Abbildung 6 gewähren einen Einblick in das Innere einer der Heißen Zellen. Kennzeichnend für die Produktionsanlage ist eine große Anzahl an Komponenten und die Kombination eines technischen und eines chemischen Anlagenteils.



Abbildung 5: Heiße Zellen für die Produktion von Actinium-225

Im Folgenden werden die wesentlichen Herausforderungen und Probleme bei der manuellen Arbeit in Heißen Zellen vorgestellt.

2.3 Problemanalyse bezüglich Arbeiten an einer Produktionsanlage

2.3.1 Anspruchsvolle Aufgaben

Die manuellen Tätigkeiten, die in der radioaktiven Umgebung anfallen, sind oft anspruchsvoll und stellen nicht selten eine Herausforderung dar. Die Arbeitsschritte können umfangreich und komplex sein. Sie erfordern häufig eine präzise Ausführung, damit die Prozesse richtig ablaufen. Da meist eine große Anzahl verschiedener Aufgaben zu erfüllen ist, die ungewohnt sind und nur selten durchgeführt werden, ist es kaum möglich, Routine zu gewinnen oder Erfahrung zu sammeln.

Insbesondere die Arbeit an einer automatisierten Produktionsanlage, die in den folgenden Abschnitten näher vorgestellt wird, ist anspruchsvoll. Um beispielsweise kleine Komponenten wie Sensoren in der Anlage ordnungsgemäß einbauen oder

warten zu können, sind ein guter Tastsinn und eine hohe Fingerfertigkeit notwendig. Die kompakte Bauweise der meist komplexen Anlagen in Kombination mit der dicken Bleiabschirmung schränkt die Bewegungsfreiheit deutlich ein und reduziert die Erreichbarkeit. Aus der oft unergonomischen Haltung während der Arbeit an der Heißen Zelle resultiert anstrengende und ermüdende Haltearbeit. Die filigranen und fragilen Bauteile der Anlage erfordern eine hohe Konzentration, um keine Schäden zu verursachen. Teilweise werden in der Anlage High-Tech-Komponenten eingesetzt, die aufwändig zu warten sind. Hinzu kommt, dass mehrere Anforderungen und Belastungen gleichzeitig auftreten können, was sich zu einer enormen körperlichen und geistigen Beanspruchung der Produktionsmitarbeiter summieren kann.

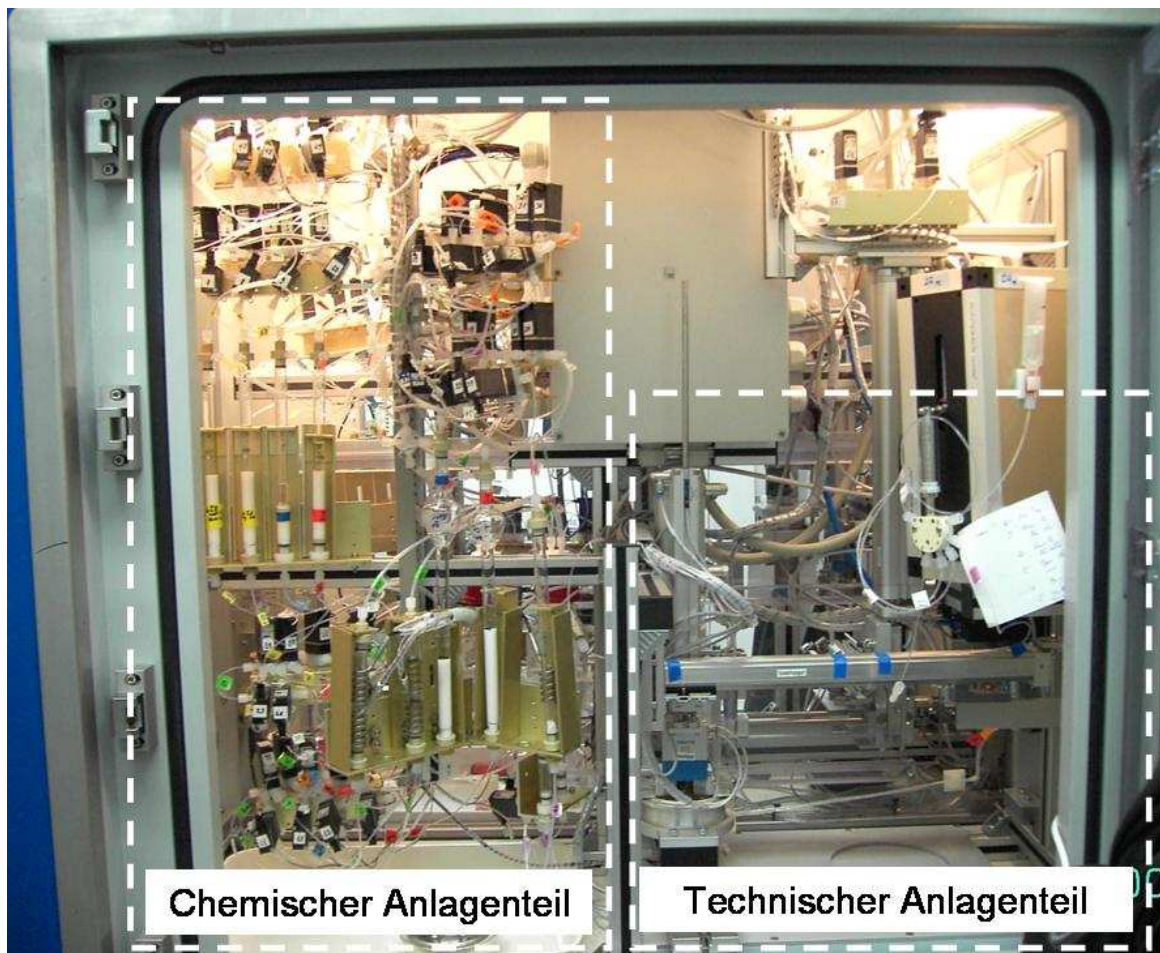


Abbildung 6: Automatisierte Produktionsanlage für Actinium-225 in einer Heißen Zelle mit chemischem und technischem Anlagenteil

Neben Geschicklichkeit und handwerklichen Fähigkeiten ist fundiertes Wissen über Automatisierungstechnik sowie über chemische Prozesse und mechanische Komponenten von Vorteil, um die Arbeiten fachgemäß erledigen zu können. Zusätzlich sollten die Produktionsmitarbeiter Funktion und Konzept der Anlage kennen, da es sich meist um Einzelanfertigungen oder Prototypen handelt, für die es noch keine

standardisierten Arbeitsanweisungen gibt oder bei denen die Vielfalt der Aufgaben hierfür zu groß ist. Da das erforderliche Fachwissen sehr umfangreich ist und die Prozesse von Spezialisten entwickelt werden, ist nachvollziehbar, dass die Produktionsmitarbeiter nicht alle Anforderungen gleichzeitig erfüllen können. Dies ist aber auch nicht erforderlich, wenn ihnen das fehlende Wissen in Form von Zusatzinformationen zur Verfügung gestellt werden kann.

2.3.2 Hohe Komplexität der Produktionsanlage

Heiße Zellen haben in der Regel einen kleinen Innenraum. Die Produktionsanlage für die radioaktive Substanz ist daher möglichst kompakt aufgebaut, um sie dort unterbringen zu können. Da die Anlage von den Produktionsmitarbeitern erreichbar sein muss, wird der zur Verfügung stehende Bauraum auf den Greifraum der Hände weiter eingeschränkt. Die automatisierten Anlagen bestehen meist aus einem mechanischen und einem chemischen Teil, die beide in der Heißen Zelle Platz finden müssen. Der mechanische Teil dient beispielsweise dazu, Gefäße wie Glasampullen oder Targets zu handhaben, sie zu öffnen und wieder zu verschließen, um sie mit Flüssigkeiten zu füllen oder diese zu entnehmen. Die Aufgabe des chemischen Anlagenteils ist, die erzeugten Stoffe chemisch aufzubereiten. Hier werden beispielsweise die produzierten Radioisotope von anderen Substanzen separiert, gereinigt und für die medizinische Verwendung vorbereitet. Es sind meist mehrere Reaktoren, Chromatographiesäulen, Ventile, Reservoirs und weitere chemische Elemente erforderlich. Zur Automatisierung der chemischen Prozesse werden elektrische Ventile eingesetzt, die aufgrund der vielen Prozessschritte und der notwendigen Redundanzen in großer Zahl in der Anlage vorkommen. Da die Ventile fast gleich aussehen, ist es schwierig, ein bestimmtes Ventil zu identifizieren und es in der Anlage zu lokalisieren. Aufgrund der großen Anzahl an Bauteilen auf eng begrenztem Raum werden Komponenten teilweise auch überdeckt, so dass sie schwer zu finden und teilweise umständlich zu erreichen sind. Die große Anzahl dünner Kapillarschläuche zwischen den Anlagenkomponenten in Verbindung mit Elektrokabeln kann trotz sorgfältiger Anordnung zu einem verwirrenden Gesamtbild führen, was die Orientierung weiter erschwert.

2.3.3 Potentielle Gesundheitsgefährdung

Die Hände der Produktionsmitarbeiter sind während der Arbeit in der Heißen Zelle in der Regel ausschließlich durch die Handschuhe aus Polymer-Materialien mit einer Dicke von weniger als einem Millimeter geschützt, wobei diese nur Alpha-Strahlung und lediglich zu einem geringen Teil die Beta-Strahlung abhalten. Bei

Gamma-Strahlung sind die Handschuhe nahezu wirkungslos (DUNSTER 1958). Die Gefahr für die Gesundheit aufgrund der während der Produktion permanent vorhandenen Strahlung im Inneren der Heißen Zelle stellt das augenscheinlichste Problem dar. Bei Überschreitung der zulässigen Grenzwerte, wie der Handdosis (siehe Abschnitt 2.2.2), besteht erhöhtes Risiko, dass Erkrankungen wie Krebs hervorgerufen werden. Um eine Gesundheitsschädigung mit großer Sicherheit ausschließen zu können, wurde dieser Grenzwert (siehe Abschnitt 2.2.2) bewusst niedrig angesetzt. Da die Dosisbelastung der Mitarbeiter regelmäßig überwacht wird, ist das tatsächliche Risiko einer gesundheitlichen Beeinträchtigung für das Bedienpersonal bei regulären Verhältnissen gering. Die Gefahr ist aber immer vorhanden und die theoretisch möglichen Konsequenzen sind immens. (VEITH 2001, VOLKMER 2007b)

Probleme entstehen vorrangig durch fehlende Informationen: Da der Mensch keine Sinnesorgane für radioaktive Strahlung besitzt, besteht eine permanente Unsicherheit bezüglich der Anwesenheit radioaktiver Strahlung sowie ihrer Aktivität. Selbst wenn geeignete Messgeräte zur Verfügung stehen, ist die Informationsversorgung oft ungünstig, da die Anzeigen häufig klein und nur schwer aus größeren Entfernungen lesbar sind. Außerdem befinden sich die Geräte mit den Anzeigen zum Schutz vor der Strahlung meist außerhalb des abgeschirmten Arbeitsbereiches. Die Produktionsmitarbeiter müssen sich aber bei ihrer Tätigkeit auf den Innenraum konzentrieren. Eigentlich sollten sie die Messergebnisse immer im Auge haben, um auf plötzlich auftretende Veränderungen reagieren zu können. Stattdessen müssen meist die Anzeigen von mehreren Geräten abgelesen und ein räumlicher Eindruck der Verhältnisse aus den Punktmessungen zusammengestellt werden. Den Produktionsmitarbeitern fehlen darüber hinaus entscheidende Informationen wie die Dauer des Aufenthalts in der radioaktiven Umgebung und der Abstand zur Strahlenquelle, um die Strahlungsexposition für die Hand abschätzen zu können.

2.3.4 Psychische Belastung

Die Produktionsmitarbeiter müssen während ihrer Arbeit, bedingt durch die radioaktive Strahlung, mit psychischer Belastung umgehen (HOUTS et al. 1988), die dadurch entsteht, dass sie das Bewusstsein haben, dass ihre Hände während der Arbeit Strahlung ausgesetzt sein können. Während der Produktion muss mit einer starken Strahlung gerechnet werden, da aus ökonomischen Gründen und für die Behandlung von Patienten eine relativ große Menge der radioaktiven Substanzen erforderlich ist. Es wird nach Möglichkeit versucht, diese aus der Heißen Zelle zu entfernen, bevor dort Wartungsarbeiten oder sonstige manuelle Tätigkeiten durchgeführt werden. Trotzdem bleibt danach Restaktivität in der Zelle vorhanden, vor

allem in den Schläuchen und den Komponenten der chemischen Anlage. Die im vorherigen Abschnitt erwähnte permanente Unsicherheit bezüglich der Strahlung verschärft die psychische Belastung weiter (HOUTS et al. 1988).

Die Strahlung macht eine schnelle Erledigung der Arbeiten erforderlich, um die Expositionszeit so gering wie möglich zu halten (siehe Abschnitt 2.2.1.3). Der daraus resultierende Zeitdruck verleitet oft zu hektischer Arbeitsweise, unsachgemäßer Erledigung der Aufgaben und voreiligem Verlassen der radioaktiven Umgebung. Die Produktionsmitarbeiter sind einer Stressbelastung ausgesetzt, was hinlänglich als Fehlerquelle bekannt ist (FRIELING & SONNTAG 1987, DIAS-FERREIRA et al. 2009, MILLER & SWAIN 1986). Die Gefahr, dass bei der Arbeit an der Anlage ein Fehler unterläuft, ist aufgrund der schwierigen Umstände groß: Bei ungenügender Sicht aufgrund des Bleiglasfensters, eingeschränkter Bewegungsfreiheit und reduziertem Tastsinn durch die Handschuhe, filigranen und zerbrechlichen Bauteilen in einer sehr kompakten Anordnung und weiteren Beeinträchtigungen kommen viele ungünstige Faktoren zusammen.

Fehler bei der Arbeit müssen unbedingt vermieden werden, da sie teilweise schwerwiegende Konsequenzen haben oder zumindest zu unangenehmer Mehrarbeit führen können. Wenn beispielsweise kleine Teile bei Montage- oder Wartungsarbeiten herunterfallen, ist es meist schwierig, sie in der vollen Zelle zu finden und zu erreichen. Zudem erhöht sich durch Fehler die Aufenthaltszeit in der radioaktiven Umgebung meist deutlich, weil in der Regel dadurch weitere und oft umfangreichere Arbeitsschritte erforderlich sind, um sie zu korrigieren. Weit gravierender sind Fehler, die zu einem Verlust von radioaktivem Material führen. Neben dem finanziellen Schaden aufgrund der teilweise wertvollen verwendeten Stoffe bereitet die Kontamination des Arbeitsraums große Probleme, da dadurch zeitaufwändige und teure Reinigungsarbeiten erforderlich werden, die zudem Produktionsausfälle mit sich bringen. Außerdem fallen für die Entsorgung radioaktiven Abfalls hohe Kosten an. Im schlimmsten Fall, vor allem bei der Verwendung langlebiger Isotope, ist die Kontamination so schwerwiegend, dass die Anlage komplett geschlossen werden muss. Bereits das Wissen über mögliche Konsequenzen und die Anforderung, fehlerfrei arbeiten zu müssen, stellt eine hohe psychische Belastung dar.

2.4 Notwendigkeit manueller Arbeit

2.4.1 Sinnvoller Automatisierungsgrad

Vor dem Hintergrund der Strahlenbelastung und der damit verbundenen Gesundheitsrisiken für das Bedienpersonal erscheint es unsinnig und fahrlässig, mit der im Wesentlichen ungeschützten Hand im radioaktiven Bereich Tätigkeiten durchzuführen. Eine vollautomatisierte Anlage ohne Interaktionsbedarf durch Personen mutet als Ideallösung an. Allerdings ist es nicht möglich und teilweise auch nicht sinnvoll, alle Prozessschritte zu automatisieren. HICHA (2000) stellt die Erfahrung des Menschen einer automatisierten radiopharmazeutischen Anlage gegenüber und führt die hohen Anforderungen auf, die eine solche Anlage erfüllen müsste, um den Menschen vollständig zu ersetzen. Bei einigen radiochemischen Prozessen ist das Feingefühl des Radiochemikers in Verbindung mit der visuellen Überwachung und dem menschlichen Urteilsvermögen nicht durch Technik zu ersetzen. Ein Beispiel hierfür ist die blasenfreie Befüllung von HPLC-Säulen für die chromatographische Trennung von Stoffen, um Verfälschungen des Reinigungsergebnisses und Beschädigungen zu verhindern (ARYEE-BOI 2002). Oft scheitert die Realisierung einer automatisierten Einheit auch an den in der Regel hohen Kosten und am großen Zeitbedarf, die für die Entwicklung und Realisierung einer automatisierten Anlage zu kalkulieren sind. Auch im Bereich der Produktion radioaktiver Stoffe muss die Wirtschaftlichkeit gewährleistet sein. HESSE (2003) beschäftigt sich ausführlich mit der Frage der Automatisierung und führt klassische Vorgaben und Empfehlungen auf. Eine Automatisierung von Prozessen ist nur bei häufig wiederkehrenden und gleich ablaufenden Prozessen sinnvoll. Doch besonders der Umgang mit radioaktiven Stoffen weist eine große Anzahl an Aufgaben und Tätigkeiten mit geringer Häufigkeit und hoher Variabilität auf. Dadurch ist Flexibilität gefragt, die am besten durch einen Menschen gewährleistet werden kann.

2.4.2 Manueller Interaktionsbedarf bei vollautomatisierten Anlagen

Selbst bei der idealen Situation einer vollkommen automatisierten Anlage ohne Interaktionsbedarf während des Ablaufs der Prozesse kann auf manuelle Arbeit nicht verzichtet werden. Die Anlage muss aufgebaut, getestet und in Betrieb genommen werden. Wenn radioaktive Ausgangsstoffe verwendet werden, ist bereits im frühen Stadium mit radioaktiver Strahlung zu rechnen. Während des Betriebs der Anlage fallen Wartungs- und Austauscharbeiten an. Besonders bei radiochemischen Prozessen sind die Häufigkeit und die Anzahl auszuwechselnder Bauteile hoch, weil

beispielsweise Kunststoffkomponenten aufgrund der harten Randbedingungen, verursacht durch Radioaktivität und Säuren, altern und dadurch porös und brüchig werden (BRUMBI 1990). Die so geschwächten Bauteile stellen ein Risiko für die Anlage und die Prozesse dar, wenn sie nicht rechtzeitig getauscht werden. Darüber hinaus müssen einige chemische Komponenten, wie beispielsweise die Harze in den Chromatographiesäulen, in gewissen Zeitabständen gewechselt werden. Aber auch technische Komponenten, wie Fluidikventile, können ausfallen und einen Austausch erforderlich machen. Die hohen Anforderungen an die Bauteile z. B. bezüglich Genauigkeit und geringer räumlicher Ausdehnung sowie die ungünstigen Rahmenbedingungen führen zu einer deutlich erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit. In der gesamten Anlage, vor allem in den Kapillarschläuchen, welche die chemischen Apparaturen und Gefäße miteinander verbinden, sammeln sich radioaktive Stoffe an, so dass von dort mit der Zeit selbst radioaktive Strahlung abgegeben wird. Dies erschwert auch die Umbauarbeiten, die von Zeit zu Zeit vorgenommen werden müssen, um Prozesse zu verbessern, Fehler zu berichtigen oder auf geänderte Anforderungen zu reagieren.

2.4.3 Qualitäten der menschlichen Hand

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Aufgaben können in der Regel nur von Hand durchgeführt werden, da die Anforderungen wie beschrieben hoch sind. Die automatisierten Produktionsanlagen sind häufig komplex und kompakt aufgebaut, unter anderem um die Verluste in den Kapillarschläuchen zu minimieren. Dadurch ist der Freiraum für Bewegungen stark begrenzt, was die Erreichbarkeit der betreffenden Komponente unter Umständen erheblich erschwert. Für mechanisch aufwändige und dadurch voluminöse Parallelmanipulatoren (siehe Abbildung 7) ist in der kleinen Heißen Zelle mit der Produktionsanlage kein Platz. Die schlanken Stabmanipulatoren (siehe Abbildung 8) sind für diese Aufgaben zu starr und unflexibel. Auch mit der Hand ist die Arbeit unter diesen Umständen nicht einfach, aber es ist zumindest möglich, mit ihr die erforderlichen Tätigkeiten durchzuführen. Die Hand bietet eine ausreichend gute Wendigkeit, um auch in verwinkelte Hohlräume vorzudringen.

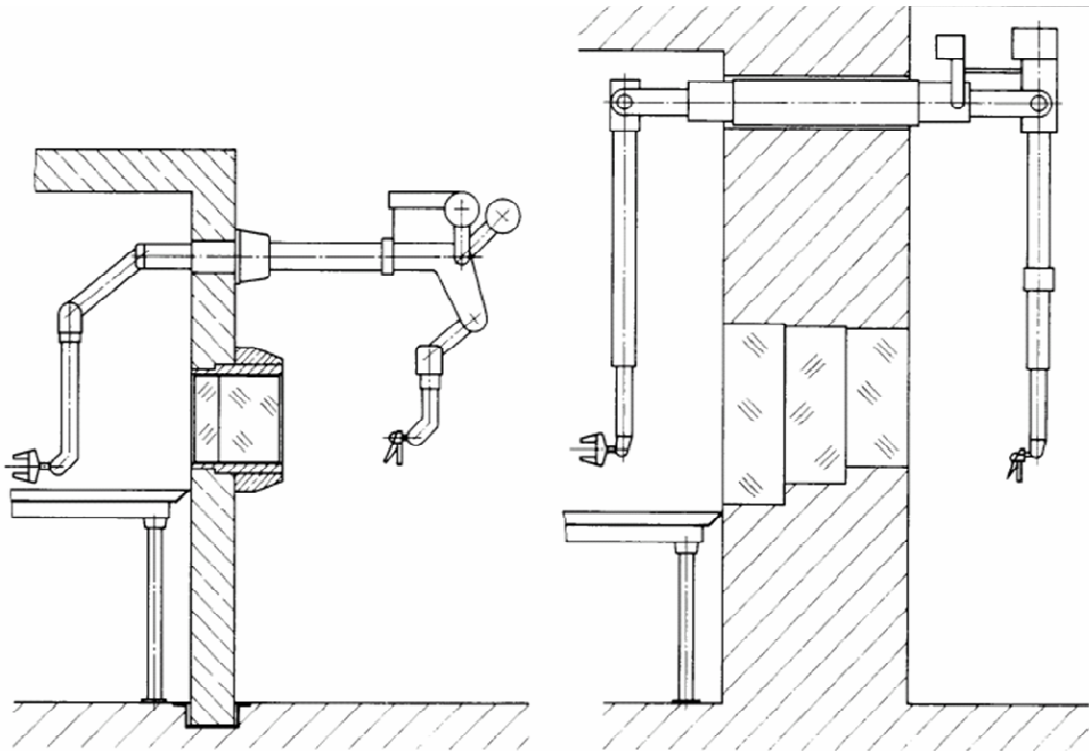


Abbildung 7: Parallelmanipulatoren gemäß DIN 25409 TEIL 1 (1993), links mit 3 Gelenken, rechts mit Teleskop

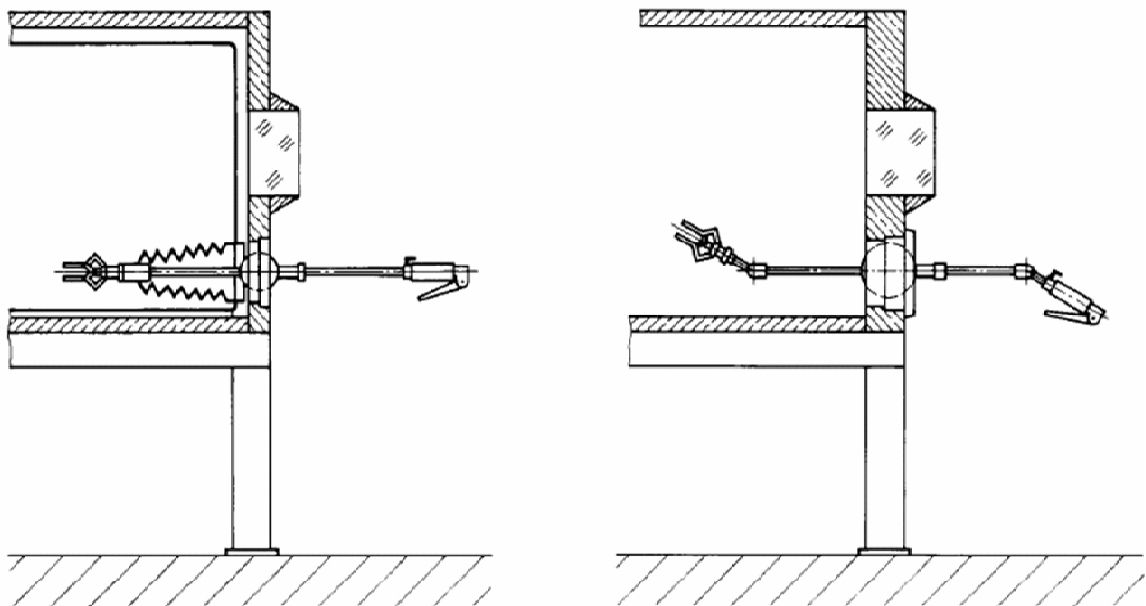


Abbildung 8: Zwei Typen von Stabmanipulatoren gemäß DIN 25409 TEIL 1 (1993), links starr, rechts mit Gelenk

Die Verwendung von dünnen Kapillarschläuchen und fragilen Glasbauteilen führt zu einer hohen Anfälligkeit der Produktionsanlage. Bei der Verwendung mechanischer Manipulatoren ist die Gefahr einer Beschädigung groß. Die menschliche Hand hingegen verfügt über eine ausgeprägte „Sensorik“, die zudem über die gesamte Oberfläche verteilt ist. Dadurch können Kollisionen detektiert werden, bevor Scha-

den angerichtet wird. Die Wahrnehmung ist allerdings eingeschränkt, da bei der Arbeit in der Heißen Zelle Handschuhe getragen werden müssen. Trotzdem ist es möglich, mit den taktilen und haptischen Fähigkeiten der Hand die Position verdeckter Gegenstände zu ertasten, sie zu identifizieren und dort Tätigkeiten vorzunehmen, obwohl eine visuelle Überwachung der Aktion nicht möglich ist.

Die herausragendste Eigenschaft der menschlichen Hand ist die außerordentliche Vielseitigkeit. Bei geringem Platzbedarf bietet sie neben vielfältigen sensorischen Fähigkeiten eine hohe Flexibilität mit zahlreichen Freiheitsgraden. Zudem sind feinfühlig Operationen möglich und die vorhandene Kraft kann gefühlvoll eingesetzt werden. Die vielen fragilen Komponenten erfordern eine sensible Behandlung, beispielsweise wenn die Verbindungen von Kapillarschläuchen zu Glasgefäßen überprüft und mit dosierter Kraft festgeschraubt werden müssen. Die Störungsanfälligkeit der Hand in der radioaktiven Umgebung ist gering. Als „Endeffektor“ ist die menschliche Hand aus den oben aufgeführten Gründen bislang technisch unerreichbar. Hinzu kommt, dass die Hand immer mit dem Kontrollorgan Mensch verbunden ist und keine Informationsschnittstellen bestehen, welche die Reaktionszeit verlängern würden.

2.5 Problemanalyse der Produktion in Heißen Zellen

2.5.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 2.3 aufgezeigt wurde, ist die Arbeit an der Produktionsanlage für die Produktionsmitarbeiter bereits fordernd, anspruchsvoll und vor allem mit zum Teil schwerwiegenden Risiken und Problemen verbunden. Da bei der Arbeit mit radioaktiven Substanzen schädliche Strahlung hoher Dosis sowie aggressive Gase und Säuredämpfe auftreten, muss die Herstellung in Heißen Zellen erfolgen. Den Mitarbeitern stehen für ihre Aufgaben daher nur einzelne Öffnungen in der Bleiwand für die Hände und ein Bleiglasfenster zur Koordination der Tätigkeiten im radioaktiven Bereich zur Verfügung. Diese Rahmenbedingungen führen zu weiteren Erschwernissen, die im Folgenden näher analysiert werden. Es wird eine getrennte Betrachtung der Heißen Zelle als Arbeitsraum im Allgemeinen und des Bleiglasfensters vorgenommen, da letzteres für die meisten und bedeutendsten Probleme verantwortlich ist.

2.5.2 Der Arbeitsraum in der Heißen Zelle

2.5.2.1 Probleme durch die Verwendung von Handschuhen

Um an der Anlage in der Heißen Zelle arbeiten zu können, müssen die Produktionsmitarbeiter Handschuhe tragen (siehe Abbildung 9). Diese erschweren die Arbeit teilweise erheblich (WALTON 1958). Sie schränken seine taktilen Fähigkeiten ein, die in der Heißen Zelle eminent wichtig sind.



Abbildung 9: Produktionsanlage zur Herstellung von Radioisotopen in einer Heißen Zelle. Im Vordergrund sind die Handschuhe an der geöffneten Türe der Heißen Zelle zu sehen

Blasen an den Spitzen der Handschuhe oder Faltenwurf an der Handinnenfläche würden die Situation noch erheblich verschärfen. Daher sind die Handschuhe in der

Regel sehr eng ausgeführt, so dass sie gut an der Hand anliegen. Allerdings setzt das dehnbare Material der Handschuhe der Bewegung der Hand einen starken und ungewohnten Widerstand entgegen, der schnell zur Ermüdung der Handmuskulatur führt. Auch aus diesem Grund sollten die Handgriffe möglichst auf Anhieb richtig durchgeführt werden. Außerdem limitiert die Länge der Handschuhe die Reichweite der Hände in der Heißen Zelle. Eine zu lange Ausführung kann dazu führen, dass sich der überschüssige Teil aufgrund des Unterdrucks in der Heißen Zelle über die Hände stülpt und dadurch die Sicht und die Tätigkeiten behindert.

Durch die enge Ausführung der Handschuhe ist außerdem deren An- und Ausziehen eine umständliche und langwierige Prozedur. Daher wird sie so selten wie möglich durchgeführt. Das bedeutet, dass die Hände der Produktionsmitarbeiter für die Zeit der Arbeitserfüllung in der Heißen Zelle quasi gebunden sind. Sie können daher nicht kurzfristig zwischen dem Inneren der Heißen Zelle und der Umgebung wechseln, um beispielsweise Aktionen wie An- oder Ausschalten von Anlagenkomponenten durchzuführen oder um zur Besorgung von Informationen eingesetzt zu werden.

2.5.2.2 Informationsversorgung

In der Heißen Zelle stehen den Produktionsmitarbeitern so gut wie keine Informationssysteme zur Verfügung. Alle Informationen, die für die Arbeit benötigt werden, müssen vorher vorbereitet und eingeprägt werden. Dies stellt eine Herausforderung für die Produktionsmitarbeiter dar, da die Vorgänge meist nicht einfach sind und des Öfteren auch eine größere Abfolge von Prozessschritten abuarbeiten ist. Die Gefahr ist groß, dass Aspekte vergessen oder Aufgaben vertauscht werden. Anspruchsvolle Tätigkeiten werden daher teilweise vor der Ausführung simuliert, um die Handgriffe zu trainieren.

2.5.3 Das Bleiglasfenster als Problemursache

2.5.3.1 Allgemeines

Zur Überwachung der Vorgänge und zur Koordination der Tätigkeiten in der Heißen Zelle ist in die Bleiwand ein Strahlenschutzfenster aus bleioxidhaltigem Glas nach DIN 25407 TEIL 2 (1993) als Hauptbeobachtungseinrichtung integriert. Dieses Bleiglasfenster weist eine Reihe von Nachteilen auf und beeinträchtigt die Arbeit zum Teil maßgeblich, wie im Folgenden aufgezeigt wird:

2.5.3.2 Reichweite der Hände

Aufgrund der deutlich geringeren Abschirmwirkung des Bleiglasses gegenüber der Bleiwand ist eine größere Dicke erforderlich, um das gleiche Schutzniveau wie die Bleiwand zu erreichen. Bei üblichen Dichten des Bleiglasses von ca. 5 g/cm^3 ergibt sich hierfür ein Faktor von ungefähr 2,5 (SIMMER 2007, PONTAX GMBH 2009, SEITZ + KERLER GMBH + CO. KG 2009). Das bedeutet, dass sich bei einer realistischen Bleiwandstärke von 100 mm ein 250 mm dickes Bleiglasfenster zwischen den Produktionsmitarbeitern und der Anlage in der Heißen Zelle befindet. Dies hat zur Folge, dass diese mit den Armen nicht ausreichend weit in die Zelle vordringen können, um ihre Aufgaben an der Anlage sachgemäß zu erledigen (siehe Abbildung 10). Außerdem wird die Bewegungsfreiheit der Arme erheblich eingeschränkt, wenn das Ellbogengelenk in der Durchführung steckt und nicht bis in die Zelle hineinreicht, so dass sich die Unterarme dort frei bewegen können. In diesem Fall reichen die Bewegungsmöglichkeiten nicht aus, um beispielsweise Gegenstände vor das Fenster zu halten, damit sie näher betrachtet werden können.

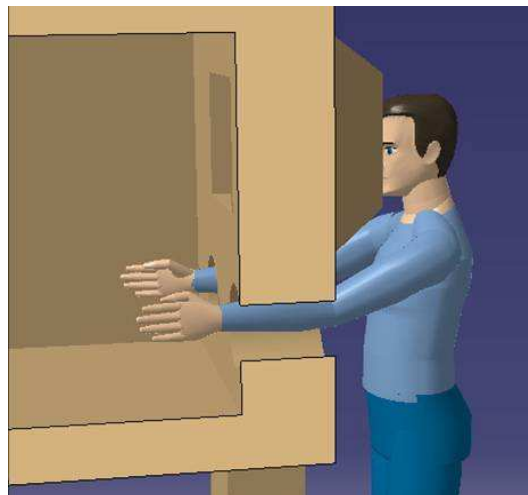


Abbildung 10: Ungenügende Reichweite der Hände aufgrund des dicken Bleiglasfensters

2.5.3.3 Sichtfeld in der Heißen Zelle

Die Inspektion von Anlagenkomponenten oder sonstigen Gegenständen direkt vor dem Bleiglasfenster ist eine der elementaren Aktionen bei der Arbeit in Heißen Zellen, da das Sichtfeld durch das Bleiglasfenster stark eingeschränkt ist, so dass wesentliche Teile des Zelleninneren und teilweise auch die Produktionsanlage nicht einsehbar sind (siehe Abbildung 11).

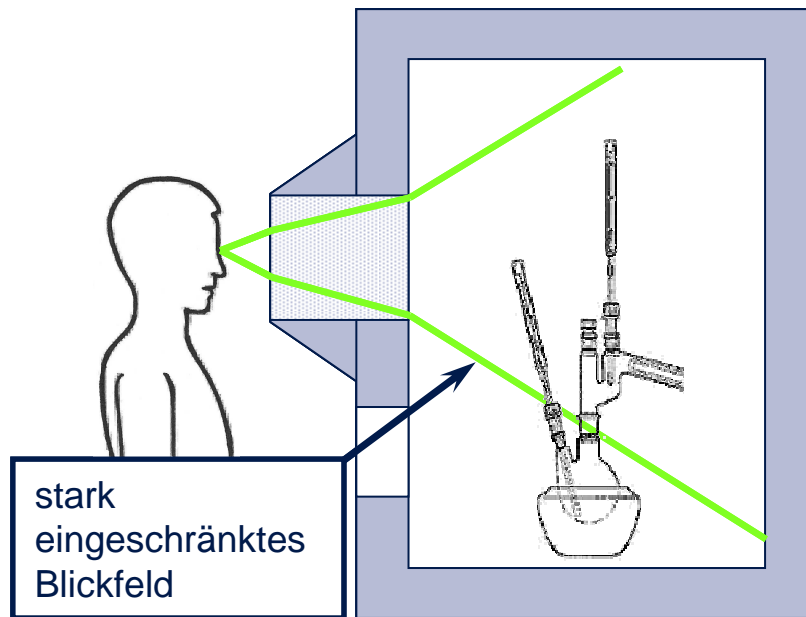


Abbildung 11: Stark eingeschränktes Sichtfeld durch das Bleiglasfenster

Dies trifft auch auf den Bodenbereich der Zelle zu, was besonders nachteilig ist, da sich dort in der Regel Werkzeuge für die Arbeit befinden, Nachfüllgefäße dort abgestellt werden und Teile, wenn sie bei der Arbeit verloren gehen, dort liegen bleiben. Daher müssen die Gegenstände in den einsehbaren Bereich gebracht werden. Die geringe Größe des Bleiglasfensters hängt neben dem Preis mit den erforderlichen Öffnungen für die Hände an der Front der Heißen Zelle zusammen. Der Blick, den die Produktionsmitarbeiter von dem Inneren der Heißen Zelle bekommen, hängt von ihrer Position vor dem Fenster ab. Das bedeutet, dass sie sich in der Regel nicht frei bewegen können, beispielsweise um mit der gesamten Armlänge in die Zelle hineinzugreifen und die maximale Reichweite zu nutzen.

2.5.3.4 Lichtbrechung durch das Bleiglas

Die Dicke des Bleiglasses bringt eine starke optische Brechung und eine unnatürliche Bild-Verzerrung in den Randbereichen mit sich (siehe Abbildung 12). Dies führt zu einer unangenehmen Diskrepanz zwischen der visuellen Wahrnehmung durch das Fenster und der kinästhetischen Wahrnehmung, was in Kopfschmerzen, Unwohlsein und im schlimmsten Fall in Übelkeit resultieren kann. Die Arbeit an Heißen Zellen erfordert nicht nur aus diesem Grund eine Einarbeitungs- und Gewöhnungszeit.

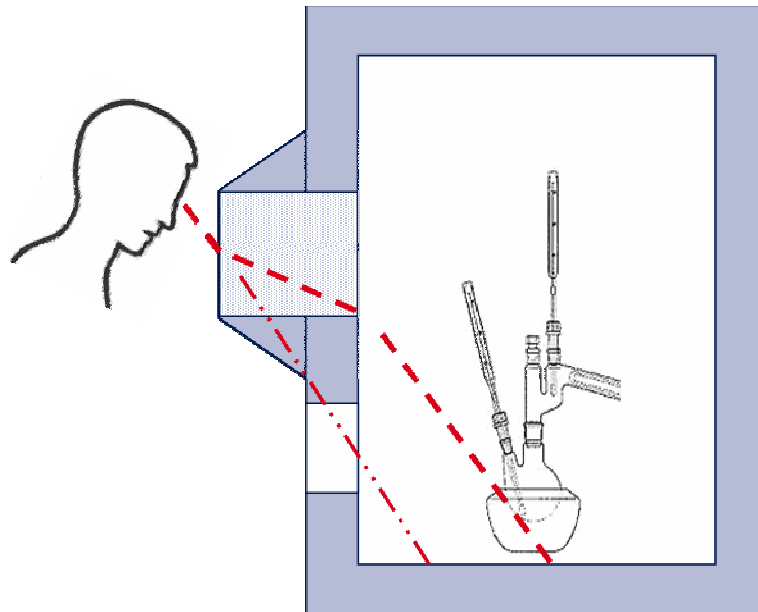


Abbildung 12: Verzerrung des Blickfeldes durch die starke optische Brechung des dicken Bleiglasfensters

2.5.3.5 Optische Qualität des Bleiglasfensters

Der Blick durch das Bleiglasfenster wird durch eine Reihe weiterer Nachteile wie Spiegelungen und Reflexionen an der Außenseite zusätzlich beeinträchtigt. Da Bleiglas relativ anfällig für äußere Einflüsse ist, können mit der Zeit an beiden Oberflächen Beschädigungen durch manuelle Einwirkung oder durch Säuren entstehen, welche die optische Qualität weiter herabsetzen. Wenn das Bleiglas an der Innenseite nicht durch eine Schutzschicht stabilisiert oder mit speziellem Glas geschützt ist, treten Verfärbungen auf. Doch auch ohne zeitliche Veränderungen oder beschädigte Oberflächen verändert das Bleiglas die Farbe der beobachteten Objekte. Aufgrund der intensiven grünen oder gelben Tönung sind die Eigenfarben der Objekte oft kaum noch zu erkennen, was die Identifikation behindert. Eine deutlich schwerwiegendere Beeinträchtigung ist die Reduzierung der Tiefenwahrnehmung, da dadurch die räumliche Orientierung erschwert wird. Die Arbeit an der Heißen Zelle erfordert aufgrund des unangenehmen Blicks durch das Bleiglas und die eingeschränkte Tiefenwahrnehmung ständig eine hohe Konzentration von den Produktionsmitarbeitern und ist daher sehr anstrengend. (BLOXAM 1958, DIN 25407 TEIL 2).

2.5.3.6 Stark eingeschränkte Kontrollmöglichkeiten

Durch das Bleiglasfenster wird der Abstand der Produktionsmitarbeiter zur Anlage in der Heißen Zelle festgelegt. Oft ist die einzige Möglichkeit, einen genauen Blick

auf Objekte im Inneren zu werfen, sie mit der Hand oder einem Manipulator nahe an das Fenster heranzubringen. Doch auch dann ist der Abstand durch das Bleiglas meist zu groß und die optische Qualität zu gering, um feine Details wie Leckagen oder Beschädigungen wie Risse zu erkennen. Zudem können nur wenige Bauteile so weit bewegt werden. In der Regel sind sie fest angebracht oder mit bewusst kurz gehaltenen Schläuchen verbunden. Dieses Problem ist umso schwerwiegender, da verstärkt kleine Komponenten zum Einsatz kommen, um einerseits die in der Anlage vorhandene Menge des radioaktiven Stoffes und dadurch die Verluste und die Risiken zu minimieren und andererseits eine kompakte Anordnung zu ermöglichen.

2.5.3.7 Unergonomische Arbeitshaltung

Da das Bleiglasfenster erheblich dicker als die Bleiwand ist, in der es sich befindet, ist für das überstehende Stück eine zusätzliche Abschirmung erforderlich. Der zu diesem Zweck angebaute trapezförmige Bleiblock steht in der Regel nach außen vor, um den Abstand der Bleiwand zur Kunststoffwand der Innenbox nicht zu vergrößern. Er bestimmt den minimalen vertikalen Abstand der Handschuhöffnungen zum Fenster, da diese auf der verbleibenden freien Fläche an der Bleiwand darunter untergebracht werden müssen. Da der zusätzliche Bleiblock viel Platz in Anspruch nimmt, ist der Abstand in der Regel zu groß für Mitarbeiter durchschnittlicher Größe. Dadurch stellt sich für die Produktionsmitarbeiter die ungünstige Situation ein, dass sie in der Position, in der sie einen guten Blick haben, nicht weit in die Heiße Zelle greifen können. Wenn es erforderlich ist, mit den Händen tief in die Zelle vorzudringen, geht hingegen der Blick verloren, so dass das zu greifende und zu bearbeitende Objekt nicht mehr zu sehen ist. Ideal wäre, den Abstand zwischen dem Fenster und den Eingriffsöffnungen je nach Größe des Mitarbeiters verändern zu können. Da dies aufgrund des fest eingebauten Bleiglasfensters nicht möglich ist, sind die Produktionsmitarbeiter zu unnatürlichen Arbeitshaltungen gezwungen, die anstrengend und ungesund sind (BUBB & LANGE 2008). Der Mensch neigt unter solchen Umständen zu Verkrampfungen und schneller Ermüdung, weil Muskeln übermäßig beansprucht werden, die unter normalen Umständen nicht zum Einsatz kommen und daher nicht trainiert sind (BAUA 2009).

2.5.3.8 Kosten

Ein weiterer, nicht unwesentlicher Nachteil sind die hohen Kosten, die für Bleiglas anfallen. Sie hängen hauptsächlich von der Größe bzw. dem Volumen des Bleiglases ab. Aufgrund der Anfälligkeit für äußere Einflüsse und einer möglichen Schädigung durch die Strahlung ist zudem mit Wartungsarbeiten und der Notwendigkeit des

Austausches nach einer gewissen Zeit zu rechnen. (PONTAX GMBH 2009, DIN 25407 TEIL 2)

2.6 Resumee

Die Analyse der Arbeitsbedingungen in Heißen Zellen ergab eine große Anzahl an Beeinträchtigungen, die im Wesentlichen auf das Bleiglasfenster zurückzuführen sind. Zum Teil sind gravierende Probleme zu erwarten, die zur Folge haben können, dass notwendige Arbeiten an der Produktionsanlage in der Box nicht durchführbar sind. Die dargelegte Situation an der Heißen Zelle, d. h. vor allem die akute Gesundheitsgefährdung, aber auch die vielen erschwerenden Randbedingungen, verlangt nach einer Unterstützung der Mitarbeiter.

3 Stand der Forschung und Technik

3.1 Allgemeines

Dieses Kapitel gibt zunächst einen Überblick über den Stand der Technik im Bereich der Produktion radioaktiver Stoffe, bevor die beiden Schwerpunkte *immersives Kamerasystem* und *Augmented-Reality-Anwendung* untersucht werden. In beiden Bereichen wird die Betrachtung auch auf bestehende Lösungen und Ansätze aus verwandten Gebieten erweitert und ihre Übertragbarkeit auf den speziellen Anwendungsfall untersucht. Das Kapitel schließt mit der Defizitbewertung.

3.2 Stand der Technik bei der Produktion radioaktiver Stoffe

3.2.1 Arbeitsumgebung für manuelle Tätigkeiten

Die Arbeit mit radioaktiven Stoffen unterliegt strengen gesetzlichen Vorschriften, die im Atomgesetz (AtG) bzw. in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) zusammengefasst sind. Nach § 36 StrlSchV wird je nach Höhe der Strahlenexposition zwischen Überwachungsbereichen, Kontrollbereichen und Sperrbereichen unterschieden (VEITH 2001). Mit dieser Einteilung gehen Vorgaben für Grenzwerte und Vorschriften zu deren Überwachung einher. Je nach Gefährdungspotential, das im Wesentlichen von der Menge und den verwendeten radioaktiven Stoffen abhängt, müssen entsprechende Arbeitsumgebungen zur Verfügung gestellt werden. Die Norm DIN 6814 TEIL 5 (2008) gibt einen Überblick über die verschiedenen Arbeitsumgebungen. Die Produktion radioaktiver Stoffe erfordert in der Regel die höchste Sicherheitsmaßnahme, eine Heiße Zelle, da entweder mit offenen radioaktiven Stoffen gearbeitet werden muss oder eine hohe Aktivität vorherrscht oder beides gegeben ist.

Gemäß DIN 25407 TEIL 3 (1993) sind zur Überwachung der Arbeiten in der radioaktiven Umgebung Strahlenschutzfenster aus Bleiglas nach DIN 25407 TEIL 2 vorzusehen. Große Ausführungen sind für das Blickfeld ideal, können aber nur in Verbindung mit Manipulatoren verwendet werden. Wenn manuelle Arbeit erforderlich ist und die Hände über Öffnungen in der Bleiabschirmung in das Innere der Heißen Zelle gelangen müssen, kommen nur kleine Versionen in Frage, da diese Öffnungen die für das Fenster zur Verfügung stehende Fläche erheblich einschränken. Die Forderungen der Strahlenschutzverordnung stellen bezüglich der sicherheitsrelevanten Aspekte bei der Arbeit mit radioaktiven Stoffen den Stand der

Technik dar. Sie enthalten keine Informationen über weitergehende Unterstützung für die Produktionsmitarbeiter oder über Assistenzsysteme, wie sie im Rahmen dieser Arbeit angedacht wurden. Das Bleiglasfenster wird in den Normen als Standardlösung dargestellt, Kamerasysteme finden hierin keine Erwähnung.

3.2.2 Verfügbare Hilfsmittel

Die in den Normen aufgeführten Hilfsmittel für manuelle Arbeiten in radioaktiven Umgebungen beschränken sich im Wesentlichen auf mechanische Elemente wie Greifer, Manipulatorarme (siehe Abbildung 7, S. 25) oder Stäbe mit Greifzangen in Kugeldurchführungen (siehe Abbildung 8, S. 25) sowie örtliche Abschirmungen. Die in DIN 25409 TEIL 1 (1993) aufgeführten Greifer eignen sich vorwiegend für einfache Tätigkeiten, nicht aber für die komplexen Aufgaben bei der Produktion von Radioisotopen. Für anspruchsvolle Arbeiten sind aufwändige Manipulatorarme verfügbar, die aufgrund vielfältiger Bewegungsmöglichkeiten eine hohe Flexibilität aufweisen und dank einer mechanischen Kraftrückkopplung gut zu bedienen sind. Doch auch diese Systeme können die Hände nicht ersetzen. Sie sind zudem zu groß für Heiße Zellen und sehr kostenintensiv. Weitere Ansätze sind in den Normen nicht zu finden.

Die Analyse der Arbeit in Heißen Zellen ergab, dass weitere Hilfsmittel benötigt und teilweise bereits verwendet werden. Ziel ist vor allem die adäquate Versorgung mit Informationen während der Arbeit in der radioaktiven Umgebung. Für die optimale Erfüllung der Aufgaben müssen beispielsweise die einzelnen Komponenten der Anlage, wie Behälter oder Separationssäulen, bezeichnet werden, um Unterscheidungsmerkmale für die sichere Identifikation zu schaffen. Außerdem sind Angaben zu den Komponenten wie bezüglich der Inhaltsstoffe der Säulen, der Fülllevel oder der erforderlichen pH-Werte notwendig. Für einige Komponenten müssen abzuarbeitende Arbeitsschritte festgehalten oder Daten, wie bisherige Messergebnisse, dokumentiert werden. Hierfür steht das Anlagenbuch zur Verfügung. Entscheidend ist aber, dass die Informationen während der Arbeit zur Verfügung stehen und mit dem betreffenden Objekt in Beziehung gebracht werden können. Daher werden die Informationen teilweise direkt auf den Komponenten notiert oder sie werden auf die Wand der Heißen Zelle bzw. auf die Scheibe der Handschuhbox geschrieben (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14). In den meisten Fällen wird Papier oder Klebeband als Beschriftungsfeld verwendet, das auf die Komponenten sowie auf Flächen in und außerhalb der Box geklebt wird.



Abbildung 13: Handschuhbox. Hier wurden die Informationen direkt auf die Scheibe geschrieben.



Abbildung 14: Außenansicht einer Heißen Zelle. Teilweise werden die Informationen auf die Wand der Heißen Zelle (links), auf Klebestreifen oder direkt auf die Komponenten wie die Chromatographiesäulen geschrieben (beides rechts).

Diese derzeit angewendeten Hilfsmittel haben eher provisorischen Charakter und weisen eine Reihe von Nachteilen auf. Die Lesbarkeit des Textes ist oft mangelhaft aufgrund eines zu großen Abstandes oder weil teilweise zu wenig Platz für eine

ausreichend große Schrift vorhanden ist. Änderungen der Informationen machen einen Austausch erforderlich, was bei einer Anbringung in der Heißen Zelle aufgrund der hermetisch abgeschlossenen Arbeitsumgebung und der Nutzung von Handschuhen sehr umständlich ist. Die Informationsmenge und die Darstellungsmöglichkeiten auf Beschriftungselementen wie Papier oder Klebeband sind stark begrenzt. Außerdem droht der Verlust von Informationen, wenn z. B. Flüssigkeiten und Säuren das Beschriftungselement aufweichen und die Schrift unleserlich machen. Die Tatsache, dass solche suboptimalen Hilfsmittel verwendet werden, belegt die Notwendigkeit einer Unterstützung. Die derzeit zur Verfügung stehenden Möglichkeiten können den Bedarf einer adäquaten Versorgung mit Informationen jedoch nicht erfüllen.

3.2.3 Unterstützung der Produktionsmitarbeiter

Trotz des großen Bedarfes wurde für die Produktion von radioaktiven Stoffen in Heißen Zellen bisher keine Unterstützung für die Produktionsmitarbeiter angedacht. Die existierenden Vorschriften und Normen beziehen sich auf passive Maßnahmen und stellen lediglich einen Rahmen für eine sichere Arbeit dar. Darüber hinaus sind die Produktionsmitarbeiter auf sich selbst gestellt. Es existieren auch keine anderen Vorschläge, um die schwerwiegenden Probleme (siehe Abschnitt 2.3) zu lösen und die Situation zu verbessern.

3.3 Stand der Forschung

Der Aspekt der Unterstützung der Mitarbeiter bei der Produktion von Radioisotopen in kleinen Heißen Zellen führt eher ein Nischendasein und wird von der Forschung kaum beachtet. Es ist keine Forschungseinrichtung zu finden, die sich intensiv mit dieser Problematik beschäftigt. Die einzigen zur Verfügung stehenden Informationsquellen sind Verbände, die sich mit der Arbeit in radioaktiven Umgebungen befassen, Standards setzen, Empfehlungen geben und Forschungsprojekte initiieren. Beispiele hierfür sind die Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF) in Deutschland, die heute in das Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt integriert wurde (HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN 2009) oder die American Glovebox Society (AGS) (AMERICAN GLOVEBOX SOCIETY 2008). Letztere hat aufgrund ihrer Größe trotz ihres nationalen Charakters weltweite Bedeutung. Die von der AGS herausgegebenen Richtlinien „Guidelines for Gloveboxes“ sind ausschlaggebend (AMERICAN GLOVEBOX SOCIETY 2007). Aber auch

bei diesen Vereinigungen sind keine Informationen zu weiteren Unterstützungsmaßnahmen für manuelle Arbeiten in kleinen Heißen Zellen zu finden.

Um eine sichere Aussage bezüglich des Standes der Technik und der Forschung treffen zu können, wurden Gespräche mit Experten aus verschiedenen Ländern und Fachbereichen geführt (siehe Kapitel 10, dort HENKELMANN 9.2.2007, FINN 16.2.2007, NAGHDY 20.2.2008, SCHLYNE 6.3.2007). Ihre Aussagen bestätigten, dass keine Assistenzsysteme mit einem immersiven Kamerasystem und Augmented Reality, wie in der vorliegenden Arbeit angedacht, verfügbar sind und dass im Moment keine umfassende Unterstützung für die Produktionsmitarbeiter möglich ist, obwohl dies wünschenswert und zum Teil erforderlich ist.

Trotz der großen Anzahl an offensichtlichen Nachteilen gibt es für das Bleiglasfenster bisher kaum Ersatz. Im Folgenden werden zur Verfügung stehende Alternativen vorgestellt und bewertet.

3.4 Alternativen für das Bleiglasfenster

3.4.1 Dünneres Bleiglas mit zusätzlicher Blende

Für die Herstellung von Actinium-225 aus Radium-226 sind zur Abschirmung der auftretenden Gamma-Strahlung Bleiwände mit 100 mm Wandstärke erforderlich. Das Bleiglasfenster muss dementsprechend eine Dicke von ca. 250 mm aufweisen, was die Durchführung der erforderlichen Arbeiten in der Heißen Zelle unmöglich macht, da die Reichweite der Hände nicht ausreicht, wie Versuche an einer maßstabsgetreuen Nachbildung der Heißen Zelle bestätigten.

Um das Isotop dennoch herstellen zu können, wurde im Rahmen des Projekts gemäß Abschnitt 2.2.6.2 mangels Alternativen das Bleiglasfenster auf die Dicke der Bleiabschirmung reduziert. Dadurch ergibt sich für die Produktionsmitarbeiter eine bestmögliche Reichweite für die Hände und auch andere Probleme wie die starke Brechung und die Begrenzung des Sichtbereichs werden durch das um zwei Drittel dünnere Bleiglas abgemindert. Um die restliche Strahlung abzuschirmen, die bei dieser Lösung am Fenster auftritt, ist eine zusätzliche Bleiabschirmung vorgesehen, die bei Nichtbenützung des Fensters vor dieses geschoben wird und so die restliche Strahlung zurückhält (siehe Abbildung 5 und Abbildung 15). Bei geöffneter Abschirmung wird der Kopf der Produktionsmitarbeiter vor dem Fenster aber nur mit ca. 33 % der üblichen Abschirmwirkung geschützt. Das bedeutet, dass der Kopf während der Arbeit erhöhter Strahlung ausgesetzt sein kann. Für die meisten Tätig-

keiten ist die verbleibende Abschirmwirkung ausreichend. Trotzdem bleibt die Gefahr einer Strahlenbelastung für die Produktionsmitarbeiter, vor allem, da sie sich während der Erfüllung ihrer Aufgaben über einen längeren Zeitraum hinweg dort aufhalten müssen und der Kopf besonders empfindlich auf radioaktive Strahlung reagiert. Dieses Beispielprojekt zeigt, dass aufgrund mangelnder Alternativen eine Detaillösung akzeptiert werden musste, die nur Teilprobleme löst und keine idealen Bedingungen schaffen kann.

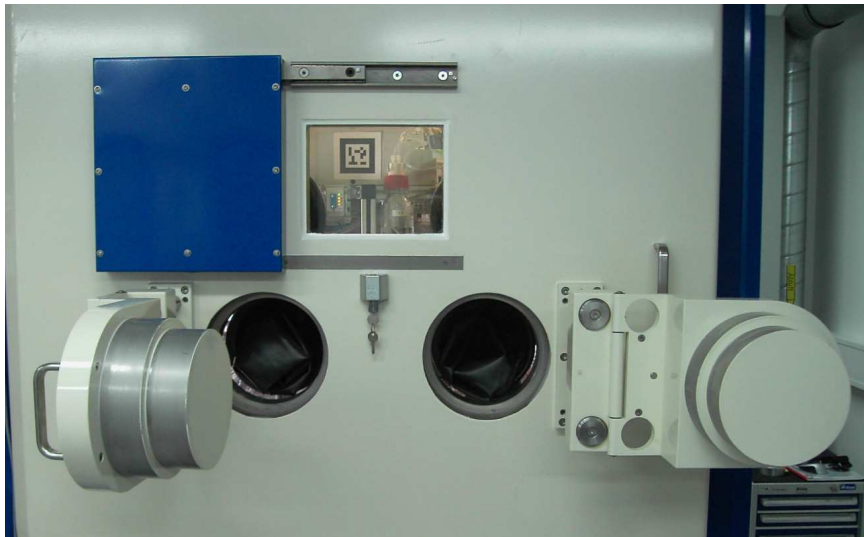


Abbildung 15: Heiße Zelle mit geöffneten Verschlüssen für die Hände und zur Seite geschobener Blende für das Bleiglasfenster

3.4.2 Kameras in radioaktiven Umgebungen

Kameras finden in radioaktiven Umgebungen allgemein häufig Verwendung. Meistens werden sie für Überwachungszwecke eingesetzt, sind statisch und ohne Zoom-Objektiv (SHURTLIFF 2005, FISCHER 2008). Für anspruchsvollere Aufgaben werden dreh- und schwenkbare Kameras mit Zoom, so genannte PTZ-Kameras, verwendet (ARMSTRONG et al. 2004). Aufgrund der hier auftretenden schädigenden Wirkung der Strahlung (siehe 5.2.1.3), besonders hervorgerufen durch Gamma-Strahlung und Neutronen, müssen in der Regel spezielle Kameras verwendet werden. Dies sind entweder abgeschirmte oder gegen Strahlung gehärtete Geräte, bei denen die ionisierenden Teilchen bis zu einem Grenzwert keine negativen Konsequenzen haben (FISCHER 2008, HOUSSAY 2000). Bei den Firmen Mirion Technologies und Ahlberg Electronics ist beispielsweise ein Sortiment an abgeschirmten Kameras verfügbar, die speziell für den Einsatz in Bereichen mit hoher radioaktiver Strahlung entwickelt wurden (MIRION 2009b, AHLBERG 2009). Die verfügbaren Geräte sind für die Heißen Zelle aber meist zu voluminös, sehr teuer und sie bewegen sich zu träge für

eine immersive Steuerung. Bei neuen Entwicklungen wird an der Aufhebung dieser Nachteile gearbeitet (FISCHER 2008, AHLBERG 2009).

Eine interessante Alternative stellt eine Endoskop-Kamera dar, wie das Through-Wall-Endoscope der Firma Mirion Technologies (MIRION 2009a) oder die Periskop-Lösung der Sucursala Cercetari Nucleare in Pitesti, Rumänien (SCN 2008). Hierbei handelt es sich um ein Pendant zur PTZ-Kamera, das speziell für den radioaktiven Bereich konzipiert wurde. Die Kamera, als sensibelster Teil des Systems, wird in einem dünnen zylindrischen Loch in der Abschirmung untergebracht und ist dadurch vor schädlicher Strahlung geschützt. Im Gefahrenbereich befindet sich lediglich ein Prisma, abgedeckt durch einen kleinen Dom, welches über eine weitere Optik das Bild zur Kamera leitet und aufgrund ihrer Beweglichkeit eine Visualisierung des gesamten Arbeitsraums ermöglicht. Neben der Beständigkeit gegen radioaktive Strahlung sprechen der minimale Platzbedarf und die geringe Baugröße der bewegten Teile für diese Lösung. Allerdings ist eine ausreichende Dicke der Abschirmung erforderlich. Für die Steuerung der Kamerabewegungen ist bei den verfügbaren Lösungen ein reguläres Bedienelement mit Druckschaltern oder einem Joystick vorgesehen, wie es bei Kameraüberwachungssystemen üblich ist (IST 2008, LEXOR GMBH 2005).

3.4.3 Verfügbare Kamerasysteme als Bleiglasfensterersatz

Das einzige Kamerasystem, das zur Substitution eines Bleiglasfensters von kleinen Heißen Zellen verwendet wird, stammt von der Firma Biodex. Es wurde 2006 entwickelt und besteht aus einer einfachen statischen Kamera, die im Inneren von kleinen Heißen Zellen angebracht ist. Das Bild der Kamera wird auf einen kleinen Flachbildschirm ausgegeben, der an der Außenseite der Bleiwand auf Augenhöhe des Anwenders angebracht ist. Es handelt sich um eine Abwandlung eines kommerziell erhältlichen Rückfahrkamerasystems für Fahrzeuge wie Autos oder Busse. Der Impuls für die Entwicklung kam von den Nutzern kleiner Heißen Zellen am Memorial Sloan Kettering Cancer Center in New York (MSKCC) (FINN 16.2.2007, siehe Kapitel 10). Dabei standen finanzielle Gründe im Vordergrund. Ziel der Neuentwicklung war, die hohen Kosten für das Bleiglasfenster einzusparen, weshalb auf kostengünstige Komponenten zurückgegriffen wurde. Da auf eine wissenschaftliche Betrachtung der Problematik des Arbeitsplatzes an der Heißen Zelle verzichtet wurde, stehen keine Veröffentlichungen oder andere Informationen zu diesem Kamerasystem zur Verfügung. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit Experten dazu befragt, wie der Entwickler des Kamerasystems Clark SCHLYNE (22.2.2007) sowie einer der Initiatoren und Anwender, Ron FINN (16.2.2007).

Bisher existieren nur zwei Prototypen des Kamerasystems, weil zunächst der Nutzen und die Akzeptanz getestet werden sollten. Einer davon wurde beim MSKCC in New York für tägliche Routinearbeiten eingesetzt. Die Arbeiten in der Heißen Zelle konnten mit diesem Kamerasystem sehr gut durchgeführt werden. Es wurde auch von den Benutzern gut angenommen. Die fehlende Tiefenwahrnehmung konnte leicht und schnell ausgeglichen werden. (FINN 16.2.2007, SCHLYNE 22.2.2007)

Das Biodex-System erzielt deutliche Kostenvorteile (FINN 16.2.2007), nutzt aber die vielen Möglichkeiten von Kameras nicht aus und weist daher Verbesserungspotential auf. Von Vorteil wäre beispielsweise eine Zoom-Funktion. Außerdem kommt nur eine statische Kamera zum Einsatz, so dass sich das stark eingeschränkte Blickfeld der Produktionsmitarbeiter im Vergleich zum Bleiglasfenster nicht verbessert. Die begrenzte Reichweite der Arme führt zu einem geringen Abstand zwischen dem Bildschirm und den Augen und einer damit einhergehenden schlechten Wahrnehmung des Bildes. Außerdem ist ein zu geringer Abstand ungesund für die Augen und anstrengend wegen der Fokussierung und Akkomodation auf nahe Gegenstände.



Abbildung 16: L-Block von BIODEX mit Kamera auf einem flexiblen Schwanenhals und mit Flachbildschirm (links, BIODEX 2008a) sowie mit Bleiglasfenster (rechts, BIODEX 2008b)

Die Firma Biodex bietet neben dem Kamerasystem einen L-Block mit einer Kamera und einem Farb-LCD-Bildschirm an (siehe Abbildung 16 links). Es handelt sich hierbei um ein Abschirm-Element aus Blei, das normalerweise mit einem Bleiglas versehen ist, so dass dahinter mit radioaktiven Stoffen gearbeitet werden kann

(Abbildung 16 rechts). Die Besonderheit an diesem Produkt ist, dass die statische Kamera an einem flexiblen Schwanenhals befestigt ist. Als wesentlichen Vorteil nennt die Firma, dass das Kamerasystem während des Prozesses nicht mehr beschlagen kann, wie dies beim Bleiglasfenster der Fall war. Außerdem ermöglicht die Kamera sowohl einen guten Überblick als auch die Möglichkeit für Nahaufnahmen, was allerdings nicht durch eine Zoom-Funktion realisiert wird, sondern durch den Schwanenhals, mit dem die Kamera näher an das interessierende Objekt herangebracht wird. (BIODEX 2008a)

3.5 Verfügbare immersive Kamerasysteme

3.5.1 Allgemeines

Da im Bereich der Anwendung radioaktiver Stoffe kein adäquates Kamerasystem zur Substitution des Bleiglasfensters verfügbar ist, wurde die Recherche auf andere Gebiete mit ähnlichem Anforderungsprofil ausgeweitet. Im Folgenden wird ein Überblick über die interessantesten Ansätze gegeben.

3.5.2 Militärische Anwendungen

Der Forschung für neue militärische Anwendungen wird in vielen Ländern, besonders in den USA, eine große Bedeutung beigemessen. Daher ist dieser Bereich mit umfangreichen finanziellen Mitteln ausgestattet, die einen technischen Vorsprung gegenüber der zivilen Forschung ermöglichen. Dies gilt auch für Kamerasysteme, die für zahlreiche neue Entwicklungen eine entscheidende Rolle spielen. Beispiele hierfür sind neuartige Flugzeuge, die keine Fenster mehr aufweisen, sondern mit kamerabasierten Visualisierungssystemen ausgestattet sind, um das Gewicht der Scheiben und das damit verbundene Risiko für die Gestaltung der Flugzeuge zu eliminieren (DELGADO et al. 2003). Allerdings sind militärische Projekte in der Regel streng geheim, so dass teilweise keine Informationen über die Entwicklungen oder die Forschungsergebnisse verfügbar sind, bzw. diese nur in sehr begrenztem Umfang und mit deutlicher zeitlicher Verzögerung veröffentlicht werden.

3.5.3 Computerspiele

Bei Zubehör-Produkten für den Computerspiele-Sektor steht ein günstiger Preis im Vordergrund. Das technische Niveau ist meist niedrig, die Anforderungen an Präzision, Wiederholgenauigkeit etc. sind gering. Trotzdem sind Entwicklungen in

diesem Bereich interessant und auch im Hinblick auf professionelle Anwendungen nicht zu unterschätzen, da es sich um einen großen Markt handelt und dadurch auch ungewöhnliche Ideen und Konzepte zur Serienreife gebracht werden. Bei Computerspielen werden in der Regel keine bewegbaren Kameras benötigt. Allerdings ist bei bestimmten, weit verbreiteten Spiele-Typen, bei denen der Spieler sich aus der Egopersicht frei durch eine dreidimensionale Spielwelt bewegt, eine intuitive Steuerung des Blicks wichtig für den Erfolg im Spiel. Daher sind Geräte von großem Interesse, mit denen die am Bildschirm sichtbare Szene ähnlich wie bei einer bewegten Kamera verändert werden kann, ohne dass die Hände vom Joystick bzw. dem Bediengerät genommen werden müssen. Ein Beispiel hierfür ist das Infrarot-Trackingsystem „TrackIR“ der Firma Naturalpoint. Es basiert auf einer Infrarotkamera, die über Bilderkennung einen reflektierenden Marker mit genau definierter Form, der am Kopf angebracht wird, erkennt und dessen Position bzw. die Bewegung verfolgt (TRACKIR 2009). Dieses Produkt erfasst sowohl Rotation als auch Translation des Anwenders, so dass es auch für die Steuerung der Zoomfunktion verwendet werden könnte. Es wurde im Rahmen der Versuche näher betrachtet.

3.5.4 Medizintechnik

Im Bereich der Medizintechnik werden Kameras vorwiegend für chirurgische Eingriffe und minimalinvasive Operationen verwendet. Da der Arzt seine Hände für die Operation bzw. die Bedienung der Werkzeuge benötigt, sind sie nicht für die Kamerasteuerung verfügbar. Dennoch kommen vorwiegend Systeme zum Einsatz, bei denen eine weitere Person die Kamera steuert oder der Arzt das Operationswerkzeug kurz aus der Hand legt, um die Kamera zu orientieren. Es existieren einzelne Ausnahmen, wie FreeHand, ein Werkzeug für die laparoskopische Chirurgie, mit dem der Arzt die Kamera mit dem Kopf steuern kann (FREEHAND 2009). Allerdings sind die Bedienungsmöglichkeiten sehr begrenzt und das Kamerasystem weist eine deutliche Zeitverzögerung auf, die für manuelle Arbeiten in radioaktiven Umgebungen zu hoch ist.

3.6 Verwendung von Augmented Reality in radioaktiven Umgebungen

3.6.1 Überblick über den Abschnitt

In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik in Bezug auf die Anwendung von Augmented Reality unter den bei der Produktion von Radiopharmaka auftretenden

Randbedingungen und Anforderungen im originären Bereich der Heißen Zelle dargelegt. Anschließend erfolgt eine Erweiterung des Betrachtungsbereichs auf die Verwendung dieser Technologie für Aufgabenfelder mit Kontakt zu radioaktiver Strahlung im Allgemeinen. Zunächst werden Grundlagen der Technologie vorgestellt.

3.6.2 Grundlagen von Augmented Reality

Augmented Reality (AR) ist eine Mensch-Technik-Schnittstelle, bei der die menschliche Wahrnehmung mit rechnergenerierten, virtuellen Informationen angereichert und dadurch erweitert wird (FRIEDRICH 2004). Der Begriff „augmented“ stammt vom lateinischen Wort „augmentatio“ ab, was Vergrößerung und Vermehrung bedeutet (FREMDWÖRTERLEXIKON 1993). Diese Technologie gestattet es, die Flexibilität und das Problemlösungspotential des Menschen mit den Möglichkeiten moderner Computersysteme zu kombinieren (ZÄH 2002, PATRON 2004). Es existiert in der wissenschaftlichen Literatur keine einheitliche Definition. Teilweise wird mit AR jede Überlagerung menschlicher Sinneswahrnehmung mit computergenerierten Informationen bezeichnet (MILGRAM & COLQUHOUN 1999, TANG et al. 2002). Große Bedeutung kommt der Auslegung von AZUMA (1997) zu, nach der AR-Systeme folgende wesentliche Merkmale aufweisen:

- Überlagerung von realen und virtuellen Objekten in einer realen Umgebung
- Interaktion und Echtzeitfähigkeit
- Dreidimensionaler Bezug zwischen realen und virtuellen Objekten

In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff *Mixed Reality* verwendet, der teilweise als Alternativbezeichnung für AR, aber auch in weiter gefasster Bedeutung gesehen wird (FREI 2003). Im Wesentlichen hat sich diesbezüglich das Verständnis von MILGRAM & KISHINO (1994) durchgesetzt, die in ihrem Reality-Virtuality-Continuum einen kontinuierlichen Übergang von der realen zur virtuellen Welt sehen und diesen als *Mixed Reality* bezeichnen. AR ist in diesem Kontinuum in der Nähe der Realität eingeordnet. AR und Virtual Reality (VR) zeigen eine große Verwandtschaft, besonders was die technische Realisierung und zum Teil die Anwendung angeht. Der wesentliche Unterschied ist, dass AR die reale Umgebung integriert, während bei VR die Welt vollständig virtuell im Computer nachgebildet werden muss. (BUTZ 2006, AZUMA et al. 2001)

3.6.3 Augmented Reality für Heiße Zellen

Die Potentiale von Augmented Reality erscheinen vor allem bei der Arbeit in kleinen Heißen Zellen sinnvoll nutzbar. Besonders die Möglichkeit, unsichtbares sichtbar zu machen, ist beim Umgang mit radioaktiver Strahlung außerordentlich wertvoll. Trotzdem wurde AR in diesem Bereich bisher nicht eingesetzt. Es sind weder Informationen zu Produkten noch zu Forschungsprojekten oder -vorhaben zu finden. Gespräche mit Experten bestätigten dieses Rechercheergebnis (HENKELMANN 9.2.2007, FINN 16.2.2007, NAGHDY, 20.2.2008, siehe Kapitel 10).

In anderen Anwendungsbereichen, bei denen ebenfalls für das Personal Kontakt zu radioaktiver Strahlung und damit eine gesundheitliche Gefährdung besteht, war in den letzten Jahren zu beobachten, dass verstärkt an der Nutzung virtueller Technologien geforscht wurde. Einzelne Detaillösungen wurden in Prototypen umgesetzt. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

3.6.4 Virtuelle Technologien in radioaktiven Umgebungen

3.6.4.1 Allgemeines

Die Potentiale, die AR bietet, legen eine Nutzung im Zusammenhang mit Radioaktivität nahe. Trotz der vielfältigen Möglichkeiten und des großen potentiellen Nutzens beschränken sich die bisherigen Anwendungen von AR in radioaktiven Umgebungen im Wesentlichen auf den Bereich der Kerntechnik, wobei Betrieb und Wartung der Anlagen im Fokus stehen. Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich außerdem auf die Visualisierung der radioaktiven Strahlung, vor allem beim speziellen Anwendungsfall der Dekommissionierung, also des Rückbaus und der Stilllegung kerntechnischer Anlagen. Im Folgenden werden relevante Forschungsprojekte vorgestellt.

3.6.4.2 Wartung kerntechnischer Anlagen

Für die Nuklearindustrie bestehen ähnliche Herausforderungen wie bei der Produktion von Radiopharmaka: Viele Aufgaben erfordern die Anwesenheit und Aktionen von Menschen in der radioaktiven Umgebung. Das Hauptziel ist daher die Vermeidung oder zumindest die Reduzierung der Strahlungsbelastung für die Mitarbeiter durch eine zeitliche Straffung der Abläufe und die Erhöhung der Sicherheit. (VIALA & LETELLIER 1997)

In letzter Zeit treten verstärkt ökonomische Aspekte in den Vordergrund. Die in den Sicherheitsbestimmungen vorgeschriebene regelmäßige Wartung kerntechnischer Anlagen ist kostspielig, da diese hierfür heruntergefahren werden müssen. Ziel ist daher, die Ausfallzeiten und damit die Verluste zu minimieren. Das bedeutet, dass die Arbeiten so schnell wie möglich durchgeführt werden müssen, was in einem psychologischen Druck für die Mitarbeiter resultiert. (DUTOIT et al. 2001, KLINKER et al. 2001, RINDAHL et al. 2006)

An der TU München wurde 2001 für diese Problematik das AR-System STARS (Sticky Technology for Augmented Reality Systems) für die Wartung von Kerntechnischen Anlagen entwickelt. Die Wartungsmitarbeiter werden mit einem mobilen Computer- und Visualisierungssystem ausgestattet, das ihnen über ein Head Mounted Display (HMD) kontextbezogenen Informationen während ihrer Tätigkeiten in der Anlage anzeigt. Ziel des Einsatzes von AR in der kerntechnischen Anlage ist die Erhöhung der Effizienz der Wartungsarbeiten und die Reduzierung der menschlichen Fehler. Bei diesem AR-System werden die Erkenntnisse aus der Verwendung von AR für große Anlagen der Verfahrenstechnik auf den Spezialbereich der Kerntechnischen Anlagen übertragen, wo u. a. ebenfalls eine größere Anzahl verschiedener Rohrleitungssysteme in teilweise unübersichtlicher Anordnung die Wartungs- und Reparaturarbeiten erschwert. (KLINKER et al. 2001, RUSITSCHKA et al. 2004, DUTOIT et al. 2001)

Beim OECD-Halden-Reaktor-Projekt wird seit 2002 der Nutzen von AR für kerntechnische Anlagen erforscht (RINDAHL et al. 2006). Zunächst wurden den Arbeitskräften mit einem HMD strahlende Bereiche angezeigt, um die Gefährdung zu reduzieren (DRØIVOLDSMO et al. 2002). In weiteren Entwicklungen stand die Unterstützung der Arbeiter in der Anlage durch zusätzliche Informationen, wie der Prozessstatus von Anlagenkomponenten, im Vordergrund (RINDAHL et al. 2006).

Die Forschung im Anwendungsgebiet kerntechnischer Anlagen beschäftigt sich vor allem mit den Problemen, die aus den speziellen Randbedingungen resultieren, wie der Anwesenheit von Personen in der radioaktiven Umgebung, den großen Dimensionen der Anlage und der notwendigen Mobilität der Arbeitskräfte. Letzteres macht beispielsweise ein tragbares Computer- und Visualisierungssystem erforderlich, mit dem sich die Arbeitskräfte in der oft weitläufigen Anlage bewegen können. Eine Kamera, die in der Regel auf dem Kopf des Benutzers installiert ist, nimmt Bilder der realen Umgebung auf, die kombiniert mit den virtuellen AR-Informationen in ein Head Mounted Display eingeblendet werden (PIEKARSKI &

THOMAS 2002, RINDAHL et al. 2006). Wesentlicher Forschungsgegenstand ist das Tracking für AR und die Positionsbestimmung der Benutzer in der Anlage.

3.6.4.3 Rückbau kerntechnischer Anlagen

Ein Spezialgebiet der Arbeit in kerntechnischen Anlagen ist die Dekommissionierung, also der Rückbau bzw. die Stilllegung von Anlagen. Auch in diesem Fall müssen die Arbeitskräfte die Räumlichkeiten betreten und sind daher mit dem gesamten Körper der Strahlung ausgesetzt. In der Regel sind die Strahlenquellen und die auftretende Aktivität nicht bekannt, sondern werden vor Ort gemessen und lokalisiert. Das Augmented Reality Radiation Display System (ARRDS) als Beispiel für ein AR-System erfasst mit zwei Gamma-Kameras dreidimensional die vorhandene Strahlung und zeigt den Anwendern diese Informationen als AR-Bild räumlich überlagert mit Bildern der realen Umgebung in einem HMD an, so dass diese die gefährlichen Bereiche lokalisieren und meiden können. (SCHUTZRECHT US 6815687 2004)

Das im Rahmen des OECD-Halden-Reaktor-Projektes entwickelte Decommissioning Engineering Support System (DEXUS) hat zusätzlich das Ziel, die Arbeitskräfte bei ihrer Tätigkeit zu unterstützen. Es kommen vorwiegend dreidimensionale Visualisierung und VR zum Einsatz, um u. a. die Vorgehensweise zu planen, Arbeitsschritte zur Kontrolle zu simulieren und die Mitarbeiter zu trainieren. Die AR-Darstellung kann mit weiteren Informationen zum Gebäude oder zur Anlage angereichert und wiederum in ein HMD eingeblendet werden, mit dem das Arbeitspersonal ausgestattet ist (IGUCHI et al. 2004, RINDAHL et al. 2006).

3.6.4.4 Visualisierung von Strahlung

Die Visualisierung radioaktiver Strahlung ist ein wesentliches Element der in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Schutzmaßnahmen für die Bediensteten in kerntechnischen Anlagen. Aufgrund des großen Gefährdungspotentials sowie der mangelnden Detektionsfähigkeit des Menschen einerseits und der mittlerweile weit verbreiteten und vielfältigen Nutzung radioaktiver Strahlung andererseits kommt die Visualisierung der Strahlung auch in zahlreichen anderen Gebieten zum Einsatz. Sie ist auch nicht auf die Kerntechnik und auf radioaktive Strahlung beschränkt, da Strahlung vielfach Verwendung findet bzw. bei vielen Bereichen berücksichtigt werden muss. Beispiele hierfür sind Anwendungen im Rahmen der Forschung und im Bereich der Medizin, wie bei der Planung der Bestrahlung von Krebstumoren. In der Luft- und Raumfahrt muss die kosmische Strahlung berücksichtigt werden.

Aber auch reguläres Licht ist Strahlung und wird mit ähnlichen Computerprogrammen simuliert, beispielsweise für Scheinwerfer oder in der Architektur, für die Designdarstellung und bei Computeranimationen für Videospiele oder Filme. Aufgrund der weiten Verbreitung und der langen Forschungshistorie existiert im Bereich der Strahlungsvisualisierung bereits viel Wissen, das für die Unterstützung an Heißen Zellen genutzt werden kann. YU et al. (2000) schlagen beispielsweise ein Radiation Management System vor, das die Strahlung am menschlichen Körper und die damit einhergehenden Gesundheitsgefährdung visualisiert.

3.7 Überblick über AR-Anwendungen

3.7.1 Anwendung von Augmented Reality allgemein

Augmented Reality ist ein relativ junges Forschungsgebiet, auf dem aber in den letzten Jahrzehnten intensiv geforscht wurde. Dadurch ist umfangreiches Wissen und weit entwickelte Technik vorhanden. Der Schwerpunkt bei der Anwendung der AR liegt immer noch im Bereich von Forschung und Entwicklung (OEHME et al. 2004). Mittlerweile ist die Technologie teilweise aber bereits den Forschungslabors entwachsen. Erste Produkte sind auf dem Markt, wobei sich Nachfrage und Verbreitung noch in Grenzen halten, besonders was die industrielle Anwendung betrifft. Auch bei AR ist die Forschung für die militärische Verwendung der Technologie der Vorreiter. DELGADO et al. (2003) beschreiben beispielsweise ein System für Kampf-Jets, bei dem der Pilot zusätzlich zu realen Kamerabildern virtuelle Zusatzinformationen zur Verfügung gestellt bekommt, die einen Einsatz und einen sicheren Flug bei allen Wetter- und Sichtbedingungen ermöglichen. Die Unterstützung der Soldaten mit AR-Informationen wird bereits intensiv genutzt (METZ 2004).

Ein ebenfalls innovationsfreudiger Bereich ist die Medizintechnik, wo AR besonders für die Unterstützung bei operativen Eingriffen, beispielsweise für die gezielte Navigation der Operationswerkzeuge, verwendet wird (BAJURA et al. 1992, STATE et al. 1996b, FUCHS et al. 1998, GOEBBELS et al. 2003). AR kann generell für die Visualisierung medizinischer Aspekte eingesetzt werden. Weitere Anwendungen im Bereich der Medizin sind Training des Personals (GOEBBELS et al. 2003, SIELHORST et al. 2004) sowie die Interaktion zwischen Patient und Arzt (BLUTEAU et al. 2005, JOHNSEN et al. 2005).

Die Bandbreite der weiteren Einsatzgebiete von AR ist enorm. Sie reicht unter anderem von der Unterstützung der Arbeiten in der Industrie über neuartige Visualisierungs- und Präsentationsansätze, beispielsweise für neue Produkte, bis hin zum

so genannten Edutainment, einer Mischung aus lehrender Informationsvermittlung und Unterhaltung (LUDWIG & REIMANN 2005).

3.7.2 Anwendung von Augmented Reality in der Industrie

Die Verwendung von AR in der Industrie korreliert mit der Finanzkraft und dem Innovationszwang des jeweiligen Industriezweigs. Daher wird AR vorwiegend in den Branchen Automobilindustrie sowie Luft- und Raumfahrt erforscht und eingesetzt. Anwendungsgebiete in der Industrie sind vor allem Entwicklung und Produktion sowie Wartung und Service (LUDWIG & REIMANN 2005). Daneben existieren eher exotische Anwendungen wie die Unterstützung von Schweißarbeiten (AITEANU 2006) und die immersive Roboterprogrammierung (GIESLER et al. 2004).

3.7.3 Augmented Reality in der Produktion

Nachdem in der Heißen Zelle ebenfalls Produktionsprozesse ablaufen, wird die Anwendung von AR im Produktionsbereich gesondert betrachtet. Wesentliches Wissen bezüglich der Anwendung von AR im Bereich der Produktion in Deutschland wurde im Rahmen des Projektes „ARVIKA - Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service“ generiert. Dabei handelt es sich um ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziertes Leitprojekt im Themenfeld Mensch-Maschine-Interaktion mit dem Ziel der Untersuchung des Potentials von AR zur Unterstützung bei industriellen Arbeitsprozessen in Entwicklung, Produktion und Service sowie bei der Entwicklung von Technologien zur Realisierung. (FRIEDRICH 2004, FRIEDRICH & WOHLGEMUTH 2004)

AR wird in der Produktion vorwiegend zur Unterstützung von Montage- oder Instandhaltungsaufgaben (REINHART & PATRON 2003) sowie bei der Planung (PATRON 2004) und Inbetriebnahme von Anlagen angedacht (ECKES & WAGNER 2006, ZÄH et al. 2005b). Die Konzepte sehen meist vor, das reale Sichtfeld von Facharbeitern, Technikern oder Entwicklungsingenieuren durch eingeblendete Hinweise mit für sie wichtigen Informationen anzureichern (AZUMA et al. 2001). Einige der in diesem Rahmen entwickelten AR-Lösungen haben das Konzept der AR-Anwendung für die Heiße Zelle inspiriert.

3.8 Zusammenfassung und Defizitbewertung

Die Recherche zum Stand der Technik ergab, dass kein immersives Kamerasystem für Heiße Zellen und keine Unterstützung der Produktionsmitarbeiter mit AR-

Technologie verfügbar ist und erst recht kein abgestimmtes Gesamtsystem. Für das Bleiglasfenster existieren einzelne Alternativen, vor allem in Form spezieller Kameras ohne Zoom und Bewegungsmöglichkeit, oder konstruktive Änderungen der Abschirmung als temporäre Behelfslösungen. Dies belegt, dass Handlungsbedarf besteht und dieser bereits erkannt wurde.

Die wenigen bisher verfügbaren Lösungen sind jedoch nicht direkt für die Produktion in Heißen Zellen geeignet. Die bestehenden Konzepte beschränken sich meist auf Detaillösungen, die lediglich einzelne Probleme beheben, wofür teilweise sogar die Verschlechterung anderer Randbedingungen in Kauf genommen wird. Es fehlt an Lösungen, die eine maßgebliche Verbesserung herbeiführen können und erst recht an einem ganzheitlichen Ansatz für die Bewältigung der Herausforderungen. Die Potentiale von Kameras werden zudem nur ansatzweise genutzt. Daher müssen sich die Produktionsmitarbeiter derzeit immer noch an die ungünstigen Bedingungen an der Heißen Zelle gewöhnen und sich mit den Beeinträchtigungen arrangieren. Sinnvoller wäre es, die Situation mit technischen Hilfsmitteln zu verbessern und die Produktionsmitarbeiter zu entlasten. Das Ziel muss sein, die Arbeitsbedingungen an den Menschen anzupassen und nicht umgekehrt. Diese Erkenntnis aus der ergonomischen Forschung ist bereits seit geraumer Zeit in die Empfehlungen zur Entwicklung neuer Produkte eingeflossen (DIERKES 2004, WEIßMANTEL & KISSEL 2002).

Ansätze zur Verwendung von AR in radioaktiven Umgebungen existieren fast ausschließlich im Bereich der Nukleartechnik. Die bei der Arbeit in kerntechnischen Anlagen auftretende Gefährdung des Arbeitspersonals aufgrund der radioaktiven Strahlung ist die wesentliche Parallele zur Produktion radioaktiver Stoffe in Heißen Zellen. Die Randbedingungen und die Anforderungen unterscheiden sich jedoch deutlich, da es sich um ein vollkommen anderes Anwendungsgebiet handelt. Hier liegt die Herausforderung vor allem in der Größe der Räume und der Erfordernis eines mobilen Unterstützungssystems, während bei der Produktion radioaktiver Substanzen in Heißen Zellen kleine Dimensionen und der stark begrenzte verfügbare Raum dominieren. Die für kerntechnische Anlagen entwickelten Lösungen sind daher nicht direkt auf die Heiße Zelle übertragbar.

Die Recherche nach verfügbaren Kamera- und AR-Systemen wurde auf verwandte Bereiche ausgedehnt, in denen einzelne Probleme mit ähnlicher Ausprägung wie bei der Produktion von Radioisotopen in Heißen Zellen auftreten und bereits Lösungen entwickelt wurden. Wie in diesem Kapitel aufgezeigt wurde, sind beispielsweise Systeme vorhanden, welche die Bedienung einer Kamera ohne den Einsatz der

Hände ermöglichen. Das bedeutet, dass die Technologie prinzipiell verfügbar ist, in Versuchen bereits Erfahrung zur Anwendung gesammelt wurde und in absehbarer Zeit mit Produkten gerechnet werden kann. Dies ist von Vorteil, da es für die Arbeit in Heißen Zellen ideal wäre, wenn auf Produkte zurückgegriffen werden könnte, die vielfach erprobt wurden und dabei ihre Zuverlässigkeit bewiesen haben. Allerdings existiert derzeit kein System, das für die Produktion von Radioisotopen in der Heißen Zelle geeignet wäre. Viele Lösungen bringen nur marginale Verbesserungen und genügen nicht den hohen Anforderungen radioaktiver Umgebungen. Sie stellen meist Lösungen für spezifische Probleme bzw. bestimmte Anwendungsfälle dar und sind nur bedingt oder mit großem Aufwand auf die Heiße Zelle übertragbar. Die vorhandenen Kamerasysteme aus anderen Anwendungsbereichen sind allerdings gut geeignet, um aus deren Gestaltung zu lernen und vorteilhafte Aspekte zu übernehmen.

Bei der Verwendung von AR im Allgemeinen ergab die Recherche ein ähnliches Bild: Es existieren zahlreiche Ansätze in Forschung und Technik in einer großen Bandbreite an Anwendungsgebieten. Keiner davon ist direkt bei der Produktion von radioaktiven Isotopen in Heißen Zellen einsetzbar, da sie nicht dafür entwickelt wurden und daher weder für die anspruchsvollen Rahmenbedingungen geeignet sind noch über die erforderlichen Funktionen zur Erfüllung der in diesem Rahmen anfallenden spezifischen Aufgaben verfügen. Die Recherche ergab, dass die Technologie AR eine Fülle an nützlichen Funktionen bietet, welche zu einer wesentlichen Unterstützung der Arbeit in der Heißen Zelle beitragen können. Primäres Ziel der Arbeit ist daher die Identifikation brauchbarer verfügbarer Technologien, deren Anpassung an die speziellen Randbedingungen und letztendlich die Zusammenführung zu einem optimalen Unterstützungssystem. Neuentwicklungen im Rahmen dieser Arbeit werden auf Bereiche und Funktionen beschränkt, für die keine Technologie vorhanden ist oder für die bestehende Konzepte beispielsweise aufgrund zu spezifischer oder restriktiver Anforderungen nicht verwendet werden können.

4 Konzept eines Assistenzsystems

4.1 Überblick über das Kapitel

Die in Kapitel 2 vorgestellte Analyse der derzeitigen Situation bei der Produktion von Isotopen in Heißen Zellen offenbarte eine große Anzahl an zum Teil schwerwiegenden Problemen und Beeinträchtigungen. Es wurde gezeigt, dass großer Bedarf an einer Verbesserung des Status Quo besteht. In diesem Kapitel wird das Konzept eines Assistenzsystems, basierend auf einem immersiven Kamerasystem und Augmented Reality-Funktionen, als Lösung für die Herausforderungen der manuellen Arbeit in Heißen Zellen vorgestellt. Zunächst werden die Anforderungen analysiert und ein Lösungsfeld mit alternativen Ansätzen für die ermittelten Probleme aufgespannt. Im Anschluss wird diesen das Konzept des immersiven Assistenzsystems gegenübergestellt, wobei zunächst die Hintergründe und Absichten näher erläutert und anschließend die Eigenschaften und Merkmale herausgestellt werden.

4.2 Anforderungen an die Produktionsumgebung

4.2.1 Allgemeines

Eine radikale Veränderung der Rahmenbedingungen auf mittelfristige Sicht erscheint unrealistisch, die Produktion von Radioisotopen wird weiterhin in Heißen Zellen stattfinden. Auch an der Notwendigkeit manueller Interaktion mit Vorrichtungen oder einer Produktionsanlage im Inneren der Heißen Zelle wird sich in naher Zukunft nichts ändern. Die Rahmenbedingungen sollten daher so gestaltet werden, dass Beeinträchtigungen beseitigt und optimale Bedingungen für die Arbeit in der radioaktiven Umgebung geschaffen werden. Neben dem in der Problemanalyse ermittelten Verbesserungsbedarf für den Arbeitsbereich ist es wichtig, den Blick auf die Produktion von Radioisotopen zu weiten und auch übergeordnete Forderungen zu berücksichtigen, die ebenfalls maßgeblichen Einfluss auf die Gestaltung einer besseren Lösung haben. Im Folgenden werden die wesentlichen Anforderungen an verbesserte Produktionsumgebungen diskutiert.

4.2.2 Sicherheit für das Personal

Die Schädigung von Menschen insbesondere durch radioaktive Strahlung muss minimiert werden. Daher ist der Sicherheit der Einrichtung absolute Priorität einzu-

räumen. Hierbei stehen zunächst die Produktionsmitarbeiter im Fokus, aber auch die Umgebung ist zu betrachten, besonders, wenn die Heißen Zellen in einem Labor stehen, in dem sich Mitarbeiter länger in direkter Nähe zur Anlage aufhalten. Die Sicherheit der Produktion und des Umgangs mit radioaktivem Material hat auch eine politische Dimension: Die Anwendung radioaktiver Stoffe wird von Teilen der Öffentlichkeit überaus kritisch betrachtet und daher argwöhnisch beobachtet. Kleinste Sicherheitsmängel können nicht nur schwerwiegende Folgen für das Image der betroffenen Firma oder Klinik haben, sondern den gesamten Bereich der Nuklearmedizin bzw. nuklearer Anwendungen in Verruf bringen. Bei Schadensfällen werden oft nur noch die Risiken und nicht mehr die vielfältig erzielten Erfolge gesehen.

4.2.3 Erfüllung gesetzlicher Vorschriften für medizinische Produkte

Es ist zu beachten, dass die Produktion und die Qualitätskontrolle von Arzneimitteln dem Arzneimittelgesetz (AMG) unterliegen. Dadurch sind eine Vielzahl strenger Verordnungen und Richtlinien zu befolgen, wie die Vorschriften des Europäischen Arzneibuchs, die Betriebsverordnung für pharmazeutische Unternehmer und die Richtlinien der Good Manufacturing Practices (GMP) (BECHTOLD & KEMMERER 2000, KUWERT et al. 2009). Vor allem das letztgenannte Regelwerk bestimmt maßgeblich die Gestaltung von Produktionsanlagen. In der Regel wird die Version der US Food and Drug Administration (FDA) angewendet, da sie weltweit die höchsten Ansprüche stellt (GMP 2009, GMP INSTITUTE 2009). Im Vordergrund steht die Qualitätssicherung des medizinischen Produktes, wobei in der Anlage besonders auf die Sterilität geachtet werden muss, um eine mikrobielle Kontamination bei der Verarbeitung zu verhindern (STMWIVT 2005). Bei Radiopharmaka müssen zusätzlich Kriterien wie die radionukleare, die radiochemische und die chemische Reinheit sowie die physiologische Verträglichkeit erfüllt und eine Querkontamination verhindert werden (BECHTOLD & KEMMERER 2000, EG-GMP 2008).

4.2.4 Niedrige Kosten

Die Produktion von Radioisotopen unterliegt einem Wettbewerb. Bei allen berechtigten Anstrengungen für erhöhte Sicherheit und verbesserte Rahmenbedingungen darf die Wirtschaftlichkeit daher nicht außer Acht gelassen werden. Auch wenn diese Aspekte ebenfalls zur Reduzierung von Kosten beitragen, indem kostspielige Fehler vermieden und die Effektivität der Produktion erhöht werden, sind den Kosten für Sicherheitsmaßnahmen enge Grenzen gesetzt. Die zusätzlichen Investitionen müssen einen entsprechenden Mehrwert oder noch besser einen Kostenvorteil

erbringen. WALTON (1958) räumt ebenfalls der Sicherheit oberste Priorität ein, empfiehlt aber einen Mittelweg, um mögliche Übertreibungen bei den Sicherheitsvorkehrungen zu vermeiden. Es gilt zwischen einem verbesserten Schutz durch die Heißen Zellen und den Nachteilen wie höheren Kosten, gesteigerter Komplexität sowie einer Verlangsamung der Arbeit durch die Sicherheitsmaßnahmen abzuwägen. Wenn das Assistenzsystem zu teuer wird, besteht die Gefahr, dass es nicht eingesetzt wird.

4.2.5 Zuverlässigkeit

Ein wichtiger Aspekt bei der Neugestaltung von Anlagen und Prozessen, aber auch bei der Entwicklung neuer Technologien im Allgemeinen, ist die Zuverlässigkeit der Technik. Dies gilt sowohl aus dem Blickwinkel der Sicherheit als auch der Wirtschaftlichkeit. Das Ziel ist, Ausfälle zu vermeiden, Ausschuss zu reduzieren, die Häufigkeit von Wartung und Reparatur zu minimieren und generell die Effizienz zu erhöhen. Um eine hohe Zuverlässigkeit zu erzielen, sollte möglichst auf bestehende Technik zurückgegriffen werden, die bereits erprobt und optimiert wurde. Standardisierte Zukaufteile haben ihre Zuverlässigkeit meist bereits bewiesen.

4.2.6 Flexibilität und Erweiterbarkeit

Die Anschaffung einer Produktionsanlage in einer Heißen Zelle ist eine kostenintensive und zeitaufwändige Investition. Die Entwicklung solcher Anlagen nimmt Monate bis Jahre in Anspruch. Zusätzlich ändern sich besonders bei pharmazeutischer Produktion die Prozesse ständig (KENNEDY & PLUMB 2003). Damit Aufwand und Investitionskosten gerechtfertigt werden können, muss die Anlage über einen langen Zeitraum betrieben und für mehrere Projekte verwendet werden können. Voraussetzung hierfür ist eine hohe Flexibilität, so dass vielfältige Anwendungen wie Produktion anderer Radioisotopen oder sonstiger radioaktiver Substanzen möglich werden. Darüber hinaus ist eine Erweiterbarkeit wünschenswert, beispielsweise auf mehr Funktionalität, um das System über einen längeren Zeitraum nutzen und an zukünftige Entwicklungen und Technologien anpassen zu können.

4.2.7 Kurzfristige Realisierbarkeit

Da der Handlungsbedarf bei der Produktion von radioaktiven Stoffen bereits heute groß ist, sind Lösungen erforderlich, die kurzfristig eine Verbesserung der Situation bewirken können. Ziel einer neuen Technologie ist die Anwendung und die Gene-

rierung von Nutzen. Es wird daher ein realistisches und kurzfristig umsetzbares Konzept angestrebt.

4.3 Lösungssuche

4.3.1 Allgemeines

Für die Suche nach adäquaten Lösungen wurde der Vorgehenszyklus der integrierten Produktentwicklung von EHRENSPIEL (2007) angewendet, der nach der Analyse der Anforderungen die Suche nach einer großen Auswahl an Lösungen für das betreffende Problem vorsieht. Ziel dieses Konzeptes ist, die beste Lösung für das Problem zu finden, indem möglichst alle Möglichkeiten identifiziert werden. Anschließend erfolgen eine Bewertung und die Auswahl der Lösungen, die weiter betrachtet werden sollen.

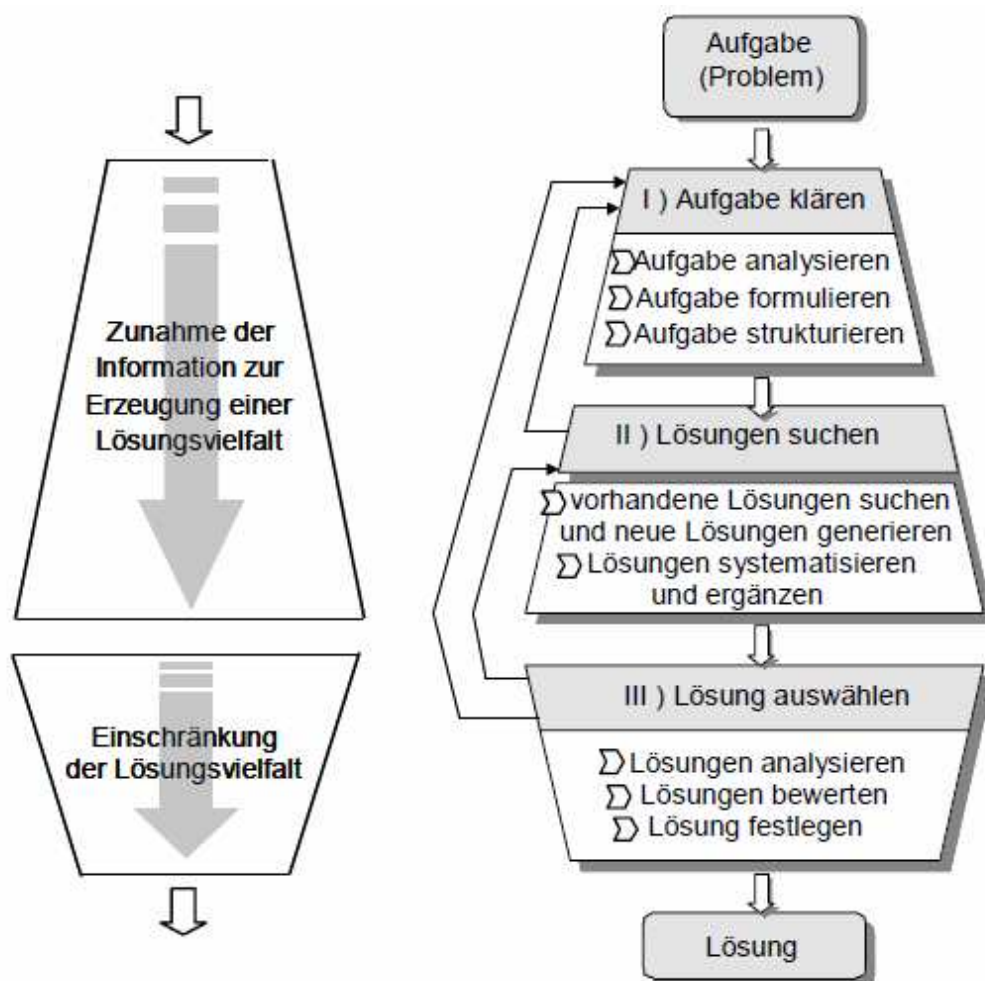


Abbildung 17: Vorgehenszyklus der integrierten Produktentwicklung von EHRENSPIEL (2007)

4.3.2 Lösungen für die Probleme an der Heißen Zelle

Im Folgenden werden Lösungen für die in Kapitel 2.5 vorgestellten ungünstigen Arbeitsbedingungen und die Probleme bei der manuellen Arbeit in Heißen Zellen aufgeführt und bewertet:

- *Bleiglas ragt in die Heiße Zelle:* Die Bleiwand der Abschirmung kann so konstruiert werden, dass das Bleiglasfenster in den Arbeitsbereich hineinragt, anstelle nach außen überzustehen. Dadurch kommen die Produktionsmitarbeiter näher an die Bleiwand heran und können tiefer in die Heiße Zelle hineingreifen. Da sich dann auch die Ellbogen in der Zelle befinden, erhöht sich die Bewegungsfreiheit der Hände. Diese Lösung weist aber gravierende Nachteile auf, weil das Bleiglas innerhalb des Arbeitsbereichs den ohnehin eng begrenzten zur Verfügung stehenden Raum weiter einschränkt. Der sichtbare Bereich des Arbeitsbereichs wird auf ein nicht mehr vertretbares Maß weiter reduziert. Die Innenbox aus Kunststoff muss eine Aussparung für das Bleiglas erhalten, was eine aufwändige und teure Konstruktion erfordert.
- *Bewegliche Wand mit dünnem Bleiglasfenster:* Bei Interaktionsbedarf wird eine Bleiwand der Abschirmung weggeschwenkt oder nach unten versenkt und stattdessen eine mobile Bleiwand mit Bleiglasfenster davor gefahren, mit welcher die Produktionsmitarbeiter die Wartungs- und Reparaturarbeiten durchführen. In diesem Fall kann dünneres Bleiglas verwendet werden, weil die Abschirmung nur die während der Arbeiten vorherrschende Strahlung abzuhalten hat. Diese muss aufgrund der Anwesenheit der Hände niedriger sein als während des automatisierten Produktionsprozesses. Das radioaktive Material wird vorher so weit möglich aus der Heißen Zelle entfernt. Das dünnere Bleiglas beeinträchtigt die Arbeit weniger, weil beispielsweise die Bildverzerrung durch Brechung schwächer ist. Der wesentliche Nachteil dieser Lösung ist, dass beim Wechsel der Bleiwände temporär keine Abschirmung vorhanden ist und dadurch eine Gefährdung der Produktionsmitarbeiter und der Umgebung gegeben ist. Der Vorgang müsste folglich automatisiert ablaufen, was allerdings aufwändig und teuer wäre. Die Übergangsbereiche zwischen regulärer und temporärer Abschirmung sind aus strahlenschutztechnischen Gesichtspunkten kritisch, weil ein Spalt nicht zu vermeiden ist.
- *Entfernbarer Abschirmung:* Dieser Lösungsvorschlag basiert auf der gleichen Überlegung, dass während der Durchführung der Arbeit nicht die maximal

erforderliche Abschirmung notwendig ist. Dieses Konzept sieht allerdings vor, die regulären Bleiwände zweigeteilt zu konstruieren, so dass ein Teil davon entfernt werden kann und dadurch die Arbeitsumgebung mit Eingriffsöffnungen und einem dünnen Bleiglasfenster frei wird. In diesem Fall ist immer eine ausreichende Abschirmung vorhanden.

Die vorgestellten Lösungsansätze wurden noch nicht realisiert und auch nicht wissenschaftlich betrachtet. Bisher existieren lediglich die im Stand der Technik vorgestellte Lösung mit dünnem Bleiglasfenster und zusätzlicher Bleiabschirmung sowie das häufig angewendete Konzept einer lokalen Abschirmung der Strahlungsquelle mit Bleiziegeln. Die Überlegungen zeigen, dass für die Bleiglas-Problematik eine Reihe von vorwiegend konstruktiven Lösungsmöglichkeiten denkbar ist, mit denen einige Probleme eliminiert bzw. abgemildert werden können. Allerdings sind Aufwand und Kosten oft sehr hoch, besonders, wenn die Bleiabschirmung geändert werden muss. Solange das Bleiglas verwendet wird, bleiben außerdem auch die damit zusammenhängenden Probleme. Bei den vorgestellten Lösungsalternativen fehlt zusätzlich der ganzheitliche Ansatz, es werden vorwiegend einzelne Probleme gelöst, teilweise sogar zum Nachteil anderer Aspekte. Außerdem bieten die Lösungsalternativen nicht die zusätzlichen Möglichkeiten eines immersiven Kamerasystems, wie die Zoomfunktion oder die Ermöglichung der Verwendung von Augmented Reality.

4.3.3 Lösungen für die Unterstützung der Produktionsmitarbeiter

Auch für die Unterstützung der Produktionsmitarbeiter sind Lösungsmöglichkeiten vorhanden:

- Als einfachste Möglichkeit bieten sich Papier oder freie Flächen auf Komponenten der Anlage, auf denen Informationen, Hinweise, Anleitungen, etc. notiert werden können. Kosten und Aufwand dieser Lösungen sind sehr gering. Allerdings ist die Flexibilität stark eingeschränkt, weil Papier im Inneren der Heißen Zelle und besonders beschriftete Komponentenflächen nicht einfach ausgetauscht werden können. Außerdem ist die Lesbarkeit in Abhängigkeit von Schriftgröße und -typ oft mangelhaft und die Informationsmenge auf der verfügbaren Fläche limitiert. Zudem kann die Information aufgrund von Säuredämpfen oder Flüssigkeiten verloren gehen. Die Unterstützungsmöglichkeiten dieser Lösungen sind daher sehr begrenzt. Außerdem ist keine aktive Unterstützung möglich.

- Mit Lichtzeichen kann ein aktives Unterstützungssystem realisiert werden. Damit ist es beispielsweise möglich, vor Gefahren zu warnen, Zusammenhänge darzustellen oder bestimmte Komponenten der Produktionsanlage hervorzuheben. Der Informationsgehalt eines einfachen Lichtzeichens ist allerdings stark begrenzt. Durch eine intelligente Vernetzung können aber auch komplexere Inhalte und Unterstützungsfunktionen realisiert werden, die aber nur begrenzt flexibel sind. Die erforderliche Technik ist einfach und kostengünstig. Allerdings entstehen Nachteile durch die notwendige Verkabelung, die einen großen zusätzlichen Aufwand mit sich bringt sowie die Korrosionsgefahr aufgrund der harten Bedingungen in der Heißen Zelle. Außerdem wird die Komplexität der Verkabelung und der Schläuche der Produktionsanlage weiter erhöht, was unter Umständen zu einer Behinderung der Anlagenfunktion führen kann. Besonders bei umfassenden Anlagen mit vielen Komponenten kann der eigentlich geringe Platzbedarf für Lichtzeichen aufgrund der erforderlichen großen Anzahl bereits zu groß sein. Letztendlich steht einem hohen Aufwand mit Risiken nur ein begrenzter Nutzen gegenüber.
- Eine deutliche optische wie inhaltliche Verbesserung der Informationsversorgung kann mit kleinen Flachbildschirmen erreicht werden, die in die Produktionsanlage integriert werden, da sie eine Flexibilität bezüglich der zur Verfügung gestellten Informationen bieten. Die Bildschirme würden im Inneren der Zelle angeordnet werden und wären durch das Bleiglasfenster sichtbar. Kommerzielle Produkte mit sehr guter Bildqualität sind mittlerweile zu akzeptablen Preisen erhältlich. Allerdings ist die sichtbare Fläche aufgrund des großen Abstandes der Produktionsmitarbeiter wegen des Bleiglasfensters zu klein. Außerdem benötigen die Geräte Platz, der in der Anlage oft nicht vorhanden ist. Als Konsequenz können nur wenige Bildschirme verwendet werden, was die örtliche Flexibilität und vor allem die Unterstützungsmöglichkeiten deutlich einschränkt. Darüber hinaus sind die empfindlichen Geräte der radioaktiven Strahlung und den Säuredämpfen ausgesetzt, was bereits nach kurzer Zeit zu Schäden führen kann.
- Durch die Verwendung eines Beamers zur Darstellung der Informationen kann die Problematik der Schädigung von Bildschirmen umgangen werden. Allerdings ist dafür eine Abtrennung des Gerätes von der problematischen Umgebung in Form einer Einhausung erforderlich. Für die hohe Abwärme des Geräts sind Vorkehrungen zu treffen. Die Informationen für die Benutzer werden auf Flächen in der Heißen Zelle projiziert. Mit einem Beamer bieten sich ähnlich gute Möglichkeiten der bildlichen Darstellung wie bei Bild-

schirmen. Allerdings sind auch für diese Lösungsidee Flächen in der Anlage für die Projektion frei zu halten, was sich in der Regel schwierig gestaltet. Außerdem muss das Gerät in der engen Zelle untergebracht werden. Dies stellt aufgrund des relativ großen hierfür erforderlichen Raums ein Problem dar.

Wie bei der Bleiglasfenster-Problematik existieren auch für die Unterstützung der Produktionsmitarbeiter bei der manuellen Produktion von radioaktiven Stoffen zahlreiche Lösungsmöglichkeiten. In diesem Fall kommen einige Vorschläge in der einen oder anderen Form bereits zur Anwendung, da der Bedarf an Informationen in der Heißen Zelle sehr groß ist und einige Lösungen auf der Hand liegen. Wesentlicher Nachteil der aufgeführten Lösungsideen ist ein ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis. Bei einigen können nur geringe Verbesserungen erzielt werden, bei anderen ist dafür ein hoher Aufwand erforderlich. Sie sind daher keine Alternative zur favorisierten Lösung der Anwendung von Augmented Reality in Verbindung mit einer Videobrille. Auch dieses Konzept ist mit Aufwand verbunden, der aber erstens durch die Kombination mit dem Kamerasystem deutlich reduziert und zweitens von dem generierten Nutzen klar übertroffen wird. Die Anwendung von AR weist unter anderem eine gute Darstellungsqualität sowie eine sehr hohe Flexibilität auf. Sie benötigt vergleichsweise wenig Platz, ermöglicht nahezu beliebig viele Informationen und ist durch die Säuredämpfe oder die radioaktive Strahlung nicht direkt gefährdet. Die AR-Anwendung stellt die umfangreichste der verglichenen Lösungen dar. Sie vereint alle Unterstützungsmerkmale der Alternativen und weist noch zahlreiche weitere Möglichkeiten auf, die in den folgenden Abschnitten noch vertieft betrachtet werden.

4.4 Konzept eines intelligenten Assistenzsystems

4.4.1 Allgemeines

Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Konzept eines intelligenten Assistenzsystems zur Unterstützung der fordernden und gefährlichen Arbeit in Heißen Zellen basiert auf einem immersiven Kamerasystem, das die Nachteile des Bleiglasfensters eliminiert und durch zusätzliche Funktionalität wie Zoom und Bewegung die Möglichkeiten der Produktionsmitarbeiter erweitert. Entscheidend ist, dass mit einem solchen Kamerasystem zusätzlich die Nutzung der Visualisierungstechnologie Augmented Reality möglich wird, die eine Fülle an Funktionen bieten, mit denen wesentliche Probleme der Arbeitsumgebung gelöst werden können. AR ermöglicht

vor allem, das bisher vorherrschende Informationsdefizit in der Heißen Zelle zu beseitigen und eine ideale Informationsversorgung zu schaffen.

Das Assistenzsystem ist daher die bestmögliche Lösung für die in der Situationsanalyse (Kapitel 2) ermittelten Probleme und beeinträchtigenden Faktoren, die eine Unterstützung der Produktionsmitarbeiter bei ihrer fordernden Arbeit notwendig machen. Das Konzept ist mehr als nur die Kombination aus Kamerasystem und Augmented-Reality-Anwendungen, da sich die beiden Komponenten optimal ergänzen, aufeinander aufbauen und dadurch das jeweilige Potential verstärkt wird. Es ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen. Zusätzlich bieten sich vielfältige Möglichkeiten, das System zu erweitern und neue Entwicklungen mit einzubeziehen.

Zuerst wird in den nächsten Abschnitten das Gesamtkonzept detaillierter vorgestellt, bevor im Anschluss und in den folgenden Kapiteln auf die beiden Hauptbestandteile, das Kamerasystem und die Augmented-Reality-Anwendung, näher eingegangen wird, in denen das Konzept umgesetzt wird.

4.4.2 Intelligente Assistenz

Den Produktionsmitarbeitern soll eine Art elektronischer „Assistent“ zur Seite gestellt werden, der sie bei den Arbeiten unterstützt. Es ist sicherzustellen, dass das Assistenzsystem die Nutzer nicht zusätzlich belastet, stört oder ablenkt. Das Konzept sieht daher ein intelligentes System vor, das situationsabhängig eingreift. Es besteht im Wesentlichen aus einem Unterstützungssystem und einem Sicherheitssystem, die beide Hand in Hand zusammenarbeiten. Das Unterstützungssystem wird von den Produktionsmitarbeitern vor der Anwendung für die jeweilige Aufgabe gestaltet und bei Bedarf aktiviert. Art und Umfang der Unterstützung hängen dem entsprechend von der jeweiligen Aufgabe und den Vorlieben der jeweiligen Produktionsmitarbeiter ab. Das Sicherheitssystem arbeitet für die Anwender unbemerkt im Hintergrund und tritt nur dann in Erscheinung, wenn es benötigt wird. Es ist ständig aktiv und überprüft die Situation, um bei Gefahr rechtzeitig warnen zu können. Diese Konzepte werden vor allem bei der Gestaltung des AR-Systems umgesetzt.

4.4.3 Realisierung einer optimalen Informationsversorgung

Die fast vollständige Abschottung des Arbeitsbereichs verhindert die Versorgung der Produktionsmitarbeiter mit Informationen während ihrer Arbeit in der Heißen Zelle. Sie sind auf Unterstützung angewiesen. Eine optimale Bereitstellung der

richtigen Informationen ermöglicht es zudem, die Hemmnisse und Beeinträchtigungen der Arbeitsumgebung zu überwinden bzw. stark abzumildern. Dadurch können auch Personen Arbeiten an der Anlage kompetent ausführen, die hierfür keine Experten sind oder noch keine Erfahrung damit gesammelt haben. Das primäre Ziel des Assistenzsystems ist daher, die Produktionsmitarbeiter mit jeder erforderlichen Hilfeleistung zu versorgen.

Der Gestaltung der Schnittstelle zwischen Assistenzsystem und Anwender kommt wesentliche Bedeutung zu. Eine optimale Informationsversorgung bedingt sowohl eine optimale Darstellung als auch eine gute Aufbereitung der Information selbst. In der Informationstheorie werden neben dem strukturellen Aufbau die semantische, die syntaktische und die pragmatische Dimension einer Information unterschieden. Entscheidend ist demnach neben dem Inhalt einer Information auch deren Zusammensetzung und Anwendungsrelevanz. Ziel ist, dass die Adressaten, in diesem Fall die Produktionsmitarbeiter an der Heißen Zelle, die Information leicht und auf Anhieb richtig verstehen. (MORRIS 1938, LOCHMANN 2006)

Mit dem Konzept eines intelligenten Assistenzsystems kann eine optimale Informationsversorgung gewährleistet werden, da mit dem Kamerasystem und der AR-Unterstützung sowohl für die Darstellung als auch die Aufbereitung der Inhalte hervorragende Bedingungen vorhanden sind. Der wesentliche Vorteil ist, dass die Versorgung mit Informationen über das Kamerasystem und insbesondere die Augmented-Reality-Technologie visuell erfolgt. Dies kommt den hervorragenden visuellen Fähigkeiten des Menschen zugute. Der Mensch ist es gewöhnt, Informationen über das Auge aufzunehmen und in Bildern zu denken. Das Auge ist das Organ, mit dem Informationen am schnellsten aufgenommen werden, was eine schnelle Reaktion ermöglicht. Außerdem kann der Mensch über Bilder ohne Mühe eine große Menge an verschiedenartigen Informationen wie Form, Farbe, Anordnung, Position, Größe, Bewegung etc. in Bruchteilen von Sekunden fast gleichzeitig erfassen. An der Größe und der Anzahl der an der Bildanalyse beteiligten Bereiche des Gehirns kann die Bedeutung der visuellen Wahrnehmung für Menschen abgelesen werden. 60 % der Großhirnrinde sind bei der Erfassung, Interpretation und Reaktion auf visuelle Reize aktiv. (GEGENFURTNER et al. 2009)

4.4.4 Konzept eines immersiven Kamerasystems

4.4.4.1 Immersion

Der Begriff „Immersion“ wird vorwiegend im Zusammenhang mit der Anwendung virtueller Technologien wie Virtual Reality verwendet. Er steht für den Grad des „Eintauchens“ in die synthetische Welt (BAUER 1997). Es wird versucht, die virtuelle Welt so zu gestalten, dass der Anwender den Eindruck einer realen Welt hat. Im Zusammenhang mit dem Kamerasystem wird der Begriff „Immersion“ im übertragenen Sinn verstanden. Ziel ist, den Produktionsmitarbeitern ein Kamerasystem zur Verfügung zu stellen, das ein „Eintauchen“ in die Arbeitsumgebung ermöglicht. Sie sollen trotz der Bleiwand das Gefühl haben, dass sich kein Hindernis zwischen ihnen und ihrem Arbeitsbereich befindet und dass sie, wie bei einer ungeschirmten Handschuhbox, einen optimalen Blick auf die Produktionsumgebung haben.

Das Konzept sieht vor, das Bleiglasfenster durch ein Kamerasystem zu ersetzen (Abbildung 18), um die in Abschnitt 2.5 aufgezeigten, damit zusammenhängenden Probleme und Nachteile zu eliminieren. Ohne das Bleiglasfenster weist die Wand vor dem Produktionsmitarbeiter keine größere Dicke mehr auf als an anderen Stellen, wodurch sich die Reichweite der Hände erhöht.

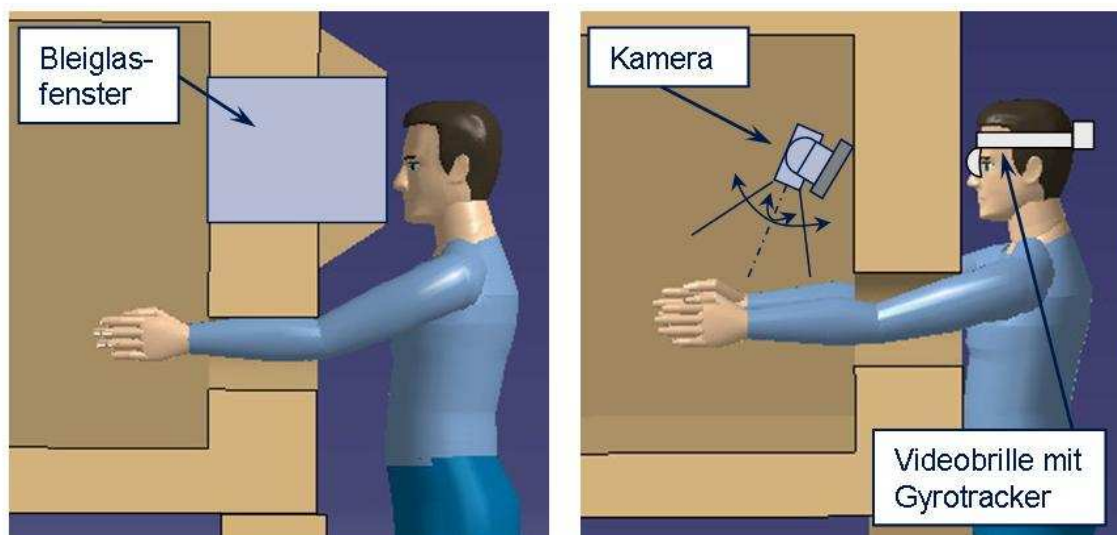


Abbildung 18: Das dicke Bleiglasfenster wird durch ein immersives Kamerasystem ersetzt, bei dem die schwenk- und neigbare Kamera u. a. mit einem Gyrotracker gesteuert wird

Außerdem ist dadurch die Position der Eingriffsöffnungen frei wählbar, so dass ergonomische Gestaltungsrichtlinien berücksichtigt werden können. Um eine optimale Sicht des Arbeitsbereichs für die Produktionsmitarbeiter zu erreichen, ist eine

schwenk- und neigbare Kamera vorgesehen, so dass alle wichtigen Bereiche im Inneren der Heißen Zelle einsehbar sind. Das Kamerabild soll über geeignete Visualisierungsmedien wie ein Head Mounted Display an die Benutzer ausgegeben werden. Dadurch ist gewährleistet, dass der Abstand zwischen den Augen und dem Bildschirm ausreichend groß ist und sich die Produktionsmitarbeiter besser auf ihre Arbeit konzentrieren können, weil die Umgebung abgeschottet wird. Mit einer zusätzlichen Zoomfunktion können detaillierte Bilder der Anlage erzeugt werden. Die Steuerung der Kamera erfolgt über intuitive Eingabegeräte, die es ermöglichen, die Kamera zu bewegen, ohne für die Anwender eine zusätzliche Belastung zu erzeugen, so dass diese ihre Aufmerksamkeit vollständig auf ihre fordernden Aufgaben in der radioaktiven Umgebung konzentrieren können.

4.4.4.2 Intuitivität

Die intuitive Gestaltung der Steuerung der Kamerabewegung ist eine wichtige Voraussetzung für ein immersives Kamerasystem. Eine eindeutige Definition für Intuitivität existiert derzeit nicht (HURTIENNE et al. 2006a), wobei die gängigen Erklärungen im Wesentlichen in die gleiche Richtung gehen: Mit intuitiven Geräten wird eine Reihe von charakterisierenden Eigenschaften verbunden. Beispielsweise wird erwartet, dass intuitiv gestaltete Geräte sofort bedient werden können, ohne dass sich die Anwender mit einer Anleitung beschäftigen oder die Bedienungshandgriffe erlernen müssten. Damit einher geht meist auch die Erwartung einer fehlerfreien Bedienung, wobei weniger die absolute Fehlerfreiheit im Vordergrund steht, als das unbewusste sofortige Verständnis der erforderlichen Steuerungsaktionen und die daraus resultierende intuitiv richtige Handlung. MOHS et al. (2006) führen eine Reihe weiterer gängiger Definitionen auf, welche die Intuitivität in ähnlicher Weise beschreiben. Es ist außerdem eine große Ähnlichkeit mit den Begriffen *Erwartungskonformität*, *Selbstbeschreibungsfähigkeit* und *Aufgabenangemessenheit* aus den Dialogprinzipien der DIN EN ISO 9241-110 (2006) festzustellen. (HURTIENNE et al. 2006a, MOHS et al. 2006, RASMUSSEN 1986)

Ziel der Untersuchungen und Versuche im Rahmen dieser Arbeit ist, herauszufinden, wie das System gestaltet sein muss, dass es als intuitiv empfunden wird. Nach HURTIENNE et al. (2006b) und RASMUSSEN (1986) ist eine intuitive Bedienung kein kognitiv beanspruchender Prozess, sondern sie läuft fertigkeitstbasiert ab. In der Regel sind Steuerungsaufgaben intuitiv, die an den natürlichen Bewegungsablauf angelehnt sind. Dies wird bei der Gestaltung des Kamerasystems sowie der AR-Unterstützung angestrebt. Der erste Ansatz ist die Anlehnung an bestehende Verhal-

tensmuster. Die genaue Gestaltung der Geräte wird in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert.

4.4.5 Assistenz auf Basis von Augmented Reality

Die vielversprechendste Lösung für die Unterstützung der Produktionsmitarbeiter bei der Produktion radioaktiver Stoffe in Heißen Zellen ist die Anwendung von Augmented Reality, da sie besonderen Bedarf an „erweiterter Realität“, d. h. an Versorgung mit zusätzlichen Informationen haben und dies besonders gut durch AR geleistet werden kann. Auch die aufgezeigten Probleme und Hindernisse können mit AR gelöst oder zumindest deutlich entschärft werden.

Ein AR-System überzeugt unter anderem durch seine Flexibilität und gute Erweiterbarkeit. Da zur Realisierung der benötigten Funktionen beim AR-System nur kleine Symbole, sogenannte Marker, erforderlich sind und keine zusätzlichen Geräte in die Heiße Zelle eingebaut werden müssen, ist der Aufwand hierfür gering. Dies gilt im Besonderen für eine Heiße Zelle, bei der das Kamerasystem anstelle des Bleiglasses verwendet wird, denn damit sind die technischen Voraussetzungen für ein AR-System in idealer Weise bereits erfüllt: Die Kombination aus Kamera und Videobrille stellt ein „Video-See-Through-Visualisierungssystem“ dar, mit dem sofort AR-Anwendungen möglich sind (PATRON 2004). Nachteile, die bei anderen AR-Anwendungen dazu führen, dass sie, trotz nachgewiesenem Nutzen, in der Praxis nicht zum Einsatz kommen, treten beim speziellen Fall der Heißen Zelle nicht auf: Da die Arbeit an der Produktionsanlage stationär ist und die Produktionsmitarbeiter ihre Position nicht verändern, ist kein kostenintensives und aufwändiges mobiles AR-System nötig. Da die Produktionsmitarbeiter mit dem AR-System keine Positionsänderung vornehmen, ergibt sich für sie durch das eingeschränkte Blickfeld der Videobrille auch keine Gefahr, wie sie beispielsweise durch seitlich herannahende Fahrzeuge in Fabrikhallen oder bei Vertiefungen im Fußboden auftritt. Die Verwendung von AR-Systemen bringt aus technischen Gründen eine deutliche Einschränkung des natürlichen Sichtfeldes mit sich, da die Kamera nur einen kleinen Öffnungswinkel hat und der Mensch den weiten Sehbereich des Auges gewöhnt ist. Bei der Heißen Zelle sind die Produktionsmitarbeiter ein unangenehmes Bleiglasfenster gewöhnt, das den Blick ohnehin stark einschränkt und darüber hinaus die Sicht verschlechtert. Das Kamerasystem führt hier zu einer Verbesserung des Blickfeldes.

AR geht weit darüber hinaus, nur Hygienefaktor zu sein, wie es HERZBERG et al. 1959 in seiner Zwei-Faktoren-Theorie beschrieben hat. AR ist eine attraktive Lö-

sung und stellt daher einen Motivator dar. Diese Technologie bietet eine Fülle zusätzlicher Unterstützungsmöglichkeiten, welche zu einer angenehmeren, besseren und schnelleren Arbeit verhelfen. Das Assistenzsystem macht dadurch eine vielfältige Unterstützung der Produktionsmitarbeiter möglich, so dass kaum Situationen denkbar sind, die nicht unterstützt werden könnten.

4.4.6 Low-Cost-Ansatz

Der Low-Cost-Ansatz zieht sich als roter Faden durch die vorliegende Arbeit und bestimmt wesentlich das Konzept des Assistenzsystems und dessen Ausgestaltung. Im Rahmen der Dissertation soll die These nachgewiesen werden, dass mit gut ausgewählten einfachen Geräten ausreichender Nutzen generiert werden kann und kostspielige Speziallösungen nicht erforderlich sind. Für die Realisierung des Lösungskonzeptes wird bewusst auf reguläre und verfügbare Technik zurückgegriffen. Normalerweise werden für Anwendungen im radioaktiven Bereich besondere Komponenten verwendet, die für die harten Bedingungen ausgelegt sind. Diese Produkte sind allerdings um ein Vielfaches teurer, weil kostspielige Werkstoffe verwendet und besondere Schutzmaßnahmen getroffen werden müssen, die den Aufwand erheblich erhöhen. Zudem sind die Stückzahlen meist sehr gering und die Anzahl der Hersteller nimmt ständig weiter ab oder sie haben eine Art Monopolstellung inne (COMMITTEE ON APPLICATION OF DIGITAL INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS TO NUCLEAR POWER PLANT OPERATIONS AND SAFETY 1997). Trotz aller Vorkehrungen können auch an solchen Spezialgeräten Defekte auftreten und sie müssen nach gewisser Zeit ausgetauscht werden. Anstelle der Verwendung spezieller Geräte wird die Strategie an die besondere Umgebung angepasst. Das Konzept sieht vor, robuste, handelsübliche Geräte zu verwenden und sie regelmäßig präventiv zu tauschen. Das Zeitintervall hierfür ist kürzer als bei gegen radioaktive Strahlung gehärteten Produkten und wird im Wesentlichen von der auftretenden Strahlungsexposition bestimmt (HARFENSTELLER et al. 2004).

5 Immersives Kamerasystem

5.1 Überblick über das Kapitel

In diesem Kapitel wird mit dem immersiven Kamerasystem zur Substituierung des Bleiglasfensters einer der beiden wesentlichen Bestandteile des Assistenzsystems näher erläutert. Den Schwerpunkt bilden neben der Neige- und Schwenkkinematik für die Kamera die Eingabegeräte, mit denen eine intuitive Steuerung der Kamerabewegung realisiert werden kann. Es wird die Umsetzung der Konzepte in Prototypen geschildert, die für die Durchführung von Versuchen erforderlich sind. Das Kapitel schließt mit den in Versuchen ermittelten Erkenntnissen und daraus abgeleiteten Empfehlungen zur Gestaltung des Kamerasystems.

5.2 Komponenten des immersiven Kamerasystems

5.2.1 Kamera als Ersatz für das Bleiglasfenster

5.2.1.1 Zweidimensionales Kamerasystem

Das immersive Kamerasystem ist zweidimensional ausgelegt. Das bedeutet, es kommt nur eine Hauptkamera in der Heißen Zelle zum Einsatz. Ein dreidimensionales Kamerasystem mit Zoom ist sehr aufwändig und kostspielig. Es beansprucht zudem deutlich mehr Raum im meist ohnehin überfüllten Arbeitsbereich der Heißen Zelle, da noch eine zweite Kamera erforderlich ist, die in einem definierten Abstand zur ersten angebracht sein muss. Der Bereich, der bei einem Schwenk der beiden Kameras überstrichen wird und daher frei gehalten werden muss, ist deutlich größer, da das Kamerasystem breiter ist.

Die Kombination von Zoomfunktion und Tiefenwahrnehmung in einem Kamerasystem stellt zudem eine technische Herausforderung dar, die bisher noch nicht zufriedenstellend gelöst wurde. Kommerziell erhältliche dreidimensionale Kamerasysteme bieten keine Zoomfunktion (BAIER et al. 2001, v3I 2009). Für ein System mit Zoom muss der Winkel der zwei Kameras zueinander je nach Zoom-Einstellung und dem Abstand zum betrachteten Objekt angepasst werden (BAIER et al. 2001). Derzeit sind lediglich in der Forschung Prototypen solcher Systeme zu finden, die allerdings noch nicht ausgereift sind. Bei der Forschung stehen neben der Herausforderung der technischen Realisierung Untersuchungen zum Nutzen für die Verbesserung der optischen Wahrnehmung im Vordergrund. Die Einbeziehung eines

dreidimensionalen Kamerasystems würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen und wird daher nicht weiter betrachtet.

Falls später ein akzeptables dreidimensionales Kamerasystem mit Zoom verfügbar ist, wäre ein Einsatz in der Heißen Zelle sicherlich ein weiterer Gewinn für die Arbeit der Produktionsmitarbeiter. Es ist aber keine notwendige Voraussetzung für eine sichere Erfüllung der Aufgaben. Der Mensch kann auch bei ebener Sicht, beispielsweise aus der Akkomodation, der Verdeckung, dem Schattenwurf oder den Größenverhältnissen Informationen zur räumlichen Situation gewinnen (BAIER et al. 2001). Außerdem ist zu bedenken, dass das Bleiglasfenster als Stand der Technik die Tiefenwahrnehmung ebenfalls erheblich einschränkt.

5.2.1.2 Qualitativ hochwertige Kamera mit Zoom

Der Anspruch an die Qualität des Videobildes ist hoch, da dieses für die Produktionsmitarbeiter während ihrer Arbeit die einzige Informationsquelle über das Innere der Heißen Zelle ist, in der sich ihre Hände in gefährlicher Umgebung befinden. Dort herrschen zudem erschwerende Rahmenbedingungen wie ungünstige Lichtverhältnisse. Daher ist eine Kamera mit automatischer Belichtungs- und Fokuseinstellung zu empfehlen, damit die Anwender sich auf ihre Aufgaben konzentrieren können. Allerdings ist von zu hochwertigen Geräten ebenfalls abzuraten, da hierfür übermäßig hohe Kosten anfallen. Zudem können die Vorteile oft nicht genutzt werden, da beispielsweise das Ausgabemedium nicht die benötigte hohe Qualität aufweist oder das Auge nicht mehr als 25 Bilder pro Sekunde verarbeiten kann. Außerdem ist mit einer Schädigung durch radioaktive Strahlung zu rechnen, was im folgenden Abschnitt näher beleuchtet wird.

5.2.1.3 Schädigung der Kamera

Allgemeines

Die Kamera befindet sich mit der Schwenk- und Neigevorrichtung in der Heißen Zelle und ist daher den darin vorherrschenden rauen Bedingungen ausgesetzt. Da bei der Arbeit oft auch Säuren verwendet werden, muss eine mögliche Korrosion metallischer Komponenten durch Säuredämpfe berücksichtigt werden (WALTON 1958). Hiervon ist vor allem die Mechanik betroffen, da in dieser in der Regel metallische Komponenten verbaut sind. Neben einer dadurch hervorgerufenen Beeinträchtigung der Funktion stört auch die Verschmutzung in der Arbeitsumgebung, die sich durch von der Oberfläche abgelöste Metalloxide ergibt. Zudem

besteht die Gefahr der Verunreinigung der produzierten Stoffe sowie der Beeinträchtigung der Messgeräte. Radioaktive Gase können darüber hinaus in die Kunststoffoberflächen eindiffundieren und die eingebauten Geräte dadurch kontaminieren.

Schädigende Wirkung der radioaktiven Strahlung

Die schwerwiegendsten negativen Auswirkungen werden durch die radioaktive Strahlung hervorgerufen. Betroffen sind vor allem die Halbleiter-basierte Elektronik, die Kunststoffkomponenten und die Linse der Kamera. Die Wechselwirkungen zwischen ionisierender Strahlung und Materie sind vielfältig. Neben Kernumwandlungen treten auch Effekte auf molekularer Ebene auf. Für Feststoffe sind Atomversetzungen maßgeblich. Dabei werden Atome durch die ionisierende Strahlung von ihrer ursprünglichen Position in einem Kristallgitter oder in einem Molekül herausgelöst. Die dadurch hervorgerufenen Fehlstellen im Kristallgitter beeinflussen die Funktion der betroffenen Komponente (PECK et al. 1963). Bei Kunststoffen werden dadurch beispielsweise mechanische Veränderungen hervorgerufen: Die ionisierende Wirkung der radioaktiven Strahlung spaltet die langkettigen Polymermoleküle auf, so dass die Bauteile porös und brüchig werden (BRUMBI 1990). Glas verliert bei intensiver Strahlenexposition die Transparenz und wird dunkel oder trüb, was ein Erblinden der Kamera zur Folge hat (COLBY et al. 2002, HARFENSTELLER 2006). Vor allem elektronische Komponenten, die auf Halbleitern basieren, werden von den so genannten Versetzungsschädigungen beeinträchtigt, wobei bei diesen Bauteilen weitere, vielschichtige Defekt-Arten auftreten (BRÄUNING 1989). Konsequenzen der radioaktiven Strahlung für die halbleiterbasierte Elektronik einer Kamera sind Beschädigungen an der Steuerelektronik oder an anderen sensiblen Komponenten, beispielsweise Pixelfehler am Bildsensor. Die durch die ionisierten Teilchen hervorgerufenen Ströme erzeugen den so genannten „single event upset“, Das sind Fehlinformationen, die beispielsweise die Bewegung der Kamera beeinflussen können. (BRUMBI 1990, HARFENSTELLER 2006, HOUSSAY 2000)

Die beschriebenen Schäden hängen im Wesentlichen von der Art der Strahlung und der Höhe der Aktivität ab. Den größten Schaden rufen Neutronen hervor. Bei Versuchen in einem Zyklotron mit einer Neutronenexposition der ungefähren Dosis von 3 Sv/h konnten an der eingesetzten handelsüblichen, ungehärteten und ungeschützten CCD-Kamera bereits nach 3 Stunden zahlreiche Pixelfehler festgestellt werden. (HARFENSTELLER et al. 2004)

Risiko des Ausfalls

Die Eintrittswahrscheinlichkeit von schwerwiegenden Beeinträchtigungen bzw. eines Ausfalls der Kamera beim im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall ist gering. Aufgrund der Anwesenheit der Hände muss das Strahlungsniveau niedrig sein. Der maximal erlaubte Grenzwert der Handdosis von 500 mSv im Jahr bei strahlenexponierten Personen ist weit entfernt von potentiell gefährlichen Strahlenbelastungen für die Kamera (VEITH 2001). Daher kommt nur eine temporär stark erhöhte Strahlendosis zwischen den manuellen Tätigkeiten für die Schädigung in Frage. Die schädlichen Neutronen können beim betrachteten Anwendungsfall ausgeschlossen werden, da sie bei der Produktion von Radioisotopen nicht signifikant auftreten. Die ebenfalls gefährliche Alpha-Strahlung lässt sich leicht abschirmen. Außerdem ist eher von einem kontinuierlichen Verlauf der Schädigung als von einem plötzlichen Ereignis auszugehen. Daher wird ein Ausfall nicht überraschend eintreten, sondern sich bereits lange vorher ankündigen. Untrügliche Zeichen sind Pixelfehler in zunehmender Anzahl und temporäre Aussetzer bei der Kamerabewegung oder anderen elektronischen Komponenten.

Maßnahmen gegen den Ausfall

Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Schädigung oder gar eines Ausfalls ist bei der Produktion von Radioisotopen zwar gering, kann aber nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Schädigungsmechanismen sind komplex und hängen von vielen Faktoren, wie Hersteller, Technologie, Typ, Charge, etc., ab (BRUMBI 1990). Eine genaue Vorhersage des Verhaltens ist daher nicht möglich. Ein Ausfall des Kamerasystems beispielsweise während des Eingriffs wäre kritisch. Da eine zuverlässige Funktion sehr wichtig ist, sieht das Konzept des immersiven Kamerasystems folgende Maßnahmen als Abhilfe vor:

- **Systematische Auswahl der Komponenten des Kamerasystems:** Da auch die verwendeten Werkstoffe eine entscheidende Rolle bei der Schädigungsproblematik spielen, muss eine intelligente Auswahl der Komponenten getroffen werden. Beispielsweise sind CMOS- oder CID-Kameras beständiger gegen Strahlenschäden als Geräte mit CCD-Sensoren (SHURTLIFF 2005). Im Allgemeinen ist darauf zu achten, dass sich keine hochwertige und damit sensible halbleiterbasierte Elektronik im strahlenexponierten Bereich befindet. Wenn keine geeigneten Geräte verfügbar sind, ist zu prüfen, ob die sensiblen Komponenten aus dem Gerät herausgetrennt und aus dem gefährdeten Bereich in die geschützte Umgebung außerhalb der Heißen Zelle verlagert werden können. Oft ist auch

eine einfache Elektrik ausreichend, beispielsweise für die Schwenk- und Neigevorrichtung.

- **Schutz der Komponenten:** Um das Risiko eines Ausfalls zu minimieren und eine möglichst lange Standzeit zu erzielen, müssen die Geräte so gut wie möglich geschützt werden. In Bezug auf Säuredämpfe und radioaktive Gase ist dies relativ einfach zu realisieren, indem alle gefährdeten Komponenten zur Vermeidung von Oberflächenkontamination und Korrosion eingehaust werden. Dies kann sowohl mit einem eigenen Gehäuse aus Plexiglas geschehen als auch mit einer Kunststofffolie, die luftdicht verschlossen wird. Die Linse muss beim zweiten Lösungsvorschlag durch ein Schutzglas abgedeckt werden, damit sie geschützt ist und trotzdem ein klares Bild ermöglicht. Eine Abschirmung der Komponenten vor den radioaktiven Strahlen wäre ebenfalls sinnvoll, ist aber nur bedingt realisierbar. Teilweise ist der Bauraum in der Heißen Zelle dafür nicht verfügbar, die Abschirmung wäre sehr schwer und der erforderliche Aufwand groß.
- **Regelmäßiger Austausch:** Nachdem eine Schädigung nicht zu vermeiden ist und ein plötzlicher Ausfall verhindert werden muss, wird ein Austauschkonzept empfohlen, das einen regelmäßigen Wechsel der Kamera, unabhängig von der aktuellen Schädigung, vorsieht. Der finanzielle Aufwand für eine kommerziell erhältliche Kamera mit ausreichenden Eigenschaften hält sich in vertretbaren Grenzen. Das Risiko hängt mit der Strahlungsintensität und der Expositionszeit zusammen, da sich die Schädigungen aufsummieren. Der zu wählende Zeitraum ist abhängig von den auftretenden Belastungen und muss für jede Anwendung gesondert festgelegt werden. Standzeiten von mehreren Monaten bis zu einem Jahr sind das Ziel. Die Befestigungsvorrichtung der Kamera ist auf einen schnellen und einfach durchzuführenden Austausch auszulegen. Die Befestigungselemente müssen auch mit den Einschränkungen der Handschuhe und ohne Sicht gut zu lösen und zu verschließen sein. Filigrane Arretierungselemente, die nur schwer ertastet werden können, sowie große erforderliche Kräfte beim Öffnen sind problematisch. Für den Austausch ist die Schleuse vorgesehen, über die in der Regel jede Heiße Zelle verfügt. Bei der Auswahl der Kamera ist darauf zu achten, dass sie nicht zu groß für die Schleuse ist, was aufgrund der üblichen Abmessungen aber eher unwahrscheinlich ist.
- **Redundanz durch weitere Kameras:** Damit die Produktionsmitarbeiter bei einem theoretisch möglichen, unerwarteten Ausfall der Hauptkamera nicht während der Erledigung der Aufgaben überrascht werden und plötzlich über kein

Bild mehr verfügen, sieht das Konzept des immersiven Kamerasystems mindestens eine weitere Kamera als Redundanz, vor. Bei Bedarf wird die Videobrille kurzfristig auf die Ersatzkamera umgeschaltet, so dass der Produktionsmitarbeiter seine Arbeit zu Ende bringen oder zumindest die notwendigen Schritte einleiten kann. Es ist zu empfehlen, die Detailkameras auf einem flexiblen Metallschlauch, einem so genannten Schwanenhals zu befestigen, so dass sie auch mit Handschuhen in der Heißen Zelle leicht in ihrer Position verändert werden können, falls der sichtbare Ausschnitt verändert werden muss oder kurzzeitig ein anderer Bereich betrachtet werden soll. Bei regulärem Betrieb kann diese Kamera für detaillierte Bilder von besonderen Bereichen der Anlage verwendet werden. Außerdem ist für den Austausch der Hauptkamera eine weitere Kamera sehr hilfreich, damit das Bedienpersonal die Situation analysieren kann und über eine optische Unterstützung bei den erforderlichen Handgriffen verfügt.

5.2.1.4 Schwenk- und Neige kinematik für die Kamera

Eine reguläre Kamera schränkt das Gesichtsfeld des Menschen erheblich ein. Während der Mensch ein ungefähres Gesichtsfeld von 170° in horizontaler Richtung und 110° in vertikaler Richtung gewohnt ist, bieten gängige Kameras einen sichtbaren Bereich von ca. 55° horizontal und ca. 40° vertikal (SCHÖBER 1957, F&R 2009). Aufgrund der engen Platzverhältnisse fällt es schwer, sich in der Heißen Zelle zu orientieren, weil der sichtbare Bereich meist zu klein ist, um verlässliche Orientierungsmerkmale an der Produktionsanlage zu finden. Auch wenn der Mensch nur in einem kleinen Teil seines maximalen Blickfeldes scharf sieht, nimmt er doch am Rand entscheidende Informationen auf, die ihm helfen, sich zurecht zu finden und die ihm ein Gefühl der Sicherheit geben, da er beispielsweise Gefahren früher auf sich zukommen sieht.

Eine übliche Lösung für das Problem des eingeschränkten Blickfeldes ist die Verwendung von Weitwinkelobjektiven. Mit einem so genannten Fischauge können Blickwinkel von jeweils 180° erzielt werden, was allerdings zu Lasten der Bildqualität geht. Versuche mit Weitwinkelkonvertern, die vor das Kameraobjektiv geschraubt wurden, zeigten, dass bereits bei einem Halb-Fischauge mit einem Faktor von 0,3 die Verzerrung zu groß für die Verwendung in der Heißen Zelle ist. Der Faktor ist Multiplikator der Brennweite und gibt wieder, wie stark die Brennweite der Kamera durch den Aufsatz reduziert wird. Ein Weitwinkelobjektiv-Adapter mit dem Faktor 0,5 stellt einen optimalen Kompromiss aus einer ausreichenden Bildqualität und der Vergrößerung des sichtbaren Bereichs dar. Es ermöglicht den Benutzern, ihre Hände zu sehen, wenn sie in die Heiße Zelle hineingreifen. Dies ist

einerseits eine nützliche Orientierungshilfe und andererseits eine entscheidende Voraussetzung, um mögliche Kollisionen mit sich im Bereich der Eingriffsöffnungen befindlichen Objekten zu verhindern.

Der mit dem Weitwinkelobjektiv erzielte sichtbare Bereich reicht allerdings bei weitem nicht für die Arbeit in der Heißen Zelle aus. Die Produktionsmitarbeiter müssen in der Lage sein, die gesamte Anlage und teilweise auch die Innenwände der Zelle zu inspizieren. Daher sieht das Konzept des immersiven Kamerasystems eine neig- und schwenkbare Kamera vor. Diese Lösung ist an das natürliche Vorbild angelehnt: Auch der Mensch muss die Augen oder den Kopf bewegen, wenn er größere Bereiche optisch erfassen will, da er nur in einem kleinen Bereich scharf sieht und lediglich diese Informationen verwenden kann. Zusätzlich soll das immersive Kamerasystem als besonderen Mehrwert mit der Zoom-Funktion einen detaillierten Blick auf die Komponenten ermöglichen. Die Zoom-Funktion macht nur in Verbindung mit der Bewegungsmöglichkeit der Kamera Sinn, da sonst immer der gleiche Bereich vergrößert werden würde.

5.2.1.5 Kommerzielles Kamerasystem versus Spezialanfertigung

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Kamerasystems sind prinzipiell kommerzielle Produkte zu bevorzugen, da diese vor dem Markteintritt in der Regel ausgiebig getestet werden und daher viel Erfahrung bezüglich ihrer Eigenschaften und ihres Verhaltens vorliegt. Außerdem sind solche Geräte in der Regel preisgünstiger als Spezialanfertigungen und kurzfristig verfügbar. Sie werden ständig weiterentwickelt und verbessert, so dass bei Nachfolgemodellen meist mit optimierten Eigenschaften zu einem geringeren Preis gerechnet werden kann. Allerdings müssen bei den Leistungsmerkmalen meist Kompromisse eingegangen werden. Es ist zu klären, ob kommerziell verfügbare Kameras für den Einsatz in der Heißen Zelle geeignet oder Spezialanfertigungen erforderlich sind.

Kommerzielle PTZ-Kameras

In Frage kommen sogenannte PTZ-Kameras, die vorwiegend für Überwachungsaufgaben konzipiert wurden. Sie bestehen aus einer Kamera mit motorgetriebenem Vario-Fokusobjektiv, Autofokus und automatischem Helligkeitsabgleich, die auf einer beweglichen Plattform befestigt ist. PTZ-Kameras bieten die Möglichkeit, sie ferngesteuert zu schwenken und zu neigen sowie die Zoom-Funktion zu bedienen. Da die Überwachungsaufgaben stark zunehmen und verstärkt auf hochwertige Kameras gesetzt wird, steht eine große Anzahl an Produkten zur Verfügung, die in vielen Aspekten den Anforderungen an das Kamerasystem für die Heiße Zelle

entsprechen. Es kommen beispielsweise hochwertige Super-HDD-Chips zum Einsatz, die eine hohe Bildauflösung von 550 TV-Linien bei sehr guter Farbqualität aufweisen, auch bei ungünstigen Lichtverhältnissen gute Resultate erzielen und über eine Reihe von Optimierungsfunktionen wie Gegenlichtausgleich oder erhöhte Konturenschärfe verfügen. Im Durchschnitt wird ein Zehnfach-Zoom geboten, der für die Anwendung in der Heißen Zelle bei weitem ausreicht (HITECSECURITY 2009). Probleme mit den kommerziellen Kameras treten in den Bereichen auf, in denen sich die Anforderungen, die an das immersive Kamerasystem gestellt werden, von den Anforderungen an Überwachungssysteme unterscheiden. Bei Überwachungsaufgaben ist beispielsweise meist ein großer Drehwinkel wichtig, während der Neigewinkel geringer ausfallen kann und 90° oft schon ausreichen. Für die Arbeit in der Heißen Zelle ist jedoch ein großer Neigewinkel erforderlich, während ein Drehwinkel von 360°, wie er teilweise angeboten wird, keinen Nutzen bringt. Die Baugröße ist bei Überwachungsaufgaben meist unerheblich, während sie in der Heißen Zelle ein Ausschlusskriterium darstellt.

Ein weiteres Manko kommerzieller Geräte ist die im Durchschnitt relativ geringe Bewegungsgeschwindigkeit, die für Überwachungsaufgaben ausreicht, aber bei einer intuitiven Steuerung einschränkend wirkt. Besonders beim Umgang mit Radioaktivität ist es inakzeptabel, wenn die Kamerabewegung viel Zeit erfordert. Auch ein Zeitverzug zwischen dem Steuersignal und der Bewegung der Kamera wird als sehr störend empfunden. Die tolerierbare Schwelle für die Latenz liegt bei etwa 100 ms (BAIER et al. 2001). Bei der Verwendung der Head-Tracking-Steuerung darf die Kamerabewegung den Steuersignalen nicht merkbar nachlaufen. Besonders bei diesem Kriterium schneiden die kommerziellen Überwachungskameras schlecht ab. Zum einen werden fast nur noch sogenannte IP-Kameras angeboten, die über einen integrierten Server verfügen und daher sehr einfach in die mittlerweile im Überwachungsbereich vorherrschende Netzwerkstruktur eingefügt werden können. Die Signalverarbeitung im Server bringt aber eine deutliche Zeitverzögerung mit sich, was für das immersive Kamerasystem nicht akzeptabel ist. Daher kommen nur analoge Kameramodelle ohne integrierten Server in Frage. Sie benötigen zur Steuerung einen Steuerrechner, der wiederum eine Ansprechverzögerung verursacht. Bei optimaler Gestaltung des Systems ist eine Minimierung auf akzeptable Werte möglich. Voraussetzung hierfür ist, dass sowohl die Kommunikation als auch die Signalverarbeitung verzögerungsfrei ablaufen. Die Kommunikationsschnittstelle zum Steuerrechner ist bei analogen PTZ-Kameras generell ein Problem, da jeder Hersteller ein eigenes Kommunikationsprotokoll verwendet, diese Protokolle untereinander nicht kompatibel sind und sie unterschiedliche Funktionen und Qualitäten aufweisen. VISCA hat sich zu einem industriellen Standard entwi-

ckelt und bietet die besten Eigenschaften (DOSTERT & ENDERLEIN 2002). Für das immersive Kamerasystem wurde eine Kamera der Firma SONY mit dem Kommunikationsprotokoll VISCA vorgesehen, da beide optimal aufeinander abgestimmt sind.

Spezialanfertigung

Der Aufwand und die Kosten für die Entwicklung einer Spezialanfertigung sind nur gerechtfertigt, wenn die am Markt verfügbaren Produkte nicht die erforderlichen Qualitäten aufweisen oder bei entscheidenden Aspekten eine deutliche Verbesserung erzielt werden kann. Die Leistungsdaten der PTZ-Kameras überzeugen bei der überwiegenden Anzahl der Produkte. Probleme treten nur bei der Bewegung der Kamera auf. Daher ist für eine Spezialanfertigung eine kommerzielle Kamera mit motorisiertem Vario-Fokusobjektiv sowie Autofokus und automatischem Helligkeitsabgleich vorzusehen, die auf einer neu konzipierten Schwenk- und Neigevorrichtung befestigt wird. Ziele der Neuentwicklung sind eine hohe Bewegungsgeschwindigkeit, ein ausreichender Bewegungsbereich, eine minimierte Zeitverzögerung bei der Ansteuerung und ein geringes Volumen. Bei der Spezialanfertigung können die passenden Komponenten und Materialien gewählt werden, die für die anspruchsvollen Rahmenbedingungen wie Säuredämpfe und radioaktive Strahlung geeignet sind. Die wenigen verfügbaren kommerziellen Schwenk- und Neigevorrichtungen für Kameras können die Erwartungen nicht erfüllen.

5.2.2 Ausgabegeräte

5.2.2.1 Allgemeines

Zur Darstellung der von der Kamera aufgenommenen Bilder stehen im Wesentlichen drei Visualisierungsmöglichkeiten zur Verfügung: Bildschirm, Head Mounted Display und Projektion eines Beamers. Bereits im Vorfeld der Versuche konnte durch einen fundierten Vergleich das am besten geeignete Gerät ausgewählt werden, da die Qualitäten der Lösungsmöglichkeiten beim betrachteten Anwendungsszenario der Heißen Zelle unterschiedlich zur Geltung kommen, wie im Folgenden aufgezeigt wird. Das Entscheidungskriterium ist der Erfüllungsgrad der Anforderungen. Im Vordergrund stehen ein geringer Platzbedarf, eine qualitativ hochwertige Wiedergabe des Kamerabildes und der Grad der Immersion.

5.2.2.2 Geringer Platzbedarf

Die ideale Lösung benötigt keinen zusätzlichen Platz zwischen dem Benutzer und der Wand der Heißen Zelle, damit die durch die Eliminierung des Bleiglasfensters gewonnene Reichweitenvergrößerung nicht wieder verloren geht. Sowohl die Videobrille als auch der Beamer erfüllen diese Anforderung. Das Beamer-Bild kann direkt auf die Außenwand der Heißen Zelle projiziert werden, so dass zwischen dem Produktionsmitarbeiter und der Wand kein Platz für das Gerät erforderlich ist. Allerdings stellt die Anbringung des Beamers eine Herausforderung dar, da die Möglichkeit der Verdeckung des Lichtstrahls durch den Produktionsmitarbeiter besteht. Eine zu starke Abweichung von der Idealposition des Beamers auf der Höhe der Augen der Produktionsmitarbeiter an der Heißen Zelle führt zu einem verzerrten Bild. Außerdem muss der Anwender einen gewissen Abstand zur Projektionsfläche einhalten, damit er nicht nur einzelne Bildpunkte sieht. Für das Head Mounted Display muss ebenfalls kein zusätzlicher Raum vorgesehen werden. Die meisten Modelle, besonders einfache Ausführungen wie die Videobrillen, sind so flach, dass sie kaum über die Nasenspitze hinausragen. Bei der Verwendung von Bildschirmen stellt der erforderliche zusätzliche Platzbedarf hingegen ein Problem dar, da selbst sehr flach bauende Geräte einige Zentimeter dick sind. Außerdem ist ähnlich wie beim Beamer aufgrund des Nahpunktes der Augen ein Abstand von ca. 100 bis 150 mm notwendig, um das Bild im Bildschirm erkennen zu können. Ältere Menschen benötigen noch mehr Distanz, um scharf sehen zu können (NAHPUNKT 2009). Aus ergonomischen Gesichtspunkten sollte das Videobild direkt vor dem Produktionsmitarbeiter zu sehen sein (siehe Abbildung 19).

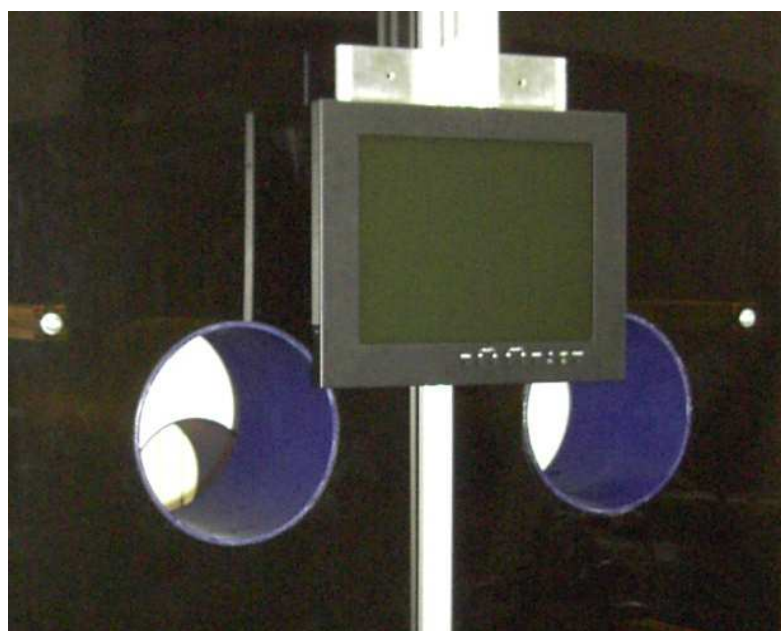


Abbildung 19: Realisierungsansatz für einen Flachbildschirm als Ausgabemedium

Alternative Anbringungspositionen wie seitlich oder über dem Benutzer sind möglich, führen allerdings zu unangenehmen Zwangshaltungen mit einer extremen Verdrehung der Kopfes um 90° und mehr, die bei einer längeren Arbeitsdauer nicht zumutbar sind.

5.2.2.3 Qualitativ hochwertige Wiedergabe

Bei allen drei Optionen hängen Bildqualität, Auflösung und Bildfläche von der Art und dem Preisniveau des gewählten Gerätes ab. Durchschnittliche Produkte bieten in der Regel ausreichende Leistungswerte. Aufgrund der begrenzten Reichweite der Hände halten sich die Produktionsmitarbeiter oft sehr nahe an der Wand der Heißen Zelle auf, beispielsweise, um weit entfernte Bereiche in der Zelle zu erreichen. In diesem Fall ergibt sich sowohl beim Bildschirm als auch bei der Beamer-Projektion eine Akkomodationsproblematik, da der Abstand der Augen zum Bild zu gering ist. Sehen auf kurze Distanz strengt die Augen an und führt zu Ermüdung. Bei diesen Rahmenbedingungen kommt eine wesentliche Eigenschaft von Head Mounted Displays zur Geltung. Die Optik ist so eingestellt, dass das Auge des Benutzers die beiden in der Brille verbauten Displays auch über einen längeren Zeitraum entspannt betrachten kann. Außerdem ist das Bild in jeder Position des Kopfes optimal zu sehen.

5.2.2.4 Immersive Gestaltung

Ein wesentlicher Aspekt immersiver Gestaltung ist die Erwartungskonformität (DIN EN ISO 9241-110 2006): Bediener fühlen sich am wohlsten mit Geräten und Umgebungen, die ihrem gewohnten Umfeld entsprechen. Bei einer statischen Kamera im Inneren der Heißen Zelle wären Beamer-Projektion und Bildschirm ideal, da sie im Wesentlichen dem Bleiglasfenster entsprechen, das den Produktionsmitarbeitern hinlänglich bekannt ist. Da aber beim betrachteten Anwendungsfall eine bewegte Kamera zum Einsatz kommt, entsteht bei beiden Geräten der verwirrende Eindruck, dass sich das Innere der Heißen Zelle bewegt. Die Benutzer müssen umdenken, was der Intuitivität widerspricht. Die Videobrille hingegen ist von solchen statischen und räumlichen Fixierungen entkoppelt. Bei der Wahl einer Kopfsteuerung bietet sich mit der Videobrille die ideale Konstellation, da sich das Bild entsprechend der Kopfbewegung verändert. Ein weiterer Vorteil eines Head Mounted Displays ist die Möglichkeit, die Benutzer mit Blenden von optischen Reizen der Umgebung abzuschotten, so dass sie sich auf das Bild der Kamera und ihre Arbeit konzentrieren können.

5.2.2.5 Head Mounted Display

Aufgrund der oben dargestellten Überlegungen wird für das immersive Kamerasystem ein Head Mounted Display favorisiert. Für diese Lösung sprechen zahlreiche Qualitäten, wie eine potentiell exzellente Immersion und die optimale Akkomodation, die besonders beim betrachteten speziellen Anwendungsfall deutliche Vorteile erwarten lassen.

Head Mounted Displays können in zwei Kategorien eingeteilt werden, die sich deutlich voneinander unterscheiden: Auf der einen Seite stehen Geräte, die vorwiegend bei professionellen Tätigkeiten in Anwendungsbereichen wie Medizin, Militär und Forschung eingesetzt werden. Sie zeichnen sich durch eine aufwändige Gestaltung und ausgezeichnete Leistungsdaten wie hohe Auflösung, große Bildfläche und hervorragende Bildqualität aus. Dies führt allerdings oft zu einer hohen Masse, einer voluminösen Form und steifen Kabeln, so dass die Geräte unangenehm zu tragen und besonders für eine dauerhafte Verwendung nicht geeignet sind. Außerdem haben sie meist einen sehr hohen Preis und stehen daher nur einer bestimmten Personengruppe zur Verfügung. Besonders im Forschungsbereich handelt es sich oft um Spezialanfertigungen oder Prototypen, die nicht vertrieben werden.

Auf der anderen Seite stehen relativ einfach gestaltete kommerzielle Consumer-Produkte, die zu erschwinglichen Preisen angeboten werden. Sie sind vorwiegend für Unterhaltungszwecke konzipiert, beispielsweise zur Betrachtung von Filmen in störenden Umgebungen oder beim Zahnarzt, um den Patienten von einer unangenehmen und evtl. schmerzhaften Behandlung abzulenken, und werden daher als Videobrillen bezeichnet. BUTZ (2006) gibt einen Überblick über Head Mounted Displays. Durch die folgenden Versuche (Abschnitt 5.4) können die offenen Fragen beim Head Mounted Display, beispielsweise bezüglich der Qualität der Darstellung oder der Akzeptanz seitens der Benutzer, beantwortet und die erwarteten Vorzüge verifiziert werden.

5.3 Steuerung des Kamerasystems

5.3.1 Allgemeines

Viele Vorteile des Kamerasystems ergeben sich durch die Möglichkeit, die Kamera zu schwenken und zu neigen sowie durch die Zoom-Funktion. Eine intuitive Bedienung dieser Bewegungsmöglichkeiten ist entscheidend für die Verbesserung der Rahmenbedingungen bei der Arbeit in der Heißen Zelle und die Akzeptanz seitens

der Benutzer. Normalerweise werden für Steuerungsaufgaben, wie auch für andere Tätigkeiten, die Hände verwendet. Nachdem bei der Produktion von Radioisotopen die Hände mit den Tätigkeiten an der Anlage beschäftigt und daher in der Heißen Zelle gebunden sind, ist für diesen Fall die Wahl anderer Steuermöglichkeiten erforderlich.

5.3.2 Steuerprinzipien

5.3.2.1 Allgemeines

Es stehen mehrere Möglichkeiten zur Steuerung von technischen Geräten zur Verfügung. Prinzipiell ist zwischen Sprachsteuerung und Bewegungssteuerung zu unterscheiden.

5.3.2.2 Sprachsteuerung

Bei der Sprachsteuerung gibt der Anwender akustische Anweisungen, die von einem Computer über ein Mikrofon aufgenommen und in Steuersignale für das jeweilige Gerät umgewandelt werden. Diese Form der Steuerung wird vorwiegend bei komplexen aber konkreten Informationen verwendet, beispielsweise bei der freihändigen Bedienung eines Telefons oder des Navigationssystems im Auto. Es werden unter anderem Daten wie Zahlen oder Straßennamen eingegeben. Die Verwendung von Sprache für die Steuerung von Bewegungen bildet hingegen eine Ausnahme, da in diesem Fall Eingaben erforderlich sind, die schwierig in Sprache auszudrücken sind. Der Mensch ist nicht in der Lage, konkrete Zieldaten, wie Koordinaten oder Winkel, ohne Hilfsmittel anzugeben. Diese Problematik wird teilweise dadurch gelöst, dass die Bewegung mit einer geringen Geschwindigkeit gestartet und beim Erreichen des Ziels gestoppt wird. Dies führt aber zu einer langsamen und schwerfälligen Bedienung, die für die Heiße Zelle stark nachteilig wäre. Beim Kamerasystem für die Heiße Zelle müssten außerdem Befehle für drei Freiheitsgrade, die Dreh- und Schwenkbewegung sowie die Zoomfunktion, gegeben werden, was die Komplexität der Steueraufgabe durch die Sprache erhöht. Eine Steuerung durch Spracheingabe ist technisch realisierbar, für den konkreten Anwendungsfall aber nachteilig und mit Problemen verbunden. Diese Lösung ist vor allem nicht intuitiv. Die Anwender müssen die Befehle erlernen und vor allem zuerst das aussprechen, was im Unterbewusstsein abläuft und normalerweise nicht bewusst wahrgenommen wird. Außerdem kann es zu Beeinträchtigungen kommen,

wenn mehrere Produktionsmitarbeiter gleichzeitig an den in der Regel räumlich eng beisammen stehenden Heißen Zellen arbeiten.

5.3.2.3 Bewegungssteuerung

Bei der Bewegungssteuerung wird die Bewegung eines Körperteils des Benutzers erfasst und in Steuersignale umgewandelt. Dieser Ansatz ist allgemein das derzeit vorherrschende Steuerungsprinzip. Es hat sich vielfach bewährt. In der Regel wird die Hand als Steuerelement verwendet. Dies liegt zum einen an den hervorragenden Eigenschaften bezüglich Freiheitsgraden, Sensorik und Feinmotorik. Zum anderen verwendet der Mensch seine Hand standardmäßig für die überwiegende Mehrheit seiner Aktionen, so dass umfangreiche Erfahrung vorliegt und die Bewegungen bereits geübt sind. Für kommerzielle Kamerasysteme, beispielsweise für Überwachungsaufgaben, werden daher fast ausschließlich Eingabegeräte für die Hand angeboten. Meist kommen Joysticks zum Einsatz, teilweise auch Einheiten mit Schaltknöpfen (IST 2008, LEXOR GMBH 2005). Auch für andere Steueraufgaben, beispielsweise bei ferngesteuerten Fahrzeugen, bei Computerspielen und auch bei Robotern, dominieren Joysticks als Steuergeräte. Für die Steuerung des Kamerasystems ist die Bewegungssteuerung am besten geeignet. Allerdings stehen in diesem Fall die Hände nicht zur Verfügung.

5.3.3 Alternativen für die Hand als Steuerelement

Theoretisch kommen als Ersatz für die Hände und Arme alle Körperpartien und Gliedmaßen in Frage, mit denen bewusste und koordinierte Bewegungen mit ausreichender Auslenkung möglich sind. Nach Betrachtung der Freiheitsgrade wurden als mögliche Alternativen für die Hand der Kopf, der Fuß, das Knie und der Bauch identifiziert. Die besten Resultate verspricht die Kopfsteuerung, da mit dieser durch die Anlehnung an natürliches Verhalten die Möglichkeit einer intuitiven Gestaltung gegeben ist. Die Steuerung müsste so realisiert werden, dass die Produktionsmitarbeiter gemäß ihrer gewohnten Kopfbewegung bei der visuellen Erfassung von Räumen die Kamera steuern. Die Augen werden für die Steuerungsaufgabe ausgeschlossen, da eine freie Bewegung notwendig ist, um das Bild der Kamera auf dem Bildschirm oder dem HMD betrachten zu können. Es wäre hinderlich, wenn jede Veränderung der Augenposition eine neue Kamerastellung zur Folge hätte. Außerdem bewegen sich die Augen nur in begrenztem Umfang und in relativ kleinen Winkeln. Bei größeren Auslenkungen dreht sich der Kopf. Eine Erfassung der Augenbewegung ist technisch möglich, allerdings ist das erforderliche Gerät kost-

spiegelig, voluminös und schwer und daher unangenehm auf dem Kopf zu tragen (E-TEACHING 2009).

Lösungen aus dem Bereich der Computerspiele können als Vorbild für alternative Steuerungsansätze dienen. Hier ist die Steuerung ebenfalls sehr wichtig und sie wird intensiv genutzt. Bisher kamen fast ausschließlich Joysticks, Kreuzwippen und Taster zum Einsatz, bei denen sich der Benutzer erst an die Form der Steuerung gewöhnen und sich die Bedeutung der Druckschalter bzw. die Funktionsbelegung einprägen muss. In letzter Zeit ist ein Wandel von intuitiv gestalteten zu wirklich intuitiven Geräten zu beobachten. Ein Beispiel hierfür ist Nintendo Wii, das mit dreiachsigen Bewegungssensoren physikalische Bewegungen der Benutzer erfasst und in Steuersignale umwandelt (NINTENDO 2009). Das Gerät kann auf Anhieb bedient werden und bietet erweiterte Steuermöglichkeiten für Bewegungen (SOHN 2006).

Darüber hinaus ist bei Computerspielen eine generelle Tendenz hin zur Kopfsteuerung zu beobachten. Geräte wie TrackIR werden für die Steuerung der Blickrichtung verwendet, damit die Hände frei für andere Aktionen sind (NATURALPOINT 2009). Bei Computerspielen wird allerdings keine Kamera gesteuert und es existiert kein System, das direkt für die Heiße Zelle verwendet werden könnte. Aus den entwickelten Produkten und der Resonanz der Anwender lassen sich aber nützliche Erkenntnisse für das Kamerasystem ableiten, auch wenn es sich nicht um professionelle Geräte, sondern lediglich um Spielgeräte handelt. Außerdem werden im Computerbereich oftmals neue und teilweise revolutionäre Konzepte angedacht und in Produkten mit respektablen Eigenschaften realisiert, die für die Weiterentwicklung in anderen Bereichen maßgeblich waren.

5.3.4 Konzepte der Bewegungserfassung

5.3.4.1 Berührungslose oder kontaktgebundene Bewegungserfassung

Die Erfassung der Steuerungsbewegungen der Produktionsmitarbeiter kann kontaktgebunden oder berührungslos erfolgen. Für die kontaktgebundene Bewegungsdetektion werden mechanische Sensoren, oft in Verbindung mit einem Hebel wie bei einem Joystick, verwendet. Damit können sowohl der Kopf, der Fuß, der Bauch als auch das Knie abgetastet werden. Die berührungslosen Verfahren kommen prinzipiell ebenfalls für alle Körperteile in Frage, sind in der Regel aber auf den Kopf fixiert. Dies ist naheliegend, da mit dem Kopf die Steuerungsbewegungen im Unterbewusstsein ablaufen, während sie mit anderen Körperpartien gelernt werden

müssen. Berührungslose Steuerungsverfahren versprechen eine hohe Immersion und sind angenehm zu bedienen, da die Bewegung des Kopfes erfasst wird, ohne dass ein Eingabeelement erforderlich ist. Allerdings werden in der Regel kleine Geräte oder Detektionselemente wie Marker benötigt, die am Kopf angebracht werden.

Der Head-Tracking-Ansatz für das immersive Kamerasystem wird mit einem gyroskopischen Sensor realisiert. Damit können rotatorische Veränderungen, aber keine absoluten Positionen oder translatorische Abweichungen erfasst werden. Diese Einschränkung ist für den betrachteten Anwendungsfall aber unerheblich, da ohnehin nur der Drehwinkel des Kopfes von Interesse ist.

5.3.4.2 Analoge und digitale Steuerung

Die beiden Ansätze der Bewegungserfassung unterscheiden sich auch bezüglich der Steuerungskonzepte. Head Tracking und die meisten anderen berührungslosen Detektionsverfahren sind analog bzw. kontinuierlich. Das bedeutet, dass das zu steuernde Gerät eine Position entsprechend der Auslenkung des Steuerelementes anfährt. Im Gegensatz dazu sind bei kontaktanalogen Eingabegeräten neben kontinuierlichen Ausführungen auch digitale verfügbar. Digital heißt in diesem Zusammenhang, dass es nur diskrete Endpositionen gibt und keine Zwischenstellungen erfasst werden. Einfache Joysticks sind beispielsweise nur mit Endschaltern versehen. Deshalb geben sie ausschließlich bei maximaler Auslenkung ein Signal, mit dem beispielsweise die Bewegungsrichtung der Kamera bestimmt wird. Alle anderen Größen, wie die Bewegungsgeschwindigkeit, sind fest eingestellt und mit dem Eingabegerät nicht veränderbar. Hierfür wird eine weitere Eingabemöglichkeit benötigt. Die Verwendung mechanischer Endschalter ermöglicht die Realisierung einer kostengünstigen und robusten Lösung, die zuverlässige Signale liefert. Allerdings können solche Sensoren nur Endlagen detektieren und unterstützen keine graduelle Bewegungsabtastung, wodurch prinzipiell die Möglichkeiten erheblich eingeschränkt werden. Für den speziellen Anwendungsfall reichen die Möglichkeiten aber vollkommen aus. Die Einschränkungen tragen sogar dazu bei, den Anwender nicht zu überfordern.

Mit kontinuierlichen bzw. analogen Joysticks kann auch die Geschwindigkeit gesteuert werden, indem der Hebel unterschiedlich weit ausgelenkt wird. Die Geschwindigkeit ist proportional zur Auslenkung und wird so lange aufrechterhalten, wie diese beibehalten wird. Wenn der Joystick in die Ursprungsposition zurückgebracht wird, stoppt die Bewegung. In der Regel sind solche Systeme selbstzentrie-

rend, damit die Nullstellung schneller und einfacher gefunden werden kann. Auch bei Joysticks lässt sich wie bei berührungslosen Eingabegeräten eine Positionssteuerung realisieren. Dabei entspricht die Position der Joysticks der Position des Geräts. Dadurch ist die Stellung des zu steuernden Objektes immer bekannt. Die Geschwindigkeit der Bewegung bestimmt der Bediener durch die Geschwindigkeit der Bewegung des Joysticks.

5.3.4.3 Überlegungen zu den Steuerungsprinzipien

Aus Sicht der Steuerungstechnik besteht ein gravierender Unterschied zwischen dem Head Tracking und allen joystickbasierten Eingabegeräten: Beim Head Tracking ist die Bedienung sehr intuitiv, weil der Kopf so bewegt wird, wie es der Mensch vom Alltag gewohnt ist. Vor allem in Randbereichen der Kamera fällt auf, dass die Bewegungssteuerung einfach ist. Ein weiterer Vorteil des Head Tracking ist, dass der Bediener bei idealer Einstellung des Systems immer weiß, wo die Kamera steht, denn der Schwenkwinkel der Kamera entspricht dem Kopfdrehwinkel. Dadurch fällt es leicht, sich in der Heißen Zelle zu orientieren.

Bei Joysticks muss von einer reaktiven Bedienung gesprochen werden. Meist wird zunächst das Ergebnis einer ersten Steueraktion abgewartet. Wenn sich nicht die gewünschte Bewegung der Kamera einstellt, wird darauf reagiert und die gegensätzliche Aktion gewählt. Mit dem Joystick ist demnach eine intuitive Steuerung nicht möglich. Das System kann aber ergonomisch kompatibel gestaltet werden, so dass eine „quasi-intuitive“, ebenfalls leicht zu steuernde und einleuchtende Bedienung möglich ist. Der Begriff *Kompatibilität* stammt aus der Ergonomie und bezeichnet den Umkodierungsaufwand, den der Mensch zwischen verschiedenen Informationen aufwenden muss. Für eine innere Kompatibilität ist eine Sinnfälligkeit zwischen der Peripherie und den inneren Modellen des Menschen, z. B. Stereotypen, erforderlich (SPANNER 1993). Das heißt, übertragen auf die Kamerasteuerung mit einem Joystick, dass die Betätigung des Joysticks zu einer erwarteten Bewegung der Kamera führt.

5.3.5 Steuerung der Kamera-Zoomfunktion

5.3.5.1 Unabhängige Zoom-Steuerung

Neben der Kamerabewegung muss auch die Zoom-Funktion gesteuert werden. Ein gemeinsames Gerät für beide Steuerungsaufgaben stellt hohe Anforderungen an die technische Realisierung und die Anwender, da die zwei Freiheitsgrade für die

Kamerabewegung mit einem weiteren Freiheitsgrad für die Zoom-Steuerung gekoppelt werden müssen. Das bedeutet, dass die Benutzer mit einem Steuerelement bewusste Steuerungsbewegungen in sechs Richtungen vollführen müssen und das Gerät diese detektieren soll. Eine sinnvolle Realisierung ist nur mit Head-Tracking-Verfahren möglich, die neben den rotatorischen Bewegungen des Kopfes auch translatorische Veränderungen erfassen. Damit können die natürlichen Drehbewegungen des Kopfes um die Längs- und eine Horizontalachse zur Steuerung der Kamerabewegung erfasst und für die Zoom-Einstellung eine Bewegung nach vorne und hinten detektiert werden. Dies entspricht einem natürlichen Verhaltensmuster des Menschen, der sich dem Objekt, das er genauer betrachten will, nähert. Der wesentliche Nachteil bei einer kombinierten Lösung ist jedoch, dass jede Bewegung des Kopfes eine Veränderung der Kameraeinstellungen zur Folge hat. Dies kann sehr unangenehm sein und ist besonders für die Arbeit an der Heißen Zelle nicht akzeptabel, da sich die Produktionsmitarbeiter relativ viel bewegen müssen, beispielsweise um tiefer hinein greifen zu können. Eine getrennte Steuerung von Kamerabewegung und Zoom erscheint daher für den speziellen Anwendungsfall sinnvoller. Diese Lösung hat außerdem den Vorteil, dass Kamera- und Zoomsteuerung unabhängig voneinander betrachtet und beliebig miteinander kombiniert werden können.

5.3.5.2 Intuitive Zoom-Steuerung

Auch die Steuerung der Zoom-Funktion soll intuitiv gestaltet werden. Im Gegensatz zur Steuerung der Kamerabewegung ist es allerdings nicht möglich, sich an eine natürliche Bewegung anzulehnen, da der Mensch keine angeborene Möglichkeit besitzt, Dinge optisch zu vergrößern. Die meisten Personen sind mit der Zoomfunktion aber über verschiedene technische Geräte und Hilfsmittel vertraut. Ziel ist daher, sich an der Zoomsteuerung dieser Geräte zu orientieren. Wenn das Bedienkonzept von anderen Anwendungen bekannt ist, kommen die Produktionsmitarbeiter besser mit der Zoomsteuerung für das Kamerasystem zurecht. Meist ist der Aspekt des Zoomens vor allem von der Foto- bzw. Videokamera bekannt. Die Mehrzahl dieser Geräte verfügt entweder über zwei einzelne Taster bzw. eine Wippe oder einen drehbaren Ring um den Auslöseknopf, mit denen das Objektiv auf Weitwinkel oder Tele-Betrachtung eingestellt wird.

5.3.5.3 Digitale Zoom-Steuerung

Für die Zoom-Funktion kommt ausschließlich eine digitale Steuerung in Frage. Eine proportionale Steuerung, bei der die Zoomgeschwindigkeit mit der Auslenkung des

Eingabegerätes gesteuert wird, überfordert die Produktionsmitarbeiter. Außerdem steht nur noch der Fuß zur Verfügung, der sich lediglich für grobmotorische Steuerungen eignet, jedoch nicht für eine filigrane Proportionalsteuerung. Die verschiedenen Realisierungsansätze werden im folgenden Abschnitt erläutert.

5.4 Umsetzung und Validierung

5.4.1 Allgemeines

Das Konzept eines immersiven Kamerasystems für die Arbeit in einer Heißen Zelle wurde in mehreren Varianten in Form von Prototypen exemplarisch realisiert, um in Versuchen mit Personen das Verhalten der Benutzer zu studieren, entscheidende Parameter und Einstellungen zu ermitteln, elementare Aussagen nachzuweisen und die beste Lösung zu identifizieren. Da eine große Anzahl an Fragen zu klären und Annahmen zu prüfen waren, wurde bei den Versuchen eine Stufenstrategie gewählt, bei der auf den Ergebnissen der jeweils vorhergehenden Versuche aufgebaut und die Fokussierung verstärkt wurde. Es wurden eine Vorauswahl und zwei Testreihen durchgeführt, die im Folgenden vorgestellt werden.

5.4.2 Vorauswahl

Die große Anzahl an Lösungsmöglichkeiten für die Kamerasteuerung machte eine sorgfältige Vorauswahl erforderlich, um den Aufwand für die Versuche auf ein sinnvolles Maß zu reduzieren, ohne viel versprechende Ansätze zu übersehen. Zu diesem Zweck wurden die nach Plausibilität ausgewählten Konzepte mit einfachen Mitteln so weit realisiert, dass ein ausreichend guter Eindruck für eine fundierte Beurteilung und die anschließende Entscheidungsfindung erreicht wurde. Dabei zeigte sich, dass mehrere Lösungsmöglichkeiten bereits vor den eigentlichen Versuchen für die weitere Betrachtung ausgeschlossen werden konnten, da eine Weiterführung mangels Erfolgsaussichten nicht sinnvoll gewesen wäre.

Einfache optische Tracking-Verfahren erscheinen beispielsweise besonders interessant, da durch die berührungslose Erfassung der Kopfbewegung mit geringem Aufwand und niedrigen Kosten eine intuitive Steuerung der Kamerabewegung erzielt werden kann. Das Tracking-System beschränkt sich bei diesem Ansatz auf eine einfache Kamera, die vor den Produktionsmitarbeitern angebracht wird, sowie eine Bilderkennungsoftware, die den Kopf identifiziert, die Bewegungen verfolgt und diese in Steuerungssignale umwandelt. Dieses Konzept wird beispielsweise zur

Steuerung einer Computermouse ohne Gebrauch der Hände verwendet. In der angenehmen Ausführung muss der Anwender keine Marker oder andere Geräte tragen, da der Kopf anhand markanter Bereiche des Gesichts wie Augen, Nase und Mund erkannt wird. Für die Vorversuche wurde exemplarisch das Programm „IBM alpha Works Head Tracking Pointer“ getestet (KJELDSSEN 2009). Es zeigte sich, dass dieser Ansatz allerdings nicht für den Einsatz in der Heißen Zelle geeignet ist. Er scheitert hier am sehr geringen Abstand der Versuchsperson zur Wand der Heißen Zelle. Dadurch kann die Kamera, die an der Wand vor dem Anwender angebracht werden muss, den Kopf bzw. das Gesicht nicht ausreichend gut erfassen. Es kommt noch erschwerend hinzu, dass der Anwender eine Videobrille trägt, wodurch die Augen abgedeckt werden, welche als eines der wesentlichen Orientierungsmerkmale der Bilderkennung dienen.

Auch der Einsatz von Hilfsmitteln wie Papier-Markern, reflektierenden Elementen oder einer LED als aktivem Marker und die Verwendung der Trackingsoftware „FreeLook“ konnten zu keiner merklichen Verbesserung beitragen (FREELOOK 2009). Die Vorversuche zeigten, dass die einfachen optischen Trackingsysteme zu anfällig und zu unzuverlässig sind. Bereits ungünstige Lichtverhältnisse, Schatten oder andere Lichtquellen führten zu falschen oder uneindeutigen Ergebnissen, die in einer undefinierten Kameraposition resultierten. Teilweise wurden bestimmte Gegenstände im Hintergrund fälschlicherweise als Marker identifiziert. Dies ist beim Umgang mit gefährlichem radioaktivem Material nicht vertretbar. Außerdem bleiben ausreichend viele Lösungsmöglichkeiten, mit denen eine sehr gute Kamerasteuerung erwartet wird.

Bei den berührungsgebundenen Steuerungskonzepten konnten nach den Vorversuchen zwei Lösungsmöglichkeiten ausgeschlossen werden: Die Joysticks für den Bauch und das Knie brachten ungenügende Ergebnisse, da die Bewegungsfreiheit dieser Körperregionen für die Steuerung der Kamerabewegung zu gering ist. Eine horizontale Auslenkung des Joysticks stellte kein Problem dar. Zur vertikalen Auslenkung des Bauchjoysticks muss die Bedienperson in die Knie gehen bzw. sich auf die Zehenspitzen stellen, was als unangenehm empfunden wurde. Auch beim Kniejoystick gestaltet sich diese Bewegung schwierig. Außerdem ist kein Bezug zwischen der Bewegung dieser Körperregionen und einer feinmotorischen Steuerungsaufgabe vorhanden, was der angestrebten Intuitivität widerspricht. Darüber hinaus ist die Schnittstelle zwischen dem Eingabegerät und dem Knie bzw. dem Bauch ungünstig.

5.4.3 Erste Versuchsreihe

5.4.3.1 Versuchsaufbau

Realistische Arbeitsumgebung

Für die Durchführung von Versuchen mit Prototypen des Kamerasystems wurde mit einem in den wesentlichen Elementen detailgetreuen Nachbau einer Heißen Zelle eine realistische Arbeitsumgebung geschaffen. Die Vorderseite des Modells war für die Versuche mit den verschiedenen Kamerasystemen vorgesehen (siehe Abbildung 20).



Abbildung 20: Vorder- und Rückseite des Modells einer Heißen Zelle mit Imitat des Bleiglasfensters auf der einen und Versuchsfeld auf der anderen Seite

Sie verfügt lediglich über eine Schiene zur Befestigung der Eingabegeräte. Die Eingriffsöffnungen befinden sich auf dieser Seite mangels Hindernissen in optimaler Position, die zusammen mit involvierten Radiochemikern ermittelt wurde. Bezüglich der Position musste ein Kompromiss gefunden werden zwischen der erforderlichen Erreichbarkeit von Gegenständen oder einer Anlage in der Heißen

Zelle einerseits und der Zugänglichkeit der Öffnungen von außen andererseits, die von der Körpergröße der Produktionsmitarbeiter abhängt. Priorität hat die Reichweite der Arme, da die unterschiedliche Körpergröße des Personals durch Podeste oder andere Hilfsmittel ausgeglichen werden kann. Am Modell ist ein Flachbildschirm angebracht, mit dem zusätzliche Informationen angezeigt werden können (siehe Abbildung 20 und Abbildung 22).

Die Rückseite des Modells wurde wie eine realistische Heiße Zelle mit dickem Bleiglasfenster und den damit verbundenen, tiefer liegenden Eingriffsöffnungen gestaltet, damit dort die Versuchsaufgaben ebenfalls durchgeführt und die neuen Konzepte mit den ursprünglichen Bedingungen verglichen werden konnten (siehe Abbildung 20). Das Bleiglasfenster wurde in Form eines sich nach innen aufweitenden Schachtes mit Plexiglasabdeckung nachempfunden, um die Brechung anzudeuten (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22). Es ist auswechselbar gestaltet, so dass auch andere Dicken des Bleiglasses simuliert werden können.



Abbildung 21: Modell der Heißen Zelle. Der sich nach innen aufweitende Schacht mit Plexiglasabdeckung imitiert das dicke Bleiglasfenster mit Brechungseffekt

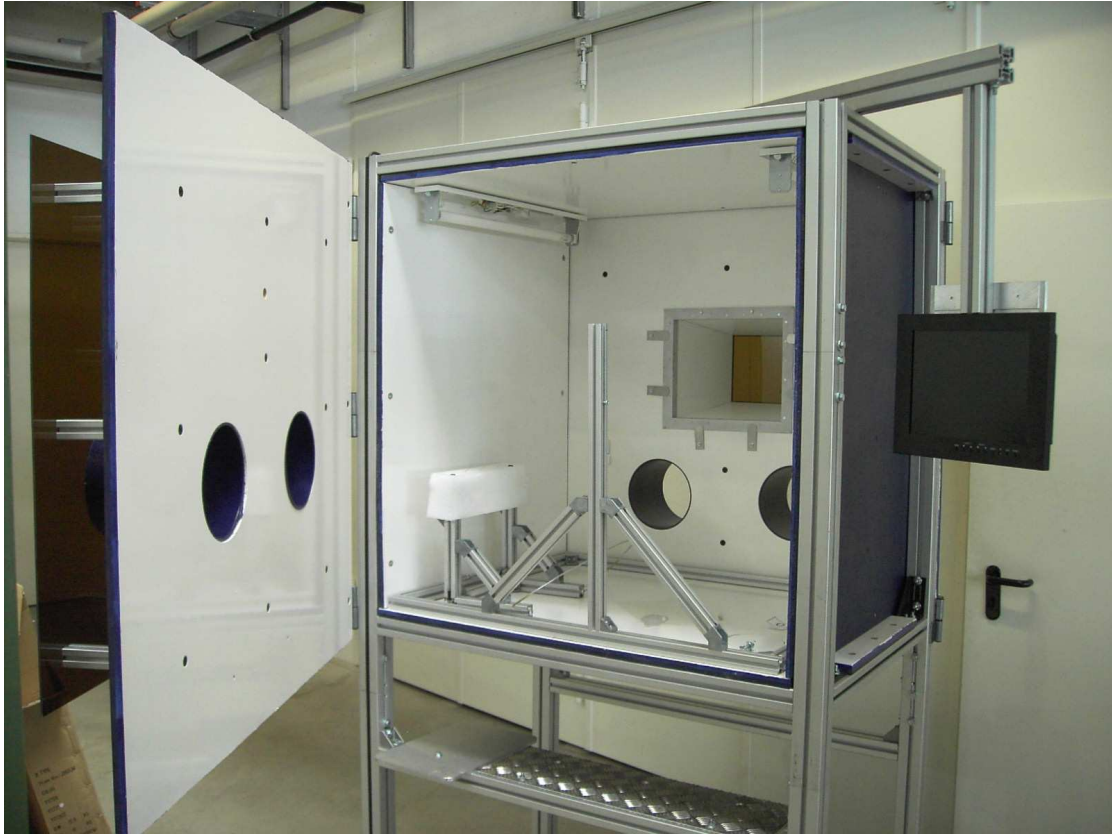


Abbildung 22: Hell gestalteter Innenraum des Modells einer Heißen Zelle mit einem Gestell in der Mitte für die Kameras

Kamera und Steuerung

Für die erste Versuchsreihe wurde die PTZ-Kamera vom Typ SONY EVI-D30 verwendet. Hierbei handelt es sich um einen weit verbreiteten Vertreter kompakter Überwachungskameras mit sehr guter Bildqualität, ausreichenden Dreh- und Schwenkmöglichkeiten und einer VISCA-Schnittstelle. Die Kamera wurde im Inneren des Modells der Heißen Zelle an einem Rahmen aus Aluminiumprofilen so angebracht, dass die Höhe und der Neigungswinkel an die Größe und die Wünsche der Versuchspersonen angepasst werden konnten. Als Steuerrechner kam ein Standard-PC zum Einsatz, der über ein VISCA-Adapterkabel am RS-232-Port die Steuersignale zur Kamera sendet. Kamera und Steuerrechner sind mit allen zu testenden Prototypen der Eingabegeräte kompatibel. Sie wurden an der USB-Schnittstelle am Steuerrechner angeschlossen. Zur Verarbeitung der Steuersignale wurde für die Versuche die „iwb VISCA Control Software“ entwickelt. Sie erfasst Bewegungen der angeschlossenen Eingabegeräte und wandelt sie in VISCA-Befehle zur Steuerung der Kamera und des Zooms um. Abbildung 23 zeigt den Aufbau der Steuerung des Kamerasystems mit den Schnittstellen zur Peripherie.

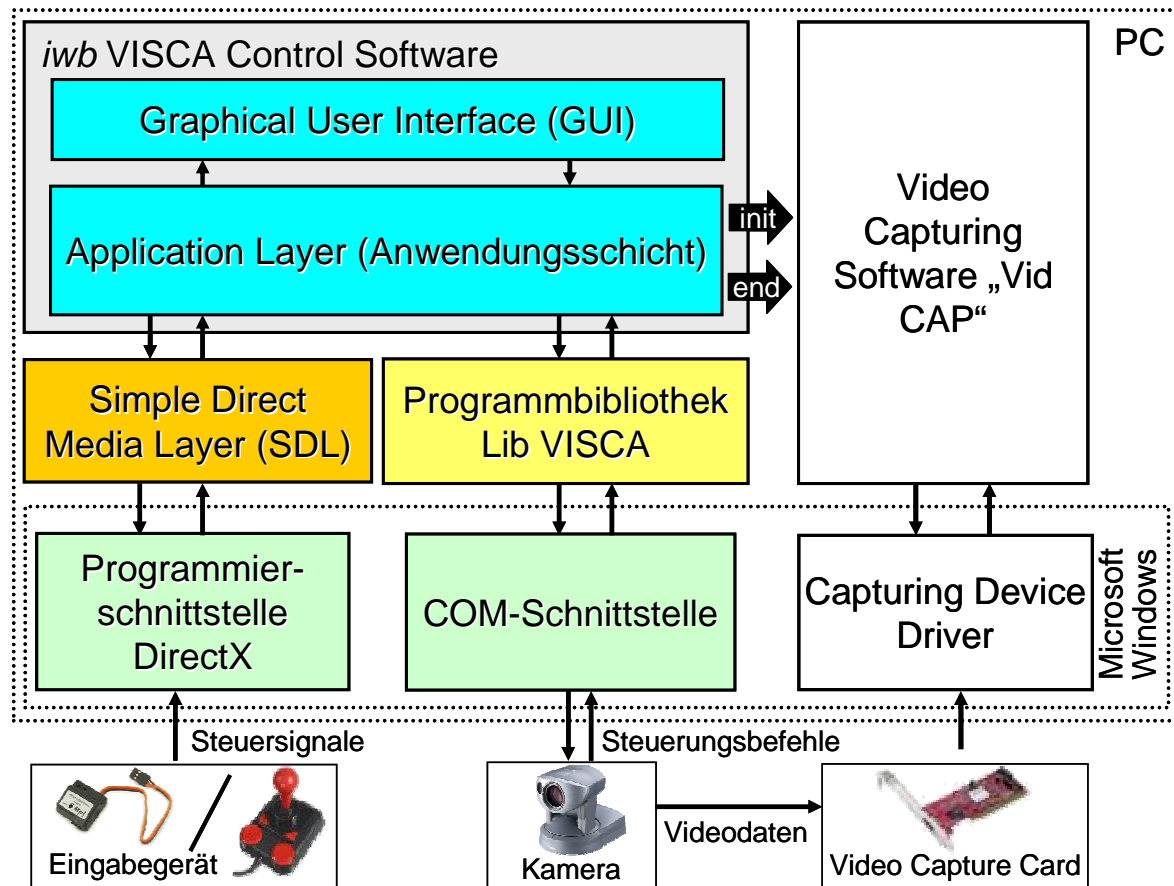


Abbildung 23: Schematischer Aufbau der Steuerung des Kamerasystems mit der iwB VISCA Control Software

Wesentliche Faktoren wie die Geschwindigkeit der Kamerabewegung können gemäß den Vorlieben der Benutzer eingestellt und die Bedienungsrichtung invertiert werden. Je näher herangezoomt wird, desto langsamer muss sich die Kamera bewegen, da sie sonst nicht ausreichend genau gesteuert werden kann. Das Steuerungsprogramm bietet hierfür eine von der Zoom-Funktion abhängende adaptive Sensitivität. Das bedeutet, die Geschwindigkeit der Kamerabewegung nimmt proportional zum Zoom ab. Das Verhältnis von Geschwindigkeitsreduzierung zum Zoom-Faktor, das so genannte Zoom-Speed-Ratio, wurde von den Versuchspersonen so eingestellt, dass sie am besten mit dem Kamerasystem arbeiten konnten. Je größer das Zoom-Speed-Ratio, desto stärker wird die Bewegungsgeschwindigkeit beim Zoom reduziert.

Videobrille als Ausgabegerät

Als Ausgabegerät für die Versuche wurde gemäß dem anvisierten kosteneffektiven Ansatz (Abschnitt 4.4.6) die kommerzielle Multimedia-Brille Olympus Eye-Trek FMD-700 ausgewählt, um ihre Eignung für das immersive Kamerasystem zu überprüfen. Sie verfügt über 2 LC-Displays mit jeweils 180.000 Pixeln und einem

Betrachtungswinkel von 30° horizontal und 23° vertikal, was einem 52“-Bildschirm mit einer Bildschirmdiagonale von 1,30 m in 2 m Abstand entspricht (OLYMPUS 2009). Das Gerät gehört zu den hochwertigsten Produkten der einfachen Kategorie. Die angestrebte breite Anwendung des Assistenzsystems hängt wesentlich mit vertretbaren Anschaffungskosten zusammen. Die hochwertigen Ausführungen stehen als Alternativlösung zur Verfügung, falls das Ergebnis nicht zufrieden stellend ist. In den nächsten Jahren ist zudem auch bei der einfachen Kategorie mit einer weiteren Verbesserung der Leistungsmerkmale zu rechnen. Dies belegen Neuentwicklungen wie die Videobrille „Informance“ der Firma Rodenstock oder die Videobrille der Firma Lumus mit Displays in VGA- und SVGA-Auflösung (RODENSTOCK 2009, LUMUS 2009).

Eingabegeräte für die Steuerung der Kamera

Nach der Vorauswahl beschränkten sich bei der ersten Versuchsreihe die zu testenden Eingabegeräte für die Kamerasteuerung auf einen Fußjoystick, einen Kopfjoystick und ein Head-Tracking-Gerät. Jede der ausgewählten Lösungen repräsentiert ein grundlegendes Steuerungskonzept, so dass die wesentlichen Fragen, ob berührungslos oder berührungsgebunden bzw. ob der Kopf oder der Fuß geeigneter sind, beantwortet werden können. Kopf- und Fußjoystick (siehe Abbildung 24 und Abbildung 25) der ersten Versuchsreihe basieren auf einem einfachen binären Spielejoystick, bei dem über einen knüppelartigen Hebel vier mechanische Endschalter aktiviert werden (siehe Abbildung 25 rechts). An diesem Stick sind Einfassungen aus Plexiglas für den Fuß bzw. den Kopf befestigt, die die Schnittstellen zum Anwender darstellen und Bewegungen der Stellglieder auf das Eingabegerät übertragen. Der Fuß steckt in einem Rahmen (siehe Abbildung 24), für den Kopf ist eine krallenförmige Einfassung vorgesehen (siehe Abbildung 25).

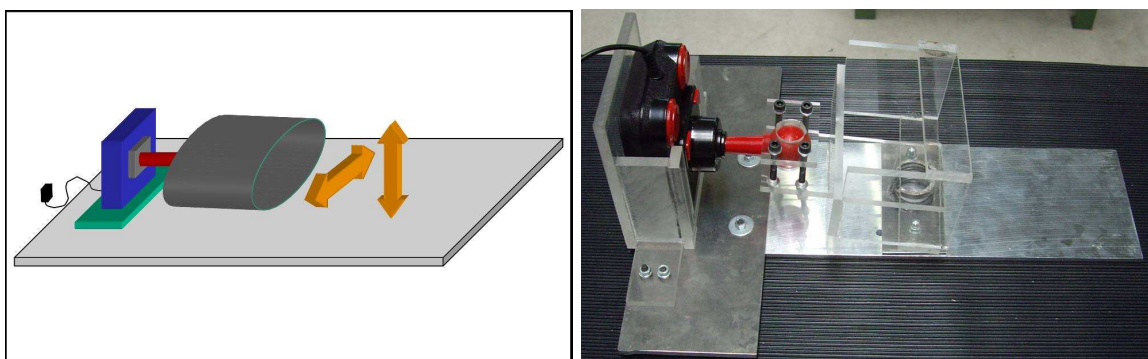


Abbildung 24: Fußjoystick mit Rahmen für den Fuß; links die Prinzipdarstellung, rechts ein Gerät für Versuche

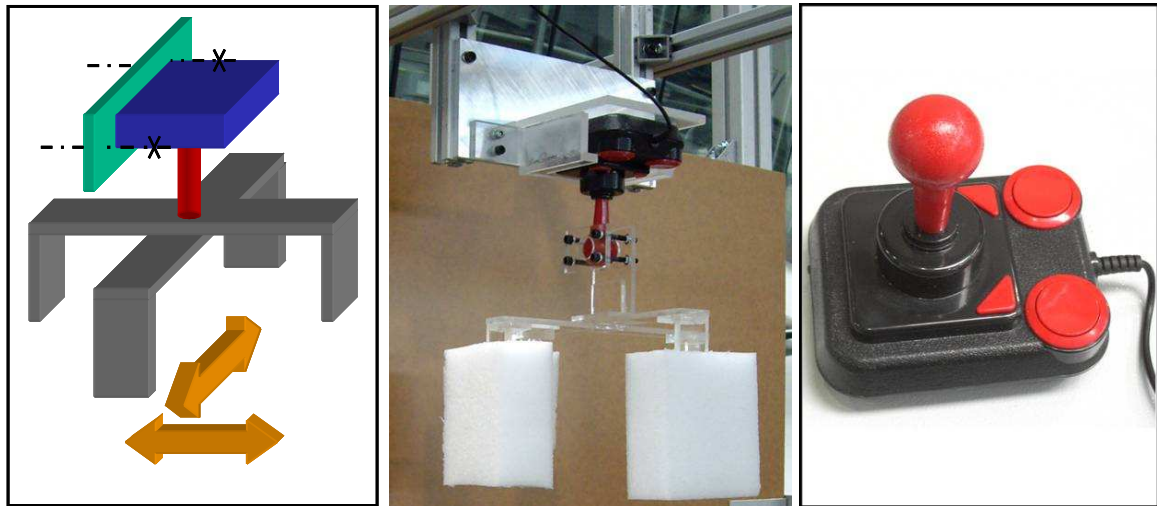


Abbildung 25: Kopfjoystick in Form einer krallenförmigen Einfassung. Links ist die Prinzipdarstellung zu sehen, in der Mitte ein Versuchsaufbau und rechts der einfache digitale Joystick als Basis

Das Konzept des Fußjoysticks sieht vor, dass der Benutzer seinen Fuß ständig im Gerät lässt, so dass er bei Steuerungsbedarf nicht lange suchen muss, was sich angesichts der Videobrille schwierig gestalten könnte. Damit der Anwender bei der Kamerabedienung mit beiden Beinen bequem stehen kann und nicht ständig seinen Fuß anheben muss, um nicht versehentlich die Kamera zu bewegen, ist die Halterung beim Fußjoystick mit einer starken Spiralfeder versehen. Diese baut eine Gegenkraft zur Gewichtskraft auf, unterstützt den Fuß von unten und hält ihn so in der neutralen Position. Das Eingabegerät kann auch mit der Feder problemlos bedient werden. Backen aus Schaumstoff dienen bei beiden Prototypen dazu, das Gerät an die Körpermaße der Versuchspersonen anzupassen. Der Kopfjoystick ist höhenverstellbar mit Aluminium-Profilen am Versuchsstand angeschraubt. Der Fußjoystick ist auf einer flachen Aluminiumplatte befestigt, die auf dem Boden liegt. Die Anwender konnten für die Versuchsdurchführung die Position am Boden frei wählen.

Der Head-Tracking-Ansatz wurde mit einer Art Stirnband für den Kopf der Versuchsperson realisiert, an dem ein gyroskopischer Sensor befestigt ist. Für die erste Versuchsreihe kam ein Sensor aus der kabellosen Präsentationsmaus Optical Air Mouse GO Plus der Firma Gyration (GYRATION 2009) zum Einsatz, der sich durch kompakte Abmessungen und ein sehr gutes Preis-Leistungs-Verhältnis auszeichnet. Von Vorteil ist bei diesem zudem, dass die Signale von den Kopfbewegungen per Funk an einen Adapter übertragen werden, der an einer USB-Schnittstelle am Steuerrechner angeschlossen ist. Mit dem gyroskopischen Sensor wird eine Maus-emulation realisiert, d. h. es werden die Steuerungssignale einer Computermouse

simuliert. Dadurch erhält der Steuerungsrechner gleich geartete Signale wie bei den auf Spielejoysticks basierenden mechanischen Eingabegeräten.

Zoomsteuerung

Die Steuerung des Zooms ist von der Bewegungssteuerung der Kamera getrennt. Im ersten Versuchsdurchgang standen hierfür der Fußjoystick, der Kopfjoystick und zwei einzelne Taster zur Verfügung, die am Boden von den Anwendern nach Belieben positioniert werden konnten. Die Taster sind am Spielejoystick angeschlossen und nutzen ebenfalls seine Steuerelektronik. Für die Steuerung des Kamerazooms mit dem Fußjoystick wurde lediglich einer der beiden möglichen Bewegungsfreiheitsgrade genutzt. Die Versuchspersonen konnten zwischen der seitlichen und der vertikalen Bewegung wählen. Die Eingabegeräte für die Steuerung der Kamerabewegung und die Zoomsteuerung sind modular gestaltet, wodurch eine beliebige Kombination ermöglicht wird.

5.4.3.2 Versuchspersonen

Ziel der Versuche waren realistische und allgemeingültige Aussagen über den Nutzen und die Anwendbarkeit des Kamerasystems in der realen Umgebung. Die ausgewählten Versuchspersonen sollten in den wesentlichen Merkmalen deutliche Übereinstimmung mit den zukünftigen Nutzern aufweisen. Allerdings kann der Personenkreis, der an der Heißen Zelle arbeiten wird, nicht genau abgegrenzt werden, da die Aufgaben, die an der Produktionsanlage in der Heißen Zelle anfallen, sehr vielfältig sind. Die Bandbreite kann daher von wissenschaftlichem Personal mit biologischem oder radiochemischem Hintergrund über technische Mitarbeiter für Wartung und Service bis hin zu angelernten Arbeitern für einfache Routinetätigkeiten reichen.

Bei den Versuchen stehen Personen im Vordergrund, die über geringe bis keine Vorkenntnisse und Erfahrungen hinsichtlich der Steuerung verfügen, da dies voraussichtlich bei der überwiegenden Anzahl der zukünftigen Nutzer des Kamerasystems der Fall sein wird. Die meisten Anwender wie Radiochemiker, Biologen oder Strahlenphysiker sind Experten in ihrem Fachbereich. Ausgeprägte praktische Erfahrung im Umgang mit technischen Geräten kann nicht erwartet werden. Außerdem ist damit zu rechnen, dass sie keine Zeit und kein Interesse haben, sich intensiv mit dieser neuen Technik zu beschäftigen. Daher ist die intuitive Gestaltung des Kamerasystems besonders wichtig. Bei Personen mit geringer technischer Kompetenz lässt sich außerdem am besten testen, ob das Kamerasystem dem Anspruch entsprechend leicht und schnell angewendet werden kann. Personen mit techni-

schem Hintergrund, handwerklichen Fähigkeiten oder Erfahrung mit praktischen Tätigkeiten sind für die Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Systems hilfreich, weil sie oft einen schnellen Zugang zu neuer Technik haben und sie sich nicht auf die Bedienung konzentrieren müssen. Sie interessieren sich in der Regel für die Möglichkeiten und die Potentiale der neuen Technik und stellen meist höhere Anforderungen. Von ihnen sind hilfreiche Hinweise auf Probleme und Defizite zu erwarten, die technisch unversierten Personen erst nach einer längeren Eingewöhnungsphase auffallen.

Für die Versuche wurden daher sowohl technisch erfahrene wie unerfahrene Personen ausgewählt. Darüber hinaus wurde auch auf eine ausgeglichene Verteilung bezüglich Alter geachtet, da besonders bei der Steuerung technischer Geräte junge Menschen oft Vorteile gegenüber Älteren haben. Neben einer möglichen Veränderung der Lernfähigkeit mit zunehmendem Alter steht vor allem die Erfahrung jüngerer Generationen mit der in letzter Zeit immer stärker in den Alltag drängenden Technik im Vordergrund. Außerdem beschäftigen sich vorwiegend junge Menschen mit Computerspielen, was bei der Steuerung des Kamerasystems Vorteile bringen kann. Neben den für die Versuche ausgewählten fachfremden Personen wurden gezielt auch spätere Anwender eingeladen, die fachkundige Auskunft geben können. Als Experten wurden Radiochemiker ausgewählt, die bereits umfangreiche Erfahrung mit der Arbeit in Heißen Zellen haben. Sie kennen den derzeitigen Stand der Technik mit seinen Nachteilen und Problemen und können ihn dadurch am besten mit dem neuen Ansatz vergleichen.

5.4.3.3 Aufgaben der Versuchspersonen

Die Aufgaben für die Versuchspersonen sollten die realen Arbeitsbedingungen möglichst wahrheitsgetreu simulieren, um für den konkreten Anwendungsfall brauchbare Aussagen zu liefern. Erschwerend ist, dass die Tätigkeiten, die bei der Produktion radioaktiver Stoffe in der Heißen Zelle anfallen, sehr unterschiedlich sind. Daher ist es nicht möglich, eine typische Aufgabe festzulegen, mit der alle Aktionen in der Heißen Zelle abgebildet werden können. Es wäre auch nicht sinnvoll, nur eine spezielle Aufgabe zu testen, da mit dem Assistenzsystem die große Vielfalt an unterschiedlichen Bedarfsfällen abgedeckt werden soll. Daher wurden für die Versuche abstrahierte Aufgaben ausgewählt, die aufgrund ihrer Einfachheit von jedem durchgeführt werden können und kein Fachwissen erfordern. Entscheidend ist, dass sie die wesentlichen Merkmale der realen Arbeitsbedingungen berücksichtigen. Um diese zu ermitteln, wurde eine größere Anzahl möglicher anfallender Tätigkeiten analysiert und folgende charakteristische Aspekte herausgefiltert:

- In der Heißen Zelle muss mit kleinen und fragilen Komponenten gearbeitet werden.
- Die Arbeiter haben fordernde Aufgaben zu erfüllen, auf die sie sich besonders konzentrieren müssen.
- Das Bleiglasfenster reduziert die Tiefenwahrnehmung erheblich, so dass die Produktionsmitarbeiter Hilfsmittel verwenden oder die Dinge ertasten müssen.
- Aufgrund der radioaktiven Strahlung sind die Produktionsmitarbeiter während ihrer Arbeit einer permanenten psychischen Belastung ausgesetzt, die ebenfalls bei der Gestaltung der Versuche berücksichtigt werden muss.

Eine weitere Anforderung an die Versuche ist, dass die zu testenden Kamerakonzepte bzw. die Steuerung intensiv beansprucht werden, da besonders das Verhalten in den Grenzbereichen, beispielsweise am Rand des Schwenkbereichs oder bei maximaler Bewegungsgeschwindigkeit, aussagekräftige Informationen liefert. Außerdem sind die Eigenschaften und die Eignung auch bei anspruchsvollen Aufgaben zu untersuchen. Dazu sollten im Rahmen der Versuche sowohl die möglichen Schwenkwinkel als auch der verfügbare Zoombereich möglichst ausgereizt werden. Außerdem wurden viele Bewegungen über größere Distanzen sowie eine gleichzeitige Verwendung der Steuerung von Schwenkbewegung und Zoomfunktion angestrebt.

Folgende Aufgaben wurden für die Versuche gestaltet:

Aufgabe 1: Die erste Aktion der Versuchspersonen war die Suche nach vier kleinen Schildern mit Zahlen, die im Modell der Heißen Zelle verteilt angebracht waren, so dass die Kamera in alle Richtungen und teilweise bis an die Grenze des Schwenkbereichs bewegt werden musste (siehe Abbildung 26 und Abbildung 27). Den Versuchspersonen war nicht bekannt, wo die Schilder angebracht waren, daher war bei der Suche eine intensive Anwendung der Steuerung notwendig. Die Schilder wurden nach jedem Versuch ausgetauscht und zusätzlich an anderen Positionen angebracht. Unter der Zahl befand sich ein kurzer Text, der von den Versuchspersonen korrekt vorgelesen werden musste. Aufgrund der gewählten sehr kleinen Schriftgröße war die Verwendung der Zoomfunktion der Kamera unerlässlich, um den Text zu erkennen. Es wurde die Zeit erfasst, die zur Durchführung dieser Aufgabe benötigt wurde. Dies setzte die Versuchspersonen unter Druck und förderte die gleichzeitige Verwendung von Zoom- und Bewegungssteuerung. Ziel dieser Übung war, zu Beginn der Tests die Versuchspersonen an den Umgang mit den Steuergerä-

ten und an das Kamerasystem zu gewöhnen, indem sie bereits unter Zeitdruck alle möglichen Bewegungen nutzen und bedienen. Sie wurde daher von jeder Versuchsperson mit jedem Prototyp der Eingabegeräte durchgeführt, der bei den Versuchen zum Einsatz kam. Gleichzeitig diene diese Übung dazu, die Einarbeitungszeit zu ermitteln, um Aussagen über die Intuitivität des jeweiligen Prototyps bzw. des Steuerungskonzeptes zu erhalten. Je länger die Versuchspersonen für diese Aufgabe benötigen, desto schwieriger ist die Bedienung und vor allem die Gewöhnung bzw. das Erlernen der Steuerungsbewegungen.



Abbildung 26: Schilder mit einer Zahl und einem Text in kleiner Schriftgröße für Aufgabe 1

Aufgabe 2: Beim „Heißer-Draht-Spiel“ müssen die Versuchspersonen einem gebogenen Draht mit einer Schlinge aus Metall folgen, ohne dass sich beide berühren (siehe Abbildung 27). Schlinge und Draht sind elektrisch miteinander verbunden, so dass bei jeder Berührung eine Hupe ertönt und ein Signallicht den Fehler anzeigt. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden die Anzahl der Fehler und die benötigte Zeit erfasst. Durch diese konträren Werte ist der Proband im Dilemma zwischen einer größeren Anzahl an Fehlern oder einer langen Durchlaufdauer.

Dieses Spiel entspricht in vielen Aspekten der Arbeit bei der Produktion radioaktiver Substanzen. Um die Aufgabe optimal auszuführen, ist über einen relativ langen Zeitraum eine dauerhafte und hohe Konzentration erforderlich. Die Schlinge kann während des Versuchs nicht abgelegt werden und muss wegen der langen Strecke sogar von der einen in die andere Hand übergeben werden. Wichtig dabei ist, dass die Steuerung des Kamerasystems nicht die Konzentration auf die Hauptaufgabe beeinträchtigt. Der Alarmton, der aufgrund der schwierigen Bedingungen relativ oft

ertönt, verursacht einen psychischen Druck, welcher der Stresssituation der Produktionsmitarbeiter bei ihrer Arbeit in radioaktiven Umgebungen ähnelt. Beim Drahtspiel verschiebt sich dadurch automatisch die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen von der Steuerung der Kamerabewegung weg hin zur eigentlichen Aufgabe. Deshalb diente dieser Versuch im Wesentlichen zur Untersuchung der Intuitivität der Bedienkonzepte bzw. der Prototypen.



Abbildung 27: Versuchsaufbau für Aufgabe 2 „Heißer-Draht-Spiel“. Unten rechts ist ein Beispiel für einen Anbringungsort der Schilder mit Zahl und Text für Aufgabe 1 zu sehen (siehe Pfeil)

Der Draht war so geformt und in der Heißen Zelle angebracht, dass die Versuchspersonen ihm fast quer durch die gesamte Zelle folgen mussten, was eine intensive Verwendung der Kamerasteuerung erforderte. Zusätzlich musste die Zoomfunktion angewendet werden, um die fehlende Tiefenwahrnehmung auszugleichen. Unter den gegebenen Umständen ist die Aufgabe sehr schwer zu lösen, weil mit dem zweidimensionalen Kamerasystem der Abstand der Schlinge zum Draht kaum

abzuschätzen ist. Auch bei der Produktion in der Heißen Zelle sind die Produktionsmitarbeiter nicht selten vor fordernde und teilweise unlösbar erscheinende Aufgaben gestellt. Bei stark vergrößertem Bild mit Hilfe des Kamerazooms kann die fehlende dritte Dimension unter anderem durch die Beobachtung der Schatten von Schlinge und Draht ausgeglichen werden. Auch bei der realen Arbeit in Heißen Zellen ist die dreidimensionale Wahrnehmung durch das Bleiglasfenster stark eingeschränkt.

Aufgabe 3: Bei der Nadel-Faden-Aufgabe muss ein dünner Faden nacheinander in drei mittelfeine Nähnadeln eingefädelt werden, die in einem Abstand von ca. 100 mm in einem länglichen Schaumstoff-Kissen stecken, das auf einem Gestell aus Aluminium-Profilen befestigt ist (siehe Abbildung 28). Das Gestell darf von den Versuchspersonen gedreht und auch verschoben werden. Es ist aber nicht erlaubt, die Nadeln aus dem Schaumstoffkissen herauszunehmen. Dadurch sind die Versuchspersonen gezwungen, die Zoom-Funktion der Kamera intensiv zu nutzen. Um die weiteren Nadeln zu finden, ist es von Vorteil, den Winkel der Kamera wieder etwas zu vergrößern, bis diese sichtbar sind. Bei dieser Aufgabe wurde die Zeit gemessen, die benötigt wurde, um den Faden in alle Nadeln einzufädeln.

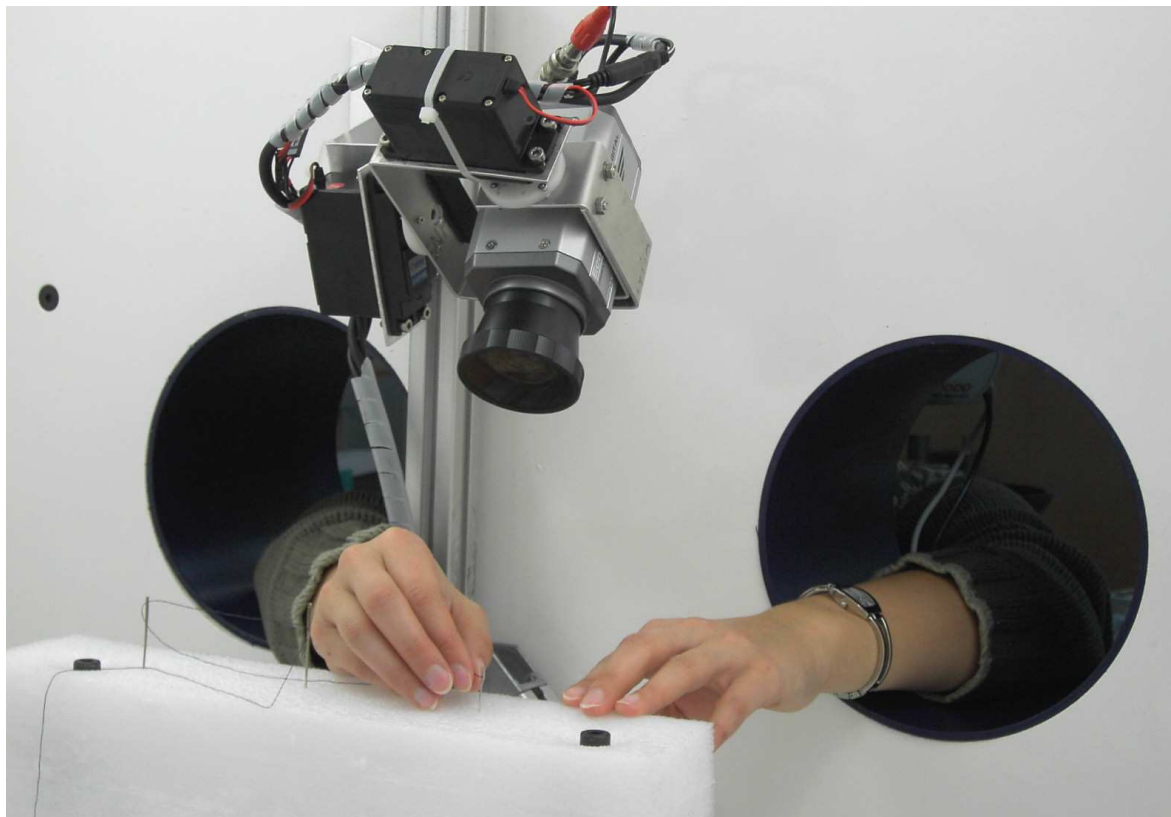


Abbildung 28: Versuchsaufbau der Aufgabe 3: „Nadel-Faden-Versuch“

Charakteristisch für die Versuchsaufgaben ist, dass sie einfach zu verstehen und allgemein bekannt sind. Jeder hat sie in der einen oder anderen Form bereits gelöst. Besondere Kenntnisse sind nicht erforderlich. Dadurch steht keine Versuchsperson vor einer neuen Aufgabe. Die Lernkurveneffekte bezogen auf die Aufgaben sind daher als sehr gering einzuschätzen. Um einen optimalen Vergleich der verschiedenen Steuerungskonzepte zu ermöglichen, führte jede der 10 Versuchsperson der ersten Versuchsreihe die drei Aufgaben mit allen drei Eingabegeräten durch. Zur weiteren Vermeidung von Lernkurveneffekten wurde bei jedem Versuch die Reihenfolge sowohl bei den Eingabegeräten wie auch bei den Aufgaben variiert. Nur die erste Aufgabe musste immer am Anfang durchgeführt werden. Das Gerät zur Zoom-Steuerung konnten die Versuchspersonen frei wählen.

Bei der Auswahl und Gestaltung der Versuchsaufgaben wurde darauf geachtet, dass möglichst viele objektive Daten wie die Dauer oder die Anzahl der Fehler erfasst werden können. Bei der Bewertung der Intuitivität der Konzepte, dem Hauptanliegen der Versuche, steht die subjektive Beurteilung der Versuchspersonen im Vordergrund. Wenn die Produktionsmitarbeiter über einen längeren Zeitraum mit dem Kamerasystem arbeiten müssen, spielen auch so genannte weiche Faktoren wie der Komfort und das subjektive Befinden eine wichtige Rolle. Solche Aspekte können nur in Gesprächen mit den Personen ermittelt werden. Die Interviews mit den Versuchspersonen stellen daher die Hauptinformationsquelle dar. Ein besonderes Ziel der Versuche war aber, die Ergebnisse auch mit Messwerten zu belegen, sofern die damit gewonnenen Zahlen aussagekräftig und sinnvoll sind. Zur Abklärung des Versuchskonzeptes wurde eine Spezialistin zu Rate gezogen. Die Arbeitswissenschaftlerin bestätigte die richtige Ausrichtung sowie die Konformität mit den Vorgaben der Versuchsplanung (Pongrac (2007, 07.02.)).

5.4.3.4 Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

Die Auswertung der bei den Versuchen erfassten Daten zeigt, dass die Versuchspersonen mit dem Head-Tracking-Gerät bei zwei von drei Aufgabenstellungen die besten Ergebnisse erzielten: Die Suche nach den verteilt angebrachten Schildern mit Zahl und kleinem Text wurde mit diesem Steuerungsansatz am schnellsten absolviert. Beim Heißen-Draht-Spiel wurde neben der kürzesten Zeitdauer mit 19,8 Fehlern im Durchschnitt auch die geringste Fehlerzahl erreicht. Allerdings ergaben sich bei der dritten Aufgabe, dem Nadel-Faden-Versuch, mit Head Tracking die schlechtesten Resultate. Hier ging der Kopfjoystick als Sieger hervor, mit dem die Versuchspersonen für die Aufgabe im Durchschnitt nur ca. 53 % der Zeit im Vergleich zum Head Tracking benötigten. Er schneidet auch bei der Text-Aufgabe sehr

gut ab, kann aber bei der Heißen-Draht-Aufgabe nicht überzeugen, wo mit einem Wert von 27,7 ca. 40 % mehr Fehler gemacht wurden und die Versuche im Durchschnitt 50 % länger dauerten. Tabelle 2 und Abbildung 29 geben einen Überblick über die erfassten und gemittelten Messdaten.

		Fußjoy- stick	Kopfjoy- stick	Head Tracking
Invertierung	j	2	3	0
	n	8	7	10
Zoomgerät	Pedale	8	6	8
	Kopfjoystick	2	0	0
	Fußjoystick	0	4	2
Zoom-Speed-Ratio		1,39	1,24	1,22
Durchschnittlicher Zeitbedarf Aufgabe 1: Text lesen	Sek.	316	249	244
Durchschnittlicher Zeitbedarf Aufgabe 2: Heißer Draht	Sek.	191	241	160
Durchschnittlicher Zeitbedarf Aufgabe 3: Nadel-Faden	Sek.	162	142	268
Durchschnitt Fehler Aufgabe 2: Heißer Draht	Anzahl	21,3	27,7	19,8
abgebrochene Aufgaben	Anzahl	0	1	2
bevorzugtes Gerät	Anzahl	0	5	5
	Prozent	0%	50%	50%

Tabelle 2: Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

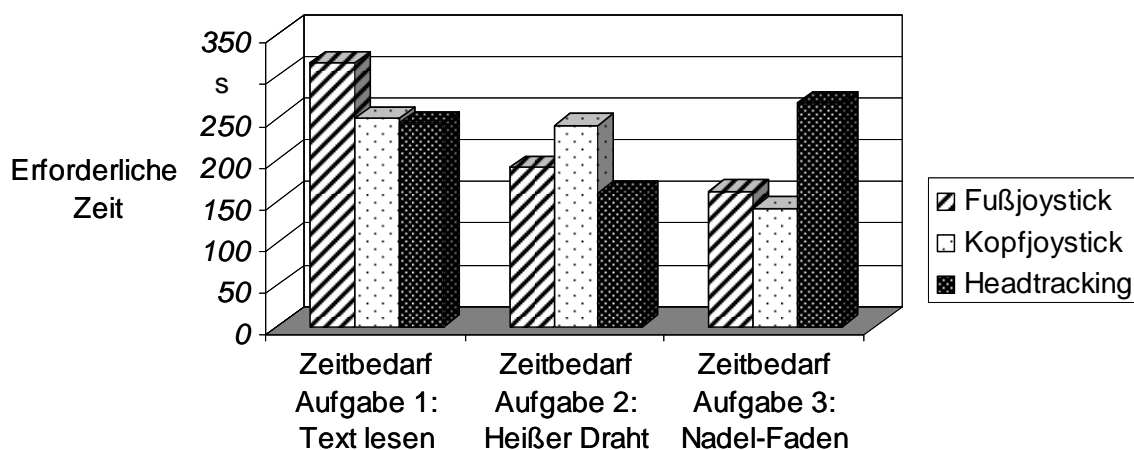


Abbildung 29: Überblick über die durchschnittlichen, kumulierten Zeiten der ersten Versuchsreihe, die mit den drei Eingabegeräten zur Erfüllung der drei Versuchsaufgaben benötigt wurden

Erklärungen für diese zunächst widersprüchlich erscheinenden Ergebnisse lassen sich aus der Beobachtung der Versuchspersonen während der Versuche sowie den Rückmeldungen in der anschließenden Befragung ermitteln. Das Head-Tracking-System wurde von der überwiegenden Mehrheit der Versuchspersonen als das intuitivste Konzept bezeichnet und konnte ohne viele Erklärungen sofort verwendet werden. Vorteile ergeben sich damit vor allem bei häufigen und weitläufigen Bewegungen.

Allerdings trat beim Head Tracking in den Versuchen ein ständiger leichter Drift auf, der entweder auf Störungen in der Funkverbindung zum Computer oder auf fehlerhafte Signale eines minderwertigen gyroskopischen Sensors im verwendeten Gerät zurückzuführen ist. Bei der Nadel-Faden-Aufgabe wird vorwiegend mit vergrößertem Bild gearbeitet, um das Nadelöhr besser zu sehen, und es finden kaum Bewegungen statt. Unter diesen Umständen macht sich eine ständige leichte Bewegung des Bildes deutlich stärker bemerkbar, als bei einer Weitwinkelperspektive und ständigem Wechsel der Kameraposition. Dieser Drift ist nicht nur unangenehm bei der Bedienung, er erzeugt Stress und kann sogar zu Unwohlsein und Übelkeit führen, was dreimal Versuchspersonen dazu zwang, die Versuchsaufgabe abubrechen. Die meisten Probanden hatten aber keine Probleme mit der schleichenden Bewegung, sondern glichen den Winkelversatz unbewusst aus. Das Problem wurde oft erst dann realisiert, als eine starke Diskrepanz zwischen der Kopfposition und der Kamerastellung auftrat und die Kopfdrehung in einer unangenehmen Zwangshaltung endete. Dies ist ein Beleg für die hohe Intuitivität dieses Steuerungskonzeptes. Allerdings wird durch den Drift das Vertrauen in die Verlässlichkeit der Technik beeinträchtigt, die bei der Arbeit in radioaktiven Umgebungen wichtig ist. Insgesamt hinterließ das realisierte Head-Tracking-System daher einen leicht negativen Eindruck. Bei der Steuerung mit dem Kopfjoystick bewegt sich die Kamera hingegen absolut zuverlässig nur dann, wenn der Joystick tatsächlich ausgelenkt wird. Bei diesem Ansatz ist die Gestaltung der Schnittstelle zum Benutzer entscheidend.

Bei der gewählten Gestaltung des Kopfjoysticks werden die Bewegungen durch translatorisches Verschieben des Kopfes nach hinten und vorne sowie nach rechts und links gesteuert. Die Beobachtung der Versuchspersonen zeigte, dass einige nicht mit dieser Anordnung zurecht kamen. Anstatt einer translatorischen Bewegung wurde der Kopf gedreht, wie es der natürlichen Bewegung entspräche, aber beim Kopfjoystick kein Signal hervorruft. Auch bei diesem Steuerungsgerät musste eine Versuchsperson aufgeben, weil es nicht gelang, damit die Versuche durchzuführen. Die freie Bewegung fällt leichter als eine erzwungene Bewegung, bei-

spielsweise wenn die Produktionsmitarbeiter mit der Kamera einem Schlauch oder dem Draht des Heißer-Draht-Spiels folgen müssen. Bei weitläufigen Bewegungen mit vielen Richtungswechseln sind die Produktionsmitarbeiter mit dem Joystick im Nachteil, weil sich diagonale Bewegungen aus den beiden Bewegungsachsen zusammensetzen. Außerdem steht ihnen nur eine festgelegte Geschwindigkeit zur Verfügung. Diese muss ein Kompromiss sein zwischen Positionierungsaufgaben, die eine langsame Geschwindigkeit erfordern, und großen Winkeländerungen, bei denen eine schnelle Bewegung von Vorteil ist. Bei den Versuchen konnten die Probanden die Geschwindigkeit nach Wunsch einstellen.

Auch die subjektive Bewertung der Steuerungsoptionen führte zum gleichen Ergebnis: Jeweils 50 % der im Anschluss an die Versuche befragten Versuchspersonen wählten den Kopfjoystick und das Head-Tracking-System als bevorzugte Lösung aus. In Anbetracht der guten Resultate von Head Tracking und Kopfjoystick kann der Fußjoystick für die Bewegungssteuerung der Kamera vernachlässigt werden. Er konnte bei keiner der Versuchsaufgaben überzeugen und wurde zudem als wenig intuitiv bewertet. Der Fuß ist nicht für feinmotorische Bewegungen geeignet. Außerdem führte der Fußjoystick bei mehreren Versuchspersonen trotz Ausgleichsfeder zu einem unsicheren Stand, der teilweise bereits nach kurzer Zeit als zu unbequem empfunden wurde.

Bei der subjektiven Beurteilung der Eingabegeräte traten deutliche Unterschiede auf, die neben der Abhängigkeit von der Art der Aufgabenstellung im Wesentlichen mit der Vorbildung bzw. der Erfahrung der Versuchspersonen korrelierten. Personen, die viel mit Joysticks arbeiten, beispielsweise bei Computerspielen, erzielten damit die besten Ergebnisse bei der Steuerung der Kamera und entschieden sich auch klar für dieses Eingabegerät. Im Allgemeinen waren es eher die Probanden mit technischem Hintergrund, die bei der Beurteilung dem Joystick den Vorzug gaben und mit ihm gut umgehen konnten. Offenbar ist technisches Verständnis und geschultes räumliches Vorstellungsvermögen förderlich, um die gewollte Bewegung der Kamera in gezielte Aktionen des steuernden Körperteils zu übersetzen. In den Interviews wurde klar, dass für viele Vertreter dieser Personengruppe bei der Bedienung der Joystick-Geräte die Steuerungsaufgabe im Vordergrund stand. Sie hatten Freude daran, sich in die Steuerung hineinzudenken und den Umgang mit dem Steuergerät zu erlernen bzw. besser zu beherrschen. Für nicht-technisch vorgeprägte Benutzer hingegen steht die primäre Aufgabe in der Heißen Zelle im Vordergrund. Sie wollen und können sich nicht zusätzlich noch mit der Steuerung der Kamerabewegung beschäftigen. Ihnen kommt die einfache Zugänglichkeit des Head-Tracking-Systems zugute, das kein langes Erlernen oder Eingewöhnen erfor-

dert. Die Benutzer müssen sich nicht einmal darauf einstellen, es reicht aus, den Kopf normal zu bewegen.

Bei der Steuerung des Kamera-Zooms konnten mit dem Fußjoystick gute Ergebnisse erzielt werden. Allerdings war die Fixierung des Fußes eher störend und wurde negativ bewertet. Sowohl bei den Resultaten als auch der Beurteilung schnitten wider Erwarten die zwei einzelnen Taster am besten ab, obwohl sie teilweise erst mit dem Fuß gesucht werden mussten. Der Kopfjoystick konnte bei der Zoom-Steuerung nicht überzeugen, obwohl damit mit der Vor- und Rückwärtsbewegung eine prinzipiell intuitive Bedienung geboten wird. Das Ergebnis ist allerdings auch im Zusammenhang mit der Steuerung der Kamera mit dem Fuß zu sehen, die viel Aufmerksamkeit von den Versuchspersonen verlangte und dadurch auch die Zoom-Steuerung beeinträchtigte.

5.4.3.5 Fazit

Wesentliche Erkenntnis der ersten Versuchsreihe ist, dass sich der Kopf gemäß den Erwartungen am besten für die feinmotorische Steuerung der Kamerabewegung eignet. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass sich sowohl mit dem Head Tracking als auch mit dem Kopfjoystick die besten Ergebnisse für die Steuerung der Kamerabewegung erzielen lassen. Die Mehrzahl der Versuchspersonen konnte bereits mit den Versuchsprototypen der Kamerasysteme und ohne Tiefenwahrnehmung die Aufgaben gut erledigen. Die Probleme, die beide Lösungen aufweisen, sind im Wesentlichen auf die Gestaltung der Geräte oder auf technische Defizite zurückzuführen, die gelöst bzw. verbessert werden können. Daher wird im Folgenden die Analyse der Probleme erläutert, auf deren Basis die Kamerasysteme für die zweite Versuchsreihe optimiert wurden.

5.4.4 Zweite Versuchsreihe

5.4.4.1 Allgemeines

Nachdem die Ergebnisse der ersten Tests keine eindeutigen Entscheidungen bezüglich der Eingabegeräte zuließen, blieb auch bei der zweiten Versuchsreihe das wesentliche Ziel, das optimale Steuerungskonzept für die Bedienung der Kamera in der Heißen Zelle zu ermitteln. In der zweiten Versuchsreihe wurden die beiden erfolgversprechendsten Konzepte, die auf der Basis der Erkenntnisse der ersten Versuche optimiert wurden, erneut einander gegenübergestellt und die Qualität der Funktion sowie die erreichte Verbesserung untersucht.

5.4.4.2 Verbesserung der Kamerasysteme und Versuchsaufbau

Getrennte Verbesserung der beiden Kamerasysteme

Bei der ersten Versuchsreihe machten sich die hohen Latenzzeiten bei der Bewegung der Kamera unangenehm bemerkbar. Eine Zeitverzögerung beeinträchtigt die Arbeit deutlich, auch wenn es sich nur um Bruchteile von Sekunden handelt. Besonders bei großen erforderlichen Schwenkwinkeln war zu beobachten, dass die Kamerabewegung der Steuerbewegung der Versuchspersonen hinterher hinkte. Dies war vor allem auf die verwendete PTZ-Kamera zurückzuführen, deren maximale Bewegungsgeschwindigkeit für diese Anwendung offenbar zu gering ist. Die Latenzen der Steuerbefehle summierten sich, wurden trotz Rückstand aber der Reihe nach abgearbeitet, so dass sich die Kamera bei den Versuchen temporär sogar entgegen der Auslenkung des Steuerelements bewegte. Die Geschwindigkeit der Kamerabewegung ist im Allgemeinen ein entscheidender Faktor, besonders auch für die Optimierung der Kamerasysteme. Allerdings sind die Anforderungen der beiden Lösungsansätze teilweise unterschiedlich: Für das Gyrotracker-basierte Head Tracking wird eine hohe Maximalgeschwindigkeit benötigt, damit die Kamera den schnellen Bewegungen des Kopfes ohne Verzögerung folgen kann. Bei der Steuerung mit Joysticks hingegen kann eine zu schnelle Bewegung kontraproduktiv sein, da die Reaktionsgeschwindigkeit des menschlichen Stellgliedes eher niedrig ausgeprägt ist und sich die Kamera schnell über das Ziel hinausbewegt. Um jedes System optimal auslegen zu können, wurden daher für die zweite Versuchsreihe die beiden Lösungsansätze in einem eigenen Prototyp weiterentwickelt, wie im Folgenden erläutert wird. Es kamen jeweils unterschiedliche Kameras zum Einsatz.

Kopf-Joystick steuert PTZ-Kamera

Für die Joystick-Steuerung wurde wiederum eine kommerzielle PTZ-Kamera verwendet (Abbildung 30), da sich viele ihrer Eigenschaften und Qualitäten bei den ersten Versuchen bewährt hatten. Allerdings wurde ein anderes Kameramodell ausgesucht: Die SONY EVI-D100 zeichnet sich gegenüber dem Vorgängermodell durch eine deutlich höhere Winkelgeschwindigkeit und ein verbessertes Befehlsmanagement aus (SONY 2009). Mit diesen Leistungsmerkmalen können Zeitverzögerungen durch zu geringe Geschwindigkeiten oder einen überfüllten Speicher ausgeschlossen werden. Für die zweite Versuchsreihe wurde die konstante Geschwindigkeit beibehalten.



Abbildung 30: Prototyp des Kamerasystems mit Kinnjoystick (links, siehe Pfeil) und PTZ-Kamera im Inneren des Modells einer Heißen Zelle (rechts)

Als weiterer entscheidender Faktor für ein optimales Steuerungssystem kristallisierte sich bei den Joystick-Lösungen in der ersten Versuchsreihe die Schnittstelle zum Anwender heraus. Eine ungünstige Kopplung zwischen Eingabegerät und bedienendem Körperglied führte zu Problemen bei der Steuerung der Kamera. Hauptkritikpunkt war wiederum eine Latenzzeit, die in diesem Fall dadurch verursacht wurde, dass der Kopf und der Fuß aufgrund einer mangelhaften Verstellbarkeit des Kopfsticks im Steuergerät oft zu viel Freiraum hatten und erst ein gewisser Weg zurückgelegt werden musste, bis die Steuerung reagierte. Die starre Einhausung schränkte die Bewegungsfreiheit in der Heißen Zelle ein und wurde zudem oft als unangenehm empfunden. Außerdem war die Steuerungsbewegung nicht intuitiv und bereitete einigen Probanden teilweise erhebliche Probleme.

Für die zweite Versuchsreihe wurde aufgrund der eindeutigen Versuchsergebnisse nur noch das Joystick-Konzept für den Kopf betrachtet und dieses auf Basis der Erfahrungen der ersten Versuchsreihe umgestaltet. Die neue Lösung sieht einen einfachen digitalen Joystick mit einem griffigen Schaumstoffpolster am Ende des Hebels vor, der an der Wand der Heißen Zelle vor dem Produktionsmitarbeiter auf der Höhe des Gesichtes angebracht ist (Abbildung 30 und Abbildung 31). Er wurde bewusst flach gestaltet, damit der durch die Eliminierung des Bleiglasfensters gewonnene Raum zwischen Kopf und Bleiwand nicht durch das Gerät wieder verloren geht. Als Kontaktfläche wird der Bereich zwischen Kinn und unterer Lippe verwendet, der an das Schaumstoffpolster gedrückt wird und so den Kontakt zum Joystick herstellt. Durch die muldenartige Ausformung dieser Gesichtspartie und

das weiche Schaumstoffpolster mit einem hohen Reibwert reduziert sich die erforderliche Druckkraft erheblich, was für die Anwender viel komfortabler ist. Zusätzlich wurde eine weiche Zentrierfeder eingewechselt, um die zum Auslenken des Sticks erforderlichen Kräfte zu reduzieren.

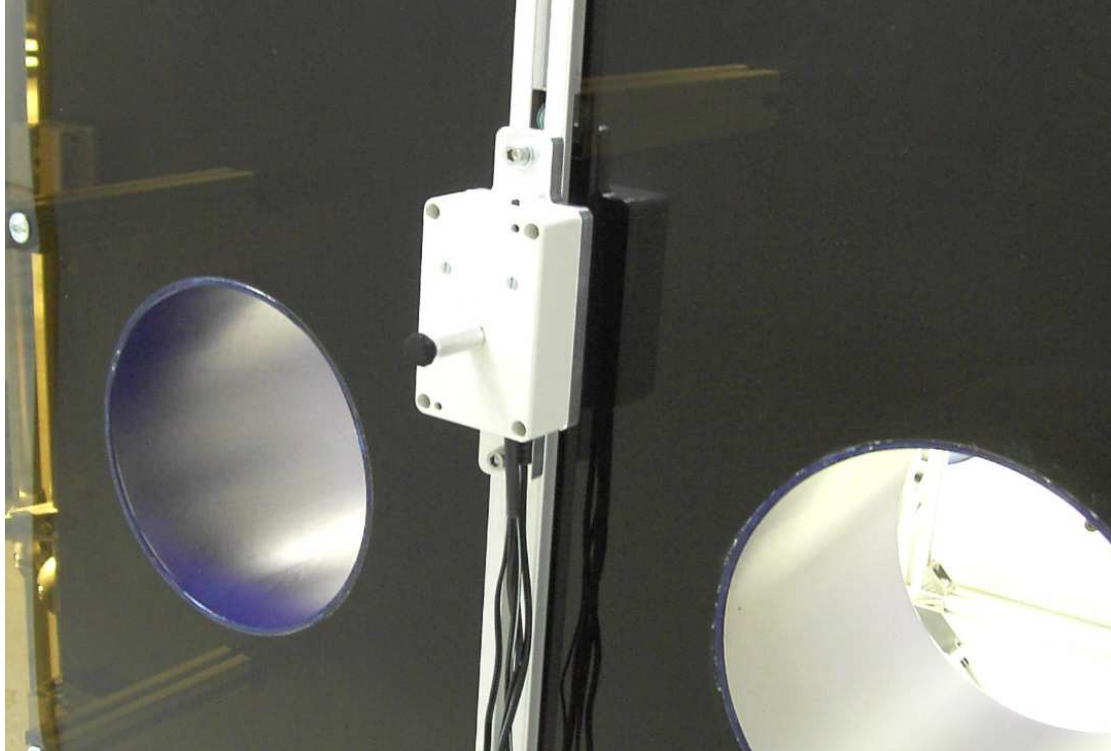


Abbildung 31: Kopf- bzw. Kinn-Joystick, mit kurzem Hebel ist am Modell der Heißen Zelle an einer Schiene höhenverstellbar angebracht

Ein weiterer Vorteil dieser Kontaktfläche ist, dass der Produktionsmitarbeiter den Joystick besser sieht, da die Videobrille, die dieser während seiner Arbeit an der Heißen Zelle ständig trägt, den Blick nur nach unten frei gibt. Das Konzept ist einfach und kostengünstig. Außerdem entfällt das Anpassen des Eingabegerätes an die unterschiedlichen Kopfmaße der Anwender. Durch die Nähe des Eingabegerätes zum Mund könnte sich bei der Benutzung durch mehrere Versuchspersonen ein Hygieneproblem ergeben, das aber durch wechselbare Schaumstoffpolster leicht gelöst werden kann. Als Alternative wäre auch die Stirn denkbar, die aber aufgrund der fliehenden Fläche und der Sichtverhältnisse der Videobrille ungünstiger ist. Hier sind allerdings weniger Beanstandungen bezüglich der Hygiene zu erwarten.

Mit dem neuen Konzept wird eine quasi-intuitive Steuerung ermöglicht, da ähnlich wie beim Head Tracking die natürliche Kopfbewegung erfasst wird. Die Produktionsmitarbeiter müssen sich nicht auf die Steuerungsaufgabe konzentrieren, es reicht aus, wenn sie ihren Kopf bewegen, wie sie es gewohnt sind, wenn sie sich in der

Umgebung umsehen. Der Stick wird dazu invers ausgelenkt und übersetzt über die Hebelwirkung die Bewegungen in Steuersignale. Ein weiterer wesentlicher Vorteil des Joystick-Ansatzes ist, dass die Kamera nur angesteuert wird, wenn eine Positionsänderung erforderlich ist. Ansonsten können die Produktionsmitarbeiter die Steuerposition am Kopfstick verlassen und ihren Kopf frei bewegen. Dem kommt das geänderte Design entgegen, da der Kopf nicht mehr in einem Gestell eingefasst ist. Um für alle Versuchspersonen eine angenehme Kamerasteuerung zu ermöglichen, ist der Kopfstick über eine Schiene stufenlos in der Höhe verstellbar.

Gyro-Tracker steuert schnelle Kamera-Schwenkvorrichtung

Beim Head-Tracking-Ansatz wurde das gesamte System hinsichtlich Verbesserungspotentialen analysiert und vollständig neu konzipiert, um eine ausreichend schnelle Ansprache und möglichst geringe Latenzzeiten zu erreichen. Anstatt einer kommerziellen PTZ-Kamera kam für die zweite Versuchsreihe ein eigens entwickeltes System zum Einsatz, bei dem eine handelsübliche Autofocus-Farbkamera mit elektrisch angetriebenem Zoomobjektiv von einer speziell konstruierten Schwenkvorrichtung bewegt wird (Abbildung 32).



Abbildung 32: Head-Tracking-Ansatz: Die Kamera (rechts) wird von Servomotoren bewegt, die von einem in der Videobrille (links) integrierten Gyro-Tracker gesteuert werden

Starke Servomotoren aus dem Modellbau-Bereich sorgen für eine hohe Beschleunigung und eine direkte Ansprache bei sehr geringen Kosten. Die Steuerung wird nicht wie bisher über einen Steuerrechner realisiert, sondern über eine Steuerelektronik, welche die Signale des Gyro-Trackers direkt verarbeitet und in Steuerbefehle

für die Motoren umwandelt. Dadurch ist eine minimale Verarbeitungszeit für die Steuerungssignale gewährleistet. Um ein optimiertes System zu erreichen, sind die einzelnen Elemente nicht mehr variabel gestaltet, sondern aufeinander abgestimmt. Die Schwenkvorrichtung wird daher ausschließlich mit einem Gyro-Tracker angesteuert. Ein weiterer Vorteil dieses neuen Ansatzes neben der optimierten Steuerung ist die Möglichkeit, Steuerung und Aktorik räumlich zu trennen. Dadurch kann die empfindliche Steuerung aus der gefährlichen radioaktiven Umgebung, in der sich die Kamera befindet, in einen sicheren Bereich verlagert werden.

Für den neuen Head-Tracking-Prototyp wurde das Immersion Set X11 der Firma RC-Tech als Basis verwendet. Es besteht aus einer schwenk- und neigbaren Kamera mit Steuerung sowie einer Videobrille für den Anwender, in die ein Gyro-Tracker integriert ist. Das Produkt wurde für Modellbau-Flugzeuge entwickelt. Es soll dem Benutzer das Gefühl vermitteln, selbst mitzufliegen. Dazu wird die Kamera in das Flugzeug eingebaut. Das Produkt überzeugt vor allem durch einen im Unterschied zu sonstigen kommerziell erhältlichen Produkten kleinen und kostengünstigen gyroskopischen Sensor, der unsichtbar in der Videobrille integriert ist, sowie durch eine tadellose Funktion bei einem einfachen und relativ kostengünstigen Aufbau. Allerdings ist das System auf extremen Leichtbau und Mobilität ausgelegt, so dass bei einigen Eigenschaften, wie der Kameraqualität und der Steifigkeit, Kompromisse eingegangen werden mussten, die sich bei der Verwendung in der Heißen Zelle nachteilig auswirken. Außerdem ist keine Zoom-Funktion verfügbar. (RC-TECH 2007, WÄGNER et al. 2007)

Für den neuen Head-Tracking-Prototyp wurden daher nur die Videobrille mit dem Gyro-Tracker sowie die Steuerungstechnik vom Immersion Set X11 verwendet. Letztere musste zudem abgeändert werden, da die Bleiwände und die Zuverlässigkeitsanforderung eine sichere Lösung über eine Kabelverbindung erforderlich machen. Da das System auf eine Funkverbindung ausgelegt ist, müssen die Signale des Gyro-Trackers zunächst verarbeitet werden, bevor sie die Kamera bewegen können. Dazu wurde ein Demultiplexer realisiert, der die Signale des Gyro-Trackers von der Pulsphasenmodulation (PPM-Signale) in die Pulsweitenmodulation (PWM-Signale) umwandelt, so dass sie von den Servomotoren verarbeitet werden können.

Beim Head-Tracking-System existiert im Unterschied zum Joystick-Konzept keine Schnittstellenproblematik, besonders da in der neuen Ausführung der Gyro-Tracker in der Videobrille integriert ist. Allerdings wird für die zweite Versuchsreihe anstatt der bisherigen festen Konstruktion eine klappbar Brille verwendet. Die Videobrille

ist über ein Scharnier an einer Art Stirnband angebracht, so dass sie einfach aufgeklappt werden kann, wenn in der Umgebung etwas betrachtet werden muss.

Rücksetzen der Kamera in die Grundstellung

Aufgrund von Beobachtungen der Versuchspersonen während der ersten Versuchsreihe und den Wünschen einiger Probanden wurde eine neue Funktion realisiert, welche die Kamera bei Betätigung eines Tasters in die Ausgangsposition zurückbringt. Dieses Rücksetzen der Kamera ist bei beiden Kamerasteuerungsprinzipien vorgesehen.

Beim Joystick bekommen die Produktionsmitarbeiter keine Rückmeldung zur Position der Kamera. Sie können sich lediglich am Bild der Kamera orientieren. Da der sichtbare Bereich der Kamera trotz Weitwinkelobjektiv aber sehr begrenzt ist und keinen Überblick ermöglicht, auf der anderen Seite aber die Anlagen oft komplex sind und in vielen Bereichen ähnlich aussehen, fällt die Orientierung anhand des Bildes schwer. Im Fall der Orientierungslosigkeit können die Produktionsmitarbeiter daher auf Knopfdruck die Kamera in die Ausgangsposition zurückstellen und sich neu zurecht finden.

Beim Head Tracking ist die Orientierung der Produktionsmitarbeiter optimal, da die Stellung der Kamera im Idealfall identisch zur Kopfhaltung ist. Nachdem kein technisches System perfekt ist, muss mit Störungen und damit verbundenem Versatz zwischen der Kamera und dem Kopf gerechnet werden. Die möglichen Ursachen sind vielfältig und reichen von Signalstörungen über kontinuierliche Fehler im Gyro-Tracker bis zu ungenauen Zoomobjektiven. Mit der Rücksetz-Funktion kann der Versatz korrigiert werden.

Da beide Arme gebunden sind, bleiben nur noch die Füße zur Betätigung des Tasters für das Rücksetzen der Kamera. Er wurde daher als Fußtaster ausgeführt, der von jeder Versuchsperson nach Belieben positioniert werden konnte (siehe Abbildung 33). Nach häufigem Gebrauch ist ohnehin davon auszugehen, dass die Produktionsmitarbeiter den Taster ohne Blickkontakt finden.

Einige Probanden äußerten außerdem den Wunsch nach einem Schalter, der die Kamera in einer bestimmten Position fixiert, so dass feinmotorische Arbeiten erfüllt werden können, ohne dass sich die Kamera bewegt. Ein solches temporäres Entkoppeln von Kamerabewegung und Steuerung wurde nicht realisiert, da sich keine vertretbare Lösung für das Wiedereinkoppeln in den Steuermodus ergab. Beim Ausschalten der Arretierungsfunktion müsste der Kopf zunächst wieder in die

Position der Kamera gebracht werden, andernfalls besteht ein Winkelversatz zwischen Kopfstellung und Kameraposition. Dies ist jedoch nicht möglich, da die Produktionsmitarbeiter die Kameraposition nicht sehen.



Abbildung 33: Anordnungskonzept der Fußtaster für die Zoom-Steuerung mit einem Rahmen aus Alu-Profilen. Mit dem einzelnen Taster (im Bild rechts) kann die Kamera in die Grundstellung zurückgesetzt werden.

Zoomsteuerung

Die Abkopplung der Zoom-Steuerung von der Steuerung der Kamerabewegung war in der ersten Versuchsreihe erfolgreich und wurde auch für die zweite Versuchsreihe beibehalten. Das bedeutet, dass jedes Kamera-Steuerungskonzept mit jeder Zoomsteuerung kombiniert werden kann. Nachdem der Kopf für die Steuerung der Kamerabewegung verwendet wird und sich sowohl der Bauch als auch die Knie als ungeeignet für Steuerungsaufgaben herausstellten, muss die Steuerung des Zooms mit den Füßen erfolgen. Für die weiteren Tests kam erneut das Konzept der zwei einzelnen Taster zum Einsatz, das sich bereits bewährt hatte. Allerdings sollten in der zweiten Versuchsreihe weitere Verbesserungen überprüft werden, die vorwiegend die Auffindbarkeit betreffen. Die Sicht nach unten zu den Tastern wird einerseits durch die Videobrille und andererseits durch den Körper des Produktionsmitarbeiters sowie die Wand der Heißen Zelle erheblich eingeschränkt. Daher wird angestrebt, dass die Anwender die Taster ohne Hinsehen finden, damit sie ihre ganze Konzentration ihren fordernden Aufgaben widmen können. Die Möglichkeiten hierfür vielfältig. Für die zweite Versuchsreihe wurden die zwei erfolgversprechendsten Ansätze ausgewählt:

Das erste Konzept sieht ein Gestell aus Aluminium-Profilen vor, das die Taster einrahmt und so zu einer Einheit zusammenfasst (Abbildung 33 links). Es ist am

Versuchsaufbau der Heißen Zelle befestigt und soll das Auffinden der Taster deutlich erleichtern. Die Idee dabei ist, dass die Produktionsmitarbeiter den Steuerungsfuß nach vorne schieben, wo er auf den Rahmen trifft. Von dort aus befindet sich links und rechts jeweils ein Taster für die Zoom-Steuerung. Es sind weitere Varianten möglich, beispielsweise könnten die Taster so aufgestellt werden, dass der Fuß nur noch seitlich bewegt oder gedreht werden muss, um sie zu aktivieren. Die ganze Anordnung könnte auch komplett um 90° gedreht werden, so dass die Produktionsmitarbeiter zur Steuerung des Zooms den Fuß nach vorne und hinten bewegen, was intuitiv wäre. Dann würden die Taster allerdings eine potentielle Stolperfalle darstellen.

Das zweite Konzept (Abbildung 34) basiert auf einem Wippedal, wie es für die Lautstärkenregulierung bei elektrischen Gitarren eingesetzt wird. Der Vorteil hierbei ist, dass nicht zwei Taster gesucht werden müssen, da beide in einem Gerät zusammengefasst sind und der Benutzer auf dem Pedal stehen bleiben kann. Um angenehmes Stehen zu ermöglichen, wurde für den anderen Fuß ein Podest aufgestellt, so dass sich auch der zweite Fuß auf der Höhe des Pedals befindet.



Abbildung 34: Wippe zur Steuerung der Zoom-Funktion

5.4.4.3 Versuchsablauf

Die Versuche der zweiten Versuchsreihe wurden ebenfalls am Modell der Heißen Zelle (siehe Abschnitt 5.4.3.1, S. 87) durchgeführt. Auch die Aufgaben des ersten Versuchsdurchgangs und der Ablauf wurden beibehalten: Jede Versuchsperson

fürte die drei Aufgaben Text finden, Heißer-Draht-Versuch und Nadel-und-Faden-Versuch sowohl mit dem Head-Tracking-System als auch mit dem Kopf-Joystick durch. Zunächst wurde zur Eingewöhnung an die Kamerasysteme immer nach den Schildern mit Text gesucht. Die Reihenfolge der weiteren Versuche wurde ständig verändert, um eine Verfälschung des Ergebnisses durch Lerneffekte bei den Versuchspersonen zu reduzieren. Abweichend zur ersten Versuchsreihe waren die beiden zur Verfügung stehenden Eingabegeräte für die Zoomsteuerung nicht mehr wählbar, sondern werden zugeteilt, um zu gewährleisten, dass beide Ansätze in allen Kombinationen getestet werden.

Die zweite Versuchsreihe wurde mit 15 Versuchspersonen durchgeführt, bei denen auf eine ähnliche Verteilung bezüglich Vorkenntnissen, Fachwissen, Alter etc. wie im ersten Durchlauf geachtet wurde (siehe Abschnitt 5.4.3.2, S. 94). Mit Ausnahme der Experten aus der Radiochemie unterschieden sich die Personen des ersten und zweiten Versuchsdurchgangs. Zusätzlich wurden die beiden Versuchsreihen mit einem deutlichen zeitlichen Abstand von mehreren Monaten durchgeführt, um zu verhindern, dass sich die Versuchspersonen an die Versuche erinnerten, daraus Vorteile hätten ziehen und somit das Ergebnis hätten verfälschen können.

5.4.4.4 Versuchsergebnisse

Kamerasteuerung - objektive Ergebnisse

Die in der zweiten Versuchsreihe ermittelten Daten bestätigen im Wesentlichen die Resultate des ersten Durchgangs. Bei den ersten beiden Aufgaben erzielten die Versuchspersonen wieder mit Head Tracking die besten Ergebnisse sowohl bei den benötigten Zeiten (siehe Abbildung 35) als auch bei der Fehleranzahl. Die Differenz der benötigten Zeiten beim Heißer-Draht-Versuch mit Head Tracking im Vergleich zum Kinnjoystick beträgt ca. 25 % und wurde damit um etwa 26 % gegenüber den ersten Versuchen kleiner. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Versuchspersonen mit dem Kinnjoystick deutlich besser arbeiten konnten als mit dem Kopfjoystick der ersten Versuchsreihe. Es bleiben aber leichte Vorteile für den Head-Tracking-Ansatz. Umgekehrt benötigten die Versuchspersonen bei der Nadel-Faden-Aufgabe mit dem Head-Tracking-Gerät nur noch 43 % länger als mit dem Kinnjoystick. Dies ist eine Reduzierung um ca. 9 % im Vergleich zur ersten Versuchsreihe. Die Anzahl der Fehler ist beim Kinnjoystick mit einem Wert von 5,6 um ca. 75 % höher als beim Head Tracking. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die durchschnittlichen Messergebnisse, aufgeschlüsselt nach den vier Kombinationsmöglichkeiten der Eingabegeräte.

		Kopfjoy- stick + Taster	Kopfjoy- stick + Wippedal	Head Tracking + Taster	Head Tracking + Wippedal
Durchschnittlicher Zeitbedarf Aufgabe 1: Text lesen	Sek.	96	123	90	112
Durchschnittlicher Zeitbedarf Aufgabe 2: Heißer Draht	Sek.	41	39	23	40
Durchschnittlicher Zeitbedarf Aufgabe 3: Nadel-Faden	Sek.	185	153	194	285
Durchschnitt Fehler Aufgabe 2: Heißer Draht	Anzahl	4,63	6,71	1,86	4,38
abgebrochene Aufga- ben	Anzahl	0	1	0	2
bevorzugtes System	Anzahl	5	1	6	3
	Prozent	33,3%	6,6%	40,0%	20,0%

Tabelle 3: Übersicht über die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe

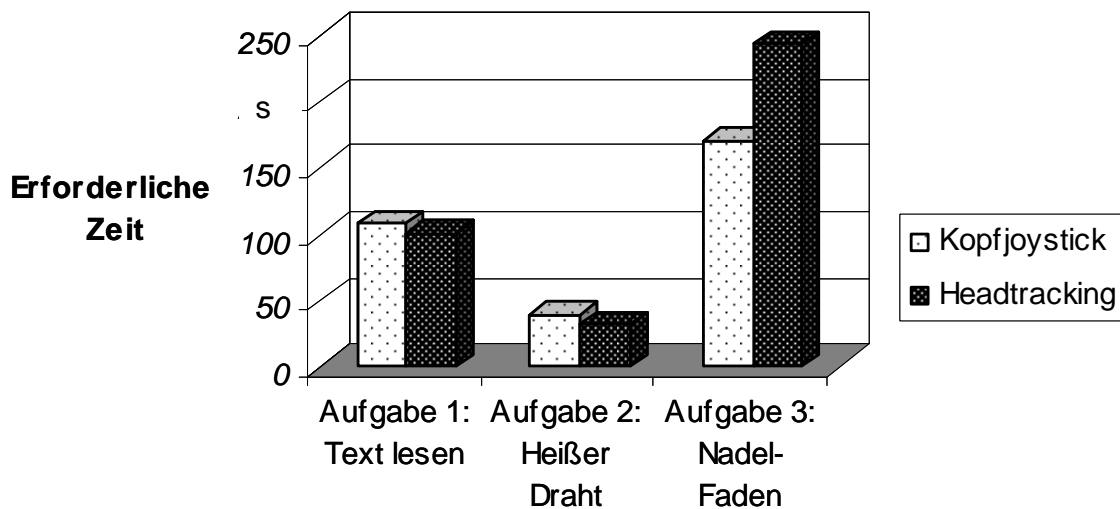


Abbildung 35: Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe: Vergleich der benötigten Zeiten bei Kopfjoystick und Head Tracking für die drei Versuchsaufgaben

Bei alleiniger Betrachtung der im Rahmen der Versuche erfassten objektiven Daten, wie benötigte Zeiten und Fehlerzahlen, ist auch nach der zweiten Versuchsreihe keine allgemeingültige Aussage darüber möglich, welches der beiden Steuerungskonzepte zu bevorzugen ist. Sowohl mit dem Joystick als auch mit dem Head-Tracking-Konzept wurden in den Versuchen sehr gute Resultate erzielt. Beide

Konzepte können bereits im realisierten Entwicklungsstand eingesetzt werden. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, dass die verschiedenen Konzepte ihre Stärken in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung offenbaren.

Das Head-Tracking-System hat Vorteile bei Anwendungsfällen, die nicht primär statisch sind, sondern bei denen ein schneller und häufiger Wechsel des Blickfeldes in verschiedene und auch weit auseinander liegende Bereiche der Heißen Zelle erforderlich ist, beispielsweise, um mit der Kamera den Händen zu folgen. Hier ist eine schnelle Bewegung der Kamera essentiell, damit Kopf und Kamera eine Einheit bilden. Ein weiterer Vorteil des Head-Tracking-Ansatzes ist die sehr kurze Einarbeitungszeit, die auf eine hohe Intuitivität schließen lässt. Dies belegen vor allem die niedrigen Zeiten und die geringen Fehlerraten bei den Versuchen mit verstecktem Text und beim Heißen-Draht-Versuch.

Wenn das Kamerasystem vorwiegend für statische Tätigkeiten verwendet wird, sollte dem Kopfjoystick der Vorzug gegeben werden. Beispiele hierfür sind Aufgaben, die an kaum wechselnden Orten präzise ausgeführt werden müssen und eine hohe Konzentration erfordern. Die Versuchsergebnisse bei der Nadel-Faden-Aufgabe zeigen, dass der Kopfjoystick bei diesem Typ von Arbeit Vorteile bringt. Bei einer ergonomisch kompatiblen Gestaltung der Joystick-Steuerung, wie es beim Prototyp für die Versuche gelungen ist, kann die Einarbeitungszeit auf ein Minimum reduziert werden.

Kamerasteuerung - subjektive Ergebnisse

Die subjektive Bewertung der Steuerungskonzepte durch die 15 Versuchspersonen nach der Durchführung der Tests ergibt ein ähnlich ausgeglichenes Bild, wie Abbildung 36 zeigt. Die Bewertung unterscheidet sich nur beim Steuerungskomfort und beim Tragekomfort merklich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei letzterem Kriterium im Wesentlichen die beiden Videobrillen beurteilt wurden, wobei das in der zweiten Versuchsreihe neu hinzugekommene Gerät mit Stirnband schlechter abschnitt. Bei der Auswahl des Wunschsystems lassen sich allerdings deutliche Präferenzen erkennen: Mit 9 zu 6 Stimmen sprach sich klar die Mehrheit der Probanden für das Head-Tracking-Konzept als bevorzugten Steuerungsansatz aus.

Bei der Beurteilung der beiden Kamerasysteme fällt wie bei den ersten Versuchen eine Korrelation zur Vorbildung auf. Personen mit technischem Hintergrund, aber keiner Erfahrung bei der Arbeit an Heißen Zellen, bewerteten die Kamerasysteme positiv, waren dabei aber eher zurückhaltend. Für sie stehen die Nachteile eines Kamerasystems und die Einschränkungen im Vordergrund, da sie es nicht gewohnt

sind, mit einer Videobrille zu arbeiten, die auch bei idealer Ausführung den Komfort verringert und das Blickfeld einschränkt.

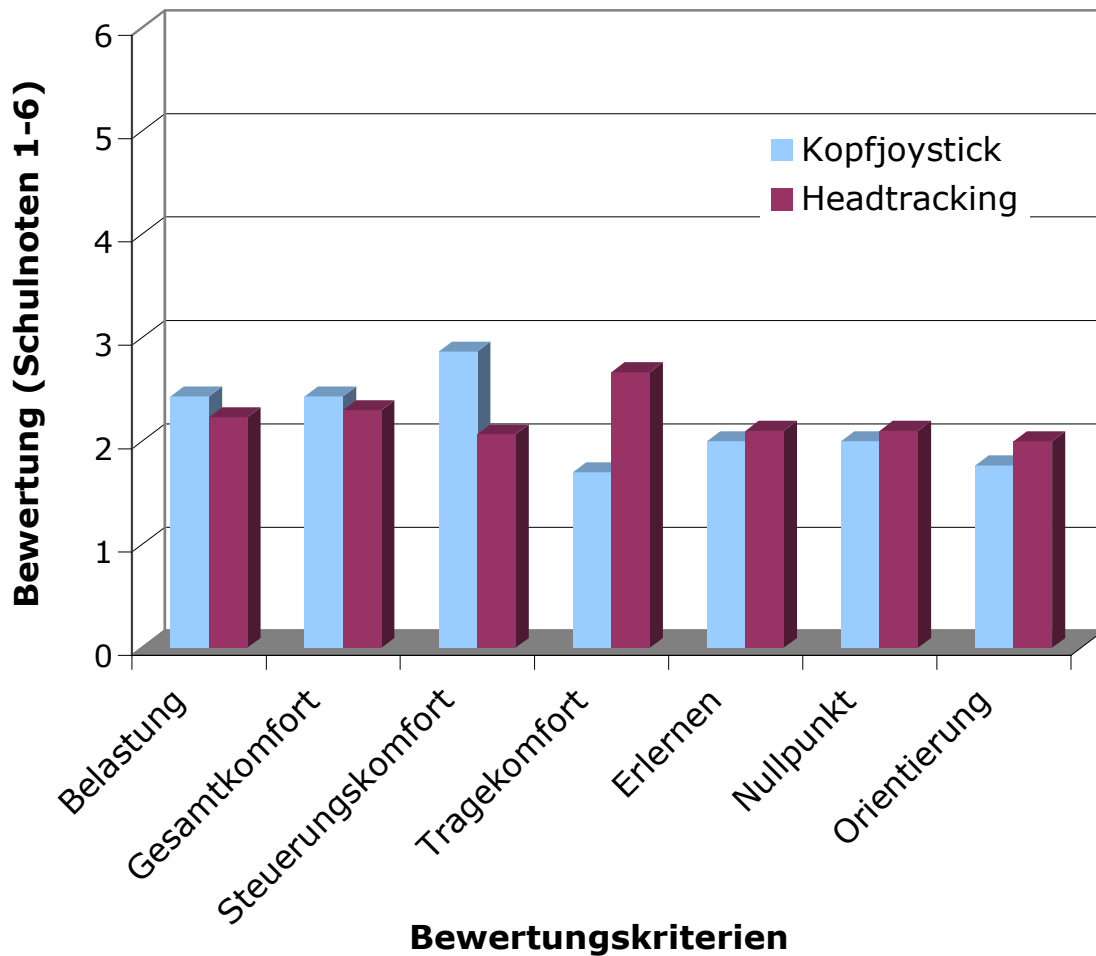


Abbildung 36: Bewertung von Head Tracking und Kopfjoystick nach dem zweiten Versuchsdurchgang

Die Radiochemiker unter den Versuchspersonen hingegen waren begeistert vom Kamerasystem. Sie kennen die derzeitige Situation an der Heißen Zelle mit den Problemen aufgrund des Bleiglasfensters und können die Verbesserungen und den Mehrwert durch das Kamerasystem am besten beurteilen. Sie waren vor allem vom sehr guten Bild des Arbeitsbereichs überzeugt, das nach ihren Aussagen deutlich besser ist, als beim Bleiglasfenster. Auch die Zoomfunktion wurde von vielen als deutliche Bereicherung gesehen. Die Radiochemiker bestätigten, dass es oft erforderlich ist, Komponenten in der Heißen Zelle genauer zu betrachten. Bei den Eingabegeräten fällt die Wahl der Radiochemiker mit 4 zu 1 Stimmen eindeutig zugunsten des Head-Tracking-Systems aus. Alle befragten Radiochemiker konnten sich vorstellen, mit dem immersiven Kamerasystem anstelle des Bleiglasfensters zu arbeiten.

Ergebnisse für die Zoomsteuerung

Bezüglich der Steuerung der Zoomfunktion lassen die Versuchsergebnisse eine klare Aussage zu. Die Fußtaster sind dem Fußpedal in Bezug auf Zeiten und Fehleraten klar überlegen und deshalb zu bevorzugen. Auch bei der subjektiven Beurteilung liegen die Fußtaster in der Gunst der Versuchspersonen vorne. Diese positiven Versuchsergebnisse zeigen außerdem, dass die Trennung von Zoomsteuerung und Steuerung der Kamerabewegung die richtige Entscheidung ist.

5.5 Fazit und Gestaltungsempfehlung

Mit den Versuchen konnte gezeigt werden, dass ein immersives Kamerasystem eine interessante Alternative zum Bleiglasfenster darstellt und großen Nutzen bietet. Vor allem die enorme Erweiterung des Sichtfeldes sowie die Zoom-Funktion bringen einen deutlichen Mehrwert für die Arbeit in der Heißen Zelle. In Kombination mit einer immersiven Steuerung, die sowohl mit dem vorgestellten Kopf- bzw. Kinnjoystick als auch mit dem entwickelten Head-Tracking-System realisierbar ist, steht ein Kamerasystem zur Verfügung, das den Produktionsmitarbeitern die erforderlichen Rahmenbedingungen für eine ideale Erfüllung der Aufgaben zur Verfügung stellt. Die überaus positive Bewertung des immersiven Kamerasystems vor allem durch die Radiochemiker ist eine besondere Bestätigung des gewählten Ansatzes. Einen wesentlichen Beitrag zu einer zeitnahen Umsetzung liefert auch die Ausrichtung auf kostengünstige Lösungen und Geräte, die sich als richtiges Konzept erwies. Auch wenn kleinere technische Defizite die Bedienung beeinträchtigten, zeigen die Versuchsergebnisse deutlich, dass mit den realisierten kostengünstigen Ansätzen bereits gut gearbeitet werden kann. Die Option eines Wechsels zu höherwertigeren Geräten ist vorhanden. Es ist zu empfehlen, in folgenden Arbeiten die Technologie weiter zu verfeinern und unter anderem den Gebrauch über eine längere Periode zu untersuchen. Beispielsweise bei der Videobrille werden diesbezüglich Probleme erwartet, da verfügbare Geräte technisch noch nicht ideal sind und neben mangelndem Tragekomfort für ein unangenehmes Gefühl bis hin zur Übelkeit verantwortlich sein können (NAPFLIN & MENOZZI 1998, HETTINGER & RICCIO 1992).

Sowohl das Head-Tracking-System als auch der Kopf-Joystick der zweiten Versuchsreihe sind für die Steuerung des Kamerasystems zur Substituierung des Bleiglasfensters geeignet. Da sich die Qualitäten der zwei Optionen aber je nach Aufgabentyp unterscheiden, wird empfohlen, vor der Auswahl das Aufgabenspektrum zu analysieren. Bei stationären Arbeiten, für die ein ruhiges Bild und nur ein geringer Fahrweg erforderlich ist, ist der Kopf- bzw. Kinnjoystick zu empfehlen. Bei

häufigen und weitläufigen Bewegungen ist das Head-Tracking-System im Vorteil, wobei dieser Ansatz in der subjektiven Bewertung generell etwas besser bei den Versuchspersonen abschnitt. Für die Steuerung des Kamera-Zooms werden zwei einzelne Fußtaster empfohlen. Nachdem die zwei Konzepte mit relativ geringen Kosten umgesetzt werden können, ist auch zu prüfen, ob den Produktionsmitarbeitern an der Heißen Zelle beide Eingabegeräte zur Verfügung gestellt werden sollten, um optimale Rahmenbedingungen für alle Anwender und für sämtliche Aufgabentypen schaffen zu können.

6 Augmented-Reality-Unterstützung in Heißen Zellen

6.1 Überblick über das Kapitel

Inhalt dieses Kapitels ist eine detailliertere Betrachtung der Unterstützung der Produktionsmitarbeiter an Heißen Zellen auf der Basis der Augmented-Reality-Technologie. Dies ist die zweite wesentliche Komponente des in Kapitel 4 vorgestellten Konzeptes eines Assistenzsystems für Heiße Zellen. Im Vordergrund stehen Gestaltungskonzepte für Unterstützungsfunktionen, die auf den Möglichkeiten von Augmented Reality basieren. Die im Rahmen der Überlegungen und der Versuche mit den exemplarisch realisierten Assistenzfunktionen (Abschnitt 6.4) gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend in Gestaltungsempfehlungen (Abschnitt 6.6) zusammengefasst.

6.2 Gestaltungsansätze für die AR-Unterstützung

6.2.1 Optimale Informationsversorgung

6.2.1.1 Allgemeines

Die Unterstützung der Produktionsmitarbeiter an der Heißen Zelle mit der AR-Technologie wird im Wesentlichen durch eine bestmögliche Versorgung mit Informationen erreicht. Die Herausforderung für die Entwicklung eines Assistenzsystems besteht darin, die Variablen des AR-Systems optimal für die Nutzer anzuwenden, zu gestalten und evtl. zu kombinieren. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die wichtigsten Freiheitsgrade des AR-Systems für die Heiße Zelle.

Variable	Beispiele
Inhalt der Information	Anweisung, Statusanzeige, Hervorhebung, Zusatzinformation
Art der Darstellung	Bild, Text, Video, Symbole
Zeit	Zeitpunkt, Dauer, Häufigkeit
Ort	Bildschirmfixiert („display-fixed“), ortsfixiert
Art und Weise	Farbe, Größe, zeitliche Abfolge (z. B. in mehreren Schritten wie bei der Anleitung oder blinkend), etc.

Tabelle 4: Variablen eines AR-Systems und Beispiele

Augmented Reality zeichnet sich vor allem durch die Darstellungsmöglichkeiten aus. Informationen, die den Produktionsmitarbeitern sonst nicht zugänglich sind, werden direkt in ihr Blickfeld eingeblendet. Dabei wird zwischen der ortsfixierten und der bildschirmfixierten, der sogenannten „Display-fixed“-Darstellung unterschieden.

Ortsfixierung wird für Informationen verwendet, die ortsfest sind, bzw. die an bestimmte Anlagenkomponenten gebunden sind. Daher sind die Informationen an kleine Symbole, die sogenannten Marker, in der Anlage gekoppelt (siehe Abschnitt 6.2.3). Wenn die Komponente mit dem Marker aus dem sichtbaren Bereich verschwindet, wird auch die Information nicht mehr eingeblendet. Diese automatische Selektion erlaubt bei einer passenden Anordnung der Marker die Darstellung einer großen Anzahl an Informationen, ohne das Bild zu überfrachten und die Benutzer zu überfordern, da sie nur dann sichtbar sind, wenn sie benötigt werden. Außerdem können durch die Zuordnung intuitiv Zusatzinformationen vermittelt werden.

Bei der „Display-fixed“-Darstellung bleibt die Information ständig im Blickfeld der Nutzer an derselben Stelle eingeblendet. Sie wird eingesetzt, um beispielsweise Informationen permanent zugänglich zu machen oder an etwas zu erinnern. Durch diese beiden Arten der Darstellung kann den Anwendern eine klare Zuordnung gegeben werden. Ortsfixierte Informationen gehören zu den jeweiligen Komponenten, die anderen sind eher übergeordnet und sollen im Auge behalten werden.

Das Bestreben nach einer optimalen Gestaltung der Informationsversorgung zieht sich durch die gesamte Konzeption des AR-Systems. Dieser Aspekt steht auch bei jeder Funktion im Vordergrund. Aufgrund der deutlichen Unterschiede beim Realisierungsaufwand und den Anwendungsmöglichkeiten muss zwischen der statischen und der dynamischen Informationsversorgung unterschieden werden.

6.2.1.2 Statische Informationsversorgung

Die statische Bereitstellung von Informationen beschränkt sich im Gegensatz zur dynamischen auf die Darstellung statischer und vor der Anwendung vorbereiteter Informationen. Es existiert keine Verbindung zu Messgeräten oder zur Anlagensteuerung, über die aktuelle Daten weitergegeben oder Aktionen ausgelöst werden könnten. Für die Realisierung ist daher nur geringer Aufwand erforderlich und diese Funktionalität ist bereits bei einfachsten AR-Systemen verfügbar. Die Darstellung kann in Form von Texten, Bildern, Symbolen oder Videos erfolgen. Beispiele für statische Informationen, welche die Arbeit in der Heißen Zelle erleichtern können, sind Übersichtspläne der Anlage, beispielsweise bezüglich der Verkabelung der

Komponenten bzw. der Verlegung der Schläuche zwischen den Ventilen. Auch zusätzliche Informationen zu den Komponenten, wie Typ, Funktion in der Anlage und Hintergrundwissen zur Technologie können eingeblendet werden (siehe Abbildung 37). Dies hilft neuen wie erfahrenen Mitarbeitern, sich in der Anlage zurechtzufinden und vermindert die Gefahr von Verwechslungen und Fehlern. Besonders bei den meist in größerer Anzahl verwendeten chemischen Säulen sind Daten wie Inhaltsstoffe sowie minimales und maximales Füllstandsniveau von Interesse. Außerdem kann eine Historie zu den Komponenten, wie ihr Alter oder das Datum der letzten Wartung, eine Entscheidungshilfe für den Austausch geben. Speziell beim Umbau der Anlage sind komponentenbezogene Informationen wie die Art der Befestigung sowie Typ, Anzahl und Position der Schrauben und das benötigte Werkzeug nützlich, um Montage- oder Austauscharbeiten schnell durchführen zu können.

6.2.1.3 Dynamische Informationsversorgung

Durch die Anzeige dynamischer Informationen mit Augmented Reality eröffnen sich zusätzliche Unterstützungsmöglichkeiten. Beispielsweise können Messwerte zugänglich gemacht werden, die das Verhalten der Produktionsmitarbeiter maßgeblich beeinflussen, z. B. aktuelle Strahlungswerte in der Heißen Zelle. Hilfreich ist auch die Anzeige von sich verändernden Prozessgrößen, wie der Temperatur der Heizer oder der Dauer eines Vorgangs. Mit AR können diese Werte in Echtzeit eingeblendet und relevanten Orten zugeordnet werden. Dadurch sind die wesentlichen Einflussgrößen im Blickfeld, so dass die Produktionsmitarbeiter gleich reagieren können. Der Aufwand hierfür ist deutlich höher als bei statischen Informationen, da eine Verbindung zu den jeweiligen Geräten und Anlagenkomponenten erforderlich ist. Außerdem müssen die dynamischen Informationen fortwährend abgefragt und verarbeitet werden, da sie sich ständig verändern. Mit einem AR-System sind die wesentlichen Grundlagen hierfür bereits vorhanden.

6.2.2 Funktionen des Assistenzsystems

6.2.2.1 Allgemeines

Das Assistenzsystem ermöglicht eine große Vielfalt an Funktionen, welche die Arbeit in der Heißen Zelle unterstützen und dadurch erleichtern können. Abbildung 37 zeigt in komprimierter Darstellung eine Auswahl denkbarer Anwendungen, die in den folgenden Abschnitten exemplarisch vorgestellt werden.

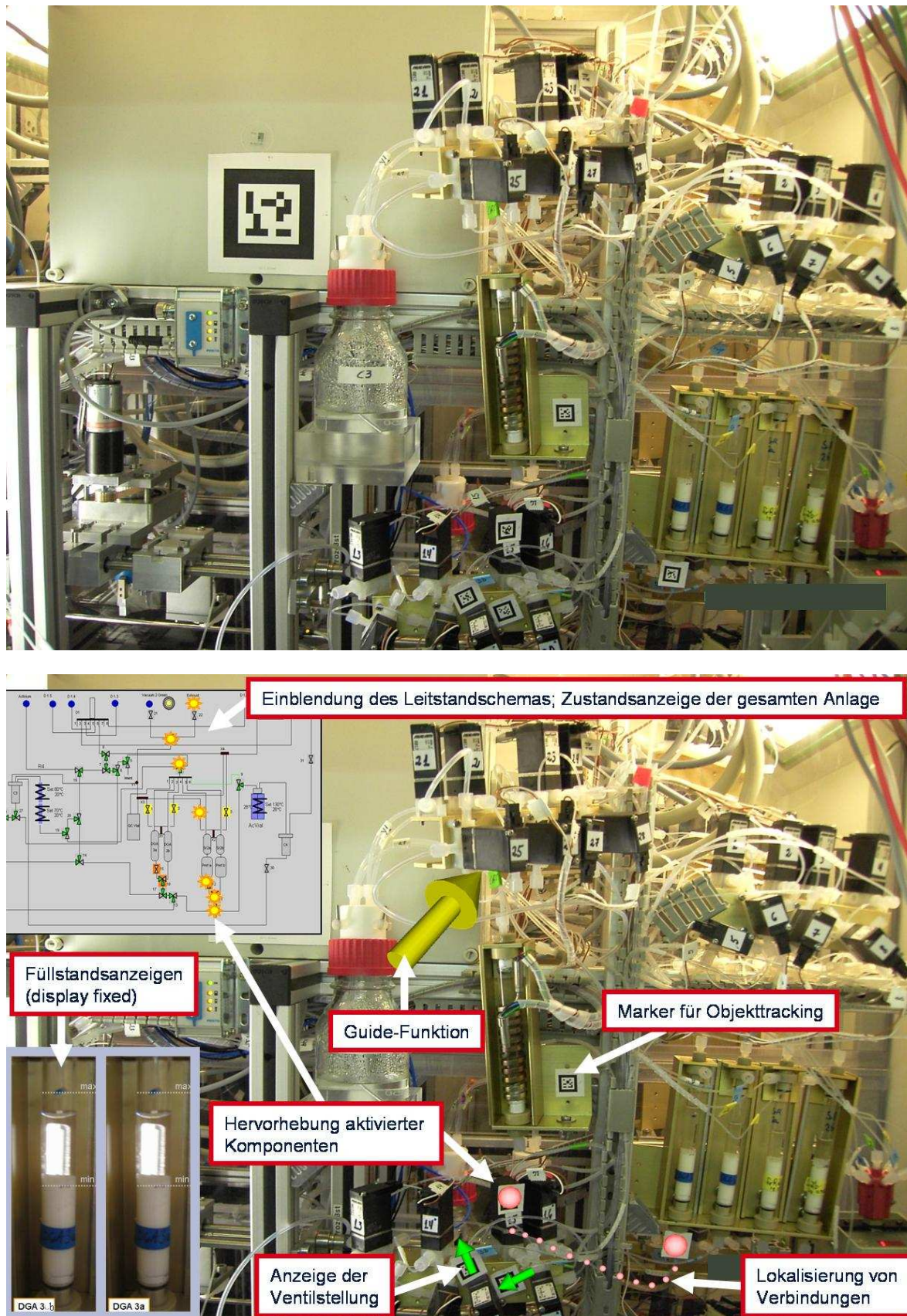


Abbildung 37: Oben: Kamerablick auf die komplexe Produktionsanlage mit AR-Markern; unten: Eine Auswahl möglicher AR-Anwendungen für die Heiße Zelle in komprimierter Darstellung

Es sollen das große Potential und der vielfältige Nutzen dieser Technologie verdeutlicht sowie ein Überblick über die zahlreichen Unterstützungsmöglichkeiten gegeben werden. Zur Darstellung wurde das konkrete Beispiel der Produktion des Isotops Actinium-225 ausgewählt (siehe Abschnitt 2.2.6.2), da sie eine besondere Herausforderung darstellt und die Möglichkeiten von AR mit ihr daher ideal verdeutlicht werden können. Die exemplarisch aufgezeigten Optionen sind aber auch als Vorbild und Anregung für andere Anwendungsfälle gedacht.

6.2.2.2 Zusammenhänge aufzeigen und Orientierung vereinfachen

Die Anlagen in den Heißen Zellen sind oft umfangreich und unübersichtlich. Das AR-System kann den Produktionsmitarbeitern helfen, sich in den komplexen und teilweise verwirrend anmutenden Aufbauten (siehe Abbildung 37 oben) zurechtzufinden. Von Vorteil ist bereits, wenn ein Bild mit dem schematischen Anlagenaufbau eingeblendet wird. In Abbildung 37 wurde beispielsweise der Anlagenplan für den Leitstandsrechner verwendet, an welcher der Betriebszustand angezeigt wird. Dies erleichtert es den Produktionsmitarbeitern erheblich, die Komponenten in der Heißen Zelle einander zuzuordnen, ihre Funktion zu verstehen und Zusammenhänge zu sehen. Durch eine Verbindung zum Leitstandsrechner bzw. zur Steuerung der Produktionsanlage kann ihr aktueller Zustand sichtbar gemacht werden, was bei der Erfüllung der Aufgaben von Vorteil ist. Hilfreich für die Produktionsmitarbeiter ist beispielsweise zu wissen, welche Anlagenkomponenten im Moment aktiviert sind, da damit die Programmierung der zahlreichen Fluidikventile überprüft werden kann. Abbildung 37 zeigt hierfür beispielhaft kleine Sterne im Leitstandschemata, die zusätzlich blinken können.

Komfortabler als die Darstellung sämtlicher Daten in einem Bild ist die lokale, komponentenbezogene Informationsbereitstellung. Es ist ein besonderer Vorteil der AR-Technologie, dass Informationen wie der aktuelle Status oder die Fließrichtung der Flüssigkeit direkt am elektrischen Ventil angezeigt werden können (siehe Abbildung 37 unten „Anzeige der Ventilstellung“). Eine aufwandsarme, aber nützliche Anwendung ist beispielsweise die Markierung einzelner Anlagenkomponenten mit einem virtuellen Punkt (siehe Abbildung 37 unten „Hervorhebung aktivierter Komponenten“), einem Kreis oder einem anderen Symbol, um sie schneller lokalisieren und sie leicht wieder finden zu können. AR-Einblendungen tragen entscheidend dazu bei, die Übersicht zu verbessern, indem sie beispielsweise einen ganzen Zweig der Chemieanlage hervorheben, dessen Funktion überprüft werden muss. Dadurch werden zusammenhängende Komponenten deutlich und das Verständnis der Abläufe vereinfacht. Durch die Kopplung mit der Anlagensteuerung und die

Hervorhebung der aktuell aktiven Komponenten direkt in der Anlage kann schnell ein Überblick über die momentanen Vorgänge gegeben werden, was bei der Erfüllung der Aufgaben hilfreich ist. Dies erleichtert und beschleunigt beispielsweise die unangenehme Suche nach undichten Stellen im komplexen Fluidiksystem. Die Anlagenkomponenten sind für diesen Zweck mit Markern versehen, die nach Bedarf aktiviert werden, so dass die Identifikation der an diesem Zweig beteiligten Komponenten möglich ist. Zur Markierung sind beispielsweise farbige Punkte ausreichend. Auf der Basis der Marker an den Komponenten kann auch die ungefähre Lage der sie verbindenden Kapillarschläuche dargestellt werden (siehe Abbildung 37 „Lokalisierung von Verbindungen“).

6.2.2.3 Warnung vor Gefahren

Eine Produktionsanlage für radioaktive Stoffe birgt vielfältige Gefahren für die Produktionsmitarbeiter bei der Durchführung ihren manuellen Tätigkeiten. An vorderster Stelle steht die radioaktive Strahlung, deren schädliche Wirkung auf den menschlichen Körper im Wesentlichen von der Expositionsdauer, vom Abstand zur Strahlenquelle sowie von der Strahlungsart und der Intensität abhängt. Die beiden letztgenannten Faktoren können nicht geändert werden, das AR-System bietet aber die Möglichkeit, davor zu warnen und die Strahlung quasi sichtbar zu machen. Bezüglich des Abstandes kann das AR-System positiv wirken, indem es den Ort der Strahlenquelle anzeigt. Dies gibt den Produktionsmitarbeitern die Möglichkeit, sich vorausschauend in der Heißen Zelle zu verhalten und strahlende Bereiche zu meiden. Da der Mensch kein gutes Gefühl für die Zeit hat, ist es hilfreich, mit dem AR-System über die Aufenthaltsdauer der Hände in der Heißen Zelle zu informieren (siehe Abbildung 38), evtl. auch in Form eines Countdowns. Der Zeitdruck ist damit trotzdem noch vorhanden, aber die Unsicherheit wird gemindert.

Neben der radioaktiven Strahlung stellen zusätzlich spitze und scharfkantige Gegenstände oder heiße Komponenten wie Heizer eine Gefahr dar. Bei einer Beschädigung der Handschuhe wird die hermetisch abgeschlossene Atmosphäre zerstört und es besteht neben der Verletzungs- auch noch Kontaminationsgefahr. Die Produktionsmitarbeiter müssen daher einen Teil ihrer Aufmerksamkeit auf ihre eigene Sicherheit verwenden. Das Assistenzsystem kann sie hierbei entlasten, indem es Warnungen vor potentiellen Gefahren gibt, so dass sich die Produktionsmitarbeiter mehr auf ihre Hauptaufgaben konzentrieren können. Ein Assistenzsystem, das selbständig warnt, ist außerdem eine große Verbesserung für Personen, welche die Anlage nicht gut kennen, die aber dennoch ihre Aufgaben zuverlässig ausführen müssen und dabei den Gefahren ausgesetzt sind.

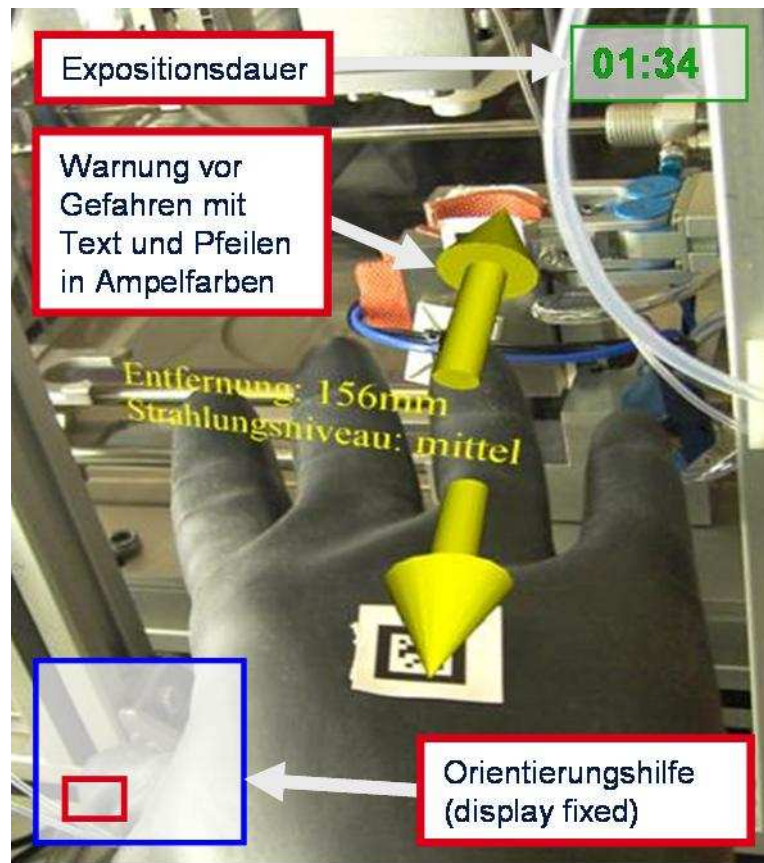


Abbildung 38: Warnung vor Gefahr, Anzeige der Expositionsdauer und Orientierungshilfe

Die Realisierung der Strahlungsvisualisierung ist in mehreren Stufen denkbar, da bereits eine einfache Ausführung deutlichen Nutzen bringen kann: Um vor lokal begrenzter radioaktiver Strahlung zu warnen, reicht es zunächst aus, den betroffenen Bereich zu markieren, indem beispielsweise an dieser Stelle ein virtuelles Warnsymbol angezeigt wird. Dadurch werden die Produktionsmitarbeiter permanent an die Strahlung und den betreffenden Ort erinnert, was bereits eine Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik darstellt. Bei der Gestaltung der Warnung bietet das AR-System fast unbegrenzte Möglichkeiten. Zusätzlich zu visuellen Zeichen wie Symbolen, Farben, der Größenänderung von eingeblendeten virtuellen Objekten und Lichteffekten sind auch akustische Signale realisierbar. Durch die Kopplung des Assistenzsystems mit Strahlungsmessgeräten kann der Wert der aktuellen Strahlendosis zur Verfügung gestellt werden. In dieser Realisierungsstufe ist es möglich, das Warnsymbol erst bei Überschreitung eines kritischen Grenzwerts einzublenden.

Ideal ist eine Warnfunktion, die sich nur bei Bedarf aktiviert, z. B. wenn die Hand einem radioaktiven Bereich zu nahe kommt oder sich zu lange dort aufhält. Hierfür ist es erforderlich, die Position der Hand zu erfassen und den Abstand zur Gefah-

renquelle zu bestimmen. Das Sicherheitssystem kann genutzt werden, um aus den ermittelten Daten wie Abstand, Aktivität der Strahler und Aufenthaltsdauer die Strahlungsexposition zu ermitteln und bei Erreichen der zulässigen Handdosis eine Warnung auszugeben (siehe Abbildung 38). Für die technische Realisierung bietet sich optisches Tracking an, wobei die Hand mit einem Marker versehen werden muss. Aufgrund der engen Platzverhältnisse in der Heißen Zelle und des beschränkten Blickfeldes von Kameras ist zur Positionserfassung der Hand mindestens eine zusätzliche Kamera erforderlich. Der Aufwand für ein solches Positionserfassungssystem ist beträchtlich, allerdings kann dadurch das Sicherheitsniveau weiter erhöht werden.

6.2.2.4 Navigationsunterstützung

Aufgrund der Tatsache, dass die Betrachtung eines begrenzten Sichtbereichs der Kamera oft ähnliche Bilder der Anlage zeigt, kann es bei der Arbeit in der Heißen Zelle zu Orientierungsproblemen kommen. Dies ist besonders dann der Fall, wenn mit der Zoom-Funktion der sichtbare Bereich weiter eingeschränkt wird. Als Abhilfe lässt sich mit AR im Bildschirm beispielsweise ein Rahmen mit einem Kästchen einblenden, wobei der Rahmen die gesamte Heiße Zelle symbolisiert und das Kästchen die Größe sowie die Position des sichtbaren Bereichs darstellt (siehe Abbildung 38). So sehen die Produktionsmitarbeiter mit einem Blick, wo sie sich in der Zelle befinden. Zusätzlich kann beispielsweise mit Pfeilen auf Bereiche verwiesen werden, die mit der Aufgabe in Zusammenhang stehen.

6.2.2.5 Anleitung geben

Die Produktionsmitarbeiter müssen mit einer großen Bandbreite an verschiedenen Aufgaben zurechtkommen, die nur selten wiederholt werden. Dadurch kann sich kaum Routine einstellen. Einige Aufgaben bestehen aus einer großen Anzahl an verschiedenen Arbeitsschritten, die präzise durchzuführen sind. Bisher müssen sich die Produktionsmitarbeiter auf die Aufgaben vorbereiten und sich beispielsweise die Schritte einprägen. Unter anderem durch die psychische Belastung aufgrund der radioaktiven Strahlung besteht die Gefahr, Schritte zu vergessen oder sie falsch auszuführen. Die räumlichen und zeitlichen Einschränkungen in der Heißen Zelle verhindern, dass die Produktionsmitarbeiter in einer Anleitung oder einem Handbuch nachsehen können. Das AR-System kann hier helfen, indem es den Anwendern speziell aufbereitete Anweisungen zeitlich und örtlich optimal zur Verfügung stellt, mit denen beispielsweise die Montage- oder Wartungsaufgaben korrekt durchgeführt werden können. Diese Unterstützung ist sowohl für neue als auch für

erfahrene Produktionsmitarbeiter sinnvoll, da sie ihnen ein Gefühl von Sicherheit gibt und den Komfort erhöht.

Besonders der chemische Teil der Anlage stellt das Personal vor Herausforderungen. Hier sind in der Regel besonders viele Wartungsarbeiten durchzuführen, da eine größere Anzahl der Komponenten von Zeit zu Zeit ausgetauscht werden müssen. Dabei sind viele Aspekte zu beachten, beispielsweise darf keine Flüssigkeit verloren gehen und die Arbeitsumgebung kontaminieren. Dazu sind vor- und nachgelagerte Ventile zu schließen. Nach dem Austausch muss Leckfreiheit garantiert und die Funktion sichergestellt sein. Erschwerend ist die Komplexität der Anlage.

Das Assistenzsystem auf Basis des Augmented-Reality-Systems kann in vielen Formen realisiert werden. Zum schnelleren Auffinden des zu wechselnden Bauteils ist beispielsweise eine optische Hervorhebung von Vorteil. Anschließend kann den Produktionsmitarbeitern Schritt für Schritt eine Anleitung in Textform gegeben werden, wobei diese idealerweise über einen Taster im Fußraum oder einen Schalter für die Hand im Arbeitsbereich das Signal für die nächste Information auslösen. Als Alternative oder als Zusatzinformation kann ein Bild vom angestrebten Endzustand angezeigt werden. Mit der Einblendung eines Videos ist es möglich auch, den einwandfreien Ablauf der erforderlichen Handlungen zu zeigen.

6.2.2.6 Unterstützung von Außen

Unterstützung bei regulärem Betrieb

Es ist davon auszugehen, dass verschiedene Personen an der automatisierten Anlage arbeiten. Das können zum einen Radiochemiker sein, die den chemischen Teil der Anlage entwickelt haben und Einstellungen oder Verbesserungsarbeiten vornehmen. Der automatisierte Teil wird in der Regel von Automatisierungsspezialisten konzipiert, realisiert und dann auch in Betrieb genommen. Danach übernehmen aus Kostengründen oft Operateure mit geringerer Qualifikation die anfallenden Aufgaben und versuchen die Vorgaben der Entwickler zu erfüllen.

Aufgrund der Abschirmung sind die Produktionsmitarbeiter bei ihrer Arbeit in der Heißen Zelle alleine und auf sich gestellt. Bei Problemen und auch bei schwierigen Aufgaben ist die Unterstützung von erfahrenen Kollegen hilfreich, die Ratschläge und Anweisungen geben können. Unter Umständen ist der Rat von Experten erforderlich. Wenn die Aufgaben nicht gemäß den Vorgaben ausgeführt werden können oder gar unvorhergesehene Ereignisse auftreten, müssen die Entscheidungsträger in der Regel zunächst über notwendige Schritte beraten und die weitere Vorgehens-

weise beschließen. Bei der Umsetzung ist eine Unterstützung des Ausführenden sehr hilfreich. Hierbei kommen die Qualitäten des Assistenzsystems zur Geltung:

Das immersive Kamerasystem bietet zunächst bereits den Vorteil, dass weitere Personen neben dem Operator überhaupt in den Arbeitsbereich sehen können. Dies ist die Grundlage für eine genaue Analyse der Situation und eine darauf aufbauende, fundierten Entscheidung. Das Kamerasystem ermöglicht zusätzlich eine genaue Inspizierung des betroffenen Bereichs mit der Zoomfunktion. Über eine Konferenzschaltung kann beispielsweise Kontakt zu Experten aufgenommen werden, die über die Kameras Informationen zur Situation und zu den Aktionen des Bedienpersonals bekommen und bei den Maßnahmen beraten können. Dadurch ist es möglich, auch Fachleute einzubinden, die sich nicht vor Ort aufhalten.

Über das Head Mounted Display können den Produktionsmitarbeitern Informationen und Anweisungen so eingeblendet werden, dass sie sie schnell verstehen und umsetzen können. Da die beratenden Personen über das Kamerasystem die Tätigkeiten verfolgen können, sind sie immer auf dem gleichem Informationsstand. Sie begleiten die Produktionsmitarbeiter bei ihrer Arbeit und geben ihnen dadurch ein beruhigendes Gefühl der Sicherheit, was der Ausführung der Tätigkeiten zugute kommt. Entscheidend ist auch die Darstellung der Informationen. Oft sind einfache virtuelle Objekte wie ein Pfeil (siehe Abbildung 37, S. 122) oder eine Hand mit ausgestrecktem Zeigefinger ausreichend, mit dem Experten von außen beispielsweise auf Dinge zeigen und Bewegungsrichtungen andeuten können.

Wenn das Zeigerelement zusätzlich mit einer Art Mal- oder Zeichenfunktion ausgestattet ist, können neben temporären Anweisungen auch bleibende Informationen generiert werden. Die unterstützende Person kann damit für den Produktionsmitarbeiter besondere Bereiche hervorheben, richtige Positionen aufzeigen und Objekte markieren. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind Anweisungen, die beispielsweise mit Pfeilen oder auch als kurzer Text ins Blickfeld oder in die Nähe der betroffenen Komponente geschrieben werden.

Unterstützung bei Notfällen

Bei der Arbeit mit radioaktiven Stoffen, vor allem in Verbindung mit automatisierten Anlagen, wird aufgrund des hohen Gefährdungspotentials und der großen Unwägbarkeiten versucht, jedes denkbare Ereignis vorherzusehen und Maßnahmen dafür vorzubereiten. Trotzdem bleiben Geschehnisse, die nicht berechenbar sind, oder bei denen der Aufwand der Vorbereitung zu groß ist. Oft handelt es sich bei diesen Spezialfällen um Notfälle, für die noch keine Lösungen existieren. Sie müs-

sen im Fall des Eintretens erst entwickelt werden. Vor allem in solchen Situationen ist Unterstützung von außen hilfreich und das Assistenzsystem kommt besonders zur Geltung, da die Unsicherheit und das Bedrohungsszenario zu einer hohen psychischen Belastung führen. Die Tätigkeiten in Notfällen sind in der Regel neu und ungewohnt. Die damit oft einhergehende Nervosität und Unsicherheit kann mit dem Assistenzsystem gedämpft werden, indem die Produktionsmitarbeiter umfangreiche Unterstützung erhalten. Das Sicherheitssystem trägt zusätzlich dazu bei, die Gefahr zu minimieren.

6.2.2.7 Unterstützung bei Schulung und Training

Die Funktionen des Assistenzsystems sind auch bei Schulungen und beim Einlernen von neuem Bedienpersonal von großem Nutzen. Sie ermöglichen optimale Lernbedingungen, die zur Verkürzung der Ausbildungszeit und zu einem höheren Ausbildungsstand beitragen können. AR verbessert vor allem die Darstellung des Lerninhalts, so dass dieser leichter erfasst und verstanden wird. Es ermöglicht eine multimediale Lernumgebung, in welcher die Handgriffe und Tätigkeiten beispielsweise in Form von Texten, Bildern, Videos und Simulationen vermittelt werden können. Besonders wertvoll ist die Option, Simulationen durchzuführen. Gerade beim Umgang mit radioaktiven Stoffen ist einerseits aufgrund des hohen Gefährdungspotentials der Bedarf an Notfalltrainings groß. Andererseits sind die Möglichkeiten für reale Übungen stark begrenzt. Eine Simulation ermöglicht die wirklichkeitsnahe Erprobung von Notfallstrategien anhand virtueller Gefahrenfälle an der realen Anlage. Die Ausbilder können die Handlungen von außen verfolgen und Anweisungen geben. Mit demselben Prinzip lassen sich, lange bevor die reale Anlage einsatzbereit ist, auch die notwendigen Aufgaben an einer virtuellen Anlage in der leeren Heißen Zelle durchspielen. Dadurch können Probleme frühzeitig erkannt und die Produktionsmitarbeiter über einen längeren Zeitraum auf ihre Aufgaben vorbereitet werden.

Das Assistenzsystem eröffnet in diesem Zusammenhang zudem Kosteneinsparungspotentiale: Da im Wesentlichen alle für die Erfüllung der Aufgaben erforderlichen Anweisungen und Informationen zur Verfügung gestellt werden, kann in gewissem Umfang auf Hilfskräfte mit einem niedrigeren Ausbildungsstand und geringerer Entlohnung zurückgegriffen werden. Dieser Aspekt hat auch positive Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der Anlage und die Zuverlässigkeit der Produktion: Da somit eine breitere Personenbasis für die Aufgaben zur Verfügung steht, reduziert sich die Abhängigkeit von kostspieligen Experten, die nicht immer und überall verfügbar sind.

6.2.2.8 Überwachung mit eingeblendeten Live-Bildern

Einige Bereiche im chemischen sowie im mechanischen Teil der Anlage erfordern eine permanente oder zeitweise Überwachung. Dies trifft beispielsweise auf die Chromatographiesäulen zur Separation der produzierten Stoffe zu, bei denen der Füllstand nicht unter einen minimalen Wert fallen darf, da sie sonst aufwändig ausgetauscht werden müssen. Einige Aufgaben sind zudem gleichzeitig zu erledigen. Manche Prozesse, wie die Verdampfung von Flüssigkeiten, erfordern so viel Zeit, dass weitere Tätigkeiten parallel durchgeführt werden können. Das Assistenzsystem ermöglicht es, die zu beobachtenden Bereiche mit einer oder mehreren fixierten Detailkameras (siehe Abbildung 39) zu überwachen und deren Bilder den Anwendern in die Videobrille einzublenden (KATO & BILLINGHURST 1999). Dadurch können diese die betreffenden Anlagenkomponenten permanent kontrollieren, während sie in der Zwischenzeit anderen Aufgaben nachgehen. Für diese Anwendung bietet sich eine „display-fixed“-Einblendung des Kamera-Bildes an, beispielsweise in einem Eck der Videobrille (siehe Abbildung 40 und Abbildung 37 unten „Füllstandsanzeigen“, S. 122). So kann der interessierende Bereich immer im Auge behalten werden und Veränderungen fallen sofort auf. Die Bilder können aber auch ortsfixiert in der Anlage dargestellt werden, so dass sie nur dann sichtbar sind, wenn sie sich im Blickbereich der Kamera befinden. Dies ist vor allem dann von Vorteil, wenn kleine, aber wichtige Bereiche durch eine vergrößerte Darstellung hervorgehoben und die Kontrolle vereinfacht werden soll. Für diese Funktion kann eine Detailkamera auf einem flexiblen Schwanenhals verwendet werden, die aus Redundanzgründen ohnehin vorhanden sein sollte (siehe Abschnitt 5.2.1.3, S. 68).

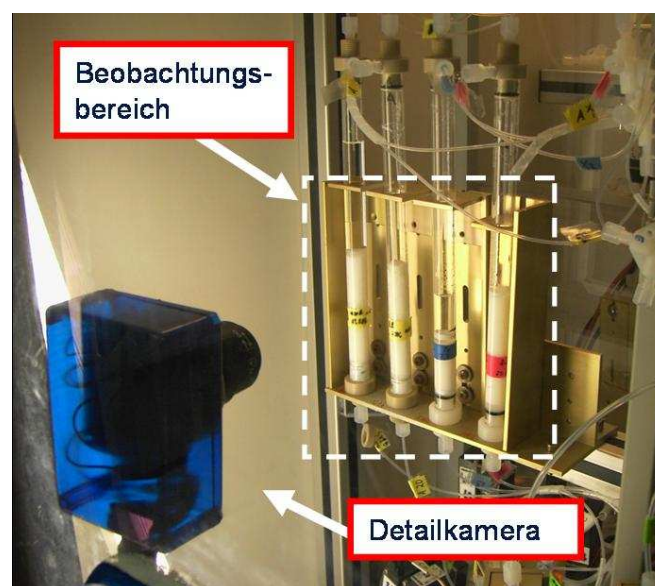


Abbildung 39: Detailkamera zur permanenten Überwachung kritischer Bereiche

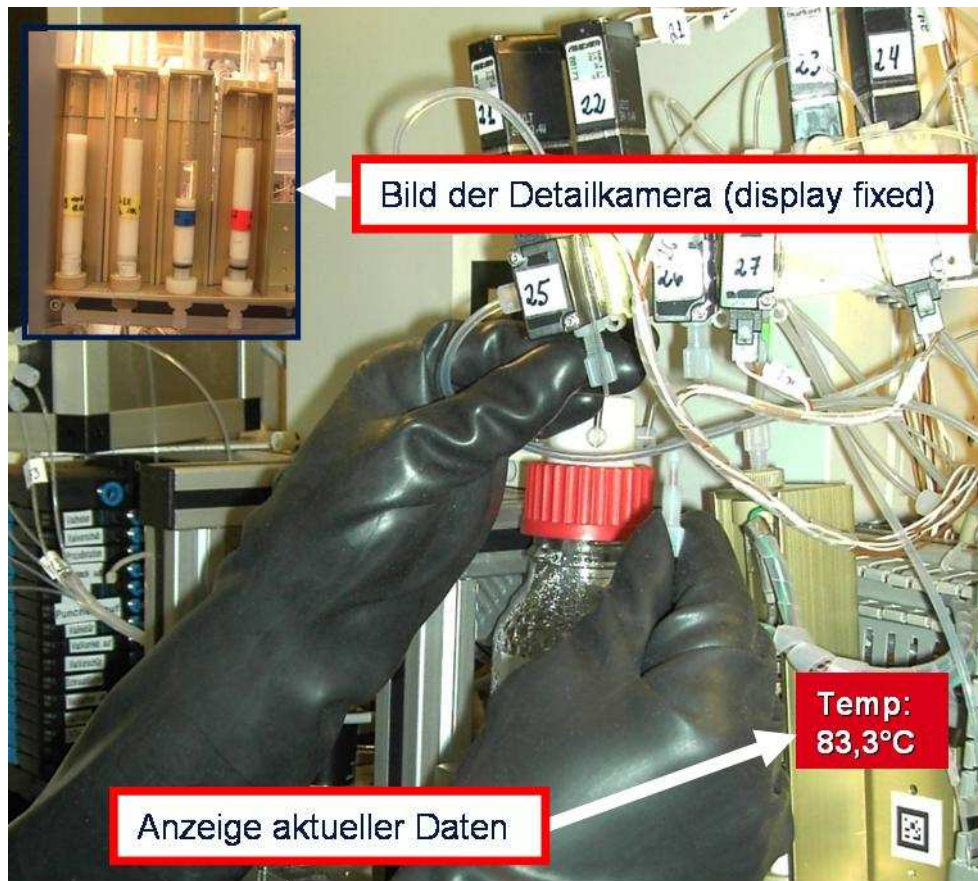


Abbildung 40: Einblendung des Kamerabildes in das Blickfeld der Produktionsmitarbeiter

6.2.2.9 Interaktion mit der automatisierten Anlage

Zur Steuerung automatisierter Anlagen werden in der Regel Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) verwendet. Die Aktoren und Sensoren sind über Kabel mit der SPS verbunden und führen programmierte Aktionen aus. Bei der Erstellung des Programms, bei der Inbetriebnahme, aber auch bei der Änderung oder der Hinzufügung weiterer Funktionen sowie für die Funktionskontrolle ist eine Interaktion mit der Steuerung erforderlich, beispielsweise, um das Programm in der realen Peripherie zu überprüfen. Bisher werden diese Schritte mit der Anlagensteuerung auf einem außerhalb der Zelle angeordneten, aber mit dieser verbundenen PC durchgeführt. Die vorherrschenden Rahmenbedingungen, wie die räumliche Trennung von Steuerung und Anlage, erschweren die Arbeit und erhöhen den Zeitbedarf hierfür. Dies gilt im Besonderen, wenn die Anlage in der Heißen Zelle, beispielsweise aufgrund von Funktionstests, bereits Kontakt mit radioaktiven Stoffen hatte und daher geschlossen gehalten werden muss.

AR ermöglicht eine Interaktion mit der SPS. ECKES (2007) verwendet beispielsweise AR, um den Anlaufprozess automatisierter Fertigungssysteme bei der Inbetrieb-

nahme zu unterstützen. Die Schnittstelle zwischen der SPS und dem AR-System basiert im Wesentlichen auf dem Programm PRODAVE von der Firma Siemens AG. Im Vordergrund steht das Auslesen von Daten der SPS, aber auch die Abänderung des Programms. Für eine SPS von Siemens steht zudem eine Dynamic-Link Library für die Kopplung von PC und S7-Steuerung via TCP/IP-Kommunikation mit Simatic S7 zur Verfügung. HERGENHAHN (2009) bietet eine frei verfügbare Open-Source-Programmiersbibliothek für die Kommunikation von SPS und AR-System über Ethernet im Internet an. Diese oder andere Programme können bei der Heißen Zelle eingesetzt werden, um vom Inneren aus über das AR-System mit der Produktionsanlage zu interagieren. Virtuelle Schalter auf der Basis der AR-Marker oder flexibel nutzbare Taster in der Zelle ermöglichen es den Produktionsmitarbeitern, Aktionen der Komponenten wie Einschalten der Heizelemente, Umschalten der Ventile oder Ausfahren von Pneumatikzylindern zu initiieren.

6.2.2.10 Erfahrungsbasiertes Assistenzsystem

Aufbauend auf der Möglichkeit der Informationsversorgung sind weitere Unterstützungsansätze denkbar: Durch die Kopplung mit einer computerbasierten Datenbank und die Darstellung der gespeicherten Informationen wird in der Heißen Zelle eine breite Wissensbasis verfügbar. Es bietet sich die Möglichkeit, eigene Erfahrungen mit Komponenten, Arbeitsschritten, Werkzeugen etc. zu dokumentieren, zu archivieren und über das Assistenzsystem bei Bedarf in der Arbeitsumgebung anzeigen zu lassen. Entscheidend ist, dass dadurch während der Arbeit auch die Nutzung von Erfahrung und Wissen anderer Mitarbeiter möglich ist sowie selbst Hinweise weitergegeben werden können. Auf dieser Basis können Fehler im Voraus vermieden werden. Am meisten profitieren davon junge Produktionsmitarbeiter oder solche, die selten an der Anlage arbeiten. Für die Weiterentwicklung der Anlage oder des Assistenzsystems ist Erfahrungswissen ebenfalls sehr nützlich. Sinnvoll ist in diesem Zusammenhang die Darstellung der Historie, zu der unter anderem das Datum der letzten Wartung, die Häufigkeit des Wechsels der Verschleißteile, die gemessenen Strahlungswerte, oder Probleme an bestimmten Anlagenteilen, die vermehrt auftraten, gehören. Erfahrungsunterstützte Systeme sind auch in der aktuellen Forschung im Fokus, insbesondere im Bereich der Produktion (ADAMI et al. 2008, KRENN & FLECKER 2000).

6.2.2.11 Automatische Dokumentation

Die Kamera des Assistenzsystems bietet die Möglichkeit, Videos und Fotos zu Dokumentationszwecken zu erstellen. Damit können beispielsweise kritische Akti-

onen der Produktionsmitarbeiter zeitsparend und ohne zusätzlichen Aufwand für die Personen aufgezeichnet und als Beleg für korrektes Vorgehen verwendet werden. Besonders bei medizinischen Produkten sind die Konsequenzen von Fehlern enorm. Daher werden verstärkt Systeme zum Nachweis einer fehlerlosen Produktion eingesetzt.

Zusätzlich können die Produktionsmitarbeiter während ihrer Arbeit in der Heißen Zelle Notizen zur Arbeit oder zur Anlage machen, beispielsweise bei der Wartung oder bei Servicearbeiten. Hierfür müssen im Rahmen des Assistenzsystems Eingabegeräte, wie eine kleine Tastatur oder ein Touchpanel, im Arbeitsbereich installiert oder die Aufzeichnung von Sprachinformationen, wie bei einem Diktiergerät, integriert sein. Auch AR bietet die Möglichkeit der Dateneingabe beispielsweise über eine virtuelle Tastatur oder einen virtuellen Stift, wobei hier noch viel Entwicklungsarbeit geleistet werden muss. Die Informationen könnten in Verbindung mit den betreffenden Komponenten gespeichert und in räumlicher Nähe dargestellt werden. Da die Notizen digital vorliegen, ist eine Weiterverwendung für die Dokumentation oder den Erfahrungsgewinn ohne großen Aufwand möglich.

6.2.2.12 Erweiterung

In den vorhergehenden Abschnitten wurden diejenigen Funktionen präsentiert, die nahe an der Anwendung sind, d. h. bei denen mit dem derzeitigen Stand der Technik bereits die Umsetzung möglich ist oder die mit absehbarem Aufwand verwirklicht werden können. Darüber hinaus sind Ansätze der Mitarbeiterunterstützung denkbar, die eher Visionen für die Zukunft darstellen, da die Realisierung noch nicht klar ist, der Aufwand zu hoch erscheint oder der Bedarf noch nicht erkannt wurde. Mit erfolgreicher Einführung des Assistenzsystems werden auch die Ansprüche steigen. Die AR-Technologie hat noch viel Potential. Vor allem als Schnittstelle zu anderen Geräten bieten sich weitere interessante Möglichkeiten. Der Idealzustand ist eine Kopplung an einen Computer, so dass die Produktionsmitarbeiter diesen während ihrer Arbeit verwenden können. Dadurch stehen eine Vielzahl an zusätzlichen Optionen zur Verfügung, wie ein Internetzugang oder Datenspeicher.

6.2.3 Tracking

6.2.3.1 Markerbasiertes optisches Tracking

Ein entscheidender Aspekt bei der Realisierung des AR-Assistenzsystems ist die Auswahl eines geeigneten Tracking-Konzeptes. Unter Tracking wird das Erfassen

sowie das Verfolgen von Position und Ausrichtung von Objekten verstanden. Es stehen zahlreiche Tracking-Technologien zur Verfügung, ihre Verwendung scheitert aber häufig an den besonderen Randbedingungen des betrachteten Anwendungsfalls. Magnetische Systeme (STATE et al. 1996a), die auf drei zueinander rechtwinklig angeordneten Magnetfeldern basieren, überzeugen beispielsweise durch eine hohe Genauigkeit und die Unabhängigkeit von Sichtbehinderungen. Problematisch ist, dass sie sensible Geräte wie Messgeräte beeinträchtigen können und selbst durch metallische Teile gestört werden (BLUTEAU et al. 2005), die im Zusammenhang mit dem Assistenzsystem in Form der Bleiwände der Heißen Zelle und der Aufbauten der Produktionsanlage in großer Zahl auftreten. Auch die anderen konventionellen Tracking-Methoden wie die Anwendung von GPS (THOMAS et al. 1998) oder von Ultraschall-Methoden (NEWMAN et al. 2001) kommen in radioaktiven Bereichen u. a. wegen der umgebenden Metallobjekte, mangelnder Stabilität, eines engen Tracking-Bereichs oder hoher Kosten nicht in Frage (SHIMODA et al. 2005). Bei der Suche nach geeigneten Ansätzen für den speziellen Anwendungsbereich standen daher optische Tracking-Verfahren im Vordergrund. Das attraktive Infrarot-Tracking-Verfahren auf der Basis reflektierender Kugeln, das im medizinischen Bereich Verwendung findet (BRAINLAB 2009), erscheint aufgrund möglicher Schäden an der speziellen Oberfläche durch in der Heißen Zelle auftretende Säuredämpfe eher ungeeignet. SHIMODA et al. (2005) und ISHII et al. (2005) empfehlen spezielle Barcode-Marker für die Verwendung von Augmented Reality zu Wartungszwecken in kerntechnischen Anlagen. Die Entwicklung bei der Tracking-Technologie tendiert zu Systemen, die ohne Marker auskommen und stattdessen die Umgebung erkennen (KLINKER et al. 2001, COMPORT et al. 2003).

Für das Assistenzsystem wurde markerbasiertes Tracking (KATO & BILLINGHURST 1999) ausgewählt, ein Konzept, das auf flächigen Markern basiert, die von einem optischen Bilderkennungsprogramm in Position und Lage erkannt werden. Besondere Vorteile dieses Systems sind die einfache Technik, die auch umhüllt von dicken Bleiwänden und unter den rauen Bedingungen einer Produktion für radioaktive Stoffe funktioniert, die relativ geringen Kosten sowie die optimale Verfügbarkeit und die damit bereits gesammelte umfangreiche Erfahrung (FISCHER et al. 2004a).

6.2.3.2 Gestaltung der Marker

Für die Marker des Assistenzsystems, die in der Anlage an relevanten Stellen angebracht werden, wären bildhafte Symbole oder Buchstaben von Vorteil, da sich die Produktionsmitarbeiter dann auch ohne das AR-System in der Heißen Zelle

zurecht finden könnten. Allerdings hat sicheres Tracking Vorrang. Daher sollten sich die Marker deutlich voneinander unterscheiden, damit keine Verwechslung auftritt. Die Erfahrung zeigt, dass bei Buchstaben diese Gefahr besteht. SHIMODA et al. (2005) schlagen Barcode als Markerbeschriftung vor und variieren außerdem die Form, die ansonsten in der Regel quadratisch ist: Durch die längliche Ausprägung können ihre Marker auch auf Schläuchen und Rohren angebracht werden, ohne überzustehen und zu stören.

6.2.3.3 Multimarkerkonzept aufgrund der Verdeckungsgefahr

Aufgrund der oftmals sehr beengten Platzverhältnisse in der Heißen Zelle und der Vielzahl an Bauteilen ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass Marker von Komponenten der Anlage verdeckt werden. Bereits die dünnen Kapillarschläuche, die in großer Zahl vorhanden sind und teilweise undefiniert im Raum verlaufen, können dazu führen, dass Marker nicht korrekt erkannt werden (siehe Abbildung 41). Zusätzlich befinden sich die Hände in der Heißen Zelle, die bei ihren Bewegungen ebenfalls zwischen Kamera und Marker geraten können. Der Blick der Produktionsmitarbeiter ist durch die fixierte Kamera auf eine Position beschränkt. Es ist nicht möglich, den Kopf bzw. die Kamera translatorisch zu verschieben, um Verdeckungen aufzulösen. Um die erforderliche Zuverlässigkeit des Assistenzsystems zu erreichen, wird ein Multimarkerkonzept vorgeschlagen. Es sieht die Verwendung mehrerer gleicher Marker vor, die an unterschiedlichen Positionen, aber in einem begrenzten Umfeld angebracht sind, so dass mit großer Wahrscheinlichkeit mindestens ein Marker optimal erkannt wird (siehe Abbildung 41).

6.2.3.4 Selektion durch unterschiedliche Markergrößen

Durch unterschiedliche Größen der Marker (siehe Abbildung 41) kann eine Selektion der Informationsversorgung in Abhängigkeit vom Kamera-Zoom erzielt werden: Da kleine Marker bei Weitwinkелеinstellung vom AR-System nicht erkannt werden, kann mit der Größe bestimmt werden, welche Information je nach Zoom und Betrachtungsebene für die Produktionsmitarbeiter sichtbar sein oder verborgen bleiben soll. Bei detaillierter Betrachtung eines Teilbereichs der Anlage verschwinden hingegen die großen Marker aus dem sichtbaren Bereich. Dann kommen die kleinen Marker zur Geltung, die entweder notwendige Information weiterhin sichtbar machen oder neue Informationen bieten, die besonders bei fokussierter Betrachtung relevant werden. Damit kann beispielsweise einer Informationsüberfrachtung entgegen gewirkt werden.

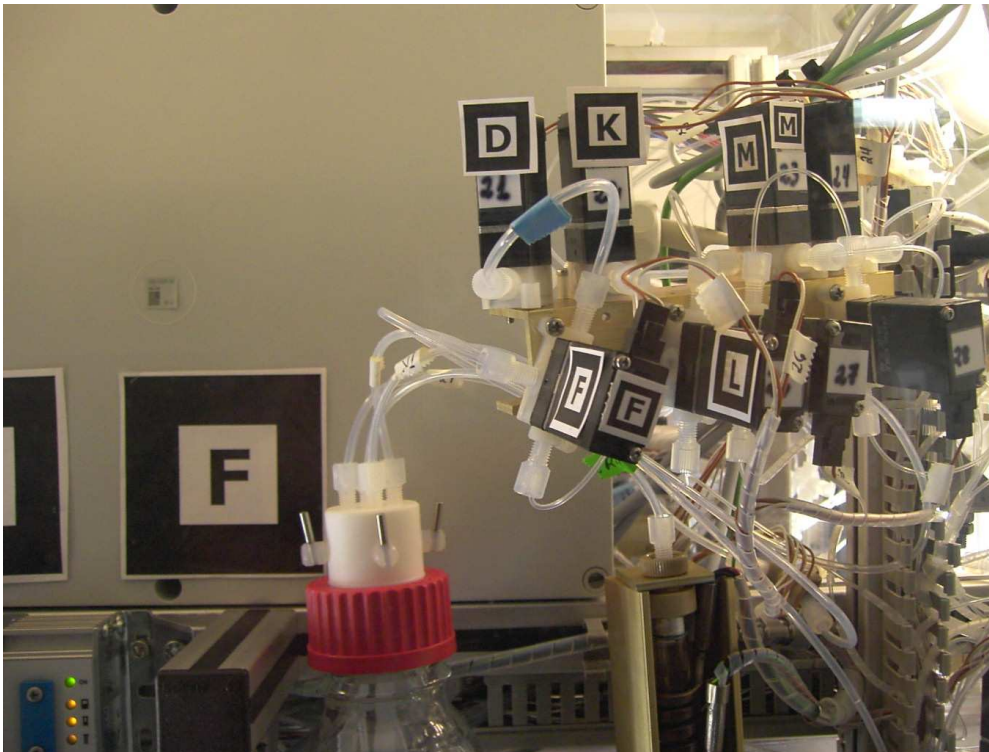


Abbildung 41: Multimarkerkonzept und unterschiedliche Markergrößen: Der Marker „F“ wird hier beispielsweise dreimal und in jeweils unterschiedlichen Größen verwendet. In diesem Fall wurden Marker in Buchstaben-Form eingesetzt.

6.2.3.5 Vorbereitung der Heißen Zelle

Beim Aufbau der Anlage ist oft noch nicht klar, welcher Bedarf an Unterstützung vorhanden ist und wie viele Marker an welchen Positionen benötigt werden. Außerdem können im Laufe der Verwendung weitere Komponenten und zusätzlicher Unterstützungsbedarf hinzukommen. Allerdings kann es sein, dass es nach einer bestimmten Betriebszeit und ab einem damit zusammenhängenden hohen Kontaminationsgrad nicht mehr zulässig ist, die Heiße Zelle zu öffnen. In diesem Fall müssen die Marker umständlich eingeschleust und mit den Handschuhen an die kleinen Flächen an der Anlage geklebt werden. Dies ist aufgrund des mangelnden Fingerspitzengefühls durch die Handschuhe, der meist kleinen Abmessungen der Marker, der begrenzten Bewegungsfreiheit in der Heißen Zelle sowie der radioaktiven Strahlung eine unangenehme und schwierige Aufgabe. Zudem sind die Marker besonders auch an Gefahrenherden angebracht. Das Konzept sieht daher vor, die Anlage auf den Einsatz von Augmented Reality vorzubereiten und wichtige Komponenten oder Anlagenbereiche von Anfang an mit einer größeren Anzahl an Markern auszustatten. Vor der Inbetriebnahme steht ausreichend Zeit für eine sorgfälti-

ge Anbringung zur Verfügung. Die einzelnen Marker können bei Bedarf über das AR-Programm aktiviert werden.

6.2.4 Gestaltung der Benutzerschnittstelle

6.2.4.1 Bedeutung der Mensch-Maschine-Schnittstelle

Neue Technologien erfordern eine sorgfältige Berücksichtigung der Eigenschaften des Menschen und der Problematik der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Der Erfolg neuer Technologien hängt mit der Fähigkeit der Entwickler zusammen, die Inkompatibilitäten zwischen der Charakteristik des Systems und der Charakteristik der Menschen, die das System bedienen, zu reduzieren (CASEY 1998). Die Bedeutung von gut gestalteten Bedienerschnittstellen für zuverlässige menschliche Leistung und Strahlensicherheit ist bekannt (IAEA 1999, MORAY & HUEY 1988, O'HARA 1994). Die Sicherheit hängt teilweise davon ab, wie weit die Gestaltung der Technologie die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler reduziert und die Chancen auf eine Fehlerbehebung verbessert bzw. inwieweit diese gegen unbemerkte menschliche Fehler abgesichert ist (WOODS et al. 1994). In mehreren Studien wurde die Bedeutung des "Menschlichen Faktors" bei der Einführung von unterstützender Computertechnologie in sicherheitskritischen Systemen hervorgehoben (LEE 1994, RAGHEB 1996). (COMMITTEE ON APPLICATION OF DIGITAL INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS TO NUCLEAR POWER PLANT OPERATIONS AND SAFETY 1997)

Beim Assistenzsystem für Heiße Zellen sind diesbezüglich zwei Aspekte zu betrachten: Die Schnittstelle des Assistenzsystems zum Nutzer während der Anwendung im Sinne der Informationsübermittlung und die Bedienung des Assistenzsystems selbst durch die Anwender.

6.2.4.2 Vermeidung von Informationsüberfrachtung

Die Anwendung von AR in der Heißen Zelle im Rahmen des Assistenzsystems ist durch zahlreiche und vielfältige Möglichkeiten gekennzeichnet. Die oben aufgezeigten Anwendungen stellen nur eine Auswahl dar. Für fast jedes Problem kann eine Lösung gefunden oder zumindest eine Verbesserung erzielt werden. Dies ist positiv, bringt aber auch die Herausforderung mit sich, die Vielfalt sinnvoll einzusetzen. Es ist erforderlich, die Anzahl der AR-Funktionen auf das für die Erfüllung der Aufgabe erforderliche Maß zu begrenzen, um eine Informationsüberfrachtung der Produktionsmitarbeiter und ein unübersichtliches Kamerabild zu vermeiden. Die Anwendung von AR stellt keinen Selbstzweck dar und sollte daher nur dann vorge-

nommen werden, wenn der Nutzen klar ist und der Benutzer damit gut zurechtkommt. Es ist daher realistisch, davon auszugehen, dass nur wenige Funktionen gleichzeitig zum Einsatz kommen, die je nach Aufgabe und Bedarf aktiviert werden. Wenn beispielsweise Wartungsarbeiten anstehen, ist es sinnvoll, nur die wartungsrelevanten Informationen einzublenden. Neben der anwendungsspezifischen Nutzung kann die Bereitstellung von Informationen auch problembezogen erfolgen, indem eine Warnung erfolgt, wenn beispielsweise der Abstand der Hand zu einer Gefahrenquelle einen Mindestwert unterschreitet oder die Strahlung zu hoch ist. Die Einstellung der Funktionen macht eine umfangreiche Konfiguration des AR-Systems erforderlich. Daher sollte die Bedienung des Assistenzsystems einfach sein.

6.2.4.3 Bedienung des Assistenzsystems

Es ist davon auszugehen, dass die Produktionsmitarbeiter der Produktionsanlage in der Regel keine AR-Experten sind und möglicherweise wenig Erfahrung mit der Konfiguration von Computersystemen haben. Das Assistenzsystem muss daher so einfach gestaltet sein, dass auch für solche Anwender eine einfache und sichere Verwendung möglich ist. Die Produktionsmitarbeiter sollten die von ihnen benötigten Funktionen für ihre Aufgabe selbständig aktivieren können. Zur vollständigen Nutzung der Möglichkeiten des Assistenzsystems sind in der Regel umfangreichere Kenntnisse erforderlich. Daher wird empfohlen, Computerexperten mit der Erstellung eines auf die speziellen Anforderungen zugeschnittenen Assistenzsystems und mit dessen Inbetriebnahme zu beauftragen. Das System sollte eine Eingabemaske als Benutzerschnittstelle bieten, über welche die erforderlichen Funktionen für die jeweiligen Tätigkeiten aktiviert und parametrisiert, d. h. mit den nötigen Einstellungen und Informationen versehen werden. Da andererseits auch im Bereich der Radiochemie der Einsatz computerbasierter Systeme, z. B. bei Messgeräten, ständig zunimmt, kann davon ausgegangen werden, dass Erfahrung und Kenntnisse der zukünftigen Anwender in diesem Bereich weiter zunehmen.

Wenn die Anwender das Assistenzsystem selbst einrichten, wird eine gewissenhafte Vorbereitung vorausgesetzt, welche aber ohnehin immer erforderlich ist, um Fehler und Risiken zu vermeiden. Bei der Gestaltung des Systems ist zu überlegen, welche Informationen während der Arbeit benötigt werden und mit welchen AR-Funktionen sie am besten visualisiert werden. Anschließend muss das System dementsprechend konfiguriert werden. Zusätzlich fallen Arbeiten bei der Installation und Wartung des Gesamtsystems an. Um die Gestaltung des spezifischen AR-Systems zu vereinfachen, werden Module oder Formulare empfohlen, welche die

Anwender unterstützen. Darüber hinaus muss eine geeignete Lösung dafür gefunden werden, wie die Funktionen aktiviert werden. Die Problematik der Bedienung des Systems sollte in weiteren Forschungsarbeiten näher untersucht werden. Die Fragestellung ist zu umfangreich, um sie im Rahmen dieser Arbeit zu betrachten.

6.3 Unterstützung über den gesamten Produktlebenszyklus

6.3.1 Allgemeines

Bei der bisherigen Betrachtung stand die Betriebsphase im Vordergrund, die den mit Abstand größten Anteil an der Lebensdauer einnimmt und der die größte Bedeutung zukommt. Die AR-Technologie kann in Verbindung mit einem Kamerasystem auch in den anderen Phasen des Produktlebenszyklus einer Heißen Zelle wertvollen Nutzen bringen und die Rahmenbedingungen verbessern, wie im Folgenden aufgezeigt wird.

6.3.2 Planungs- und Entwicklungsphase

In der Planungsphase kann das AR-System bei der Entwicklung des Konzeptes unterstützen, indem es die verschiedenen Varianten und Möglichkeiten auf der Basis der CAD-Daten virtuell visualisiert. Dadurch werden die Beurteilung der Machbarkeit und die Entscheidungsfindung bei der Auswahl der besten Lösung vereinfacht. Bereits in diesem frühen Entwicklungsstadium sind trotz der unzulänglichen Wissenslage und der damit verbundenen Unsicherheit Entscheidungen zu treffen, welche die Anlage wesentlich bestimmen und nur mit großem Zeitverlust und deutlichen Mehrkosten korrigiert werden können.

Heiße Zellen haben beispielsweise eine Lieferzeit von teilweise mehr als sechs Monaten und müssen daher frühzeitig bestellt werden. Das bedeutet, dass endgültige Angaben zu Abmessungen und zur Ausstattung erforderlich sind, obwohl sich die Produktionsanlage noch in der Planung befindet. Zu diesem Zeitpunkt muss unter anderem abgeklärt sein, dass der zur Verfügung stehende Platz in der Heißen Zelle ausreicht, dass die Position der Eingriffsöffnungen korrekt vorgegeben ist, dass alle Öffnungen für Zuführungen, Ableitungen und sonstige Transaktionen vorgesehen sind und dass diese am richtigen Platz sind. Bei der Beurteilung und Auswahl der Lösung werden auch erfahrene Produktionsmitarbeiter zu Rate gezogen. Das AR-System kann hierbei unterstützen, indem es ihnen ermöglicht, die virtuell dargestellte Heiße Zelle mithilfe der Videobrille genauer in Augenschein zu

nehmen. Dadurch können sie sich die Zelle besser vorstellen und bekommen einen realistischeren Eindruck. Auch die Außenabmessung und die Integration in die Peripherie sowie die anderen Teile der Produktionsanlage sind abzuklären. Dazu kann die Heiße Zelle virtuell in die reale Umgebung eingeblendet werden.

Bei der Entwicklung der Produktionsanlage treten ähnliche Probleme auf, die eine vergleichbare Unterstützung verlangen. Beispielsweise muss der benötigte Bauraum abgeschätzt und mit dem verfügbaren Raum in Übereinstimmung gebracht werden. Interessant ist vor allem die Interaktion mit dem Bedienpersonal. Ein AR-System ermöglicht es, die geplante Anlage bereits zu einem sehr frühen Stadium virtuell in eine reale Heiße Zelle einzublenden. Damit können wichtige Aspekte wie die Erreichbarkeit der Anlagenkomponenten oder die Zugänglichkeit geklärt und mögliche Probleme, wie Kollisionen zwischen den Armen der Beschäftigten und sensiblen Anlagenteilen, oder verdeckte Bereiche frühzeitig erkannt und vermieden werden. Darüber hinaus bietet ein AR-System die Möglichkeit, bereits frühzeitig mit der Schulung bzw. dem Training des Bedienpersonals zu beginnen, damit dieses bei Abschluss der Inbetriebnahme sofort einsatzbereit ist.

6.3.3 Realisierung der Anlage

Mit einem geeigneten AR-System lassen sich beim Aufbau der Anlage von Anfang an Fehler vermeiden, die bei der Inbetriebnahme Nachbesserungen erforderlich machen, weitere Kosten verursachen und zu einem zusätzlichen Zeitverlust führen. Der Zeitaufwand bei der Realisierung der Anlage kann im Allgemeinen reduziert werden, wenn den Monteuren über AR eine optimale Anleitung für ihre Aufgaben zur Verfügung gestellt wird. Die Produktionsanlagen sind teilweise so umfangreich und komplex, dass Unterstützung notwendig ist, um die Bauteile am richtigen Verbauort anzubringen und sie korrekt anzuschließen. In der Regel reicht es aber aus, Anleitung, Pläne und Zusammenbauzeichnungen einzublenden und zusätzliche erforderliche Informationen verfügbar zu machen, um Sicherheit und Komfort bei der Arbeit zu erhöhen. Nachdem die Anlagen in der Regel mit CAD-Systemen entwickelt werden, sind viele Informationen bereits vorhanden oder können mit geringem Aufwand erzeugt werden. Die Unterstützungsmöglichkeiten sind hier ähnlich umfangreich wie beim Betrieb der Anlage.

6.3.4 Inbetriebnahme der Anlage

Bei der Inbetriebnahme steht die Interaktion mit der Anlagensteuerung im Vordergrund. Das Ziel in dieser Phase ist ein optimierter und reibungsloser Ablauf auf der

Anlage. Dazu muss zunächst die Programmierung der SPS an der realen Anlage überprüft werden, bevor im Anschluss die Parameter so eingestellt werden, dass qualitativ hochwertige Produkte erzeugt werden können. Bereits bei gewöhnlichen Inbetriebnahmen ist eine AR-Unterstützung hilfreich. ECKES (2007) schlägt beispielsweise vor, das Sichtfeld auf das Fertigungssystem mit Zuständen der einzelnen Komponenten in Echtzeit anzureichern. Dadurch können die Ein- und Ausgänge der Steuerung leicht miteinander verglichen und Abweichungen zwischen dem spezifizierten, dem erwarteten und dem realen Verhalten des Systems festgestellt werden. (ECKES 2007)

Beim betrachteten Anwendungsfall besteht aufgrund der nachteiligen Bedingungen erweiterter Bedarf an Unterstützung. Vor allem der Abgleich zwischen dem programmierten Ablauf und den tatsächlichen Aktionen der Anlagenkomponenten, der im Rahmen der Programmierung ständig stattfinden muss, gestaltet sich aufgrund der Einhausung der Anlage schwierig. Mit einem AR-System können den Inbetriebnahmemitarbeitern wichtige Informationen angezeigt werden, so dass sie beispielsweise während der Überprüfung der Abläufe die Programmzeilen der SPS-Steuerung einsehen und mitverfolgen können, wie das Programm abgearbeitet wird. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass mit einem AR-System auch Abläufe simuliert und virtuell in der realen Anlage dargestellt werden können. Dadurch erhalten die Inbetriebnahmemitarbeiter eine direkte Rückmeldung der vorgenommenen Änderungen in der Steuerung.

6.3.5 Umbau- und Änderungsarbeiten

Bei der Produktionsanlage fallen ständig Änderungs- und Umbaumaßnahmen an, bei denen Komponenten ersetzt oder weitere Funktionalitäten integriert werden. Von Zeit zu Zeit muss die Produktion modernisiert bzw. an den aktuellen Stand der Technik angepasst werden. Außerdem werden Heiße Zellen aufgrund der hohen Investitionskosten und der langwierigen Entwicklung nach dem Ablauf des primären Produktionsvorhabens meist noch für weitere Projekte verwendet. Hierfür sind teilweise umfangreiche Umbauarbeiten erforderlich, die zudem mit erhöhtem Risiko verbunden sind, da mit großer Wahrscheinlichkeit Bereiche bzw. Komponenten der Anlage kontaminiert sind. Auch in dieser Phase kann ein AR-Assistenzsystem die Durchführung der Umbauarbeiten maßgeblich unterstützen, beispielsweise mittels konkreter Anleitungen für das Personal. Für die optimale Integration neuer Komponenten empfiehlt sich zudem die virtuelle Einblendung in die reale Anlage, so dass der geplante Einbau simuliert und überprüft werden kann.

6.3.6 Abbau und Recycling

Wenn nach Ablauf der Nutzungsdauer die Anlage wieder abgebaut wird, können die Demonteure mit einem Assistenzsystem unterstützt werden, das wichtige Informationen wie Gefahrenbereiche oder kontaminierte Komponenten anzeigt. Auch eine Anleitung zur fachgerechten Demontage und zur Entsorgung der Sonderstoffe trägt maßgeblich zu einem sicheren und umweltgerechten Umgang bei. Zudem könnten Informationen zu enthaltenen Wert- oder auch Schadstoffen gegeben werden, so dass eine fachgerechte Trennung und evtl. Aufbereitung erfolgen kann.

6.4 Exemplarische Umsetzung der AR-Unterstützung

6.4.1 Allgemeines

Das vorgestellte Konzept der Unterstützung manueller Arbeit bei der Produktion von radioaktiven Substanzen mit Augmented Reality wurde exemplarisch umgesetzt. Es wurde darauf verzichtet, alle der zahlreichen angedachten AR-Funktionen zu realisieren, da diese teilweise in anderen Anwendungsbereichen in abgewandelter Form bereits verfügbar sind und auf der dabei gewonnenen Erfahrung aufgebaut werden kann. Der Schwerpunkt lag hier vielmehr auf der Untersuchung des Low-Cost-Ansatzes sowie der Anwendung von AR in einer Heißen Zelle. Spezielle Ansätze sowie wichtige Unterstützungsfunktionen wurden zu Demonstrationszwecken umgesetzt, um auf dieser Basis Gespräche mit potentiellen Anwendern führen zu können und eine Bewertung des Konzeptes zu erhalten.

6.4.2 Verwendete AR-Technologie

6.4.2.1 AR-Ausrüstung

Die für eine AR-Unterstützung erforderliche Ausrüstung war mit dem Video-See-Through-System des immersiven Kamerasystems bereits vorhanden. Für Untersuchungen standen die zwei in Abschnitt 5.4.3.1 (S. 87) vorgestellten immersiven Kamerasysteme am Versuchsstand zur Verfügung. Zur Abklärung prinzipieller AR-Fragen kam auch eine hochwertige Webcam zum Einsatz. Als Versuchsumgebung diente unter anderem die Produktionsanlage zur Herstellung von Actinium, an welcher unter realistischen Bedingungen getestet werden konnte.

6.4.2.2 Getestete AR-Programme

Es existieren zahlreiche AR-Programme, die für die Umsetzung verwendet werden konnten. Gemäß dem angestrebten Low-Cost-Ansatz wurden mit AR-Toolkit (ARTOOLKIT 2009), Studierstube (TU GRAZ 2009) und AMIRE (GRIMM et al. 2002) vorwiegend diejenigen Vertreter ausgewählt, die für nicht kommerzielle Anwendungen kostenlos im Internet verfügbar sind. Um einen Vergleich mit kommerzieller Software durchführen zu können, wurde zusätzlich das Software-Development-Kit Unifeye der Firma Metaio GmbH (METAIO 2009) getestet.

Das AR-Toolkit ist eine Software-Bibliothek auf der Basis der Programmiersprachen C und C++ zur Programmierung von AR-Anwendungen. Im Vordergrund steht die korrekte Darstellung virtueller Gegenstände in der realen Welt mit Hilfe von rechteckigen Trackern und einer Kamera (HIT LAB 2009). AR-Toolkit ist die am weitesten verbreitetste AR-Tracking-Bibliothek (SOURCEFORGE 2009). AMIRE und Studierstube sind sogenannte Frameworks auf der Grundlage von AR-Toolkit. Sie bieten vorbereitete Funktionalitäten beispielsweise in Form interaktiv zusammensetzbarer Komponenten an, die es besonders auch Anwendern ohne tiefere Programmierkenntnisse ermöglichen, AR zu nutzen (GRIMM et al. 2002, TU GRAZ 2009). Die Unifeye Plattform der Firma Metaio GmbH ist eine kommerzielle Software für den professionellen Einsatz von AR, wobei der Schwerpunkt auf der Präsentation von Produkten liegt (METAIO 2009). Daher wurde besonders auf eine hochwertige Darstellungsqualität und zuverlässiges Tracking geachtet.

6.4.2.3 Analyse und Auswahl

Alle getesteten Systeme sind mächtige Werkzeuge, mit denen vielfältige Unterstützung geboten werden kann. Sie unterscheiden sich aber unter anderem bezüglich der Funktionalität, der Gestaltung, der Bedienfreundlichkeit und der Qualität des Marker-Trackings. Unifeye bietet mit Abstand die beste Darstellungsqualität und das zuverlässigste Tracking, obwohl alle Systeme auf dem gleichen Prinzip des markerbasierten optischen Trackings basieren. Dafür sind bei Unifeye die Funktionen im Vergleich zu den anderen AR-Systemen eingeschränkt, bzw. sie müssen teuer hinzugekauft werden. Die kostenlosen Lösungen unterscheiden sich vor allem im Aufwand und in der Unterstützung für die Anwender. Die Verwendung von ARToolKit erfordert beispielsweise umfangreiche Programmierkenntnisse und erzeugt einen hohen Aufwand bei der Erstellung eines AR-Systems. AMIRE bietet zahlreiche nützliche AR-Funktionen, ist ausführlich dokumentiert und wurde daher für die Umsetzung des Konzeptes ausgewählt.

6.4.3 Realisierte Funktionen

6.4.3.1 Allgemeines

Einige Funktionen des oben vorgestellten Assistenzsystems wurden in Funktionsprototypen realisiert, um einen Eindruck von den Unterstützungsmöglichkeiten zu vermitteln.

6.4.3.2 Statische Zusatzinformationen

Das umgesetzte AR-System beschränkte sich zunächst auf die Einblendung statischer Informationen (Abbildung 42). Obwohl diese Funktion eine der einfachsten AR-Anwendungen ist, kann damit bereits deutlicher Nutzen generiert werden. Sie eignet sich daher gut, um generelle Aussagen zum Nutzen und zur Akzeptanz von AR-Technologien zu erhalten. Für die Überprüfung der elektrischen Ventile im Rahmen der Inbetriebnahme der Produktionsanlage wurde ein Bild des schematischen Aufbaus eingeblendet. Bei der empfindlichen Chromatographie-Säule wurden die Inhaltsstoffe sowie das wichtige Füllstandsniveau angezeigt (Abbildung 42).

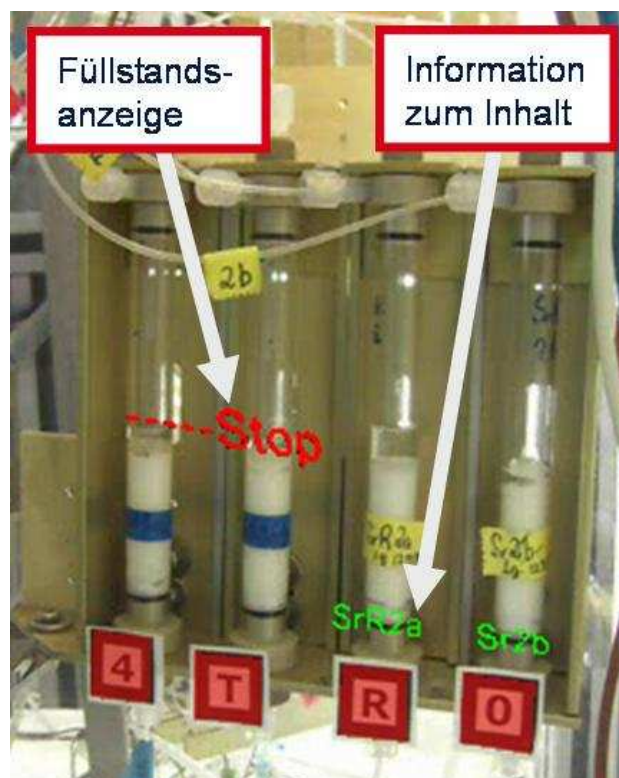


Abbildung 42: AR-Einblendung mit Informationen zu empfindlichen chemischen Säulen

Weitere umgesetzte Funktionen sind die Visualisierung der Fließrichtungen an den Ventilen und die Hervorhebung einzelner Anlagenkomponenten durch die aufgabenabhängige Markierung mittels AR.

6.4.3.3 Einblendung virtueller Gegenstände

Zur Untersuchung des Nutzens der Einblendung virtueller Gegenstände wurde u. a. ein nachgebildetes Fluidik-Ventil virtuell in die reale Umgebung eingefügt (Abbildung 43). Es handelt sich hierbei um ein zentrales Element automatisierter chemischer Anlagen, das dort in großer Zahl eingebaut ist und an dem daher öfters Änderungen vorgenommen werden müssen. Aufgrund der vielen Schnittstellen des Ventils zu Schläuchen und Kabeln, die sich an ungünstigen Stellen befinden, gestaltet sich die Befestigung dieser Komponente in den engen Anlagen schwierig. Daher ist eine sorgfältige Planung vor dem Einbau erforderlich, bei der AR unterstützen kann.

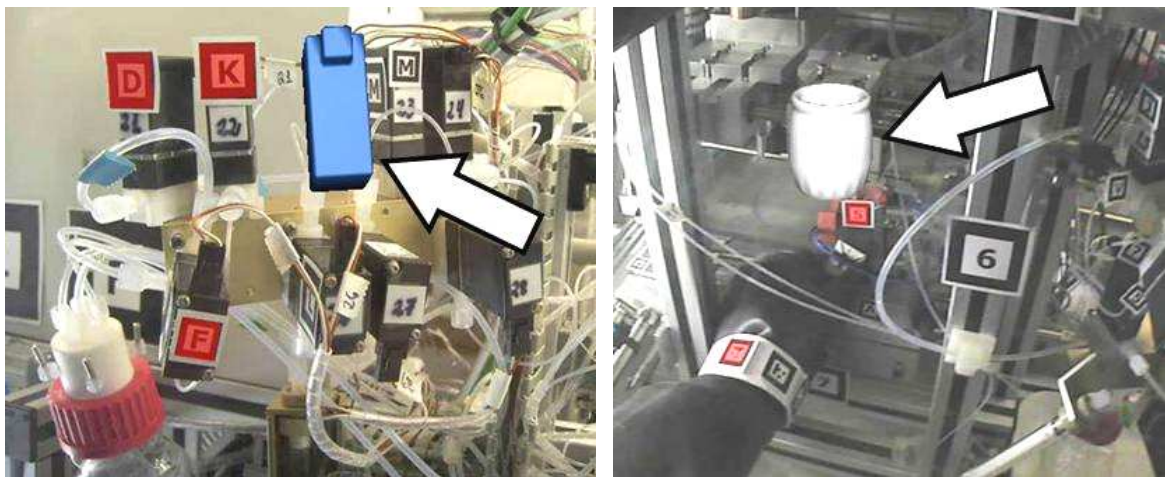


Abbildung 43: Virtuelle Anlagenkomponenten (siehe Pfeile) in realer Umgebung zur Abschätzung von Erreichbarkeit und Platzverhältnissen: links ein Ventil, rechts ein Abfallbehälter

6.4.3.4 Unterstützung bei Wartung und Umbau

Zur Unterstützung von Montage- oder Umbauarbeiten ist folgender Ablauf denkbar: Zunächst wird eine Einleitung in Textform gegeben, die den Servicemitarbeitern die Aufgabe erklärt und darauf hinweist, worauf geachtet werden muss. Anschließend werden sie über virtuelle Symbole wie Pfeile zu den betreffenden Anlagenkomponenten geführt, um sie schneller aufzufinden (siehe Abbildung 44). Nun erfolgt in Einzelschritten die Anleitung für die Tätigkeit, wobei mit dem Assistenzsystem wertvolle Hinweise gegeben werden können. Beispielsweise sind vor- und nachge-

lagerte Ventile zu schließen, wenn eine Komponente der Fluidikanlage ausgewechselt wird, um eine Leckage zu verhindern (Abbildung 45).

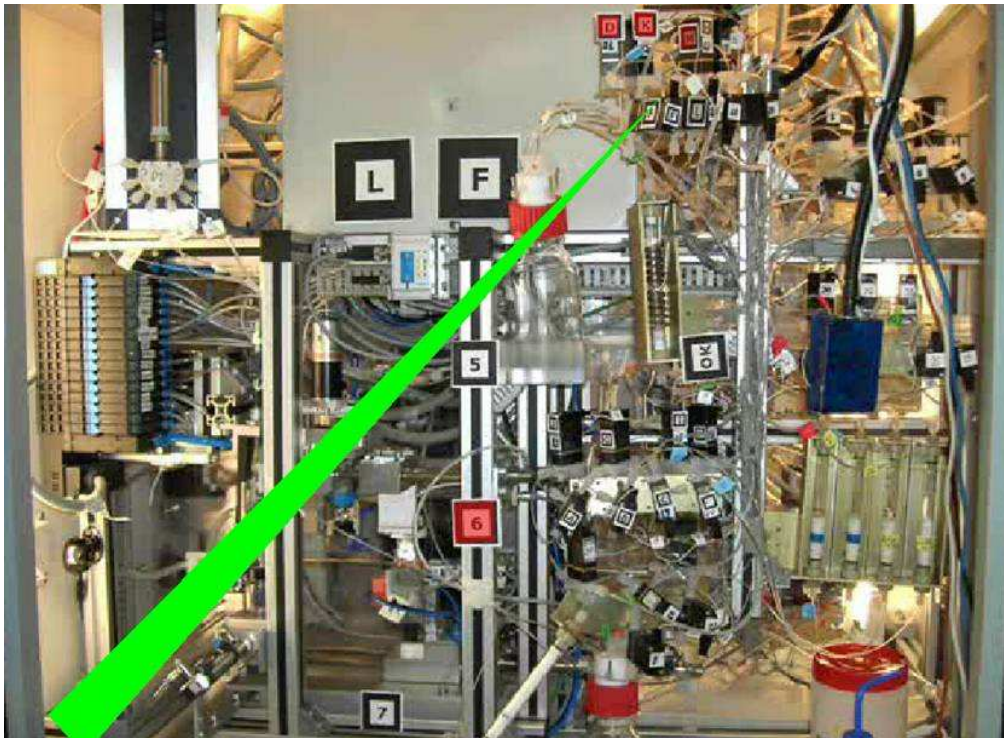


Abbildung 44: Unterstützung bei Wartungsarbeiten: Pfeilartiges Symbol zur Hervorhebung eines Ventils, das getauscht werden muss

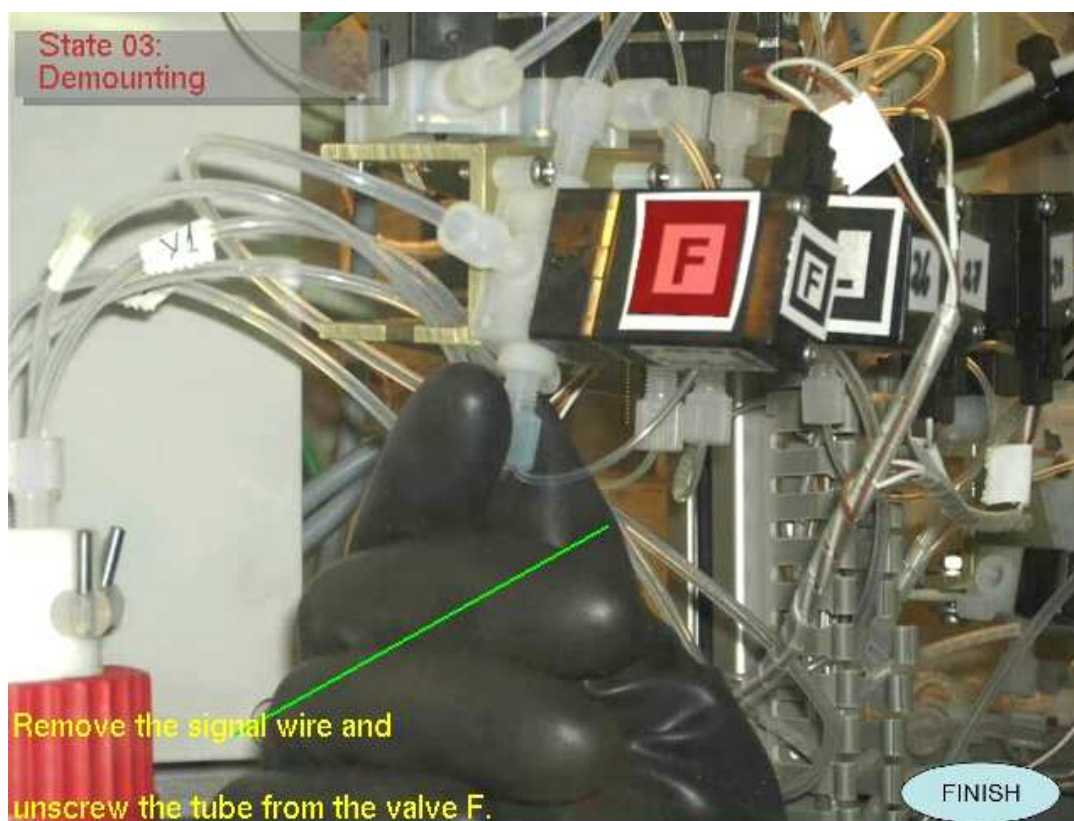


Abbildung 45: Anleitung für eine Wartungsaufgabe

6.4.3.5 Erfassung der Hand und Abstandsmessung

Um zusätzliche Funktionen realisieren zu können, die von der Position der Hand in der Heißen Zelle abhängen, muss diese erfasst werden. Ein Beispiel hierfür ist die Ermittlung des Abstands zur Gefahrenquelle, um unter anderem die Strahlenbelastung zu kalkulieren. Nachdem ein Trackingsystem bereits vorhanden war, lag die Nutzung dieses Prinzips für die Hand nahe. Der Marker sollte möglichst nahe an den Fingerspitzen angebracht sein, damit er im Bild zu sehen ist und vom AR-System erkannt werden kann. Die Hand wird nur selten ganz von der Kamera erfasst. Bei PIEKARSKI & THOMAS (2002) steckt die Hand daher in einem Handschuh, der mit einem Marker am Daumen versehen ist. Eine weitere Möglichkeit ist ein Ring mit einem Marker, der an einen Finger gesteckt werden kann. Bei beiden Optionen ist allerdings fraglich, ob sie für die Arbeit in der Heißen Zelle geeignet sind, da die Hand bereits in einem Handschuh steckt und der Ring die Bewegungsfreiheit der Hand beeinträchtigen könnte oder die Marker während der Arbeit verdeckt werden könnten. Das Konzept des Assistenzsystems sieht ein Armband am Handgelenk vor, auf dem mehrere gleiche Marker angebracht sind, so dass mindestens einer davon immer sichtbar ist. Zusätzlich ist eine weitere Kamera mit einem Weitwinkelobjektiv in der Heißen Zelle vorgesehen, die den gesamten Arbeitsbereich überblickt und daher die Hand immer im Bild hat. Durch die Kombination mehrerer Kameras ist eine sichere Erfassung der Position der Hand möglich, um damit Sicherheitsfunktionen realisieren zu können. Die Funktion wurde anhand eines Prototyps erfolgreich getestet (Abbildung 46).

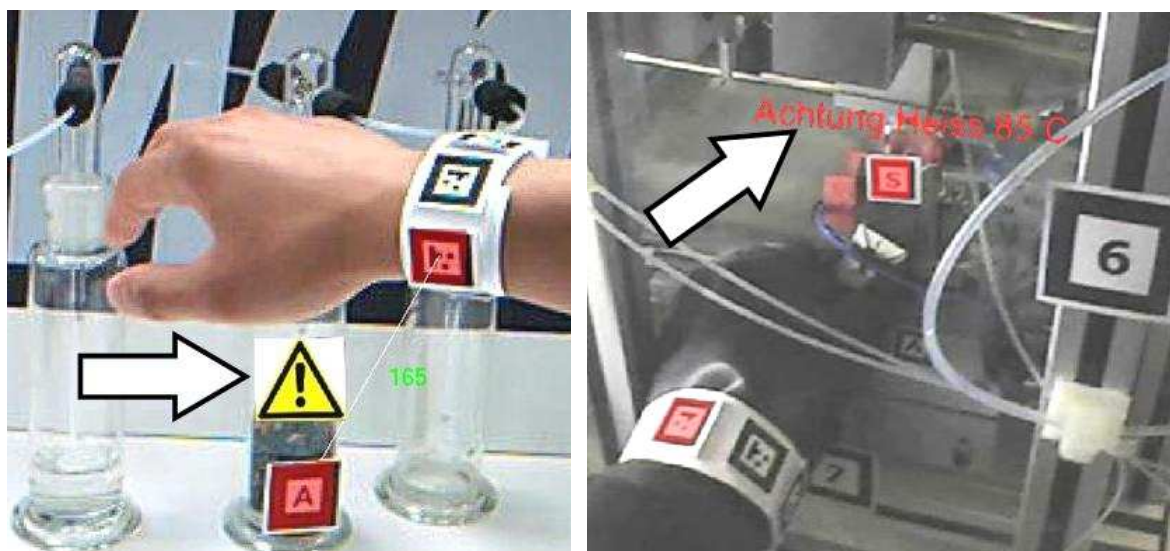


Abbildung 46: Messung der Entfernung der Hand zur virtuellen Gefahrenquelle mittels Markern an einem Armband am Handgelenk: Anzeige einer Warnung bei zu geringem Abstand in Form eines Warnschildes (links, siehe Pfeil) oder eines rot gefärbten Warntextes (rechts)

6.5 Fazit

6.5.1 Nachhaltige Verbesserung der Situation möglich

Mit der Anwendung von Augmented Reality für die Produktion radioaktiver Stoffe in Heißen Zellen kann eine nachhaltige Verbesserung der Situation erzielt werden. Dies liegt zum einen am großen Optimierungsbedarf, der aus den dort auftretenden fordernden Aufgaben für das Bedienpersonal resultiert, sowie an den problembehafteten und erschwerenden Rahmenbedingungen. Zum anderen eignen sich die Potentiale von Augmented Reality hervorragend, um die hier auftretenden Probleme zu lösen oder zumindest zu entschärfen. Das entwickelte Konzept weist daher Anwendungsmöglichkeiten in großer Anzahl und Vielfalt auf, die einen deutlichen Mehrwert generieren können. Der entscheidende Vorteil ist, dass bereits elementare AR-Anwendungen wie die Einblendung statischer Informationen die Arbeitsbedingungen merklich verbessern. Dies wurde von den Anwendern bestätigt, welche die AR-Nutzung für die Heißen Zellen begrüßten und allgemein sehr positiv bewerteten. Die befragten Radiochemiker, die über umfangreiche Erfahrung bezüglich der Arbeit in Heißen Zellen verfügen, bezeichneten bereits die einfachen umgesetzten Funktionen als deutliche Verbesserung ihrer Arbeitsbedingungen.

Es sind AR-Systeme verfügbar, die bereits ausreichende Funktionalität bieten und für den Einsatz in der Heißen Zelle verwendet werden können. Daher wurde für die Realisierung eines Prototyps des Assistenzsystems auf bestehende Systeme zurückgegriffen und auf die Entwicklung eines eigenen Systems verzichtet. Auf der Basis von AMIRE konnten wesentliche Aspekte des Konzeptes eines Assistenzsystems in Form von rudimentären AR-Funktionen realisiert und damit Machbarkeit, Nutzen sowie Akzeptanz gezeigt werden.

Es ist aber noch viel Entwicklungspotential zu erkennen. Neben der Verbesserung der Funktionen und der Generierung neuer Anwendungen muss vor allem eine einfach zu nutzende Bedienerschnittstelle zur Konfiguration des AR-Systems entwickelt werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden neue Fragen und weiterer Handlungsbedarf aufgeworfen, beispielsweise bezüglich der Gestaltung der Produktionsanlage. Es sind weitere Versuche mit den Anwendern durchzuführen, um ihre Erfahrung, aber auch ihre Erwartungen und Anforderungen an die Entwicklung des AR-Systems mit einfließen lassen zu können.

6.5.2 Defizite

Neben der Bestätigung des Nutzens wurden am realisierten Prototyp eines AR-Systems auch einige Probleme augenscheinlich. Als wesentliches Defizit stellte sich die Tracking-Qualität heraus. Die Marker konnten beim umgesetzten Assistenzsystem oft nicht erkannt werden, so dass die eingeblendeten virtuellen Objekte häufig die Position änderten oder verloren gingen. Vor allem bei einer Bewegung der Kamera benötigte das AR-System einige Sekunden, um die Marker zu erfassen. Dadurch musste einige Zeit auf die Marker geblickt werden, bis die Informationen angezeigt wurden. Es ist allerdings davon auszugehen, dass dieser Effekt bei einem optimierten System mit einem leistungsstärkeren Computer reduziert werden kann. Wie erwartet, beeinträchtigten die ungünstigen Rahmenbedingungen die Erkennung der Marker zusätzlich. Die dünnen Schläuche störten teilweise die Autofocusfunktion der Kamera, so dass sie keine scharfen Bilder von den Bauteilen und den daran befestigten Markern liefern konnte. Diese wurden dadurch vom AR-System nicht erkannt. Aufgrund der hohen Komplexität der Anlage traten weitere Ursachen für unsichere Markererkennung auf, wie eine Verdeckung durch andere Bauteile und Kabel oder ein ungünstiger Winkel der Markerfläche. Große Marker wurden mit einer höheren Wahrscheinlichkeit erkannt, aber nur an wenigen Bauteilen ist eine ausreichend große Fläche hierfür vorhanden. Interessant wären besonders kleine Marker, um beispielsweise die schwer zu lokalisierenden Schläuche hervorheben zu können. Ein möglicher Nachteil der AR-Technologie ist, dass die eingeblendeten Objekte das reale Bild teilweise überdecken. Die Methoden, die dies verhindern könnten, wie virtuelle Phantom-Modelle, die den realen Objekten nachgebildet sind, oder Matrizen funktionieren bei den in der Heißen Zelle auftretenden komplexen Geometrien nicht (Breen et al. 1996). Da die AR-Technologie ständig weiterentwickelt wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Defizite zukünftig behoben oder zumindest abgemildert werden.

6.5.3 Risiken

Die Unterstützung kann auch zu Risiken führen, etwa wenn die Benutzer sich zu sehr darauf verlassen und unvorsichtig oder nachlässig werden. Besonders bei den Sicherheitsfunktionen ist auch immer zu berücksichtigen, dass ein Ausfall des Systems möglich ist, der unter Umständen nicht sofort auffällt. Es sollte daher auch für ein Assistenzsystem eine Schulung durchgeführt werden, die in regelmäßigen Abständen wiederholt wird und in der auf die Gefahren hingewiesen wird.

6.6 Gestaltungsempfehlungen

Um ein optimales Assistenzsystem gewährleisten zu können, wird empfohlen, bei der Entwicklung von Anlagen zur Produktion radioaktiver Stoffe einige Gestaltungsgrundsätze zu berücksichtigen, bzw. die Anlage für den Einsatz der AR-Technologie vorzubereiten. Die Richtlinien wurden aus den Erfahrungswerten des Projektes zur Herstellung von Actinium (siehe Abschnitt 2.2.6.2) sowie den gewonnenen Erkenntnissen der Versuche, in deren Rahmen die realisierten Assistenzfunktionen getestet wurden, abgeleitet. Sie sind als Empfehlungen zu verstehen. Oberste Priorität bei der Gestaltung der Produktionsanlage haben die hohen Ansprüche an die Qualität der Produkte. Das bedeutet, dass die Funktion der Anlage und damit chemische, physikalische und technische Aspekte im Vordergrund stehen. Allerdings sind meist noch ausreichend Freiheiten vorhanden, um die Empfehlungen zu berücksichtigen.

Erreichbarkeit

Die Komponenten der Anlage sollten für die Produktionsmitarbeiter optimal erreichbar sein, damit die Arbeiten gut durchgeführt werden können. Bei zu großem Abstand der Anlage ist die Reichweite der Hände nicht ausreichend für eine komfortable und entspannte Arbeitshaltung, was zu anstrengenden Zwangshaltungen führt. Bei zu geringem Abstand fehlt den Produktionsmitarbeitern der Bewegungsraum für Hände und Arme und die Kamera ist unter Umständen zu nah an den Komponenten, um scharf fokussieren zu können. Es empfiehlt sich eine in etwa halbkugelförmige Anordnung um die beiden Eingriffsöffnungen für die Hände. Beim Actinium-Projekt (siehe Abschnitt 2.2.6.2) hat sich eine ungefähr quadratische Zelle mit einem Volumen von einem Kubikmeter bewährt, die in zwei Hälften aufgeteilt wurde, so dass zwei Anlagen integriert werden konnten, die jeweils von einer Seite der Box ideal zugänglich sind. Es ist durchaus denkbar, eine Anlage auch von zwei Seiten zu bearbeiten.

Sichtbarkeit

Um alle Komponenten der Anlage sehen und überwachen zu können, sollten sie möglichst in einer Ebene angebracht sein und Verdeckungen vermieden werden. Ein gestaffelter Aufbau mit mehreren Komponenten hintereinander sorgt für eine gute Raumausnutzung und einen geringen Platzbedarf, macht aber die Übersicht zunichte und erschwert die Arbeit beträchtlich. Auch für die zahlreichen Kabel und Schläuche ist eine ordentliche Führung zu empfehlen, so dass ihr Weg leicht nachverfolgt und die zusammenhängenden Komponenten erkannt werden können. Bei umfangreichen Anlagen können klappbare Halterungen, an denen die Komponenten

befestigt sind, eine Lösung darstellen. Wenn dahinter liegende Komponenten in den Fokus treten, werden die davor angebrachten Anlagenteile einfach mit der Hand zur Seite geschwenkt. So lassen sich viele Komponenten übersichtlich anordnen.

Kurze Wege

Der Verlust radioaktiven Materials und die damit verbundene Kontamination hängen mit der Größe der Oberfläche zusammen, mit der die radioaktive Lösung in Berührung kommt. Um die Verluste des teuren und seltenen Materials sowie die Kontamination zu minimieren, müssen die Komponenten so angebracht werden, dass die sie verbindenden Schläuche möglichst kurz sind. Auch für die Übersichtlichkeit ist von Vorteil, wenn die Längen der Leitungen gering sind und sie nicht über lange Wege in der Anlage verlegt werden müssen.

Beleuchtung

In der Heißen Zelle ist ein hohes Maß an Helligkeit für alle Anlagenteile erforderlich, um die Komponenten gut sehen und um sie optisch beurteilen zu können. Auch die Marker sollten hell und gleichmäßig ausgeleuchtet sein, damit das Tracking zuverlässig funktioniert. Die Positionen der Beleuchtungselemente müssen mit den Blickbereichen der Kameras abgeglichen werden, damit kein störendes Gegenlicht auftritt. Zu beachten sind auch Reflexionen oder Lichteileffekte, die besonders bei Komponenten aus Metall oder Glas auftreten. Die Beleuchtung kann auch unterstützend eingesetzt werden. Bei einem optimalen Lichtfall ist es beispielsweise einfacher, den Füllstand einer klaren Flüssigkeit in einem Gefäß oder in den Säulen mit einer Kamera zu erkennen.

Vorbereitung für die AR-Nutzung

Bei der Anordnung der Anlagenkomponenten sollten die Marker berücksichtigt werden, die ebenfalls an der Anlage zwischen den Bauteilen angebracht werden müssen. Damit sie vom AR-System gut erkannt werden, ist zu empfehlen, überall am Gestell freie Flächen vorzusehen, an denen die Marker flach aufliegen und die Flächennormale in etwa zur Kamera zeigt.

6.7 Überleitung

In den letzten Abschnitten wurde eine technische Lösung für die Probleme bei der Produktion von Radioisotopen in Heißen Zellen vorgeschlagen. Die wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten sind noch zu prüfen. Dies erfolgt in Kapitel 7.

7 Wirtschaftliche Bewertung und Verallgemeinerung

7.1 Überblick über das Kapitel

Nachdem das immersive Kamerasystem und die AR-Unterstützung bereits getrennt am Ende des jeweiligen Kapitels technisch bewertet wurden, erfolgt in diesem Kapitel die wirtschaftliche Betrachtung des vorgestellten gesamten Konzeptes eines intelligenten Assistenzsystems (zum Begriff des intelligenten Assistenzsystems siehe Abschnitt 4.4.2, S. 61). Darüber hinaus werden Überlegungen zu einer erweiterten Nutzung des Konzeptes und der realisierten Ansätze auf andere Anwendungen vorgestellt.

7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

7.2.1 Allgemeines

Das präsentierte Konzept des Assistenzsystems überzeugt durch ein sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis. Verbesserungen, die durch technische Entwicklungen erreicht werden, müssen meist mit einem deutlichen Aufschlag bei den Investitionen und evtl. auch bei den laufenden Kosten bezahlt werden. In diesem Fall können die oben aufgezeigten Vorzüge jedoch kostenneutral oder gar mit Kosteneinsparungspotential realisiert werden. Dies liegt daran, dass das Kamerasystem das Bleiglasfenster ersetzt, das mit hohen Investitionskosten sowie laufenden Kosten verbunden ist. Außerdem genügt der gewählte Low-Budget-Ansatz, um das Ziel zu erreichen und die Situation zu verbessern. Dadurch sind für Kamerasystem und AR-System moderate Ausgaben realistisch, wie in den nächsten Abschnitten genauer dargestellt wird.

Die technischen Verbesserungen tragen auch zu einer Reduzierung von laufenden Kosten sowie von Folgekosten bei. Beispielsweise hilft der Sicherheitsgewinn die Gesundheit der Mitarbeiter zu schützen. Unfälle sind zudem oft mit einem Image- und Vertrauensschaden für das betroffene Unternehmen verbunden. Es entstehen weitere Kosten, wenn Mitarbeiter infolge einer Schädigung ausfallen. Hierfür reicht bereits die Überschreitung der Handdosis aus, was derzeit nicht selten auftritt (BFS 2009). Es erscheint hinfällig, beim Assistenzsystem die Kosten abzuwägen, da dieses unter anderem zur Steigerung der Sicherheit dient. Daran sollte besonders bei radioaktiven Stoffen nicht gespart werden, da die möglichen Folgen enorm sind und die Unversehrtheit der Mitarbeiter bei der Gestaltung der Anlage oberste Priorität

haben sollte. Doch auch bei der sicherheitskritischen Produktion radioaktiver Stoffe muss auf eine niedrige Hürde für die Anwendung eines Assistenzsystems geachtet werden. Daher wurde dieser Kostenaspekt bereits bei der Entwicklung des Konzeptes berücksichtigt.

Das Assistenzsystem leistet nicht nur einen Beitrag zur Reduzierung von Kosten, es kann aktiv dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit durch Steigerung der Produktivität zu erhöhen. Die Unterstützung durch das Assistenzsystem ermöglicht es den Mitarbeitern an der Produktionsanlage, ihre Aufgaben besser und schneller zu erfüllen, nahezu fehlerfrei zu arbeiten sowie einer geringeren Strahlenbelastung ausgesetzt und dadurch länger einsatzfähig zu sein. Das Assistenzsystem ermöglicht außerdem die Herstellung größerer Mengen des radioaktiven Stoffes, da seine Sicherheitsfunktionalität den Umgang mit dem damit zusammenhängenden hohen Strahlungsniveau ermöglicht. Dadurch wird die Wirtschaftlichkeit der Produktion verbessert, da die anteiligen Fixkosten sinken. Es bieten sich beim Betrieb zudem weitere Ansatzmöglichkeiten, um die Kosten zu reduzieren, indem beispielsweise Arbeitskräfte mit niedrigerer Qualifikation, angeleitet durch das Assistenzsystem, einfache, aber zeitintensive Aufgaben erfüllen. Außerdem können die Schulungs- und die Einarbeitungsphasen verbessert und verkürzt werden. Darüber hinaus sind die Möglichkeiten durch zukünftige neue Technologien zu sehen, die über das Assistenzsystem für die Produktion radioaktiver Stoffe eingesetzt werden können (siehe Abschnitt 6.2.2.12, S. 133).

7.2.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beim Kamerasystem

Ein Kamerasystem mit Leistungsmerkmalen, die für die Anwendung an der Heißen Zelle ausreichend sind, ist derzeit für ca. 2500 € verfügbar. Dabei handelt es sich um eine nicht abgeschirmte Autofocuskamera mit automatischer Belichtungsregelung und Zoom-Funktion, die ein zweidimensionales Bild an die Videobrille ausgibt. In Tabelle 5 sind die Kosten für die beiden als Prototypen realisierten Kamerasysteme genauer aufgeschlüsselt. Im Rahmen einer Weiterentwicklung zum Produkt können Einsparungspotentiale ausgeschöpft werden. Außerdem ist von einer Evolution der Technik auszugehen, die neben einer verbesserten und erweiterten Funktionalität meist auch einen sinkenden Preis mit sich bringt.

Demgegenüber stehen die hohen Investitionskosten für das Bleiglasfenster, die sich auf mehr als 10.000 € belaufen und bei der Verwendung des Kamerasystems eingespart werden können. Hinzu kommen weitere finanzielle Belastungen für Anbauten bzw. Umbauten an der Bleiwand. Der Preis des Bleiglasfensters hängt im Wesentli-

chen von den Abmessungen ab, die wiederum von der in der Box auftretenden Strahlung bestimmt werden. Um von realistischen Werten auszugehen, wurde für die Kalkulation ein Bleiglas mit den Abmessungen 350 mm x 300 mm x 240 mm herangezogen, das von der Firma Von Gahlen für die Actinium-Produktionsanlage angeboten wurde (siehe Abschnitt 2.2.6.2, S. 17 ff.). Da das Bleiglas anfällig für Verkratzungen sowie Säuren und Alkali ist (SCHOTT AG 2009), kommen weitere laufende Kosten für den Unterhalt sowie für Reinigung, Wartung und Reparaturen hinzu (HCS 2009).

	Kamerasystem 1: Servomotoren und Gyro-Tracker		Kamerasystem 2: PTZ-Kamera und Joystick	
Kosten der Komponenten	Kamera	500 €	PTZ-Kamera	1000 €
	Schwenkvorrichtung	500 €	Joystick	100 €
	Videobrille	500 €	Videobrille	500 €
	Gyro-Tracker	500 €	Computer mit Programm und passenden Schnittstellen	900 €
	Sonstiges (Kabel, Halte- rungen, Elektronik, etc.)	500 €	Sonstiges	500 €
Gesamt	2500 €		3000 €	

Tabelle 5: Kostenaufstellung der beiden für die Versuche realisierten Kamerasysteme

Ein wichtiger Faktor bei der Gegenüberstellung ist die Standzeit der Kamera. Bisher liegen keine Erfahrungen dazu vor, nach welcher Einsatzdauer das Kamerasystem unbrauchbar wird und ausgetauscht werden muss. Aus Sicherheitsgründen wird empfohlen, die Kamera in regelmäßigen Abständen zu wechseln. Eine hohe Strahlenbelastung reduziert die Lebensdauer und führt zu einem erhöhten Bedarf an Ersatzgeräten. Allerdings muss nicht das gesamte Kamerasystem ausgetauscht werden, da sich einige Komponenten, wie die Videobrille, außerhalb des Gefährdungsbereichs befinden und andere, beispielsweise die Schwenkmechanik, durch radioaktive Strahlung keinen Schaden nehmen. Je nach Typ sind für die Ersatzkamera Kosten im Bereich von 500 € bis 1000 € zu veranschlagen. Das bedeutet, dass die Kosten für ein einfaches Kamerasystem, wie es oben vorgestellt wurde, das prophylaktisch in einem Einjahres-Rhythmus getauscht wird, durch die Einsparungen beim Bleiglasfenster bei einer mittleren Lebensdauer der Heißen Zelle von 10 Jahren mindestens refinanziert werden können.

7.2.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beim AR-System

Die Kosten beim vorgestellten AR-System werden maßgeblich vom AR-Programm bestimmt, da das Kamerasystem in diesem Fall bereits vorhanden ist. Es wird ein leistungsfähiger Computer benötigt, der in der Regel aber ebenfalls verfügbar ist bzw. dessen Anschaffungskosten in einem vertretbaren Rahmen bleiben. Im Gegensatz zu anderen AR-Anwendungen verursacht in diesem Fall das Tracking-System so gut wie keine Kosten, da für das Assistenzsystem in der Heißen Zelle Papiermarker in Verbindung mit der Bildverarbeitung des AR-Systems ausreichen. Der Funktionsprototyp wurde mit einem kostenlos verfügbaren AR-System umgesetzt. Für die finale Realisierung eines Unterstützungssystems empfiehlt sich aus Gründen der Durchgängigkeit, Fehlerfreiheit und Zuverlässigkeit trotzdem eine Neuentwicklung durch professionelle Programmierer.

Die Bandbreite der verfügbaren AR-Programme ist enorm. Sie reicht von kostenlosen Open-Source-Programmier-Bibliotheken, die im Internet frei verfügbar sind, bis zu komplexen und für den jeweiligen Anwendungsfall angepassten professionellen Systemen, die dementsprechend hohe Investitionen erfordern. Die Kostenskala ist nach oben offen und hängt unter anderem von der Komplexität des Systems und von der Anzahl der Funktionen ab. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren ist eine genaue Bezifferung der Kosten nicht möglich. Im günstigsten Fall sind für die Realisierung eines AR-Systems keine direkten zusätzlichen Ausgaben erforderlich. Bedingung hierfür ist ein Mitarbeiter, der mit Software umgehen und am AR-Programm die notwendigen Programmier- oder Einstellarbeiten durchführen kann. Wahrscheinlicher ist, dass hierfür Hilfe von professionellen Experten in Anspruch genommen wird. Bei knappem Budget können die realisierten Funktionalitäten auf das notwendige Maß reduziert werden. Oft sind beispielsweise statische Einblendungen bereits ausreichend, die mit den verfügbaren AR-Systemen auch von Laien eingerichtet werden können. Bei der Auswahl sollte allerdings auf eine hochwertige Bildverarbeitung Wert gelegt werden, um eine gute Tracking-Qualität und damit ein zuverlässiges System zu erhalten.

Für eine optimale Unterstützung erscheint ein möglichst umfangreiches System wünschenswert, was allerdings erheblichen Programmieraufwand und hohe Kosten mit sich bringt. Dieser Ansatz ist dann gerechtfertigt, wenn ein flexibles System geschaffen wird, das vielfach in gleicher Form verwendet werden kann, so dass sich die Kosten auf mehrere Anlagen und einen langen Nutzungszeitraum verteilen. Das vorgestellte Konzept eines Assistenzsystems für manuelle Tätigkeiten in Heißen Zellen hat den entscheidenden Vorteil, dass kostspielige und aufwändige Systeme

nicht erforderlich sind, da bereits die Möglichkeiten eines einfachen AR-Systems für eine signifikante Verbesserung der derzeitigen Situation ausreichen.

7.3 Verallgemeinerung

Die Verbesserung der Arbeitsbedingungen in Heißen Zellen durch das vorgestellte Konzept eines Assistenzsystems hat positive Auswirkungen auf gezielte Krebstherapien auf der Basis radioaktiver Stoffe im Allgemeinen, da die hierfür erforderlichen radioaktiven Substanzen sicherer und wirtschaftlicher hergestellt werden können und dadurch besser verfügbar sein werden. Darüber hinaus kann neuen Therapieansätzen zum Durchbruch verholfen werden, bei denen die Produktion bisher zu aufwändig oder zu gefährlich war.

Ein weiterer attraktiver Bereich neben der Produktion von Radioisotopen, in dem mit einem Assistenzsystem eine deutliche Verbesserung des Status quo erzeugt werden kann, ist die Herstellung radioaktiver Medikamente in Kliniken. Ideales Beispiel zur Darstellung der Problematik ist das Therapeutikum Zevalin. Es nimmt eine Vorreiterrolle ein, da es sich um das erste kommerziell erhältliche Radioimmun-Therapeutikum in Deutschland handelt. Es wurde erst 2004 zugelassen (BAUDISCH & ÖCHSNER 2004). Zevalin wurde für die Behandlung erwachsener Patienten mit CD20-positivem follikulärem B-Zell-Non-Hodgkin-Lymphom (NHL) entwickelt. Dabei handelt es sich um eine maligne Erkrankung, die das lymphatische System befällt. Es ist die fünfthäufigste Krebsart hinter Brust-, Prostata-, Lungen- und Dickdarmkrebs. Bei Zevalin wird durch die Kombination des spezifischen Antikörpers Ibritumomab-Tiuxetan mit dem β -Strahler Yttrium-90 die zielgenaue Bindungsfähigkeit eines monoklonalen Anti-CD20-Antikörpers mit der tumorzerstörenden Wirkung der Betastrahlung von Yttrium-90 verbunden. (SCHERING 2004, MERKMALE ZEVALIN 2005)

In Studien wurde belegt, dass mit einem Verhältnis von 80 % zu 65 % deutlich mehr Patienten auf das radioaktiv gelabelte Zevalin ansprachen, als auf den „kalten“ Antikörper Rituximab ohne Isotop. Außerdem konnten mit dem radioaktiven Präparat auch Patienten behandelt werden, die auf eine Rituximab-Behandlung nicht ansprachen oder nach einer solchen Behandlung einen Rückfall erlitten. (CELL THERAPEUTICS INC. 2008, ZEVALIN 2009, STAAK et al. 2003, BAUDISCH & ÖCHSNER 2004)

Bei Zevalin ist eine Produktion des Radioisotops Yttrium-90 wie bei der Alpha-Partikel-Immun-Therapie nicht nötig, da es durch natürlichen Zerfall aus Strontium-

90 extrahiert werden kann. Die Halbwertszeit von 64,1 Stunden (PFENNIG et al. 1995) erlaubt eine zentrale Gewinnung mit anschließendem Transport zu den behandelnden Kliniken. Bevor die radioaktiven Stoffe den Patienten verabreicht werden können, müssen sie allerdings an Antikörper gebunden und mit weiteren Reagenzien vermischt werden. Diese Zubereitung findet derzeit in Kliniken kurz vor der Verabreichung statt, da bei längerer Wartezeit die Gefahr besteht, dass die radioaktiven Isotope die Bindung an die Antikörper zerstören. Die Versendung eines fertigen Präparats scheitert zudem an der Radiolyse, bei der durch die radioaktive Strahlung die Flüssigkeit in ein gefährliches Gemisch aufgespaltet wird. Zur Herstellung des Therapeutikums wird das Yttrium-90 durch Eluierung aus einem mit Strontium-90 geladenen Generator gewonnen und anschließend mit den weiteren Bestandteilen in der passenden Menge zum richtigen Zeitpunkt so miteinander vermischt, dass eine Bindung zwischen den Radioisotopen und den Antikörpern entsteht und die hergestellte Substanz den hohen medizinischen Anforderungen entspricht. Anhand einer Qualitätskontrolle am Ende des Herstellungsprozesses, bei der im Wesentlichen die Qualität des Labeling-Prozesses im Vordergrund steht, wird entschieden, ob das Präparat verabreicht werden kann oder entsorgt werden muss. (ZEVALIN 2009, FISCHER et al. 2004b)

Bei Zevalin sind hierfür spezielle Abschirmmaßnahmen im Arbeitsbereich ausreichend. Eine Heiße Zelle ist nicht erforderlich, so dass bei der Herstellung keine Probleme mit einem Bleiglasfenster und den damit verbundenen Beeinträchtigungen auftreten. Die Verwendung eines immersiven Kamerasystems erscheint daher sinnlos, da hierfür eine Videobrille getragen werden müsste, die bei diesem Anwendungsfall unter anderem den Blick einschränken und daher eine Verschlechterung darstellen würde. Allerdings müssen auch bei Zevalin die Produktionsmitarbeiter, in diesem Fall in der Regel Medizinisch Technische Assistenten (MTAs), mit ihren Händen in einer radioaktiven Umgebung arbeiten, was ähnliche Probleme, wie in Kapitel 2 geschildert, mit sich bringt. Es sind vor allem die mögliche Gesundheitsgefährdung durch die radioaktive Strahlung und der damit verbundene psychologische Druck zu nennen. Obwohl die Schritte nicht sonderlich komplex sind, treten Bedienungsfehler auf, die teure Konsequenzen verursachen, da neben dem Verlust des wertvollen Präparates auch noch hohe Kosten für die Entsorgung anfallen. Der Zeitdruck ist aufgrund der kurzen Halbwertszeit hoch und es müssen zahlreiche Arbeitsschritte durchgeführt werden, die teilweise erhebliches Fehlerpotential bergen. Ein weiteres Problem bei dieser Therapie ist die Gefahr einer erhöhten Handdosis und der damit verbundene temporäre Ausfall von Personal. (BFS 2009)

Folglich kann auch hier ein einfaches, auf das Wesentliche reduziertes Assistenzsystem einen deutlichen Mehrwert schaffen. Die auftretenden Beeinträchtigungen legen die Vermutung nahe, dass der Nutzen etwaige Nachteile, wie das für die Produktionsmitarbeiter ungewohnte Kamerasystem und die entstehenden Mehrkosten, überwiegt. Die finanziellen Belastungen sind im Vergleich zu den Kosten für das Medikament oder einer möglichen Schädigung der Mitarbeiter ohnehin zu vernachlässigen. Für die Herstellung von radioaktiven Medikamenten wie Zevalin wäre ein flexibles und mobiles System ideal, das je nach Bedarf an den jeweiligen Arbeitsplatz gebracht und dort verwendet werden kann.

Der Einsatz eines Assistenzsystems ist im Allgemeinen bei manuellen Arbeiten mit radioaktiven Stoffen bzw. in radioaktiven Umgebungen naheliegend. Hier ist beispielsweise die Produktion von Substanzen für die Krebsdiagnose oder für weitere Behandlungsformen von Krebserkrankungen zu nennen, wie die Brachytherapie, besonders in der Form der Seed-Implantation (UNIVERSITÄTSKLINIK HEIDELBERG 2010). Radioaktive Stoffe werden außerdem in der Forschung verwendet, z. B. bei der Entwicklung neuer Medikamente und von resistenterem Saatgut, oder für berührungslose Materialprüfungen im Bereich der Materialwissenschaften. Der Einsatz ist vor allem fallspezifisch abzuwägen. Weitere Untersuchungen sind hier erforderlich. (NEI 2009, STOLZ 2005, DIN 6814 TEIL 1 2005)

Die Potentiale des Assistenzsystems machen eine Betrachtung weiterer Anwendungsmöglichkeiten auch über den Bereich radioaktiver Strahlung hinaus sinnvoll. Sein wesentliches Merkmal, verallgemeinert betrachtet, ist die Unterstützung von Personen bei der Durchführung fordernder manueller Aufgaben unter erschwerenden Arbeitsbedingungen. Diese Randbedingungen treten besonders bei Arbeiten in Gefahrenbereichen auf, wie bei der Bombenentschärfung oder der Minenräumung (PETZOLD 2007). Das Forschungsprojekt IntARWeld (Intelligent Augmented Reality Welding Helmet) zeigt, dass ein Assistenzsystem auch bei exotisch anmutenden Anwendungen, wie dem Schweißen, Nutzen bringen kann (PARK et al. 2007). Generell ist eine Unterstützung dann hilfreich, wenn zur Erfüllung der Aufgaben eine gute Sicht erforderlich ist, diese aber durch die Rahmenbedingungen beeinträchtigt wird. Beispiele hierfür sind Störeinflüsse wie blendendes Licht oder die Gefährdung der Augen durch Strahlung, z. B. beim Umgang mit Lasern, sowie durch gefährliche Flüssigkeiten oder Späne. Das Kamerasystem ermöglicht außerdem eine optische Vergrößerung, z. B. für die Mikromontage, oder die Arbeit im Dunkeln, was beispielsweise für biologische Stoffe interessant ist.

Die Suche nach weiteren Anwendungsmöglichkeiten für das Assistenzsystem hat das Ziel, eine möglichst große Verbreitung zu erreichen. Einerseits soll dadurch in vielen Bereichen Nutzen generiert werden. Andererseits bewirkt eine größere Anzahl an Produkten und Nutzern eine Verbesserung des Systems und Kosteneinsparungen durch Skaleneffekte, wovon auch die Produktion radioaktiver Substanzen in Heißen Zellen profitieren würde.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Radioaktive Stoffe wie Radioisotope kommen aufgrund ihrer Potentiale verstärkt zum Einsatz, besonders für medizinische Anwendungen wie neuartige, gezielte Krebstherapien. Für die Herstellung der Isotope ist in vielen Fällen manuelle Arbeit in radioaktiver Umgebung erforderlich, was häufigen Kontakt zu radioaktiver Strahlung und dadurch ein hohes Gesundheitsrisiko für die Produktionsmitarbeiter mit sich bringt. Im Moment ist keine Lösung verfügbar, die den Umgang mit der permanenten Bedrohung vereinfachen und die Mitarbeiter bei ihren anspruchsvollen, komplexen und anstrengenden Aufgaben unterstützen würde. Aufgrund der radioaktiven Strahlung findet die Herstellung der Isotope in abgeschirmten Handschuhboxen, so genannten Heißen Zellen statt. Die ungünstigen Arbeitsbedingungen dort wirken zusätzlich erschwerend. Die Abschirmung gegen die radioaktive Strahlung behindert die Produktionsmitarbeiter bei ihrer Arbeit, da sie u. a. die Bewegungsfreiheit einschränkt und zu einer unergonomischen Arbeitshaltung zwingt. Zur Verfolgung der Vorgänge und Arbeiten in der radioaktiven Umgebung wird derzeit ein dickes Bleiglasfenster verwendet, das den sichtbaren Bereich allerdings deutlich einschränkt und zu einer großen Anzahl an zum Teil schwerwiegenden Nachteilen führt. Hier sind vor allem die ungenügende Reichweite der Hände, die störende Diskrepanz zwischen dem kinästhetischen Gefühl der Hand und der optischen Wahrnehmung aufgrund der Lichtbrechung und nicht zuletzt der hohe Preis zu nennen.

Als Lösung für diese Herausforderungen wird in der vorliegenden Arbeit ein intelligentes Assistenzsystem (zum Begriff des intelligenten Assistenzsystems siehe Abschnitt 4.4.2, S. 61) für manuelle Tätigkeiten in radioaktiven Umgebungen vorgestellt, das die Informationstechnologie Augmented Reality in Kombination mit einem immersiven Kamerasystem nutzt. Das Kamerasystem besteht aus einer dreh- und schwenkbaren Kamera mit Zoom, die sich in einer radioaktiven Umgebung wie im Inneren einer Heißen Zelle befindet, sowie einer Videobrille. Ein intuitives Eingabegerät sorgt für eine optimale Bedienung. Die Kamera ersetzt das problembehaftete Bleiglasfenster und bietet darüber hinaus eine Reihe zusätzlicher Vorteile: Aufgrund des Kamerazooms eröffnen sich neue Möglichkeiten bei der Inspizierung der Produktionsanlage mit den teilweise kleinen Komponenten. Die Aktivitäten im radioaktiven Bereich können einfach aufgezeichnet und beispielsweise zur Dokumentation oder für Schulungszwecke verwendet werden. Externer Zugriff auf die Kamera ist möglich, so dass beispielsweise Kollegen die Aktionen des Produktionsmitarbeiters verfolgen und Unterstützung bieten können. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass Augmented Reality verwendet werden kann, da mit dem Kamera-

system die benötigte technische Basis für die Visualisierung der Informationen bereits vorhanden ist. Augmented Reality bietet die Möglichkeit, den Benutzern wichtige zusätzliche Informationen orts- und kontextbezogen direkt in den Blick auf die Arbeitsumgebung einzublenden. Diese Eigenschaft in Kombination mit einer adäquaten Strategie kann die Sicherheit deutlich erhöhen, indem beispielsweise Strahlenquellen visualisiert und gefährliche Bereiche optisch hervorgehoben werden, oder indem allgemein vor Gefahren gewarnt wird. Das Assistenzsystem versorgt die Benutzer mit notwendigen Informationen und unterstützt sie bei der Aufgabenerfüllung und der Entscheidungsfindung. Dadurch wird die Belastung der Produktionsmitarbeiter reduziert, eine angenehmere Arbeitsatmosphäre geschaffen sowie eine schnellere und auf Anhieb richtige Erfüllung der Aufgaben gefördert. Außerdem kann unnötige Anwesenheit in der radioaktiven Umgebung und damit die Dauer der Strahlenexposition reduziert sowie die Arbeitssicherheit erhöht werden.

Zur Validierung des Konzeptes wurden Kamerasysteme sowie wesentliche Aspekte der AR-Unterstützung in Form von Funktionsprototypen realisiert. Versuche zeigten, dass bereits die elementare Umsetzung der Lösungskonzepte zu einer merklichen Verbesserung führt und das Gesamtsystem die Arbeitsbedingungen nachhaltig positiv beeinflussen kann. Die befragten potentiellen Anwender beurteilten das Assistenzsystem positiv und bestätigten den Nutzen einer solchen Unterstützung für ihre Arbeit. Die Potentiale des Kamerasystems und besonders der Augmented-Reality-Technologie eignen sich hervorragend dazu, die bei manuellen Arbeiten in Heißen Zellen auftretenden Probleme zu lösen oder zumindest zu entschärfen. Das entwickelte Konzept weist daher Anwendungsmöglichkeiten in großer Anzahl und Vielfalt auf, die einen deutlichen Mehrwert generieren können. Zudem sind die technischen Voraussetzungen für die Umsetzung in den meisten Fällen bereits vorhanden.

Der realisierte Prototyp des Assistenzsystems diene primär dazu, Funktion und Nutzen des Konzeptes aufzuzeigen und weist daher noch Entwicklungspotential auf. Für eine Verwendung in realen Produktionsumgebungen müssen neben der weiteren Verbesserung der Funktionen und der Generierung neuer Anwendungen vor allem eine einfach zu nutzende Bedienerschnittstelle zur Konfiguration des AR-Systems entwickelt und die Zuverlässigkeit erhöht werden. Es sind auch weitere Versuche mit den Anwendern durchzuführen, um ihre Erfahrung, aber auch ihre Erwartungen und Anforderungen an die Gestaltung des Assistenzsystems mit einfließen lassen zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden neue Fragen aufgeworfen und es entstanden weitere Ideen zur Verbesserung des Konzeptes. Mit einer Funkschnittstelle für die Videobrille könnte beispielsweise der Komfort für die Anwender erhöht werden, da dann die starren Kabel wegfallen würden, welche die Kopfbewegung negativ beeinflussen. Bei der Verwendung eines dreidimensionalen Kamerasystems mit Zoom, das oft von Versuchspersonen gewünscht wurde, ist eine weitere Verbesserung der Arbeitsbedingungen zu erwarten. Voraussetzung hierfür ist allerdings ein geeignetes Kamerasystem, das derzeit nicht verfügbar ist. Die Anpassung der Winkel der beiden Kameras zueinander in Abhängigkeit vom Zoom und vom Abstand zum betrachteten Objekt stellt eine technische Herausforderung dar. Eine weitere Idee ist die Verbesserung der Sicht in der Heißen Zelle durch eine zusätzliche translatorische Bewegung der Kamera entlang der Wand, beispielsweise in vertikaler oder horizontaler Richtung. Ziel ist, durch eine Veränderung der Position verdeckende Objekte zu umgehen oder allgemein den Blickwinkel auf die Anlage zu ändern. Eine andere visionärere Idee sieht vor, die schwenkbare Kamera durch eine Matrix aus kleinen Kameras zu ersetzen, deren Bilder entweder an eine Monitorwand an der Außenseite der Box ausgegeben werden oder in ein Head Mounted Display selektiv je nach Blickrichtung des Benutzers eingeblendet werden. Mit diesem Ansatz soll die evtl. anfällige Schwenkmechanik ersetzt werden. Bei allen Ideen ist zu prüfen, ob der erzielte Mehrwert den technischen Mehraufwand rechtfertigt und die Arbeitsbedingungen dadurch weiter verbessert werden.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Konzept wurde der Grundstein für ein intelligentes Assistenzsystem zur Verbesserung der manuellen Arbeit im radioaktiven Umfeld gelegt. Auch die Technologie Augmented Reality, ein elementarer Bestandteil des Konzeptes, ist vor allem als mächtige Basis zu sehen, die zahlreiche und vielfältige weitere Möglichkeiten bietet. Dadurch eröffnen sich vollkommen neue Optionen für die Arbeit mit radioaktiven Stoffen, welche diesen Bereich grundlegend ändern können. Das Assistenzsystem hat das Potential, neue Wege zu eröffnen und bestehende Hemmnisse zu überwinden. Die vorliegende Arbeit ist daher auch als Denkanstoß für Bereiche mit ähnlichen Anforderungen und Problemen zu sehen, wie die Nuklearmedizin. Dort könnte es beispielsweise dazu beitragen, die Versorgung mit benötigten Radioisotopen zu verbessern, die Herstellung der Therapeutika zu vereinfachen und die Erforschung neuer Krebsmedikamente zu fördern, um den betroffenen Patienten besser helfen und einem der derzeit größten Gesundheitsprobleme der Menschheit wirksam begegnen zu können.

9 Literatur

ADAMI et al. 2008

Adami, W.; Lang, C.; Pfeiffer, S.; Rehberg, F.: Montage braucht Erfahrung - Erfahrungsbasierte Wissensarbeit in der Montage. München und Mering: Rainer Hampp 2008. ISBN: 978-3-86618-274-5.

AHLBERG 2009

Ahlberg Electronics: Radiation Hardened Cameras <<http://www.ahlberg-electronics.com/category.php?catID=6>> - 30.03.2009.

AITEANU 2006

Aiteanu, D.: Virtual and Augmented Reality Supervisor for a New Welding Helmet - Computerised assistance and online feedback of seam quality at manual welding. Diss. Universität Bremen (2006). Aachen: Shaker 2006. ISBN: 3-8322-4945-1.

ALLEN 2005

Allen, B.: Role of alpha sources in cancer therapy. In: 5th international Conference on Isotopes. Brüssel: 2005.

AMERICAN CANCER SOCIETY 2004

Cancer Statistics 2004
<http://www.cancer.org/docroot/pro/content/pro_1_1_Cancer_Statistics_2004_presentation.asp> - 17.04.2007.

AMERICAN GLOVEBOX SOCIETY 2007

American Glovebox Society: Guideline for Gloveboxes. 3 Aufl. 2007. ISBN: 1-892643-06-5.

AMERICAN GLOVEBOX SOCIETY 2008

American Glovebox Society <<http://www.gloveboxsociety.org/>> - 11.03.2008.

APOSTOLIDIS et al. 2005

Apostolidis, C.; Molinet, R.; McGinley, J.; Abbas, K.; Möllenbeck, J.; Morgenstern, A.: Cyclotron production of Ac-225 for targeted alpha therapy. Applied Radiation and Isotopes 62 (2005), S. 383-387.

ARMSTRONG et al. 2004

Armstrong, G. A.; Burgess, T. W.; Rennich, M. J.: Integrated Video Monitoring System for Spallation Neutron Source Target Hot Cell Remote Handling. 10th Topical Meeting on Robotics & Remote Systems. Gainesville, Florida, USA, 03.28. - 04.01.2004.

ARTOOLKIT 2009

Human Interface Technology Laboratory (HIT Lab) at the University of Washington (Hrsg.): ARToolKit
<<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>> - 27.01.2009.

ARYEE-BOI 2002

Aryee-Boi, J.: Dusch-PUVA: Ein innovatives Verfahren der lokalen PUVA-Therapie Klinische und pharmakokinetische Ergebnisse bei Psoriasis vulgaris. Diss. Klinik und Poliklinik für Dermatologie im Universitätsklinikum Benjamin Franklin der Freien Universität Berlin, Berlin (2002).
<http://www.diss.fu-berlin.de/diss/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDISS_derivate_000000000649/> - 10.09.2009.

AZUMA 1997

Azuma, R.: A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6 (1997) 4, S. 355-385.

AZUMA et al. 2001

Azuma, R.; Baillot, Y.; Behringer, R.; Feiner, S.; Julier, S.; MacIntyre, B.: Recent advances in augmented reality. IEEE Computer Graphics and Applications 21 (2001) 6, S. 34-47.

BAIER et al. 2001

Baier, H.; Freyberger, F.; Schmidt, G.: Interaktives Stereo-Telesehen – ein Baustein wirklichkeitsnaher Telepräsenz. at – Automatisierungstechnik 49 (2001) 7, S. 295.

BAJURA et al. 1992

Bajura, M.; Fuchs, H.; Ohbuchi, R.: Merging Virtual Objects with the Real World: Seeing Ultrasound Imagery within the Patient. In: Proceedings of the 19th annual SIGGRAPH Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Chicago, Illinois, USA. ACM 1992, S. 203-210. ISBN: 0-89791-479-1.

BAUA 2009

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA): Portal Gefährdungsbeurteilung: Zwangshaltung (erzwungene Körperhaltung) - Art der Gefährdung und deren Wirkung
<<http://www.gefaehrungsbeurteilung.de/de/gefaehrungsfaktoren/physischebelastung/zwangshaltung>> - 06.10.2009.

BAUDISCH & ÖCHSNER 2004

Baudisch, C., Öchsner, M.: Ibritumomab-Tiuxetan - Radioimmuntherapeutikum zur Behandlung des CD20-positiven follikulären Non-Hodgkin-Lymphoms. <http://www.pharmazie.uni-mainz.de/Fachschaft/Referate/Dannhardt/0405_ws/Ibritumomab-Tiuxetan.pdf> - 18.12.2004 (spezieller login notwendig).

BAUER 1997

Bauer, W.: Entwicklung eines Systems zur virtuellen ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung. Berlin: Springer 1997. (IPA-IAO Forschung und Praxis 257).

BDN 2009

Berufsverband Deutscher Nuklearmediziner (BDN): Weiterer Etappensieg: BDN macht sich für neues Verfahren zur Diagnose des Helicobacter pylori stark <<http://www.medipan-diagnostica.com/heliprobe/dok/n051001-1.pdf>> - 19.01.2009.

BECHTOLD & KEMMERER 2000

Bechtold, V.; Kemmerer, B.: Radioisotope für die medizinische Diagnostik. Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe 32 (2000) 1-2, S. 10-14.

BERTZ et al. 2006

Bertz, J.; Giersiepen, K.; Haberland, J.; Hentschel, S.; Kaatsch, P.; Katalinic, A.; Stabenow, R.; Stegmaier, C.; Ziegler, H.; Gesellschaft der epidemiologischen Krebsregister in Deutschland e.V.: Krebs in Deutschland - Häufigkeiten und Trends. 5. Aufl. Saarbrücken: 2006. ISBN: 3-9808880-3-7.

BFS 2009

Bundesamt für Strahlenschutz (BFS): Empfehlungen zum Strahlenschutz bei der Radioimmuntherapie mit Y90-markierten Antikörpern
 <http://www.nuklearmedizin.de/publikationen/allgem_publik/strahl_rit.pdf>
 - 17.02.2009.

BIODEX 2008a

Biodex Medical Systems: Compact L-Block with Dose Calibrator Shield and LCD Display <http://www.biodex.com/radio/pet/pet_440feat.htm> -
 11.03.2008.

BIODEX 2008b

Biodex Medical Systems: Compact L-Block Shield with built-in Dose Calibrator Shield <http://www.biodex.com/radio/pet/pet_433feat.htm> -
 11.03.2008.

BLOXAM 1958

Bloxam, F. S.: Viewing And Handling Equipment. In: The United Kingdom Atomic Energy Authority (Hrsg.): Glove Boxes And Shielded Cells For Handling Radioactive Materials. London: Butterworth Scientific Publications 1958, S. 330-343.

BLUTEAU et al. 2005

Bluteau, J.; Kitahara, I.; Kameda, Y.; Noma, H.; Kogure, K.; Ohta, Y.: Visual Support for Medical Communication by Using Projector-Based Augmented Reality and Thermal Markers. In: Association for Computing Machinery (ACM) (Hrsg.): Proceedings of the 2005 International Conference on Augmented Tele-Existence. Christchurch, Neuseeland, 5. - 8.12.2005. 2005, S. 98-105. ISBN: 0-473-10657-4 (ACM International Conference Proceeding Series; Vol. 157).

BOLL et al. 2005

Boll, R. A.; Malkemus, D.; Mirzadeh, S.: Production of Actinium-225 for Alpha Particle Mediated Radioimmunotherapy. Applied Radiation and Isotopes 62 (2005) 5, S. 667-679.

BRAINLAB 2009

BrainLAB (Hrsg.): Essential Navigation Platform Kolibri ENT. 2009.
 <<http://www.brainlab.com/download/pdf/ENTInternationalbrochure.pdf>> -
 15.03.2009.

BRÄUNING 1989

Bräuning, D.: Wirkung hochenergetischer Strahlung auf Halbleiterbauelemente. Berlin: Springer 1989. ISBN: 3540508910.

BREEN et al. 1996

Breen, D. E.; Whitaker, R. T.; Rose, E.; Tuceryan, M.: Interactive Occlusion and Automatic Object Placement for Augmented Reality. Computer Graphics Forum 15 (1996) 3, S. 11-22.

BRUMBI 1990

Brumbi, D.: Bauelemente-Degradation durch radioaktive Strahlung und deren Konsequenzen. Diss. Ruhr-Universität Bochum (1990). (Schriftenreihe des Instituts für Elektronik 901/5).

BUBB & LANGE 2008

Bubb, H.; Lange, C.: Produktionsergonomie. Umdruck zur Vorlesung, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München (2008).

BUTZ 2006

Butz, A.: Augmented Reality. Vorlesungsskript, Institut für Informatik, Ludwig-Maximilians-Universität München (2006).
<<http://www.medien.ifi.lmu.de/lehre/ws0607/ar/>> - 31.01.2009.

CASEY 1998

Casey, S. M.: Set Phasers on Stun and Other True Tales of Design, Technology, and Human Error. 2 Aufl. Santa Barbara, Kalifornien, USA: Aegean Publishing 1998. ISBN: 0963617885.

CELL THERAPEUTICS INC. 2008

Cell Therapeutics Inc. (Hrsg.): Zevalin - A resource guide for patients and their families. Seattle, Washington, USA: März 2008.
<<http://www.zevalin.com/pdf/Z%20Patient%20QA.pdf>> -

CHARITE 2009

Patienteninformation: MIBG-Therapie
<http://www.charite.de/nuklearmedizin/pat_scon3_5.html> - 19.01.2009.

COLBY et al. 2002

Colby, E.; Lum, G.; Plettner, T.; Spencer, J.: Gamma Radiation Studies on Optical Materials. In: IEEE Transactions on Nuclear Science, Bd. 49. Dec. 2002. 2002, S. 2857-2867.

COMMITTEE ON APPLICATION OF DIGITAL INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS TO NUCLEAR POWER PLANT OPERATIONS AND SAFETY 1997

Committee on Application of Digital Instrumentation and Control Systems to Nuclear Power Plant Operations and Safety: Digital Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants: Safety and Reliability Issues. Washington, D.C.: National Academy Press 1997. ISBN: 0-309-05732-9.

COMPORT et al. 2003

Comport, A. I.; Marchand, É.; Chaumette, F.: A Real-Time Tracker for Markerless Augmented Reality. Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2003). Tokyo, Japan, Oktober 2003, S. 36-45.
<http://www.irisa.fr/lagadic/pdf/2003_ismar_comport.pdf> -

DELGADO et al. 2003

Delgado, F. J.; White, J.; Abernathy, M. F.: Smart Camera System for Aircraft and Spacecraft. In: Verly, J. G. (Hrsg.): Enhanced and Synthetic Vision 2003, Bd 5081. Orlando, Florida, USA, 22.09.2003. SPIE 2003, S. 102-1081).

DGN 2009a

Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V. (DGM): Nuklearmedizin – DGN-Patienteninfo im Internet
<http://www.nuklearmedizin.de/pat_info/nuk_online/einleitung.php> - 19.01.2009.

DGN 2009b

Deutsche Gesellschaft für Nuklearmedizin e.V. (DGM): Leitlinie für die Radiosynoviorthese
<<http://www.nuklearmedizin.de/publikationen/leitlinien/radiosynoviorthese.php>> - 17.02.2009.

- DIAS-FERREIRA et al. 2009
Dias-Ferreira, E.; Sousa, J. C.; Melo, I.; Morgado, P.; Mesquita, A. R.; Cerqueira, J. J.; Costa, R. M.; Sousa, N.: Chronic Stress Causes Frontostriatal Reorganization and Affects Decision-Making. Science News 325 (2009) 5940, S. 621-625.
- DIERKES 2004
Dierkes, M.: Technik für den Menschen. Forschung aktuell 2004 (2004), S. 62-63.
- DIN 6814 TEIL 1 2005
DIN 6814 Teil 1: Begriffe in der radiologischen Technik - Anwendungsgebiete. Berlin: Beuth 2005.
- DIN 6814 TEIL 5 2008
DIN 6814 Teil 5: Begriffe der radiologischen Technik - Strahlenschutz. Beuth 2008.
- DIN 25407 BEIBLATT 1 1994
DIN 25407 Beiblatt 1: Abschirmwände gegen ionisierende Strahlung - Hinweise für die Errichtung von Wänden aus Bleibausteinen. Berlin: Beuth 1994.
- DIN 25407 TEIL 2 1993
DIN 25407 Teil 2: Abschirmwände gegen isolierende Strahlung. Berlin: Beuth 1993.
- DIN 25407 TEIL 3 1993
DIN 25407 Teil 3: Abschirmwände gegen isolierende Strahlung - Errichtung von Heißen Zellen aus Blei. Berlin: Beuth 1993.
- DIN 25409 TEIL1 1993
DIN 25409 Teil1: Fernbedienungsgeräte zum Arbeiten hinter Schutzwänden; Ferngreifer, Maße. Berlin: Beuth 1993.
- DIN 25409 TEIL 1 1993
DIN 25409 Teil 1: Fernbedienungsgeräte zum Arbeiten hinter Schutzwänden; Ferngreifer, Maße. Berlin: Beuth 1993.
- DIN 25412 TEIL 1 1988
DIN 25412 Teil 1: Handschuhkästen: Maße und Anforderungen. Berlin: Beuth 1988.
- DIN 25425 TEIL1 1995
DIN 25425 Teil1: Radionuklidlaboratorien - Regeln für die Auslegung. Berlin: Beuth 1995.
- DIN EN ISO 9241-110 2006
DIN EN ISO 9241-110: Grundsätze der Dialoggestaltung. 2006.
- DOSTERT & ENDERLEIN 2002
Dostert, R.; Enderlein, W.: Projekt: Kamera-Steuerung. Projektbericht, Lehrstuhl Computergrafik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken (2002).
<<http://graphics.cs.uni-sb.de/Courses/ws0102/Multimedia/Projekt/kamera/>> - 01.02.2009.

DRØIVOLDSMO et al. 2002

Drøivoldsmo, A.; Reigstad, M.; Shimoda, H.; Louka, M. N.; Helgar, S.; Gustavsen, M.; Nystad, E.: Use of radiation maps in augmented reality (HWR-717). OECD Halden Reactor Project Work Report, (2002).

DUNSTER 1958

Dunster, H. J.: The Place of the Glove Box in Radiation Protection. In: Walton, G. N. (Hrsg.): Glove Boxes and Shielded Cells for Handling Radio-active Materials. London: Butterworths Scientific Publications 1958, S. 3-5. (A record of the Proceedings of the Symposium on Glove Box Design and Operation held in Harwell on February 19th to 21st, 1957)

DUTOIT et al. 2001

Dutoit, A. H.; Creighton, O.; Klinker, G.; Kobylinski, R.; Vilsmeier, C.; Bruegge, B.: Architectural Issues in Mobile Augmented Reality Systems: A Prototyping Case Study. 8th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC 2001). Macau, 4. - 7. Dezember 2001. 29.11.2007.

DZB 2007

Research, D. B.: Healthcare - Eckert & Ziegler
<http://www.equitystory.com/Download/Companies/ezag/Other%20Information/ezag_o_i_d_DZ_Bank021001.pdf> - 20.04.2007.

ECKES & WAGNER 2006

Eckes, R.; Wagner, R.: Einsatz von Augmented Reality im Ramp-Up Prozess von automatisierten Fertigungssystemen. In: Gausemeier, J. et al. (Hrsg.): Tagungsband zum 5. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, 31. Mai / 1. Juni 2006. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe Band 188 2006.

ECKES 2007

Eckes, R.: Augmented Reality-basiertes Verfahren zur Unterstützung des Anlaufprozesses von automatisierten Fertigungssystemen. Diss. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2007. ISBN: 978-3-939350-25-5. (HNI-Verlagsschriftenreihe 206).

EG-GMP 2008

European Medicines Agency (EMA): EU Guidelines to Good Manufacturing Practice (EU-GMP): Medicinal Products for Human and Veterinary Use - Annex 3: Manufacture of Radiopharmaceuticals
<http://ec.europa.eu/enterprise/pharmaceuticals/eudralex/vol-4/2008_09_annex3.pdf> - 20.08.2009.

EHRLENSPIEL 2007

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3 Aufl. München Wien: Hanser 2007. ISBN: 3-446-40733-2.

E-TEACHING 2009

e-teaching.org: Eye Tracking <<http://www.e-teaching.org/didaktik/qualitaet/eye>> - 16.03.2009.

EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE 2004

European Commission Joint Research Centre (Hrsg.): 40 years of science at the institute for transuranium elements. 2004.
<http://itu.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/ITU_40_years_of_science.pdf> -

F&R 2009

F & R Internet Agentur: Ihre Panoramen <http://www.freiburg-panorama.com/pan_infos.html> - 18.02.2009.

FISCHER 2008

Fischer, G.: Strahlungsresistente optische Sensoren und Kameras. atw - Internationale Fachzeitschrift für Kernenergie 53 (2008) Heft 2 - Februar.

FISCHER et al. 2004a

Fischer, J.; Neff, M.; Freudenstein, D.; Bartz, D.: Medical Augmented Reality based on Commercial Image Guided Surgery. Eurographics Symposium on Virtual Environments (EGVE). Juni 2004, S. 83-86.

FISCHER et al. 2004b

Fischer, M.; Behr, T.; Grünwald, F.; Knapp, W. H.; Trümper, L.; von Schilling, C.: Leitlinie für die Radioimmuntherapie des rezidivierenden oder refraktären CD20-positiven follikulären B-Zell-Non-Hodgkin-Lymphoms. Nuklearmedizin 5 (2004), S. 171-176.

FREEHAND 2009

Prosurgics Ltd.: FreeHand <<http://www.freehandsurgeon.com/about.php>> - 31.03.2009.

FREELook 2009

Murphy, G.: FreeLook, a software headtracker for computer simulations and disabled access <<http://freelook.glenmurphy.com/>> - 04.04.2009.

FREI 2003

Frei, T.: Analyse und Konzeption einer Autorenumgebung für MR-Anwendungen. Diplomarbeit, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main (2003). <http://www.gdv.informatik.uni-frankfurt.de/diplomarbeiten/pdf/Diplomarbeiten_final/Diplomarbeit_tfrei.pdf> - 31.01.2009.

FREMDWÖRTERLEXIKON 1993

Hermann, U.: Fremdwörterlexikon. München: Orbis 1993. ISBN: 3572005485.

FRIEDRICH 2004

Friedrich, W.: ARVIKA - Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. Erlangen: Publicis Corporate Publishing 2004. ISBN: 3895782394.

FRIEDRICH & WOHLGEMUTH 2004

Friedrich, W.; Wohlgemuth, W.: Das Leitprojekt ARVIKA. In: Friedrich, W. (Hrsg.): ARVIKA – Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. 1 Aufl. Erlangen: Publicis Corporate Publishing 2004, S. 13-26. ISBN: 3895782394.

FRIELING & SONNTAG 1987

Frieling, E.; Sonntag, K.: Lehrbuch Arbeitspsychologie. Bern: Huber 1987.

FUCHS et al. 1998

Fuchs, H.; Livingston, M.; Raskar, R.; Colucci, D.; Keller, K.; State, A.; Crawford, J.; Rademacher, P.; Drake, S.; Mayer, A.: Augmented reality visualization for laparoscopic surgery. In: Proceedings of the First Interna-

- tional Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention 1998 (MICCAI). 1998, S. 934-943. ISBN: 3-540-65136-5.
- GEERLINGS 1993
Geerlings, M. W.: Radionuclides for radioimmunotherapy: criteria for selection. The International Journal of Biological Markers 8/3 (1993), S. 180-186.
- GEERLINGS et al. 1993
Geerlings, M. W.; Kaspersen, F. M.; Apostolidis, C.; van der Hout, R.: The Feasibility of ^{225}Ac as a Source of Alpha-Particles in Radioimmunotherapy. Nuclear Medicine Communications 14/2 (1993), S. 121-125.
- GEGENFURTNER et al. 2009
Gegenfurtner, K. R.; Walter, S.; Braun, D. I.: Visuelle Informationsverarbeitung im Gehirn. Tutorial, Abteilung Allgemeine Psychologie, Justus-Liebig-Universität, Gießen (2009). <<http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/aka.htm>> - 01.02.2009.
- GIESLER et al. 2004
Giesler, B.; Salb, T.; Steinhaus, P.; Dillmann, R.: Using augmented reality to interact with an autonomous mobile platform. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '04). 2004, S. 1009-1014. ISBN: 0-7803-8232-3.
- GMP 2009
Food and Drug Administration (FDA): Good Manufacturing Practices (GMP) / Quality System (QS) Regulation
<<http://www.fda.gov/CDRH/DEVADVICE/32.html>> - 08.02.2009.
- GMP INSTITUTE 2009
GMP Institute: GMP Regulations and Current Preambles
<<http://www.gmp1st.com/gmpregs.htm>> - 08.02.2009.
- GOEBBELS et al. 2003
Goebbels, G.; Troche, K.; Braun, M.; Ivanovic, A.; Grab, A.; von Lübtow, K.; Zeilhofer, H. F.; Sader, R.; Thieringer, F.; Albrecht, K.; Praxmarer, K.; Keeve, E.; Hanssen, N.; Krol, Z.; Hasenbrink, F.: Development of an Augmented Reality System for intra-operative navigation in maxillo-facial surgery. In: 2. Jahrestagung des Gesellschaft für Computer-und Roboterassistierte Chirurgie (CURAC). 2003.
- GRIMM et al. 2002
Grimm, P.; Haller, M.; Paelke, V.; Reinhold, S.; Reimann, C.; Zauner, J.: AMIRE - Authoring Mixed Reality. The First IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop. Darmstadt, GERMANY, 29. September 2002.
- GRÜNWALD 2001
Grünwald, F.: Nuklearmedizinische Diagnostik und Therapie – Aktuelle Bedeutung für die klinische Medizin. Hessisches Ärzteblatt (2001) 3, S. 105-111.
- GYRATION 2009
Air Mouse GO Plus <<http://www.gyration.com/index.php/de/produkte/in-air-mouse-und-tastaturen/go-air-mouse.html>> - 07.10.2009.
- HARFENSTELLER et al. 2004
Harfensteller, M.; Schilp, M.; Eursch, A.; Zaeh, M. F.: Sensor Integration in Radioactive Environments. In: Wang, A. (Hrsg.): Sensors for Harsh Envi-

ronments, Proceedings of SPIE, Bd 5590. Philadelphia, Pennsylvania, USA. 2004, S. 57-65.

HARFENSTELLER 2006

Harfensteller, M.: Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets. Diss. Technische Universität München (2006).
<http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=986428701&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=986428701.pdf>.

HARFENSTELLER et al. 2006

Harfensteller, M.; Eursch, A.; Zaeh, M. F.; Moreno, J.; Kabai, E.; Henkelmann, R.; Türlér, A.; Huenges, E.; Mentler, M.: Automated Target Processing in Radioactive Environments. In: Westkämper, E. (Hrsg.): The 1st CIRP-International Seminar on Assembly Systems. Stuttgart, 15.-17. November 2006. Stuttgart: 2006, S. 277-281. ISBN: 978-3-8167-7213-2.

HCS 2009

Hot Cell Services: Radiation Shielding Services <http://www.sovis-optique.com/hotcell/rs_services.htm> - 11.09.2009.

HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN 2009

Helmholtz Zentrum München - Deutsches Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit <<http://www.helmholtz-muenchen.de/>> - 25.01.2009.

HERGENHAHN 2009

Hergenbahn, T.: Developer page - Libnodave
<<http://linux.softpedia.com/developer/Thomas-Hergenbahn-11873.html>> - 05.04.2009.

HERZBERG et al. 1959

Herzberg, F.; Mausner, B.; Snyderman, B. B.: The motivation to work. New York: Wiley 1959.

HESSE 2003

Hesse, S.: Automatisieren mit Know-How. 1 Aufl. Hoppenstedt Publishing 2003. ISBN: 3935772009.

HETTINGER & RICCIO 1992

Hettinger, L. J.; Riccio, G. E.: Visually Induced Motion Sickness in Virtual Environments. PRESENCE - Teleoperators and Virtual Environments 1 (1992) 3, S. 306-310.

HICHWA 2000

Hichwa, R. D.: Radiopharmaceutical Automation: Sensors and Technology vs the Human Experience. Proceedings of the Eighth Workshop on Targetry and Target Chemistry. St. Louis, Missouri, USA, 23. - 26. 06.1999, S. 59-61.

HIT LAB 2009

Human Interface Technology Laboratory (HIT Lab) at the University of Washington: ARToolkit Documentation
<<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/documentation/>> - 12.03.2009.

HITECSECURITY 2009

HitecSecurity: Überwachungskamera
<<http://www.hitecsecurity.de/media/products/HTS-51.pdf?XTCsid=12b9a03f3ebea01fdc2c6e4e2ac991f4>> - 01.02.2009.

HOUSSAY 2000

Houssay, L. P.: Robotics And Radiation Hardening In The Nuclear Industry. University of Florida (2000). <<http://etd.fcla.edu/UF/ana6242/master.PDF>> - 31.03.2009.

HOUTS et al. 1988

Houts, P., S.; Cleary, P., D.; Hu, T.-W.: The Three Mile Island Crisis - Psychological, Social and Economic Impacts on the Surrounding Population. The Pennsylvania State University Press 1988. ISBN: 0-271-00633-1.

HUBER 2003

Huber, R.: Bewertung der lokoregionalen Radioimmuntherapie disseminierter Tumorzellen des diffusen Magenkarzinoms mit einem ²¹³Bi gekoppelten tumorspezifischen Antikörper im Mausmodell. Diss. Tierärztliche Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München (2003).

HÜBNER 2004

Hübner, C.: Radioaktive Spürhunde. Chemie in unserer Zeit 2004 (2004) 38, S. 286-288.

HURTIENNE et al. 2006a

Hurtienne, J.; Mohs, C.; Meyer, H. A.; Kindsmüller, M. C.; Israel, J. H.; IUI Research Group: Intuitive Use of User Interfaces - Definition und Herausforderungen. i-com, Zeitschrift für interaktive und kooperative Medien 5 (2006a) Heft 3, S. 38-41.

HURTIENNE et al. 2006b

Hurtienne, J.; Mohs, C.; Meyer, H. A.; Kindsmüller, M. C.; Israel, J. H.; IUI Research Group: Intuitive Use of User Interfaces - Definition und Herausforderungen. i-com - Zeitschrift für interaktive und kooperative Medien 5 (2006b) 3, S. 38-41.

IAEA 1999

IAEA: Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants. Safety Series No. 75-INSAG-3 Rev. 1. Wien, Österreich: International Atomic Energy Agency (IAEA) 1999. ISBN: 92-0-102699-4.

ICRP 1993

ICRP: Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) 1990. Stuttgart: Gustav Fischer 1993. (ICRP Veröffentlichung 60, deutsche Ausgabe).

IGUCHI et al. 2004

Iguchi, Y.; Kanehira, Y.; Tachibana, M.; Johnsen, T.: Development of Decommissioning Engineering Support System (DEXUS) of the Fugen Nuclear Power Station. Journal of Nuclear Science and Technology 41 (2004) 3, S. 367-375.

IMV 2007

IMV Medical Imaging Division: IMV Nuclear Medicine Report Shows Distinct Utilization Patterns in Hospitals vs. Non-Hospitals, <<http://www.imvlimited.com/PDF/2005/MID/Press%20Release/NM05%20release%207-06%20.pdf>> - 19.04.2007.

ISHII et al. 2005

Ishii, H.; Fujino, H.; Droivoldsmo, A.: Development of a Tracking Method for Augmented Reality Applied to Nuclear Plant Maintenance Work: (2) Circular Marker. Symposium on the Future I&C for Nuclear Power Plants

- (ISOFIG) 2005. Tongyeong, Gyungnam, Korea, 1. - 4.11.2005.
<<http://www2.hrp.no/vr/workshops/2005/ishii.pdf>> -
- IST 2008
Imaging & Sensing Technology Nuclear Systems (IST)
<<http://www.istcorp.com/>> - 11.03.2008.
- JOHNSEN et al. 2005
Johnsen, K.; Dickerson, R.; Raij, A.; Lok, B.; Jackson, J.; Shin, M.; Hernandez, J.; Stevens, A.; Lind, D. S.: Experiences in Using Immersive Virtual Characters to Educate Medical Communication Skills. In: Proceedings of IEEE Virtual Reality 2005. 2005.
- JURCIC et al. 1997
Jurcic, J. G.; McDevitt, M. R.; Sgouros, G.; Ballangrud, Å. M.; Finn, R. D.; Geerlings, M. W., Sr.; Humm, J. L.; Molinet, R.; Apostolidis, C.; Larson, S. M.; Scheinberg, D. A.: Targeted therapy for myeloid leukemias: a phase I trial of bis-muth-213-HuM195 (anti-CD33). Blood, 90(10): 2245, Part 1, Suppl. 1 (1997).
- KATO & BILLINGHURST 1999
Kato, H.; Billinghurst, M.: Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System. In: Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR 99). San Francisco, Californien, USA, Oktober 1999. 1999, S. 85-94. ISBN: 0-7695-0359-4.
- KENNEDY & PLUMB 2003
Kennedy, R.; Plumb, K.: Process development facilities and pilot plants. In: Bennett, B. et al. (Hrsg.): Pharmaceutical Process development facilities and pilot plants production - an engineering guide. Rugby: Institution of Chemical Engineers 2003, S. 347-371.
- KID 2007a
Krebsinformationsdienst (KID) - Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg: PET -Positronenemissionstomographie - Darstellung von Stoffwechselabläufen zur Krebsdiagnostik
<http://www.krebsinformation.de/Fragen_und_Antworten/pet.html> - 18.04.2007.
- KID 2007b
Krebsinformationsdienst (KID) - Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg: Szintigraphie - bildgebender Verfahren in der Krebsdiagnostik
<http://www.krebsinformationsdienst.de/Fragen_und_Antworten/szintigraphie.html> - 18.04.2007.
- KID 2007c
Krebsinformationsdienst (KID) - Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg: Chemotherapie - Krebsbehandlung mit Medikamenten
<http://www.krebsinformationsdienst.de/Fragen_und_Antworten/chemotherapie.html> - 19.04.2007.
- KIRCHGEORG 2009
Kirchgeorg, M.: Szintigraphie
<<http://www.netdokter.de/Diagnostik+Behandlungen/Untersuchungen/Szintigraphie-1477.html>> - 24.01.2009.

KJELDSSEN 2009

Kjeldsen, R.: IBM Head Tracking Pointer
<http://www.alphaworks.ibm.com/tech/headpointer> - 04.04.2009.

KLINKER et al. 2001

Klinker, G.; Creighton, O.; Dutoit, A. H.; Kobylinski, R.; Vilsmeier, C.; Brügge, B.: Augmented maintenance of powerplants: A prototyping case study of a mobile AR system. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2001). New York, USA, 29. - 30. Oktober 2001. 29.11.2007.

KRENN & FLECKER 2000

Krenn, M.; Flecker, J.: Erfahrungsgeleitetes Arbeiten in der automatisierten Produktion. Neue Anforderungen an die Personalpolitik, Ausbildung und Arbeitsgestaltung. Wien: 2000. (FORBA-Forschungsbericht 3/2000).

KUWERT et al. 2009

Kuwert, T.; Prante, O.; Meyer, G.: Arzneimittelrechtliche Aspekte der Herstellung und Anwendung von Radiopharmaka. Der Nuklearmediziner 32 (2009) 2, S. 101-104.

LEE 1994

Lee, E. J.: Computer-Based Digital System Failures. Technical Review Report AEOD/T94-03. Washington D.C., USA: U.S. Nuclear Regulatory Commission 1994.

LEXOR GMBH 2005

LEXOR GmbH (Hrsg.): Strahlenschutzmaterial - Video- und Sprechsysteme. Zollikofen, Schweiz: April 2005.
<http://www.lexor.ch/download/LexorD.pdf> - 06.10.2009.

LOCHMANN 2006

Lochmann, D.: Vom Wesen der Information: Eine allgemeinverständliche Betrachtung über Information in der Gesellschaft, in der Natur und in der Informationstheorie. 2 Aufl. Books on Demand GmbH 2006. ISBN: 3833416912.

LUDWIG & REIMANN 2005

Ludwig, C.; Reimann, C.: Augmented Reality: Information im Fokus. C-Lab Report 4 (2005) 1.

LUMUS 2009

Lumus (Hrsg.): Video Eyeglasses. Rehovot, Israel: 2009.
http://www.lumus-optical.com/index.php?option=com_content&task=view&id=9&Itemid=15 - 23.01.2009.

MACIAN 2006

Macian, R.: Applications of Nuclear Medicine to Medical Diagnosis. Radiation and Radioisotope Applications - EPFL Doctoral Course PY-031, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (2006).
http://lrs.web.psi.ch/educational/courses/2006_EPFL_DOCTORAL_PSI_COURSE/week6/Week_6_Lecture_10.pdf - 08.02.2010.

MCDEVITT et al. 1998

McDevitt, M. R.; Sgouros, G.; Finn, R. D.; Humm, J. L.; Jurcic, J. G.; Larson, S. M.; Scheinberg, D. A.: Radioimmunotherapy with alpha-emitting nu-

- clides. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging 25 (1998) 9, S. 1341-1351.
- MCDEVITT et al. 2000
McDevitt, M. R.; Barendswaard, E.; Ma, D.; Lai, L.; Curcio, M. J.; Sgouros, G.; Ballangrud, A. M.; Yang, W.-H.; Finn, R. D.; Pellegrini, V.; Geerlings Jr., M. W.; Lee, M.; Brechbiel, M. W.; Bander, N. H.; Cordon-Cardo, C.; Scheinberg, D. A.: An a-particle emitting antibody ([²¹³Bi]J591) for radio-immunotherapy of prostate cancer. Cancer Research (2000) 60, S. 6095-6100.
- MERKMALE ZEVALIN 2005
Schering AG (Hrsg.): Merkmale von Zevalin
<http://www.schering.at/html/de/70_aerzte_apotheker/pdfs/Zevalin_SPC.pdf> - 20.01.2005.
- METAIO 2009
Metaio: Unifeye Plattform - Software Plattform für Augmented Reality
<<http://www.metaio.de/produkte/>> - 12.03.2009.
- METZ 2004
Metz, C.: Virtual und Augmented Reality in Industrie und Militär. Seminararbeit, Ludwig-Maximilians-Universität, München (2004).
<http://www.medien.ifi.lmu.de/fileadmin/mimuc/hs_2004/ausarbeitung_metz.pdf> - 01.04.2009.
- MEYER 2005
Meyer, G. J.: Therapie mit Alpha-Strahlern. Der Nuklearmediziner 28 (2005) 1, S. 57-61.
- MEYERS 2008
Meyers Lexikon online: Radioaktivität (Sachartikel). 2008.
(<http://lexikon.meyers.de/beosearch/permlink.action?pageId=44893063&version=3>)
- MILENIC & BRECHBIEL 2004
Milenic, D. E.; Brechbiel, M. W.: Targeting of Radio-Isotopes for Cancer Therapy. Cancer Biology & Therapy 3 (2004) 4, S. 361-370.
- MILGRAM & KISHINO 1994
Milgram, P.; Kishino, F.: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE Transactions on Information Systems E77-D (1994) 12, S. 1321-1329.
- MILGRAM & COLQUHOUN 1999
Milgram, P.; Colquhoun, H.: A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. In: Ohra, Y. et al. (Hrsg.): Mixed Reality - Merging Real and Virtual Worlds. Berlin: Springer 1999, S. 1-16.
- MILLER & SWAIN 1986
Miller, D.; Swain, A.: Human Error and Human Reliability. In: Salvendy, G. (Hrsg.): Handbook of Human Factors/Ergonomics. New York: John Wiley 1986.
- MIRION 2009a
Mirion Technologies: Thru-Wall Endoscope
<<http://www.mirion.com/en/products/datasheets/is/ThruWall.pdf>> - 30.03.2009.

- MIRION 2009b
 Mirion Technologies: Inspection: High Radiation Imaging Systems
<http://www.mirion.com/en/products/listing.php?byProduct=IHR&byDivision=IS> - 17.02.2009.
- MOHS et al. 2006
 Mohs, C.; Hurtienne, J.; Scholz, D.; Rötting, M.: Intuitivität - definierbar, beeinflussbar, überprüfbar. In: Useware 2006 - VDI Berichte Nr. 1946. Düsseldorf: VDI-Verlag 2006, S. 215-224.
- MORAY & HUEY 1988
 Moray, N.; Huey, B.: Human Factors Research and Nuclear Safety. Washington D.C., USA: National Academy Press 1988. ISBN: 9991822798.
- MORENO et al. 2005
 Moreno, J.; Turler, A.; Henkelmann, R.; Huenges, E.; Kabai, E.; Birebent, G.; Schilp, M.; Harfensteller, M.; Eursch, A.: Target preparation method for irradiating Ra-226 in the Cyclotron at TUM and radiochemical procedures for extracting Ac-225 from irradiated targets. 5th International Conference on Isotopes. Brüssel, Belgien, 25.-29. April 2005.
- MORRIS 1938
 Morris, C. W.: Foundations of the Theory of Signs. Chicago, USA: 1938.
 (deutscher Titel: Grundlagen der Zeichentheorie, in: Charles William Morris, Grundlagen der Zeichentheorie, Ästhetik der Zeichentheorie, Frankfurt a.M., Fischer (1988). ISBN: 3-596-27406-0)
- MOSS 1997
 Moss, R. W.: Fragwürdige Chemotherapie - Entscheidungshilfen für die Krebsbehandlung. Heidelberg: Karl F. Haug 1997. ISBN: 3776016604.
- NAHPUNKT 2009
 Dorozinski, T. E.: Perspektivische Bilder richtig betrachten
<http://www.3doro.de/persp/persp3.htm> -
- NAPFLIN & MENOZZI 1998
 Napflin, U.; Menozzi, M.: VFX1-Datenhelm im Vergleich mit 17" Monitor: Effekte der Benutzung unterschiedlicher Anzeigen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 52 (1998) 4, S. 231-239.
- NATURALPOINT 2009
 NatrualPoint: TrackIR
http://www.trackir.eu/trackirnew/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=32 - 23.01.2009.
- NEI 2007
 Nuclear Energy Institute (NEI): Medical and Industrial Uses of Radioactive Materials <http://www.nei.org/index.asp?catnum=3&catid=188> - 17.04.2007.
- NEI 2009
 Nuclear Energy Institute (NEI): Beneficial Uses of Radiation
<http://www.nei.org/howitworks/> - 27.01.2009.
- NEWMAN et al. 2001
 Newman, J.; Ingram, D.; Hopper, A.: Augmented Reality in a Wide Area Sentient Environment. Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR) 2001. S. 77-86.

- NIEDERLAENDER 2006
Niederlaender, E.: Die Todesursachen in der EU. Statistik kurz gefasst - Bevölkerung und soziale Bedingungen 10/2006 (2006). (EUROSTAT, Europäische Gemeinschaften)
- NIERMANN 2005
Niernann, I. Krebsforschung profitiert von neuer Datenbank. Handelsblatt, Ausgabe vom 13.09.2005.
<<http://www.handelsblatt.com/technologie/medizin/krebsforschung-profitiert-von-neuer-datenbank;958731>> - 24.01.2009.
- NINTENDO 2009
Nintendo: Wii - Technische Details
<http://www.nintendo.de/NOE/de_DE/systems/technische_details_1072.html> - 16.03.2009.
- NLM 2009
Nuclear Liabilities Management (NLM): Photo Archive
<http://www.radwaste.co.za/photo_archive.htm> - 01.10.2009.
- OEHME et al. 2004
Oehme, O.; Wiedenmaier, S.; Schmidt, L.; Luczak, H.: Methoden zur Evaluation von AR-Systemen. In: Luczak, H. et al. (Hrsg.): Benutzerzentrierte Gestaltung von Augmented-Reality-Systemen. Düsseldorf: VDI Verlag 2004, S. 64-69. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22 Nr. 17).
- O'HARA 1994
O'Hara, J. M.: Advanced Human-System Interface Design Review Guideline. NUREG/CR-5908. Washington D.C., USA: U.S. Nuclear Regulatory Commission 1994.
- OLYMPUS 2009
Olympus Corporation: Launch of New Eye-Trek FMD-700
<<http://www.olympus-global.com/en/news/2000a/nr000524fmd700e.cfm>> - 04.04.2009.
- PARK et al. 2007
Park, M.; Schmidt, L.; Schlick, C.; Luczak, H.: Design and evaluation of an augmented reality welding helmet. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing 17 (2007) 4, S. 317-330.
- PATRON 2004
Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Diss. Fakultät Maschinenwesen der Technische Universität München (2004). (Utz Forschungsberichte iwb 190).
- PECK et al. 1963
Peck, D. S.; Blair, R. R.; Brown, W. L.; Smits, F. M.: Surface Effects on Radiation on Transistors. Bell Systems Techn. Journ. 95 (1963).
- PETZOLD 2007
Petzold, B.: Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsen- te Mikromontage. Diss. Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität München (2007).

- PFENNIG et al. 1995
Pfennig, G.; Klewe-Nebenius, H.; Seelmann-Eggebert, W.; Institut für Radiochemie: Karlsruher Nuklidkarte. 6 Aufl. Lage/Lippe: Marktdienste Haberbeck 1995.
- PIEKARSKI & THOMAS 2002
Piekarski, W.; Thomas, B. H.: The Tinmith system: demonstrating new techniques for mobile augmented reality modelling. In: Proceedings of the Third Australasian conference on User interfaces, Bd 7. Melbourne, Australien. 2002, S. 61-70. ISBN: 1445-1336.
- PONTAX GMBH 2009
Pontax GmbH (Hrsg.): Strahlenschutzglas (Bleiglas). Lennestadt: 2009.
<<http://www.pontax.de/download/strahlenschutzglas.pdf>> - 29.03.2009.
- PORTAL FÜR ORGANISCHE CHEMIE 2009
Portal für Organische Chemie: Immuntherapie gegen Krebs
<<http://www.organische-chemie.ch/chemie/2008apr/immunzellen.shtm>> - 19.01.2009.
- RAGHEB 1996
Ragheb, H.: Operating and Maintenance Experience with Computer-Based Systems in Nuclear Power Plants. International Workshop on Technical Support for Licensing Issues of Computer-Based Systems Important to Safety. München, 5.-7. März 1996.
- RALOFF 1999
Raloff, J.: Wanted: Medical Isotopes. Science News 156 (1999) 17, S. 264 ff. (23. Oktober 1999)
- RASMUSSEN 1986
Rasmussen, J.: Information processing and human-machine interaction: An approach to cognitive engineering. Amsterdam: Elsevier Science Ltd 1986. ISBN: 0444009876. (North-Holland Series in System Science and Engineering, 12).
- RC-TECH 2007
RC-TECH: Produkt - Immersions Set X11 <http://www.rc-tech.ch/web/index.php?page=shop.product_details&flypage=shop.flypage&product_id=74&category_id=23&manufacturer_id=0&option=com_virtuemart&Itemid=26> - 24.08.2007.
- REINHART & PATRON 2003
Reinhart, G.; Patron, C.: Integrating Augmented Reality in the Assembly Domain - Fundamentals, Benefits and Applications. Annals of CIRP 52/1 (2003), S. 5-8.
- RINDAHL et al. 2006
Rindahl, G.; Johnsen, T.; Mark, N.-K.-F.; Meyer, G.: Virtual Reality in planning and operation from research topic to practical issue. Proceedings of NPIC&HMIT 2006 Conference. Albuquerque, New Mexico, USA, 2006.
- ROBERT KOCH-INSTITUT 2006
Koch-Institut, R. (Hrsg.): Krebsinzidenzschätzungen für Deutschland bis 2000
<http://www.rki.de/cln_006/nn_226994/DE/Content/GBE/DachdokKrebs/Datenbankabfra>

- [gen/Neuerkrankungen/neuerkrankungen_node.html_nnn=true](#)> - 08.02.2006.
- RODENSTOCK 2009
Rodenstock: "Informance®": Die Brille der Zukunft
<http://www.rodenstock.de/rod_web/de/de/pressText.jsp?id=documents/000/0/00/00/57/22385.xml> - 23.01.2009.
- RUSITSCHKA et al. 2004
Rusitschka, E.; Appel, M.; Neuberger, M.; Niedermayr, E.; Schleyer, C.: AR im Service für Kraftwerks- und Prozessanlagen. In: Friedrich, W. (Hrsg.): ARVIKA - Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. 1. Aufl. Erlangen: Publicis Corporate Publishing 2004, S. 195-202. ISBN: 3895782394.
- SCHERING 2004
Schering AG: Schering erhält Zulassung für Radioimmuntherapeutikum Zevalin® in Europa - Pressemitteilung vom 22.01.2004
<http://www.schering.de/scripts/de/50_media/2004/pi/Q1/040122_zevalin.php?n=mep> - 31.05.2005.
- SCHICHA & SCHOBER 1997
Schicha, H.; Schober, O.: Nuklearmedizin: Basiswissen und klinische Anwendung. 3. Aufl. Stuttgart: Schattauer 1997.
- SCHMALJOHANN et al. 2005
Schmaljohann, J.; Biersack, H.-J.; Guhlke, S.: Radiotherapeutika: Herstellung und therapeutische Anwendung von Radiopharmaka. Pharmazie in unserer Zeit 34 (2005) 6, S. 498-504.
- SCHMITT 1998
Schmitt, S.: Chemotherapie. Grundlagen, Probleme, Interventionen. Wiesbaden: Ullstein Medical 1998. ISBN: 3861266423.
- SCHOBER 1957
Schober, H.: Das Sehen, Band I. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1957.
- SCHOTT AG 2009
Schott AG (Hrsg.): Auf der sicheren Seite. Grünenplan: 2009.
<http://www.schott.com/architecture/english/download/reinigungshinweise_d-e.pdf> - 28.08.2009.
- SCHRÖCK 2004
Schröck, H.: Bewertung der Radiotoxizität eines mit dem Alpha-Strahler ²¹³Bi gekoppelten tumorspezifischen Antikörpers anhand von Veränderungen der Zellkernmorphologie. Diss. Nuklearmedizinische Klinik und Poliklinik der Technischen Universität München, München (2004).
- SCHUBIGER 2007
Schubiger, P. A.: Radiopharmazeutische Chemie - Einführung Radiopharmaka. Vorlesungsskript, ETH Zürich (2007).
<http://zrw.web.psi.ch/lectures/files/Kapitel_01_02.pdf>.
- SCHUTZRECHT DE102004022200B4 2006
Schutzrecht DE102004022200B4 Radium-Target sowie Verfahren zu seiner Herstellung (20.07.2006). Actinium Pharmaceuticals Inc. Radium-Target sowie Verfahren zu seiner Herstellung.

SCHUTZRECHT US 5355394 1994

Schutzrecht US 5355394 Method for producing actinium-225 and bismuth-213 (10.11.1994). European Atomic Energy Community (EURATOM). Method for producing actinium-225 and bismuth-213.

SCHUTZRECHT US 6815687 2004

Schutzrecht US 6815687 Method and system for high-speed, 3D imaging of optically-invisible radiation (09.11.2004). University of Michigan (US). Method and system for high-speed, 3D imaging of optically-invisible radiation.

SCIENTIFIC INSTRUMENT SALES 2009

Scientific Instrument Sales: Lab Impex Systems
<http://www.scientificinstrumentsales.com/LabImpex_PET.htm> - 01.10.2009.

SCN 2008

Pârvan, M.: Post-Irradiation Examination Laboratory, Sucursala Cercetari Nucleare in Pitesti, Rumänien,
<http://www.scn.ro/departamente/lepi_en.htm> - 11.03.2008.

SEITZ + KERLER GMBH + CO. KG 2009

Seitz + Kerler GmbH + Co. KG (Hrsg.): Röbalith Strahlenschutz-Systeme - Seilo-Strahlenschutz-Bleiglas. Lohr am Main: 2009.
<<http://www.seilo.de/Strahlenschutz/Datenblaetter/deutsch/Bleiglas.pdf>> - 29.03.2009.

SHIMODA et al. 2005

Shimoda, H.; Ishii, H.; Maeshima, M.; Nakai, T.; Bian, Z.; Yoshikawa, H.: Development of a Tracking Method for Augmented Reality Applied to Nuclear Plant Maintenance Work: (1) Barcode Marker. Symposium on the Future I&C for Nuclear Power Plants (ISOFIG) 2005. Tongyeong, Gyungnam, Korea, 1. - 4.11.2005. <<http://www2.hrp.no/vr/workshops/2005/ishii.pdf>, <http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/Lab/staff/hirotake/paper/papers/ISOFIG2005-shimoda.pdf>> -

SHURTLIFF 2005

Shurtliff, R. M.: Using Single-Camera 3-D Imaging to Guide Material Handling Robots in a Nuclear Waste Package Closure System. International Robot & Vision Show. Chicago, Illinois, USA, 27.09. - 29.09.2005.

SELHORST et al. 2004

Sielhorst, T.; Obst, T.; Burgkart, R.; Riener, R.; Navab, N.: An augmented reality delivery simulator for medical training. In: Proceedings of the International Workshop on Augmented Environments for Medical Imaging - MICCAI Satellite Workshop. 2004.

SIMMER 2007

Simmer, R.: Maßnahmen zur Begrenzung der externen Exposition. Präsentation, Leibnitz Universität Hannover - Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie, Bad Honnef (2007). <http://www.zsr.uni-hannover.de/heraeus/27/27_8.pdf>. (Wilhelm und Else Heraeus-Physikschule)

SNM 2007a

Society of Nuclear Medicine: What is Nuclear Medicine?
<<http://interactive.snm.org/index.cfm?PageID=1110&RPID=3106&FileID=2136>> - 10.04.2007.

- SNM 2007b
Society of Nuclear Medicine (SNM): What is PET?
<<http://interactive.snm.org/index.cfm?PageID=972&RPID=968>> - 18.04.07.
- SOHN 2006
Sohn, G.: Gaming-Konsolen: Der neue Trend heißt Sprachsteuerung - Mit Sprachchips in neue Spielwelten eintauchen. Presstext Deutschland (pte) (2006).
- SONY 2009
SONY Corporation: Color Video Camera EVI D100/D100P - Technical Manual <http://graphics.cs.uni-sb.de/Courses/ws0102/Multimedia/Projekt/kamera/evi-d100-technical_manual.pdf> - 04.04.2009.
- SOURCEFORGE 2009
Sourceforge.net: Download History for ARToolKit
<http://sourceforge.net/project/stats/detail.php?group_id=116280&ugn=artoolkit&type=prdownload> - 12.03.2009.
- SPANNER 1993
Spanner, B.: Einfluss der Kompatibilität von Stellteilen auf die menschliche Zuverlässigkeit. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993. (Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 17 "Biotechnik".
- STAAK et al. 2003
Staak, J. O.; Dietlein, M.; Engert, A.; Weihrauch, M. R.; Eschner, W.; Schomäcker, K.; Fischer, T.; Eschner, W.; Borchmann, P.; Diehl, V.; Schicha, H.; Schnell, R.: Hodgkin's lymphoma in nuclear medicine: diagnostic and therapeutic aspects. Nuklearmedizin 42 (2003) 1, S. 19-24.
- STAMM-MEYER et al. 2006
Stamm-Meyer, A.; Noßke, D.; Schnell-Inderst, P.; Hacker, M.; Hahn, K.; Brix, G.: Nuklearmedizinische Untersuchungen in Deutschland zwischen 1996 und 2002: Anwendungshäufigkeiten und kollektiv effektive Dosen. Nuklearmedizin 1/2006 (2006) 45, S. 1-9.
- STATE et al. 1996a
State, A.; Hirota, G.; Chen, D. T.; Garrett, W. F.; Livingston, M. A.: Superior augmented reality registration by integrating landmark tracking and magnetic tracking. In: Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH 96). ACM 1996a, S. 429-438. ISBN: 0-89791-746-4.
- STATE et al. 1996b
State, A.; Livingston, M.; Hirota, G.; Garrett, W.; Whitton, M.; Fuchs, H.; Pisano, E.: Technologies for Augmented-Reality Systems: realizing Ultrasound-Guided Needle Biopsies. In: Proceedings of SIGGRAPH 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New Orleans, Louisiana, USA. ACM 1996b, S. 439-446. ISBN: 0-89791-746-4.
- STMWIVT 2005
Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, I., Verkehr und Technologie: Medizinprodukte - Merkblatt zur EU-Richtlinie 93/42/EWG
<<http://www.stmwivt.bayern.de/pdf/europa/Medizinprodukte.pdf>> - 20.08.2009.

STOLZ 2005

Stolz, W.: Radioaktivität. Grundlagen, Messung, Anwendungen. 5 Aufl. Wiesbaden: Teubner 2005. ISBN: 3-519-53022-8.

TANG et al. 2002

Tang, A.; Owen, C.; Biocca, F.; Mou, W.: Experimental Evaluation of Augmented Reality in Object Assembly Task. In: Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAP) 2002. New York: IEEE Press 2002. ISBN: 0-7695-1781-1.

THOMAS et al. 1998

Thomas, B.; Demczuk, V.; Piekarski, W.; Hepworth, D.; Gunther, B.: A Wearable Computer System with Augmented Reality to Support Terrestrial Navigation. Second International Symposium on Wearable Computers. 19. - 20. Oktober 1998, S. 168-171.

TLB 2007

Technologie-Lizenz-Büro (TLB) der Baden-Württembergischen Hochschulen GmbH: Neue radioaktive Technetium- und Rhenium-Chelatkomplexe für die Diagnostik und Therapie von Krebserkrankungen
<http://tlb.server.de/servlet/is/4008/Kurzinfo_Radiopharmaka_II.pdf> - 20.04.2007.

TRACKIR 2009

Natural Point: Products - TrackIR 4:PRO
<<http://www.naturalpoint.com/trackir/02-products/product-TrackIR-4-PRO.html>> - 29.01.2009.

TU GRAZ 2009

Technische Universität Graz: Studierstube Augmented Reality Project
<<http://studierstube.icg.tu-graz.ac.at/>> - 12.03.2009.

TUM 2009

Technische Universität München Presse & Kommunikation: Rhenium-188 - alles im Fluss
<<http://www.frm2.tum.de/informationen/einzelnews/article/rhenium-188-alles-im-fluss/index.html>> -

UNIVERSITÄTSKLINIK HEIDELBERG 2010

Heidelberg, U.: Brachytherapie/Seed-Implantation der Prostata bei Prostatakarzinom <<http://www.klinikum.uni-heidelberg.de/Brachytherapie-Seed-Implantation-der-Prostata-bei-Prostatakarzinom.108362.0.html>> - 28.01.2010.

V3I 2009

Vision 3 International (v3i): v3i Stereoscopic Camera nOOn
<http://www.v3i.co.kr/v3i_eng/inc.php?inc=product/product12> - 05.04.2009.

VEITH 2001

Veith, H.-M.: Strahlenschutzverordnung: Neufassung 2001 ; Textausgabe mit einer erläuternden Einführung. 6., völlig neu bearb. Aufl., Stand: 1. August 2001 Aufl. Köln: Bundesanzeiger-Verl.-Ges. 2001.

VFA 2007

Verband Forschender Arzneimittelhersteller e.V. (VFA): Mehr Behandlungserfolg durch zielgerichtete Krebstherapien

- <http://www.vfa.de/de/presse/pressemitteilungen/pm_010_2005.html> - 18.04.2007.
- VIALA & LETELLIER 1997
Viala, M.; Letellier, L.: A Camera Based Augmented-Reality System for Teleoperation in Nuclear Environments. In: 5th International Conference on Nuclear Engineering. 1997.
- VOLKMER 2007a
Volkmer, M.: Radioaktivität und Strahlenschutz. Köln: UbiaDruckKöln 2007a. ISBN: 3-926956-45-3. (Informationskreis Kernenergie).
- VOLKMER 2007b
Volkmer, M.: Kernenergie Basiswissen. Köln: UbiaDruckKöln 2007b. ISBN: 3-926956-44-5. (Informationskreis Kernenergie)
- VON GAHLEN 2009
Von Gahlen Nederland B.V.: Products - Hot Cells
<http://www.vongahlen.nl/products/prod_hc_radiochem.php> - 24.01.2009.
- VON PHILIPSBORN 1995
von Philipsborn, H.: Strahlenschutz Radioaktivität und Strahlungsmessung. Bayreuth: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) 1995. ISBN: 3-910088-01-5.
- WAGNER et al. 2007
Wagner, E.; Perakis, N.; Bernet, A.: Wer das große Abenteuer wagt - Von der Kamera zur Immersionssteuerung. Modellflugsport (2007) 1, S. 9-16.
- WALTON 1958
Walton, G. N.: The Place of the Glove Box in Experimental Projects. In: Walton, G. N. (Hrsg.): Glove Boxes and Shielded Cells for Handling Radioactive Materials. London: Butterworths Scientific Publications 1958, S. 5-7. (A record of the Proceedings of the Symposium on Glove Box Design and Operation held in Harwell on February 19th to 21st, 1957)
- WEIßMANTEL & KISSEL 2002
Weißmantel, H.; Kissel, R.: Klar und deutlich - Produkte benutzerfreundlich konzipieren. Feinwerktechnik und Mikrotechnik 2002 (2002) 3, S. 57-59.
- WHO 2007a
World Health Organisation (WHO): Cancer
<<http://www.who.int/cancer/en/>> - 12.04.2007.
- WHO 2007b
World Health Organisation (WHO): Global cancer rates could increase by 50% to 15 million by 2020
<<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2003/pr27/en/>> - 12.04.2007.
- WOODS et al. 1994
Woods, D. D.; Johannesen, L. J.; Cook, R. I.; Sarter, N. B.: Behind Human Error: Cognitive Systems, Computers, and Hindsight. Dayton, Ohio, USA: Crew Systems Ergonomics Information Analysis Center, Wright-Patterson Air Force Base 1994.

YU et al. 2000

Yu, H.; Hamilton, D. S.; Peck, M. M.; Kearfott, K. J.: Computer-Based Radiation Safety Training For Hospital Radiation Workers. Health Physics 78 (2000) 2, S. 4-8.

ZÄH et al. 2005a

Zäh, M. F.; Harfensteller, M.; Eursch, A.: Prozessautomatisierung in radioaktiven Umgebungen. wt Werkstatttechnik online 95 (2005a) 3, S. 113-117.

ZÄH et al. 2005b

Zäh, M. F.; Schack, R.; Munzert, U.: Digitale Fabrik im Gesamtkontext. 2. Internationaler Fachkongress Digitale Fabrik. Ludwigsburg, 28. - 29.06.2005.

ZÄH 2002

Zäh, M.-F.: Augmented Reality - Grundlagen, Nutzenpotenziale und Umsetzung. In: 17. Deutscher Montagekongress, München. Landsberg: Moderne Industrie 2002, S. 11.

ZEVALIN 2009

Pharma, B. S. (Hrsg.): Zevalin - Webseite <<http://www.zevalin.ch/>> - 24.01.2009.

10 Expertengespräche

(FINN 16.2.2007)

Finn, Ron: Expertengespräch zum Thema „Immersive Kamerasysteme und Augmented Reality für Heiße Zellen“ (Memorial Sloan Kettering Cancer Center, New York, USA) am 16.2.2007, telefonisch.

(HENKELMANN 9.2.2007)

Henkelmann, Richard: Expertengespräch zum Thema „Verfügbare Unterstützung für manuelle Arbeiten in Heißen Zellen“ (Institut für Radiochemie der TU München, Garching) am 9.2.2007 in Garching, persönlich.

(NAGHDY 20.2.2008)

Naghdy, Fazel: Expertengespräch zum Thema „Immersives Assistenzsystem auf der Basis von Augmented Reality für radioaktive Umgebungen“ (Fakultät für Informatik, University of Wollongong, Australien) am 20.2.2008, persönlich.

(PONGRAC 7.2.2007)

Pongrac, Helena: Expertengespräch zum Thema „Versuchsplanung und -durchführung“ (Institut für Arbeitswissenschaft der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr, München) am 7.2.2007, persönlich

(SCHLYNE 6.3.2007)

Schlyne, Clark: Expertengespräch zum Thema „Arbeit mit Bleiglas, Kamerasystem der Firma Biodex und Alternativen“ (Biodex Medical Systems, New York, USA) am 6.3.2007, telefonisch.

11 Anhang

11.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gliederung der Arbeit.....	5
Abbildung 2: Heiße Zellen in großer (links, NLM 2009) und kleiner Ausführung (rechts, SCIENTIFIC INSTRUMENT SALES 2009)	11
Abbildung 3: Geöffnete Heiße Zelle mit eingebauter Produktionsanlage. Links sind die durchsichtige Türe der Handschuhbox mit den vier Handschuhen und die dicke Türe der Bleiabschirmung mit Bleiglasfenster zu sehen	11
Abbildung 4: Funktionsprinzip der Alpha-Partikel-Immun-Therapie (APIT) (EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE 2004)	15
Abbildung 5: Heiße Zellen für die Produktion von Actinium-225	18
Abbildung 6: Automatisierte Produktionsanlage für Actinium-225 in einer Heißen Zelle mit chemischem und technischem Anlagenteil.....	19
Abbildung 7: Parallelmanipulatoren gemäß DIN 25409 TEIL 1 (1993), links mit 3 Gelenken, rechts mit Teleskop	25
Abbildung 8: Zwei Typen von Stabmanipulatoren gemäß DIN 25409 TEIL 1 (1993), links starr, rechts mit Gelenk.....	25
Abbildung 9: Produktionsanlage zur Herstellung von Radioisotopen in einer Heißen Zelle. Im Vordergrund sind die Handschuhe an der geöffneten Türe der Heißen Zelle zu sehen	27
Abbildung 10: Ungenügende Reichweite der Hände aufgrund des dicken Bleiglasfensters.....	29
Abbildung 11: Stark eingeschränktes Sichtfeld durch das Bleiglasfenster	30
Abbildung 12: Verzerrung des Blickfeldes durch die starke optische Brechung des dicken Bleiglasfensters	31
Abbildung 13: Handschuhbox. Hier wurden die Informationen direkt auf die Scheibe geschrieben.	37

Abbildung 14: Außenansicht einer Heißen Zelle. Teilweise werden die Informationen auf die Wand der Heißen Zelle (links), auf Klebestreifen oder direkt auf die Komponenten wie die Chromatographiesäulen geschrieben (beides rechts).	37
Abbildung 15: Heiße Zelle mit geöffneten Verschlüssen für die Hände und zur Seite geschobener Blende für das Bleiglasfenster	40
Abbildung 16: L-Block von BIODEx mit Kamera auf einem flexiblen Schwanenhals und mit Flachbildschirm (links, BIODEx 2008a) sowie mit Bleiglasfenster (rechts, BIODEx 2008b)	42
Abbildung 17: Vorgehenszyklus der integrierten Produktentwicklung von EHRENSPIEL (2007)	56
Abbildung 18: Das dicke Bleiglasfenster wird durch ein immersives Kamerasystem ersetzt, bei dem die schwenk- und neigbare Kamera u. a. mit einem Gyrotracker gesteuert wird	63
Abbildung 19: Realisierungsansatz für einen Flachbildschirm als Ausgabemedium	76
Abbildung 20: Vorder- und Rückseite des Modells einer Heißen Zelle mit Imitat des Bleiglasfensters auf der einen und Versuchsfeld auf der anderen Seite	87
Abbildung 21: Modell der Heißen Zelle. Der sich nach innen aufweitende Schacht mit Plexiglasabdeckung imitiert das dicke Bleiglasfenster mit Brechungseffekt	88
Abbildung 22: Hell gestalteter Innenraum des Modells einer Heißen Zelle mit einem Gestell in der Mitte für die Kameras	89
Abbildung 23: Schematischer Aufbau der Steuerung des Kamerasystems mit der iwb VISCA Control Software	90
Abbildung 24: Fußjoystick mit Rahmen für den Fuß; links die Prinzipdarstellung, rechts ein Gerät für Versuche	91
Abbildung 25: Kopfjoystick in Form einer krallenförmigen Einfassung. Links ist die Prinzipdarstellung zu sehen, in der Mitte ein Versuchsaufbau und rechts der einfache digitale Joystick als Basis	92

Abbildung 26: Schilder mit einer Zahl und einem Text in kleiner Schriftgröße für Aufgabe 1	96
Abbildung 27: Versuchsaufbau für Aufgabe 2 „Heißer-Draht-Spiel“. Unten rechts ist ein Beispiel für einen Anbringungsort der Schilder mit Zahl und Text für Aufgabe 1 zu sehen (siehe Pfeil)	97
Abbildung 28: Versuchsaufbau der Aufgabe 3: „Nadel-Faden-Versuch“	98
Abbildung 29: Überblick über die durchschnittlichen, kumulierten Zeiten der ersten Versuchsreihe, die mit den drei Eingabegeräten zur Erfüllung der drei Versuchsaufgaben benötigt wurden	100
Abbildung 30: Prototyp des Kamerasystems mit Kinnjoystick (links, siehe Pfeil) und PTZ-Kamera im Inneren des Modells einer Heißen Zelle (rechts)	105
Abbildung 31: Kopf- bzw. Kinn-Joystick, mit kurzem Hebel ist am Modell der Heißen Zelle an einer Schiene höhenverstellbar angebracht.....	106
Abbildung 32: Head-Tracking-Ansatz: Die Kamera (rechts) wird von Servomotoren bewegt, die von einem in der Videobrille (links) integrierten Gyro-Tracker gesteuert werden	107
Abbildung 33: Anordnungskonzept der Fußtaster für die Zoom-Steuerung mit einem Rahmen aus Alu-Profilen. Mit dem einzelnen Taster (im Bild rechts) kann die Kamera in die Grundstellung zurückgesetzt werden.	110
Abbildung 34: Wippe zur Steuerung der Zoom-Funktion	111
Abbildung 35: Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe: Vergleich der benötigten Zeiten bei Kopfjoystick und Head Tracking für die drei Versuchsaufgaben.	113
Abbildung 36: Bewertung von Head Tracking und Kopfjoystick nach dem zweiten Versuchsdurchgang	115
Abbildung 37: Oben: Kamerablick auf die komplexe Produktionsanlage mit AR-Markern; unten: Eine Auswahl möglicher AR-Anwendungen für die Heiße Zelle in komprimierter Darstellung	122
Abbildung 38: Warnung vor Gefahr, Anzeige der Expositionsdauer und Orientierungshilfe	125
Abbildung 39: Detailkamera zur permanenten Überwachung kritischer Bereiche	130

Abbildung 40: Einblendung des Kamerabildes in das Blickfeld der Produktionsmitarbeiter.....	131
Abbildung 41: Multimarkerkonzept und unterschiedliche Markergrößen: Der Marker „F“ wird hier beispielsweise dreimal und in jeweils unterschiedlichen Größen verwendet. In diesem Fall wurden Marker in Buchstaben-Form eingesetzt.....	136
Abbildung 42: AR-Einblendung mit Informationen zu empfindlichen chemischen Säulen.....	144
Abbildung 43: Virtuelle Anlagenkomponenten (siehe Pfeile) in realer Umgebung zur Abschätzung von Erreichbarkeit und Platzverhältnissen: links ein Ventil, rechts ein Abfallbehälter	145
Abbildung 44: Unterstützung bei Wartungsarbeiten: Pfeilartiges Symbol zur Hervorhebung eines Ventils, das getauscht werden muss	146
Abbildung 45: Anleitung für eine Wartungsaufgabe.....	146
Abbildung 46: Messung der Entfernung der Hand zur virtuellen Gefahrenquelle mittels Markern an einem Armband am Handgelenk: Anzeige einer Warnung bei zu geringem Abstand in Form eines Warnschildes (links, siehe Pfeil) oder eines rot gefärbten Warntextes (rechts)	147

11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strahlungs- und Gewebe-Wichtungsfaktor (aus VEITH 2001).....	8
Tabelle 2: Ergebnisse der ersten Versuchsreihe.....	100
Tabelle 3: Übersicht über die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe	113
Tabelle 4: Variablen eines AR-Systems und Beispiele.....	119
Tabelle 5: Kostenaufstellung der beiden für die Versuche realisierten Kamerasysteme	155

