

Markus Koch

*Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau
durch den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik*

Markus Koch

*Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau
durch den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik*

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,
Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	15. Oktober 2001
Tag der Promotion:	28. Januar 2002
Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. A. Winnacker
Berichterstatte	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing./Univ. Tokio Thomas Bock, TU München

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Koch, Markus:

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau
durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik /

Markus Koch. - Bamberg : Meisenbach, 2002

(Fertigungstechnik - Erlangen ; 118)

ISBN 3-87525-165-2

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2002

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Für Christoph

Vorwort

*Der Bauende soll nicht herumtasten und versuchen;
was stehen bleiben soll, muss recht stehen.
Mag man doch immer Fehler begehen,
bauen darf man keine!
(Johann Wolfgang v. Goethe)*

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich für die engagierte Förderung meiner Arbeit sowie den Freiraum und die Unterstützung, die er mir bei der Bearbeitung der praxisorientierten und industrienahen Projekte gewährte.

Herrn Prof. Dr.-Ing./Univ. Tokio Thomas Bock, dem Leiter des Lehrstuhls für Baurealisierung und Bauinformatik an der TU München, danke ich für die Übernahme des Korreferates und die fachlichen Anregungen.

Ferner gilt mein Dank Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wolfgang Bär für die sehr gute Unterstützung und die Betreuung zahlreicher Studien- und Diplomarbeiten am Lehrstuhl für Regelungstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg.

Die Arbeit beruht zum Teil auf einem Kooperationsprojekt, das von der Bayerischen Forschungsstiftung gefördert wurde. Mein Dank gilt insbesondere Herrn Werner Thaler und Herrn Ludwig Schmid von der Lindner AG, Herrn Josef Konrad von der Baumann GmbH, sowie Herrn Klaus Kreupl und Herrn Jens Herbst vom Lehrstuhl für Baurealisierung und Bauinformatik der TU München, die durch fachliche Diskussionen dazu beigetragen haben, die Praxisrelevanz dieser Arbeit sicherzustellen.

Weiterhin danke ich allen Kollegen und Mitarbeitern am Lehrstuhl FAPS für die fachlichen Diskussionen, die tatkräftige Unterstützung und die gute Zusammenarbeit. Hervorheben möchte ich Herrn Ulrich Wenger, Herrn Matthias Wenk sowie Herrn Bernd Fischer und Herrn Karl-Heinz Mönius.

Ich möchte mich auch bei allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich bei der Bearbeitung meiner Projekte und der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben, bedanken, insbesondere bei Susanne Zangl, Stefan Breu, Stefan Neckermann, Ludwig Schlecht und Sven Vosse.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und durch ihren Rückhalt erheblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein herzlichster Dank gebührt meiner Frau Christiane und meiner Tochter Ann-Kathrin, die durch ihre permanente Motivation und Unterstützung den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit möglich gemacht haben.

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik der Automatisierung im Bauwesen.....	9
2.1	Automatisierungssysteme in der Vorfertigung	10
2.1.1	Gebäudeherstellung in Japan	10
2.1.2	Vorfertigung von Ziegelwänden und –decken	11
2.1.3	Vorfertigung von Betonelementen	14
2.2	Automatisierung von Fertigungsprozessen auf Baustellen	15
2.2.1	SMART-Shimizu	15
2.2.2	Roboter zur Errichtung von Mauerwerk	18
2.2.3	Sonstige Automatisierungssysteme.....	21
2.2.4	Roboter für die Instandhaltung und Wartung	23
2.3	Grundsätzliche Verfahren für die Baustellenautomatisierung	28
2.3.1	Komplette Bauwerkserstellung von oben bzw. außen.....	28
2.3.2	Konventionelle Rohbauerstellung und automatisierter Innenausbau	29
3	Rationalisierungs- und Humanisierungspotentiale von ausgewählten Montageaufgaben im Innenausbau	31
3.1	Chancen und Hemmnisse der Automatisierung im Bauwesen	31
3.1.1	Hindernisse einer Bauautomatisierung und deren Überwindung	31
3.1.2	Nutzenpotentiale der Bauautomatisierung.....	33
3.2	Humanisierungspotentiale von Montagearbeiten im Innenausbau	36
3.3	Rationalisierungspotentiale ausgewählter Tätigkeiten im Innenausbau	40
3.3.1	Vermessung von Räumen und Durchführung von Markierungsarbeiten..	41
3.3.2	Automatisierte Montage von Systemböden	43
3.3.3	Montage von nicht tragenden inneren Trennwänden nach DIN 4103	45
3.3.4	Deckenmontage.....	48
3.4	Bewertung der unterschiedlichen Einsatzgebiete	50

4 Vergleich von Automatisierungsansätzen zur Montage von Befestigungselementen an der Decke	53
4.1 Automatisierung von Montageaufgaben im Innenausbau	53
4.1.1 Möglichkeiten zur Automatisierung von Prozessen im Innenausbau	53
4.1.2 Problemstellen und Anforderungen an Automatisierungslösungen im Innenausbau	54
4.2 Realisierungsansätze mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden	57
4.2.1 Integration von Befestigungsmöglichkeiten in der Vorfertigung	57
4.2.2 Anbringen von Befestigungselementen an der Decke mit bedienergeführten Automaten	58
4.2.3 Anbringen von Deckenabhängern mit mobilen Robotern	65
5 Möglichkeiten der Positionsbestimmung für mobile Roboter am Bau	75
5.1 Problemstellen der Positionsbestimmung von Baurobotern	75
5.2 Überblick über Verfahren der Positionsbestimmung	77
5.2.1 Interne Verfahren zur Positionsbestimmung	77
5.2.2 Externe Verfahren zur Positionsbestimmung	80
5.3 Optische Bahnführung des mobilen Bauroboters	86
5.3.1 Aufbau einer geeigneten Beleuchtungseinheit mit Infrarot-Dioden	86
5.3.2 Einsatz eines industriellen Komplettsystems	88
5.3.3 Verarbeitung der Suchergebnisse für Aufrisslinie und Aufrisspunkt	96
6 Entwicklung eines modularen Robotersystems zur Montage von Deckenbefestigungen	99
6.1 Prinzipieller Aufbau des Steuerungssystems für den mobilen Bauroboter	100
6.2 Steuerungsfunktionen unter Windows NT 4.0	102
6.2.1 Mensch-Maschine-Interface	102
6.2.2 Ablaufsteuerung	104
6.2.3 Neigungs- und Positionskorrektur	107
6.3 Steuerungsfunktionen im Echtzeit-Betriebssystem	109
6.3.1 Ablaufsteuerung	111
6.3.2 Kommunikationsschnittstelle	113
6.3.3 Bewegungssteuerung	115
6.3.4 Hinderniserkennung	119
6.4 Betriebsverhalten des Bauroboters während der Fahrt	124

7 Optimierung der Einsatzbedingungen des Roboters	127
7.1 Optimierung des Fahrwerks zur Verbesserung der Bewegungseigenschaften des Prototypen	127
7.1.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus	127
7.1.2 Fahrverhalten auf Industriebeschicht mit Gummikettengliedern	128
7.1.3 Fahrversuche auf Betonfliesen mit Gummikettengliedern	130
7.1.4 Verbesserung der Fahreigenschaften durch neue Kettenglieder	133
7.2 Organisatorische Optimierungen im Bauablauf zur Erhöhung der Einsatzhäufigkeit des Roboters.....	135
7.2.1 Organisatorische Probleme bei der Einbindung des Roboters in den Bauablauf.....	135
7.2.2 Produktivitätssteigerung durch organisatorische und technische Innovationen	138
7.2.3 Anforderungen an eine automatisierungsgerechte Baustelle	140
8 Trends und Perspektiven der Automatisierung am Bau	145
8.1 Trend der Automatisierung im Bauwesen	146
8.1.1 Möglichkeiten für eine kurz-, mittel- und langfristige Steigerung der Produktivität am Bau	146
8.1.2 Baustelle der Zukunft	148
8.1.3 Chancen und Voraussetzungen für einen verstärkten Einsatz bedienergeführter Automaten oder autonomer Roboter am Bau	149
8.1.4 Entwicklungsbedarf an technischen Hilfsmitteln	152
8.2 Fazit und Bewertung	153
8.2.1 Zunahme des Vorfertigungsanteils	153
8.2.2 Verbesserung der Planungsmethoden	155
8.2.3 Zunahme der Standardisierung	156
8.2.4 Erhöhung der Gewerkintegration	157
8.2.5 Bedienergeführte Automaten und verbesserte Kommunikationseinrichtungen.....	157
9 Zusammenfassung	159
Literaturverzeichnis	161

1 Einleitung

„Die Entwicklung des Bauwesens in den letzten fünfzig Jahren ist gekennzeichnet durch den Übergang von lohn- zu maschinenintensiven Bauverfahren. Seit Anfang der achtziger Jahre wird die Mechanisierungsphase von einer Optimierung mittels Mikroelektronik abgelöst [50].“

„Die Innovationen für Bauen und Wohnen werden sich auch in Zukunft eher moderat entwickeln. Ein großer Stellenwert wird in Deutschland einer höheren Lebensqualität sowie umweltverträglichen Bauweisen bzw. wiederverwendbaren oder recyclebaren Materialien beigemessen. Übertriebenen Utopien wie ultrahohen Hochhäusern oder bemannten Weltraumstationen wird jedoch eine Abfuhr erteilt. Auch die Bauautomatisierung wird für Deutschland nicht sehr euphorisch gesehen – hier werden wohl Japan und die USA ihre Führungsrolle behalten [24].“

Diese beiden Zitate verdeutlichen das Spannungsfeld, in welchem sich der Bereich der Bauautomatisierung befindet: Einerseits wurden bereits viele Bauprozesse mithilfe moderner Technologien optimiert, rationalisiert und humanisiert. Straßenbau- und Tunnelbohrmaschinen haben beispielsweise einen hohen technischen Standard erreicht und ermöglichen präzises, effizientes und ressourcenschonendes Arbeiten. Andererseits gilt das Bauwesen als bodenständig und viele Bauunternehmen verhalten sich sehr zurückhaltend gegenüber der Einführung neuer Technologien. Zahlreiche Baustellen sind nach wie vor geprägt durch extremen körperlichen Einsatz und großes Improvisationsvermögen der Handwerker und Bauleiter.

Obwohl die deutsche Bauwirtschaft mit ca. 2,3 Mio. Beschäftigten [127] und einem Anteil von ca. 6 % an der Bruttowertschöpfung [126] einen der sechs größten Wirtschaftssektoren der deutschen Volkswirtschaft darstellt, erscheint sie im Vergleich zu den anderen bedeutenden Industriezweigen verhältnismäßig rückständig hinsichtlich moderner Methoden zur Gestaltung von Arbeitsplätzen oder zur Produktivitätssteigerung. Allerdings gelten nicht die beschränkte menschliche Leistungsfähigkeit, sondern die Gewerke übergreifende Logistik, die mangelnde Abstimmung der Gewerke untereinander, der oft unüberschaubare Materialfluss und die unzureichende Planung als wichtigste Hemmnisse einer höheren Produktivität.

Hinzu kommt eine Fülle von wirtschaftlichen Problemen, welche die Möglichkeiten der Bauunternehmen zur Investition in Modernisierungsmaßnahmen drastisch einschränken. So führt zum Beispiel die Reduzierung der Staatsinvestitionen im Bausektor zu einem Ausfall eines bedeutenden Nachfragers [98], verstärkt wird dies noch dadurch, dass staatliche Förderprogramme für Bauvorhaben eher eingeschränkt als aufgestockt werden. Ebenso spricht die Struktur des Bauwesens gegen einen Rationalisierungsfortschritt, da beinahe 84 % aller Betriebe unter 20 Beschäftigte aufweisen [63] oder eine Eigenkapitalquote von unter 10 % haben. Bedingt durch eine hohe saisonale Schwan-

kung in der Auslastung der einzelnen Bauunternehmen, müssen gerade kleine Unternehmen während der Bausaison Rücklagen für die Wintermonate bilden, um ihre wirtschaftliche Existenz zu gewährleisten. Diese Rücklagen stehen dann jedoch nicht als Investitionsmittel zur Verfügung.

Weitere Probleme bereitet den Bauunternehmen vor allem die zunehmende Markttransparenz durch die fortschreitende Öffnung der Märkte. Bedingt durch die Europäische Wirtschafts- und Währungsunion erhöht sich der Wettbewerbsdruck auf den Märkten für Produktionsfaktoren, Bauleistungen, Baumaterialien und Baumaschinen selbst für die oft nur regional tätigen Bauunternehmen nachhaltig [98]. So können zum Beispiel aufgrund des Lohngefälles speziell im Bauwesen Arbeitsleistungen relativ günstig eingekauft werden. Dies wird durch die Tatsache begünstigt, dass die Tätigkeiten im Bau so gestaltet sind, dass viele dieser Arbeiten auch von angelernten Arbeitskräften erledigt werden können.

Hinzu kommt der Mangel an Fachkräften, der dazu führen wird, dass verstärkt handwerklich qualifizierte Arbeitskräfte EU-weit angeworben und für die jeweiligen Tätigkeiten betriebsintern angelernt werden, wodurch sehr schnell und effizient Personal beschafft werden kann. Somit ist davon auszugehen, dass mittel- bis langfristig ausreichend Arbeitskräfte zu moderaten Kosten zur Verfügung stehen werden.

Unter diesem europaweit verschärften Konkurrenzdruck haben bei allen Nachfragern nach Bauleistungen die Kostenaspekte ein noch höheres Gewicht bekommen, dadurch liegt das derzeitige Preisniveau noch deutlich unter den Baupreisen für das statistische Basisjahr 1995 [63]. Gleichzeitig werden an die Qualität der Bauausführung von den Nutzern immer höhere Anforderungen gestellt [98].

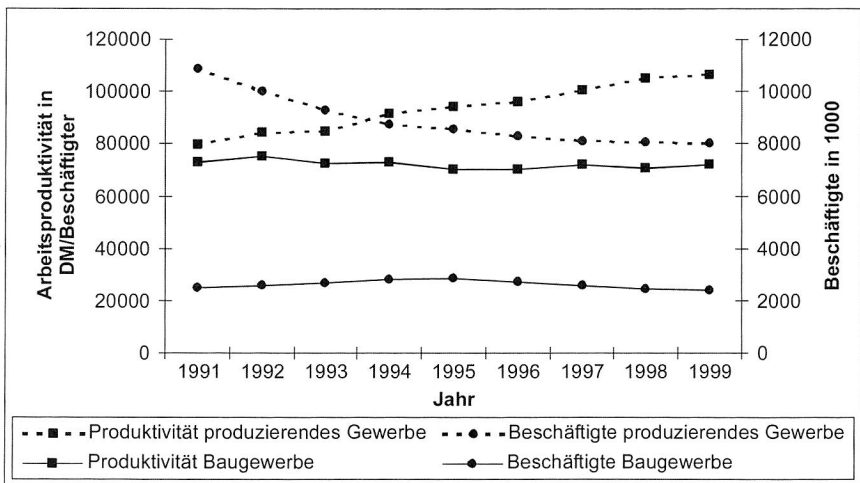


Bild 1: Die wirtschaftlichen Kenndaten des deutschen Baugewerbes im Vergleich zum produzierenden Gewerbe (Quelle: Stat. Bundesamt)

Im Bauhauptgewerbe bilden die Personalkosten nach wie vor das Schwergewicht innerhalb der gesamten Kostenrechnung. So betrug der Personalkostenanteil im Jahr 1996 in einem mittelgroßen Bauunternehmen (50 – 200 Beschäftigte) des Hoch- und Tiefbaus rund 37,5 %. Da die Nachunternehmerleistungen, deren Anteil in denselben Betrieben zuletzt bei durchschnittlich 22,4 % lag, überwiegend ebenfalls aus Arbeitskosten bestehen, beträgt der Personalkostenanteil im Bauhauptgewerbe insgesamt tatsächlich noch immer fast 50 % [125]. Weitere 25 % der Kosten werden für Bau-, Bauhilfs- und Betriebsstoffe angesetzt. Der Rest umfasst Fremdleistungen, Abschreibungen und die sonstigen Kosten einschließlich des Unternehmerlohns und des Gewinns. Gerade der Block der Personalkosten stellt den einzelnen Bauunternehmer bei den aktuell sinkenden Baupreisen vor große Probleme.

Ein weiteres Indiz für die schwierige wirtschaftliche Situation der deutschen Bauwirtschaft ist die im Vergleich zum produzierenden Gewerbe rückläufige Arbeitsproduktivität. Dieser Wert drückt das Verhältnis zwischen Produktionsergebnis und Zahl der Erwerbstätigen für diesen Wirtschaftsbereich aus. Verglichen mit dem steigenden Wert der Produktivität für das produzierende Gewerbe ist der Wert der Bauproduktivität eher rückläufig bzw. stagniert auf einem sehr niedrigen Niveau [125].

Zwangsläufig sind mit den geschilderten Schwierigkeiten für die Unternehmen erhebliche organisatorische bzw. technische Probleme verbunden, die zu spürbaren Qualitätsverlusten führen. Die Bauunternehmen werden daher gezwungen sein, weitere Rationalisierungspotentiale zu erschließen, um bestehende Marktanteile zu sichern oder auszubauen. Dazu bieten sich im Wesentlichen drei einander ergänzende Möglichkeiten an:

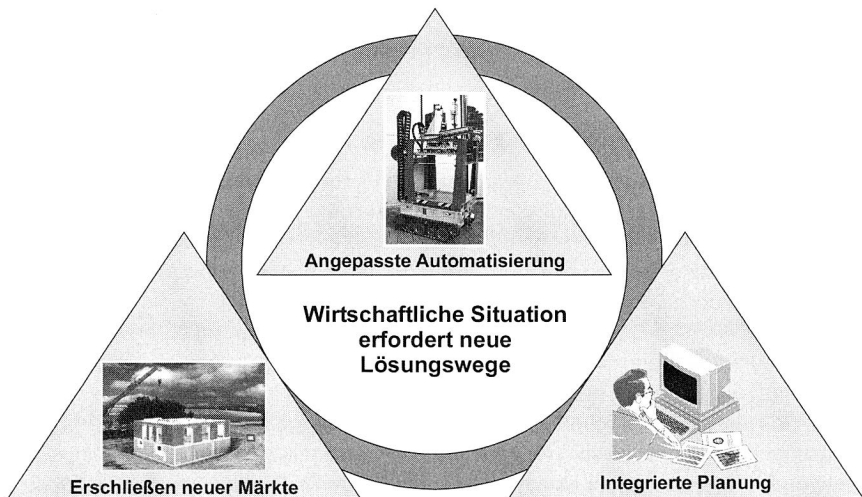


Bild 2: Ganzheitliche Lösungsansätze bieten Möglichkeiten zur Reduzierung der wirtschaftlichen Schwierigkeiten im Bauwesen

Integrierte Planung

Zum einen müssen logistische und organisatorische Probleme mithilfe einer computer-gestützten Informationsverarbeitung reduziert werden. Nur mit einer wesentlich stärkeren Durchdringung des gesamten Bauablaufs mit modernen Planungswerkzeugen kann sichergestellt werden, dass zu jedem Zeitpunkt alle notwendigen Informationen aktuell verfügbar sind und von allen Beteiligten eines Bauvorhabens genutzt werden können. Eine gegenüber den bisherigen Planungsmethoden wesentlich detailliertere Planung bzw. ein Abschluss der Planungsarbeiten vor Baubeginn stellt eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung von Automatisierungsprojekten dar.

Erschließen neuer Märkte

Zum anderen müssen die Unternehmen des traditionell mittelständisch und handwerklich geprägten Baugewerbes ihr bislang dominierendes Selbstverständnis als Bereitstellungsgewerbe aufgeben und sich einer Marktorientierung mit aktiver Absatzpolitik zuwenden. Dieser Prozess ist bereits angelaufen, so treten viele Fertigteilhersteller nicht mehr nur als Zulieferer für die Bauindustrie auf, sondern bieten die Fertigstellung eines Kellergeschosses oder ganzer Wohneinheiten als Dienstleistung von der Planung bis zur Ausführung an. Dieser Prozess, der bei weitem noch nicht in allen der rund 80000 überwiegend kleinen und mittleren Baubetriebe Deutschlands begonnen hat, muss noch forciert werden, wenn eine große Zahl konkurrenzfähiger Unternehmen bestehen bleiben und im Inland ein hoher Beschäftigungsstand gesichert werden sollen. Außerdem können durch projektbezogenes, firmenübergreifendes Zusammenarbeiten Synergieeffekte ausgenutzt werden. Weiterhin können durch mehr Vorfertigung, durch eine Erhöhung des Automatisierungsgrades, durch verbesserte Planung und Organisation sowie durch Spezialisierung auf Nischenprodukte Produktivitäts- und Effizienzsteigerungen erzielt werden [98].

Angepasste Automatisierung

Schließlich kann eine angepasste Automatisierung zur Lösung dieser Probleme beitragen und die zukünftige Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit dieses bedeutenden Wirtschaftszweiges verbessern. Neben der erheblichen Reduzierung der Kosten wird diese Entwicklung zu einer qualitativen Verbesserung der Arbeitsergebnisse führen. Die Automatisierungstechnik könnte auch im Bauwesen zur Schlüsseltechnologie des neuen Jahrhunderts werden. So könnte die aufgrund der Automatisierung zu erwartende Produktivitätszunahme den hohen Lohnkostenanteil von etwa 50 % bei Bauarbeitern reduzieren und zu geregelten Arbeitszeiten während des ganzen Jahres führen, was wiederum ein ganzjährig gesichertes Einkommen zur Folge haben könnte. Konkrete Einschätzungen zur Höhe dieser Reduzierung der Personalkosten liegen allerdings noch nicht vor. Die Einführung der Robotertechnologie würde auch zu einer gesicherten Fort- und Weiterbildung der Bauberufe, sowie zu einer Verbesserung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes und der Arbeitsbedingungen führen. Die Verkürzung der Bauzeiten wird die Kosten-Nutzen-Analysen von Bauprojekten positiv beeinflussen [10].

Im Bauwesen lassen sich im Wesentlichen vier grundsätzliche Bereiche erkennen, die für eine Automatisierung erschlossen werden können. Bild 3 verdeutlicht diese Anwendungsfelder, nämlich die Produktion von Baumaterialien, die Vorfertigung von Bauelementen und -modulen, die Prozesse auf der Baustelle sowie der Gebäudebetrieb. Wesentliche Merkmale für eine Automatisierung eines Bauablaufs sind:

- der Bauprozess muss algorithmierbar sein, d. h. eine eindeutig bestimmte Folge von Grundoperationen, die entweder von vornherein definiert werden oder jeweils von den Ergebnissen der vorhergehenden Operationen abhängen;
- eine Messwerterfassung durch Sensoren muss möglich sein;
- die zu automatisierenden Vorgänge müssen sich wiederholen;
- die dem automatisierten Teilbereich vor- und nachgeschalteten Bereiche müssen mit möglichst geringem Aufwand angepasst werden können.

Im Einzelnen lassen sich die vier Bereiche folgendermaßen charakterisieren:

Prozessabläufe der Baumaterialienproduktion

Die Automatisierung von Prozessabläufen in der Baumaterialindustrie stellt seit jeher ein klassisches Anwendungsgebiet der Automatisierungstechnik dar. Der Grad der Automatisierung entspricht dem vergleichbarer moderner Industrieanlagen. Neben den bekannten klassischen Automatisierungskonzepten werden in zunehmendem Maße leistungsfähige neue Strategien angewendet (z. B. Adaptiv- und Expertensysteme) [42]. Als Entwicklungstrends sind in diesem Bereich Optimierungen der einzelnen Produktionsprozesse zu erwarten. Die Automatisierung von Prozessabläufen in der Baumaterialienindustrie ist jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, deshalb soll darauf nicht mehr näher eingegangen werden.

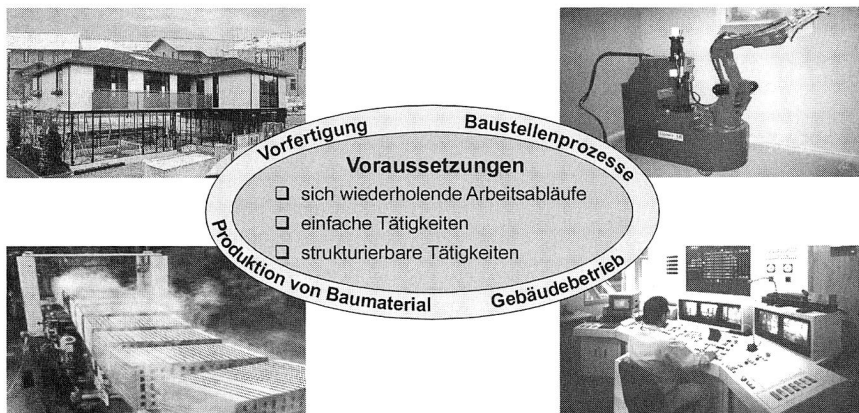


Bild 3: Unterschiedliche Anwendungsbereiche für den Einsatz von Automatisierungssystemen im Bauwesen

Stationäre Vorfertigung von Bauelementen und Bauteilen

Unter stationären Bedingungen ablaufende Herstellungsprozesse von Bauteilen und Bauelementen eignen sich aufgrund ihrer Ähnlichkeit zu Fertigungsprozessen im Maschinenbau prinzipiell gut für eine Automatisierung. Gewisse Unterschiede bestehen in der geringen Stückzahl der pro Zeiteinheit herzustellenden Bauteile und Bauelemente, in der noch ungenügenden Überwachung bzw. Steuerung der Be- und Verarbeitungsaufgaben durch Prozessmesstechnik und Prozessautomatisierung sowie in der geringeren Qualifikation der Arbeitskräfte im Vergleich zum Maschinenbau und ähnlichen Zweigen [42]. Auf einige Konzepte zur Vorfertigung im Bauwesen wird im Stand der Technik eingegangen. Wie die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Meinungsanalysen zeigen werden, wird erwartet, dass der Anteil und Einsatz von vorgefertigten Bauteilen im Bauwesen zunehmen werden.

Automatisierung von Baustellenprozessen

Die Automatisierung von Baustellenprozessen stellt, bedingt durch die unstrukturierte und dynamische Baustellenumgebung, den wohl anspruchsvollsten Bereich dar. Dennoch gibt es auch hierfür bereits Automatisierungslösungen, die im Stand der Technik vorgestellt werden sollen. Gemeinsam ist allen bisher entwickelten Prototypen, dass sie für bestimmte definierte Aufgaben unter Baustellenbedingungen zum Einsatz kommen sollten und die Tätigkeit der übrigen Bauarbeiter nicht wesentlich beeinträchtigen dürfen. Gezeigt hat sich, dass unter diesen Prämissen die wenigsten Roboter wirtschaftlich einsetzbar sind. Die Einschränkungen für die Arbeiter, die notwendigen Sicherheitsvorschriften, verbunden mit den nicht vorhersehbaren und unplanbaren Einflüssen auf der Baustelle, setzen dem Einsatz einzelner Roboter parallel zum normalen Bauablauf starre Grenzen. Nur einige wenige der bisherigen Entwicklungen sind augenblicklich im wirtschaftlichen Einsatz oder werden auf dem Markt zum Verkauf angeboten. Daraus resultiert die Erkenntnis, dass man Produktionsverhältnisse wie in der Fabrikhalle nicht ohne Schwierigkeiten und vor allem nicht wirtschaftlich auf die Baustelle transferieren kann [43].

Versorgungsprozesse während des Gebäudebetriebs

Die Automatisierung der zum Betreiben von Bauwerken aller Art notwendigen Versorgungsprozesse (Heizungs-, Lüftungs- und Sanitärtechnik) gehört seit langem zu den bevorzugten Anwendungsgebieten der Automatisierungstechnik. Ausgereifte Lösungsvarianten, wie zum Beispiel der europäische Installationsbus EIB, liegen national und international vor. Neuerungen sind vor allem im Bereich Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik durch gezieltes integriertes Zusammenwirken von neuen Prinzipien der Wärmedämmung und Energieerzeugung (z. B. Solartechnik) in Verbindung mit einer vorteilhaften Bauwerksgestaltung festzustellen. Der stärkere Zwang zum rationellen Umgang mit den zur Verfügung stehenden Energieressourcen, differenziert für unterschiedliche Nutzungsformen von Bauwerken, wird ein wesentlicher Faktor zur Entwicklung neuer optimaler Lösungen auf diesem Gebiet sein [42].

Die vorliegende Arbeit zeigt am Beispiel von Montageprozessen des Innenausbaus, wie Automatisierungslösungen gestaltet werden und welche Rationalisierungs- und Humanisierungspotentiale mit ihnen erschlossen werden können. Dabei wird auch deutlich, wie wichtig eine an die Bedürfnisse der Automatisierungslösungen angepasste Planung ist, damit diese wirtschaftlich eingesetzt werden können. Neben den technischen Aspekten wurde mit systematisierten Fragebögen das Stimmungsbild der deutschen Bauwirtschaft zum Themenbereich der Bauautomatisierung erfasst und analysiert.

Im Einzelnen wird zuerst der Stand der Technik der Automatisierung im Bauwesen dargestellt, um die gesamte Bandbreite des Themenkomplexes Bauautomatisierung aufzeigen zu können. Besonders bemerkenswerte Automatisierungslösungen sind die japanischen Feldfabriken zur Errichtung von Hochhäusern und Beispiele von Prototypen japanischer Bauroboter. Aber auch in Europa sind mittlerweile verschiedene Systeme in der Entwicklung oder im Baustellentest im Einsatz. Schließlich können durch eine abstrakte Betrachtung der aktuellen Bauverfahren zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Baustellenautomatisierung identifiziert und einander gegenübergestellt werden. (Kapitel 2).

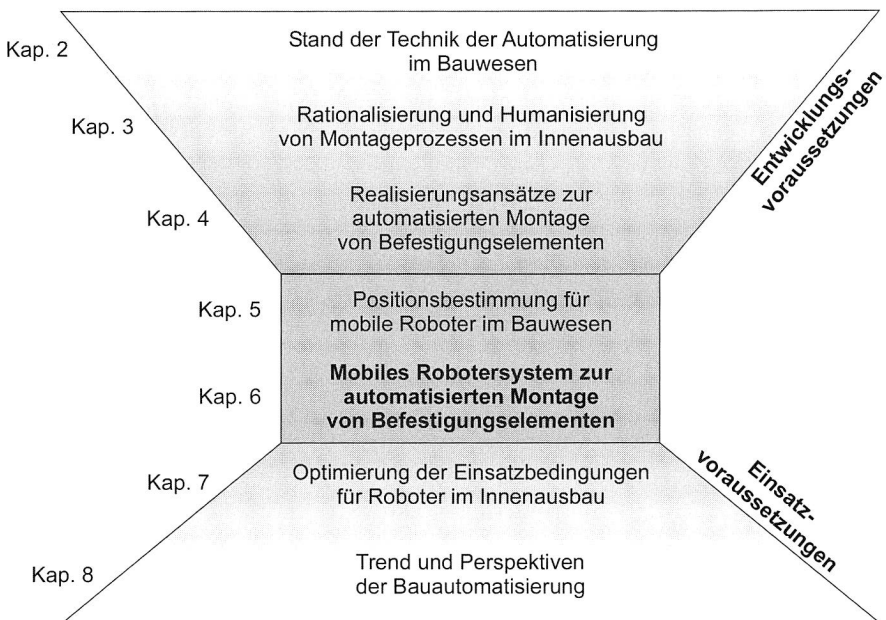


Bild 4: Vorgehensweise und Entwicklungsschwerpunkte der vorliegenden Arbeit

Anschließend werden die Chancen und Hemmnisse der Automatisierung im Bauwesen diskutiert. Dazu wird vor allem auf die Ergebnisse der Meinungsanalysen zurückgegriffen. Am Beispiel von verschiedenen Montageprozessen des Innenausbaus werden au-

ßerdem die Rationalisierungs- und Humanisierungspotentiale der Automatisierung am Bau analysiert und ein besonders geeignet erscheinender Prozess ermittelt (Kapitel 3).

Für diesen Prozess (Setzen von Dübeln und Abhängern bei der Montage von abgehängten Decken) werden im nächsten Kapitel verschiedene Realisierungsansätze mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden konzipiert. Ziel dieses Abschnitts soll es sein, ein geeignetes Konzept zur Realisierung auswählen zu können (Kapitel 4).

Besonders problematisch beim Arbeitseinsatz eines mobilen Roboters auf Baustellen ist die exakte Bestimmung der Position des Roboters. Hierzu werden verschiedene Verfahren vorgestellt, bewertet und ein eigener Lösungsansatz erarbeitet, der auf dem Verfolgen einer Führungslinie mithilfe eines Kamerasystems basiert (Kapitel 5).

Die Konzeption eines modularen Robotersystems zur Montage von abgehängten Decken zeigt die Möglichkeiten zum Einsatz von hochautomatisierten Geräten im Innenausbau auf. Eingehender betrachtet werden dabei das Steuerungssystem und die Benutzerführung, da beide Einheiten speziellen Ansprüchen genügen müssen, um erfolgreich im Baustellenbetrieb eingesetzt werden zu können (Kapitel 6).

Aus den Baustellentests des realisierten Prototypen ergibt sich die Forderung nach einer Optimierung der Roboterhardware und nach verbesserten, automatisierungsgerechten Bauabläufen, um die Baustellentauglichkeit und Einsatzmöglichkeit des Roboters zu erhöhen. Eine automatisierungsgerechte Baustelle muss anders organisiert sein als eine herkömmliche, daher wird ein Anforderungskatalog zur besseren Vorausplanung für künftige Bauprojekte mit Automatisierungslösungen erarbeitet (Kapitel 7).

Abschließend werden Trends der künftigen Automatisierung am Bau zusammengefasst und auf der Basis weiterer Daten der Meinungsanalysen diskutiert. Es zeigt sich, dass zum einen eine Erhöhung des Planungsaufwands vor Beginn der Bauausführung und zum anderen eine Zunahme des Vorfertigungsanteils als wesentliche Merkmale der Baustelle der Zukunft angesehen werden (Kapitel 8).

2 Stand der Technik der Automatisierung im Bauwesen

Ziel dieses Kapitels ist es, einen repräsentativen Eindruck von aktuellen Möglichkeiten der Automatisierung im Bauwesen zu vermitteln. Dazu wird der Stand der Technik in den für die Errichtung eines Gebäudes besonders maßgeblichen Bereichen „Vorfertigung“ und „Automatisierung von Baustellenprozessen“ anhand von markanten Beispielen erläutert. Es zeigt sich, dass besonders in Japan auf diesen Gebieten große Fortschritte erzielt werden konnten, die in beeindruckenden Systemlösungen resultieren. Seit einiger Zeit werden jedoch auch in Europa verstärkt Forschungsanstrengungen in dieser Disziplin unternommen und baustellentaugliche Roboter entwickelt.

Bei der Aufgliederung der Anwendungsbereiche für eine Automatisierung im Bauwesen wurde schon darauf hingewiesen, dass insbesondere im Bereich „Automatisierung von Baustellenprozessen“ noch starke Defizite bei der Rationalisierung und Humanisierung durch den Einsatz von Automatisierungstechnik zu erkennen sind. Zwar werden in diesem Kapitel einige der weltweit entwickelten Automatisierungssysteme vorgestellt, die Anzahl der dauerhaft eingesetzten und als Seriengeräte entwickelten Automaten oder Roboter ist aber vernachlässigbar klein. Bild 5 zeigt diesen Sachverhalt am Beispiel der 1997 in Deutschland eingesetzten Roboter, von denen nur 10 Stück (ca. 5 %) auf der Baustelle selbst arbeiten.

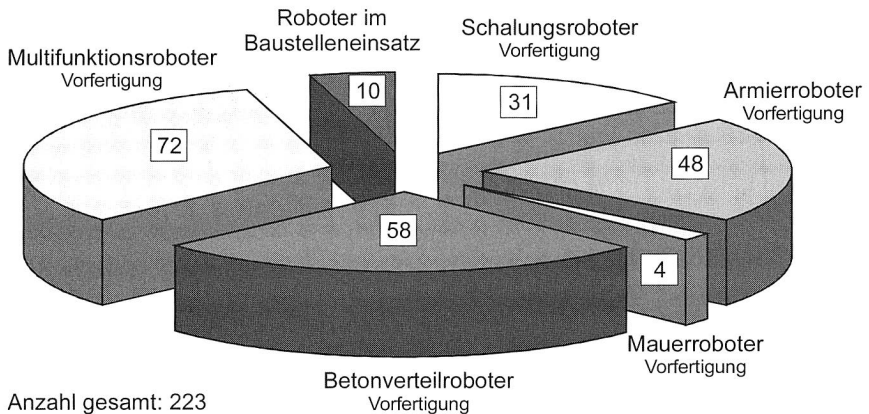


Bild 5: Anzahl der 1997 in Deutschland eingesetzten Bauroboter [119]

Die in Bild 6 aufgezählten Roboter sind in dem im Kapitel 4.2.3 definierten Sinn zu verstehen, d. h. sie weisen mindestens drei frei programmierbare Bewegungsachsen auf. So ist es auch zu erklären, dass nur ein eingesetzter Kanalroboter oder ein Straßenfertiger genannt werden. Da aber die Einordnung der Geräte als Roboter von den einzelnen Autoren durchaus subjektiv vorgenommen wird, können die Einsatzzahlen immer wieder schwanken, besonders japanische Veröffentlichungen müssen hinsichtlich der Zahl der zum Einsatz kommenden Roboter kritisch hinterfragt werden, da oftmals einfachste Systeme aus Gründen des Marketings bereits als Roboter angesehen werden.

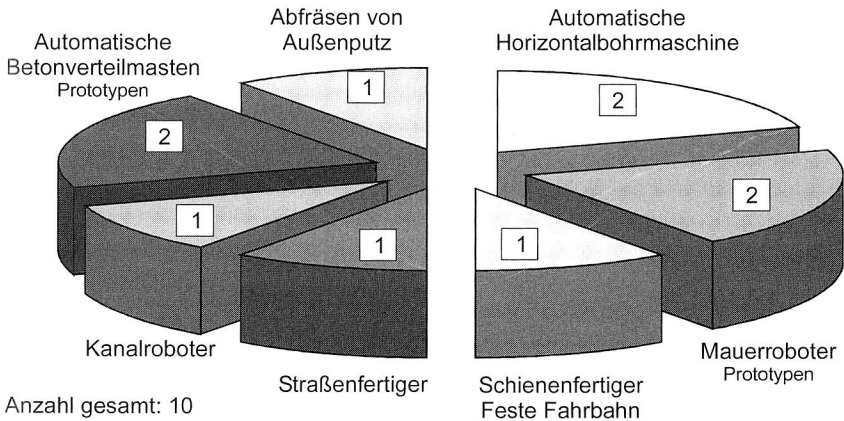


Bild 6: Anzahl der 1997 in Deutschland auf der Baustelle eingesetzten Bauroboter [119]

2.1 Automatisierungssysteme in der Vorfertigung

Aufgrund der rationelleren Fertigungsvoraussetzungen und der Möglichkeit einer höheren Funktionsintegration gewinnt die Vorfertigung von Bauteilen zunehmend an Bedeutung. Arbeitsinhalte vom personalkostenintensiven Baustellenbereich können in das kostengünstige Arbeitsumfeld der Kleinserienfertigung verlagert werden. Dies trägt zur Reduzierung der Gesamtkosten und somit zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des gesamten Baugewerbes bei.

2.1.1 Gebäudeherstellung in Japan

Die Vorfertigung von Gebäudeteilen oder Raumzellen hat in Japan weltweit die höchste Integrationsdichte und den höchsten Vorfertigungsgrad erreicht. Es ist auffallend, dass es gerade die großen Mischkonzerne, wie zum Beispiel die Toyota Motor Corporation, verstanden haben, ihre Erfahrungen aus der Serienfertigung im Automobilbau in die Vorfertigung von Gebäudeteilen einzubringen und so die Effizienz der Produktion im Bereich der Bauindustrie wesentlich zu steigern. Gleichzeitig wurden die hohen Qualitätsansprüche der PKW-Produktion auf die Fertigung von Raummodulen übertragen.

Die Produktivität liegt bei den neuesten Toyota-Werken bei 4,5 – 7 Häusern pro Personennjahr [11], wobei eine Raumzelle im 2,5 – 6-Minutentakt vorgefertigt wird. Die Montage einer solche Raumzelle ist in Bild 7 zu sehen. Trotz der Vorfertigung ist die Zusammenstellung eines Hauses sehr flexibel, der Kunde kann sich sein Eigenheim aus über 350000 Einzelteilen zusammenstellen, welche in Form von Bauteilgruppen und Baugruppen im rechnergestützten Planungssystem der Firma angeboten werden. Auf der Grundlage von Virtual Reality bieten verschiedene Unternehmen dem Kunden bereits vor der Unterzeichnung des Kaufvertrages einen Rundgang durch das künftige Haus an.

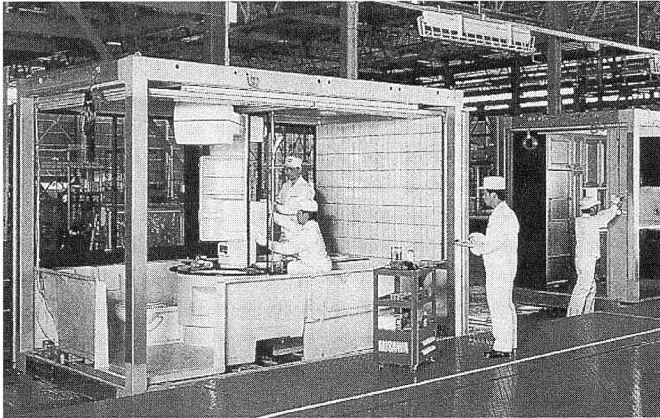


Bild 7: Montagearbeiten an einer Raumzelle der Firma Toyota [11]

Auf der Baustelle schließlich wird aus bis zu 12 verschiedenen Raumzellen in vier bis sechs Stunden ein ca. 120 m² großes Haus montiert, der Marktpreis eines solchen Fertighauses beträgt ca. 900,- bis 1500,- €/m². Ein alten- bzw. behindertengerechtes Haus mit Aufzug, spezieller Küchen- und Sanitäreinrichtung, Home-Automation und weiteren Extras kostet ca. 2300,- €/m².

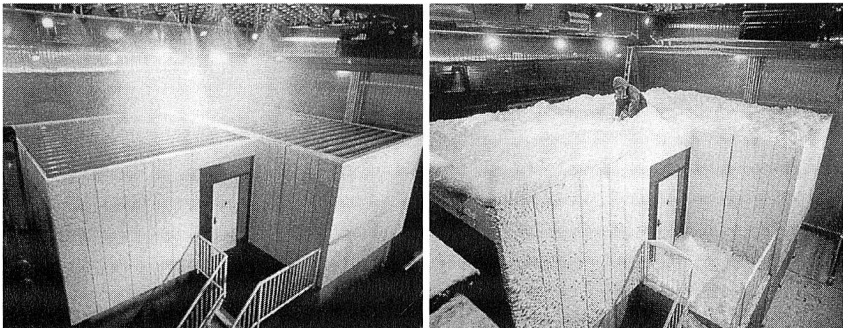


Bild 8: Testzentrum von Misawa-Homes (Regentest und Beschneigungsanlage) [11]

Die Herstellungsqualität ist bei Toyota und anderen Anbietern so groß, dass die Firmen Garantien von 10 bis 20 Jahren auf ihre Fertighäuser geben können. Bild 8 zeigt die Durchführung von verschiedenen Tests, um die Dichtigkeit der Raummodule und ihrer Verbindungen zu überprüfen.

2.1.2 Vorfertigung von Ziegelwänden und -decken

In Deutschland gibt es ebenfalls einige Anbieter von Raummodulen (z. B. [89], [90]), die allerdings überwiegend als Zwischenlösungen bei Umbaumaßnahmen von Krankenhäusern und anderen öffentlichen Einrichtungen verwendet werden. Bei Wohnhäusern

dagegen wird neben der konventionellen Bauwerksserrichtung die Verwendung von vorgefertigten Wänden in Ziegel-, Holz- oder Betonbauweise bevorzugt, so dass für dieses Marktsegment zahlreiche Anbieter um Marktanteile kämpfen.

Am Beispiel eines Herstellers von Fertighäusern aus Ziegel soll ein typisches Vorgehen erläutert werden. In Zusammenarbeit mit dem Bauherren wird von Architekten des Fertighausanbieters ein CAD-Plan des Hauses erstellt, welcher bereits alle Einbauelemente enthält. Auf der Grundlage dieses Planes werden die einzelnen Wandelemente ermittelt und im Werk mit großen Portalanlagen in liegender Bauweise vorgefertigt [122].

Die einzelnen Fertigungsstationen werden mit großen Paletten angefahren, welche die Wand- oder Deckenelemente von einer maschinellen Arbeitsstation bzw. manuellen Arbeitsgruppe zur nächsten befördern. Die Belegung der Fertigungspaletten erfolgt softwaregestützt in der Konstruktionsabteilung. Dabei werden die erstellten Gebäudepläne für die Produktion der Wand- und Deckenelemente aufbereitet und alle erforderlichen Fertigungsdaten ermittelt [55], [122].

Der Fertigungsumlauf beginnt mit dem Reinigen der Fertigungspalette, dem Aufzeichnen der Konturen für die manuell zu fertigenden Teile und die Qualitätskontrolle, dem Markieren der Schalungen und Elektroden und dem Auftrag von Öl als Trennmittel. In der Ziegelsetzstation werden die zuvor automatisch entstapelten Ziegelsteine unter Berücksichtigung der Fenster, Türen oder ähnlicher Aussparungen von einer Portalanlage an die richtige Position gebracht. Anschließend werden manuell die Randschalungsteile auf die Paletten gesetzt und mit ihnen verstiftet oder mit Magneten darauf fixiert. Abschließend werden noch bei Bedarf Schnittsteine manuell eingelegt. Elektroden, Leerrohre, Sanitärteile und Ähnliches werden ebenfalls manuell eingebracht. An einer dritten Station werden die bereits vorgeschnittenen Armierungseisen eingelegt [55].

Danach werden die Fugen zwischen den Steinreihen mit einer speziellen Vergussmasse automatisch verfüllt. Eine automatisch beschickte Trockenkammer beschleunigt das Austrocknen der gefertigten Elemente. Im Anschluss an die Trocknung wird einseitig der Putz manuell aufgebracht und geglättet. Es folgt eine weitere Einlagerung in die Trockenkammer, in der bis zu elf Paletten übereinander gelagert werden können. Nach Ablauf der Trockenzeit wird die Palette zum Entschalplatz transportiert. Dort werden die Schalungen entfernt, gereinigt und auf einer Stahlbühne zur erneuten Verwendung bereitgestellt. Die Palette verfährt auf einen hydraulischen Kipptisch, der auf 85 Grad geschwenkt wird [55].

Bei den Ziegelwänden wird dann manuell der Putz auf die zweite Seite aufgetragen und geglättet. Die Fenster werden eingebaut, die Dosen freigelegt und die Teile versandfertig gemacht. Nach einer weiteren Trockenzeit von ca. acht bis zehn Stunden werden die Teile auf Versandpaletten gestellt, die dann mit speziellen Innenladerfahrzeugen auf die verschiedenen Baustellen verteilt werden [55].

Auf der Baustelle wird zuerst die Baugrube ausgehoben, danach werden die Abwasserleitungen verlegt und die Bodenplatte des Kellers fertiggestellt. Dann werden von

einem Bautrupp die Kelleraußenwände aus Beton mit einem Kran auf die Fundamentplatte gesetzt und gesichert. Anschließend folgen die Innenwände sowie die geschosshohen Kaminelemente mit Schamotteinsätzen, Putztüren und Rauchrohranschlüssen. Sobald alle Wände aufgestellt sind, werden sie an den Stoßstellen mit Spezialmörtel und Vergussmaterial unlösbar miteinander verbunden. Außerdem werden die sperrigen Teile für Heizung und Warmwasserbereitung im Keller aufgestellt, ebenso erfolgt jetzt bereits die Montage der Betontreppenläufe. Als Abschluss des ersten Montagetages auf der Baustelle wird die Ziegel-Elementdecke auf das Kellergeschoss aufgesetzt [72].

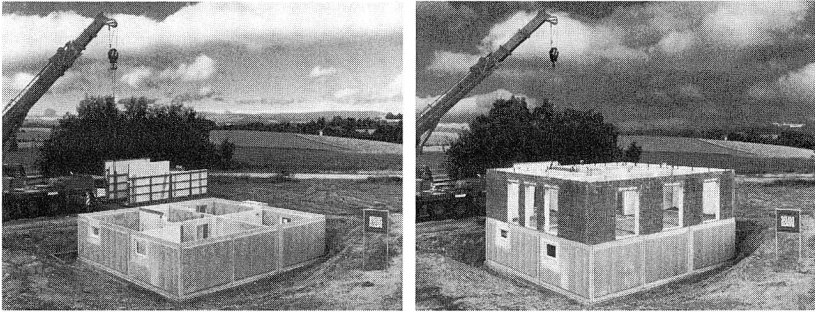


Bild 9: Montage des Untergeschosses und des Erdgeschosses an den ersten beiden Tagen (Quelle: Winklmann GmbH & Co. KG)

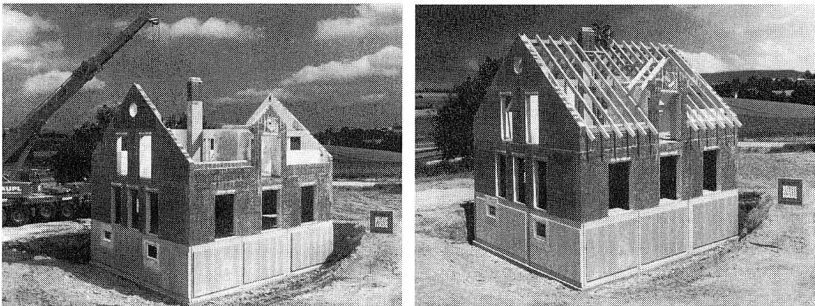


Bild 10: Montage des Dachgeschosses und des Dachstuhls am dritten und vierten Tag (Quelle: Winklmann GmbH & Co. KG)

Am zweiten Tag werden die Wände für das Erdgeschoss angeliefert, aufgestellt und miteinander verbunden. Am dritten Tag wird das Erdgeschoss mit einer weiteren Ziegel-Elementdecke abgedeckt. Anschließend werden die Giebelwände montiert und die Gerüste für Zimmerer und Dachdecker aufgebaut. Am vierten Tag wird der Dachstuhl errichtet, am fünften Tag schließlich werden das Dach fertiggestellt und Fenster und Türen eingebaut. Damit ist das Haus dicht gegen Regen und Wind. In weiteren zehn Wochen erfolgen dann der komplette Innenausbau und die Fertigstellung des Gebäudes [72].

2.1.3 Vorfertigung von Betonelementen

Ähnliche Fertigungsabläufe sind auch bei der Vorfertigung von Betonelementen zu beobachten. Beispielhaft soll die Fertigung der Firma Fuchs [110] erläutert werden.

Die Paletten sind für den Aufbau zweier unterschiedlicher Schalungssysteme ausgelegt. Das eine dient der Herstellung von Fertigteilen bis zu einer Elementdicke von 200 mm und ist robotertauglich. Das zweite Schalungssystem ist für die Herstellung von Massivelementen bis zu einer Stärke von 400 mm vorgesehen. Aufgrund des geringen Anteils werden diese Schalungen manuell verlegt.

Die bis zu 200 mm hohen Schalungen werden von einem automatisch arbeitenden Magazinroboter bereitgestellt. Dieser Roboter hat die Aufgabe das komplette Schalungslager mit derzeit vier unterschiedlichen Höhen zu verwalten und dem Schalungsroboter die benötigten Schalungsteile zu übergeben. Die Schalungen werden bei diesem System mithilfe von schaltbaren Magneten, welche vom Roboter positionsgenau aufgesetzt werden können, auf der eingeölte Palettenoberfläche befestigt.

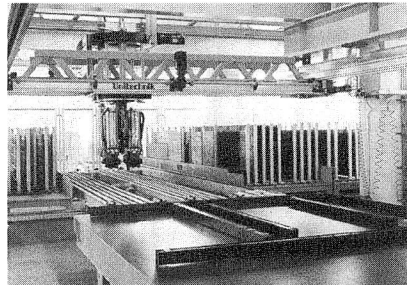
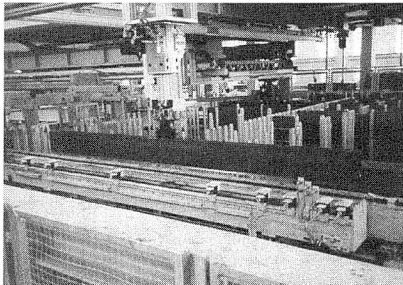


Bild 11: Roboter beim Organisieren und Setzen der Schalungsteile [110]

Anschließend erfolgen ein Teil der manuellen Komplettierung der Schalung und der Einbau der Bewehrung. Die komplette Bewehrung wird im Obergeschoss der Montagehalle mit einer automatisch arbeitenden Mattenschweißanlage hergestellt. Durch Öffnungen im Deckenbereich wird die Bewehrung abgesenkt und direkt palettenweise in die Schalung eingelegt. Darüber hinaus erfolgt auf der Schalstation eine Qualitätskontrolle der gesamten Palette vor dem Betonieren.

Zwei automatische Betonverteiler ermöglichen die Verarbeitung von Leicht- und Schwerbeton. Nach dem Betonieren wird mit der leisen Schütteltechnik verdichtet. Über das Regalbediengerät, das die Härtekammer verwaltet, können Paletten individuell in den Veredlungsbereich über der Härtekammer transportiert werden. Auf dieser Ebene werden die Wände manuell geglättet. Zukünftig kann eine Glättmaschine nachgerüstet werden, mit der die Massivwände halbautomatisch geglättet werden können. Darüber hinaus können auf dieser Veredelungsbühne die Elemente mit einer Isolierung versehen werden. Die ausgehärteten Betonelemente werden entschalt und auftragsbezogen auf einem der Abstapelplätze abgelegt oder direkt in bereitstehende Innenladergestelle eingelagert.

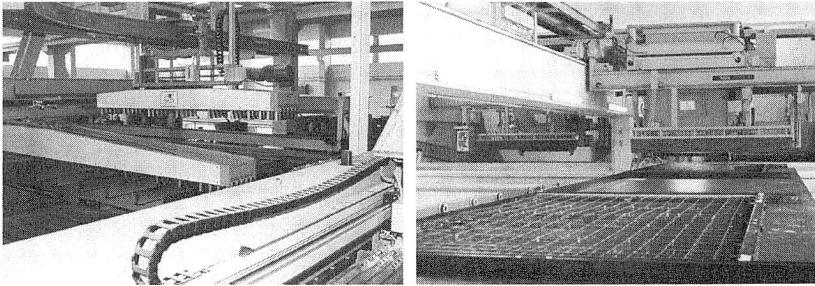


Bild 12: Mattenschweißanlage und Betonierstation [110]

Aus den vorgestellten Systemen lässt sich ableiten, dass im Bereich der Vorfertigung bereits ein hoher Automatisierungsgrad erreicht werden konnte. Dabei gibt es sowohl komplexe Systeme mit der Vorfertigung ganzer Raummodule als auch die großflächige Vorfertigung einzelner Wand- oder Deckenelemente. Nachteilig bei Einsatz vorgefertigter Systeme ist zum einen, dass im Moment nur sehr wenig Ausbauelemente in die Vorfertigung integriert werden können, da geeignete Verbindungstechniken für die Elektro-, Sanitär- und Heizungsinstallationen fehlen. Zum anderen bereitet die Logistik, d. h. der Transport der vorgefertigten Teile auf die Baustelle, Schwierigkeiten, vor allem, wenn es sich um ganze Raummodule handelt. Kurzfristige Änderungswünsche der Bauherren sind nach dem Start der Produktion nur sehr kostenintensiv zu realisieren.

Dagegen gewährleistet die Vorfertigung in definierten Fabrikumgebungen eine Produktion mit gleichbleibender Qualität und hoher Maßhaltigkeit. Die Bauzeit kann deutlich verkürzt werden und damit eine frühere Nutzung des künftigen Gebäudes und eine kürzere Finanzierungsphase erreicht werden.

2.2 Automatisierung von Fertigungsprozessen auf Baustellen

Die Automatisierung von Bauprozessen ist schon seit Beginn der achtziger Jahre Gegenstand der Forschung und Entwicklung der großen japanischen Baufirmen. Begonnen wurde mit der Entwicklung einzelner Roboter und fernbedienbarer Manipulatoren. Dazu zählen Roboter zur Betoneinbringung und Betonbehandlung, zum Feuerschutzauftrag auf Stahlkonstruktionen, Handling und Positionierung von Großteilen und Fassadenroboter für Diagnose, Putz- und Farbauftrag (z. B.: [14], [23], [71]). Bis 1993 wurden über 100 verschiedene Prototypen entwickelt und im Baustelleneinsatz getestet. Außerdem gibt es in Japan die weltweit einzigen „Hochhausbaumaschinen“.

2.2.1 SMART-Shimizu

Die Shimizu Corporation war eine der ersten japanischen Baufirmen, die damit begann, ihre Erfahrungen aus 10 Jahren Entwicklung von Baurobotern in das Konzept einer durchgängig automatisierten Hochbaustelle einzubringen. Nach fünf Jahren Entwicklung und einem finanziellen Aufwand von annähernd 16 Millionen US-Dollar wurden 1990 und 1991 zwei Prototypen des SMART-Systems (Shimizu Manufacturing System

by Advanced Robotics Technology) für den Bau kleiner Gebäude eingesetzt. Der erste Großeinsatz fand dann 1991 bei der Erstellung des 20-stöckigen Juhroku-Bankgebäudes in Nagoya City statt.

Unter dem SMART-System versteht man bei Shimizu die Summe der halb- und vollautomatischen Lager-, Transport- und Montageeinrichtungen bzw. Montageroboter, die ein Gebäude weitgehend automatisch erstellen. Es ist der Versuch, die Bauablaufplanung sowie das Baustellenmanagement unter Zuhilfenahme einer Echtzeit-Computersteuerung zu verbessern. Dies umfasst einen durchgängigen Informationsfluss vom Design und der Planung des Bauwerks über die Programmierung der Bauroboter mithilfe dieser Daten bis hin zur Kontrolle und Überwachung des Baugeschehens vor Ort über Computer.

Kern des Systems ist eine in Zusammenarbeit mit der Mitsubishi Heavy Industries Ltd. erstellte Stahlkonstruktion, an deren Unterseite Schienen für Montage- und Transportroboter angebracht sind und die auf vier Säulen ruht. Das Gesamtgewicht dieser Konstruktion beträgt 1200 t auf einer Gesamtfläche von ca. 1200 m². Nach Erstellung des Fundaments werden die vier Säulen und auf diesen die Stahlkonstruktion mit den Montage- und Transportrobotern installiert und komplett mit einer Kunststoffolie überdacht. Dies dauert ca. sechs Wochen. Zwei Stahl- und zehn Fertigteilwerke liefern „just in time“ im Zehn-Minutentakt die zu verarbeitenden Fertigteile an. Dieses Anlieferungskonzept ist allerdings nicht unbedingt Teil des Systems, sondern resultiert vielmehr aus dem Platzmangel japanischer Baustellen in Großstädten. Die Fertigteile werden kontrolliert und in bestimmten Depots am Fuß des Gebäudes oder im Gebäude selbst den Robotern zur Verfügung gestellt.

Neun, mit automatischen Kranwinden ausgestattete Roboter bringen die Stützen, Träger, Boden-, Decken-, Wand- oder Installationselemente in die jeweilige Etage des Stahlskelettgebäudes [57]. Die anschließenden Vorgänge der Positionierung und Fixierung geschehen ebenfalls größtenteils automatisch. Die Stahlstützen und Stahlträger werden nach der Positionierung von automatischen Schweißrobotern miteinander verbunden. Die Positionierung und die Identifikation bzw. Kontrolle der Schweißnaht geschieht mittels Laserüberwachung. Nach der Fertigstellung eines Stockwerks wird das gesamte, auf den vier Säulen ruhende Tragwerk von 12 Hydraulikstempeln ein Stockwerk nach oben gedrückt. Jeweils drei 132-t-Hydraulikstempel in jeder Säule werden benötigt, um dies in 1,5 Stunden zu bewerkstelligen. Voll ausgefahren erreicht es eine Höhe von 25 m, zusammengefahren ist es etwa 4,5 m hoch [56]. Eine Etage höher angelangt, wird mit der Erstellung des nächsten Stockwerks begonnen. Ungefähr neun Tage benötigt man für ein Stockwerk. Endziel ist die Stockwerkserstellung im Wochentakt, also in fünf Tagen. Für die nötigen Installationen, die noch nicht in den Fertigteilen integriert sind, wurde im bereits fertiggestellten Teil des Gebäudes eine Feldfabrik eingerichtet.

Durch die Ausbildung des obersten Stockwerks des Hochhauses als Dach zu Beginn des Bauprozesses ist die Baustelle in alle Richtungen abgeschlossen, was Beeinträchtigungen und eventuelle Schäden durch Witterungseinflüsse erheblich vermindert. Der

Arbeitskräftebedarf reduzierte sich durch diesen Prototypen des SMART-Systems um ca. 30 %. Erreicht werden soll bei weiteren SMART-Projekten eine Arbeitskräfteeinsparung von ca. 50 %. Augenblicklich liegen die Erstellungskosten eines Gebäudes durch das SMART-System noch deutlich über denen der herkömmlichen Ausführung. Es wird jedoch eine merkliche Kostenreduzierung nach dem sechsten oder siebten mit dem SMART-System errichteten Gebäude erwartet.

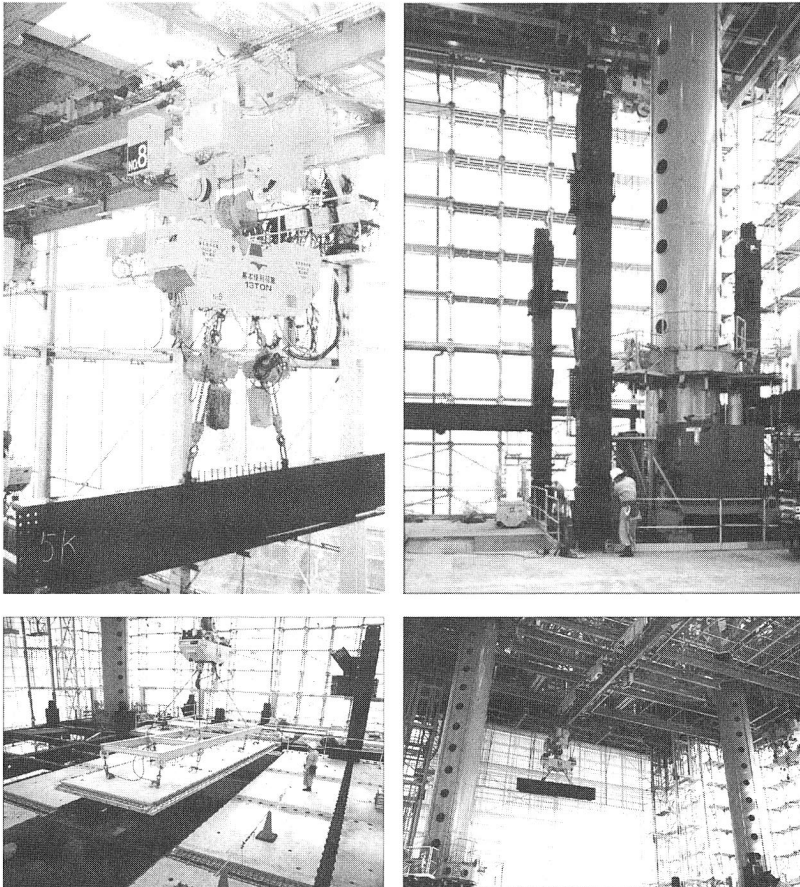


Bild 13: *Materialtransport, Montage der Stahlstützen und Verlegung der Fußböden im SMART-Systems (Quelle: Shimizu Corporation)*

Bemerkenswert ist der hohe Anteil von Fertigteilen am Gebäude. Nach der Erstellung des Fundaments kann man den übrigen Bauablauf als Transport- und geometrisches Konfigurationsproblem beschreiben. Ausnahmslos alle Elemente sind vorgefertigt, lediglich Teile der Installation, die Fugenisolierung und andere Nebentätigkeiten müssen

noch manuell ausgeführt werden. Die Problematik des Bauablaufs liegt also weniger im rechtzeitigen Bereitstellen von Material, in der Wahl der Bauverfahren bzw. -maschinen oder ähnlichen, auf herkömmlichen Baustellen anzutreffenden Schwierigkeiten, sondern mehr in der akkuraten Planung, in der Programmierung der Roboter oder in der Just-in-time-Anlieferung der Teile [56].



Bild 14: Steuerzentrale und Außenansicht des SMART-Systems (Quelle: Shimizu Corporation)

Darüber hinaus gibt es Hochhausbaumaschinen von weiteren japanischen Konzernen, die nach demselben Prinzip arbeiten. Alternativ zu dem beschriebenen Fertigungsverfahren arbeitet ein System AMURAD der Firma Kajima. Hier wird als erstes das Dach des künftigen Gebäudes ebenerdig gefertigt und als Wetterschutz der weiteren Bautätigkeit benutzt. Mit speziellen Hubeinheiten werden dieser Gebäudeteil und jedes im weiteren Bauverlauf fertiggestellte Geschoss computergesteuert angehoben. Anschließend kann die darunter liegende Etage ebenfalls wieder ebenerdig gefertigt werden, wobei sich der Fertigungsverfahren selbst nur unwesentlich von dem SMART-System unterscheidet [23].

Die automatischen Hochbausysteme sind bisher ca. 20 mal eingesetzt worden und sollen demnächst erstmalig auch im asiatischen Ausland realisiert werden [12]. Derzeit sind sieben bis acht verschiedene Fertigungssysteme im Einsatz, deren Roboter nur einen weit kleineren als den theoretisch automatisierbaren Teil der Bauleistungen übernehmen. Der Einsatz der Baumaschinen bringt auch einige Nachteile mit sich. Bis zu sechs Wochen dauert der Aufbau und die gleiche Zeit noch einmal der Abbau der bis zu fünfzehn parallel arbeitenden Geräte. Zwischen 2,5 und 13 Mio. € kostet die Einrichtung der Baustelle. Rentabel sind diese Bauverfahren nur, wenn Hochbauten mit großer Gesamtfläche geplant sind oder aber wenn strenge Vorschriften, wie in Tokio, das Bauen erschweren. In Japan dürfen Baustellen den Verkehr in der Hauptstadt nicht behindern und auch deren Straßen nicht verschmutzen [109].

2.2.2 Roboter zur Errichtung von Mauerwerk

In Europa hat sich der Einsatz dieser Hochhausbaumaschinen bisher nicht etabliert, da die hohen Entwicklungs- und Betriebskosten europäische Baufirmen als nicht wirtschaftlich erschienen. Stattdessen wurde an Systemen gearbeitet, die vor allem den Bau von Wohnhäusern erleichtern sollen. Da diese häufig aus Ziegelmauern bestehen,

war es naheliegend, mit einem Roboter zu versuchen, Ziegelmauern auf der Baustelle zu errichten.

Die folgende Beschreibung dieses vom Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Uni Stuttgart entwickelten Mauerroboters wurde auf Basis der in [97], [25] und [103] genannten Angaben vorgenommen. Dieser Roboter wurde bewusst klein gehalten, er kann nur etwa 50 kg Gewicht tragen, andererseits ist er aber sehr beweglich und kann daher auch für kleinere Gebäude schnell wirtschaftlich werden.

Ziel dieses Entwicklungsprojektes war es, den praxisnahen Einsatz eines Mauerroboters auf der Baustelle demonstrieren zu können sowie bestehende Risiken und Unwägbarkeiten, die einer industriellen Umsetzung im Wege stehen, zu reduzieren.

Der Roboter besteht aus einer mobilen Plattform mit Raupenfahrwerk und einem darauf angebrachten hydraulischen Roboterarm mit Vakuumsauggreifer. Ausgehend von den CAD-Daten des Architekten und den Maschinendaten des Roboters führt ein so genanntes Wandplanungssystem die Einteilung der Wände in Einzelsteine, die Planung der Fertigungsreihenfolge sowie die optimale Bestimmung der Roboter- und Palettenstandorte aus. Ein flexibles Programmiersystem ermöglicht die automatische Generierung der Roboterprogramme aus diesen Plandaten. Mithilfe unterstützender Sensorik zum Abgleich von Plan- und Istdaten bewegt sich der Mauerroboter auf der Geschossdecke und erstellt geschosshohe Innen- und Außenwände.

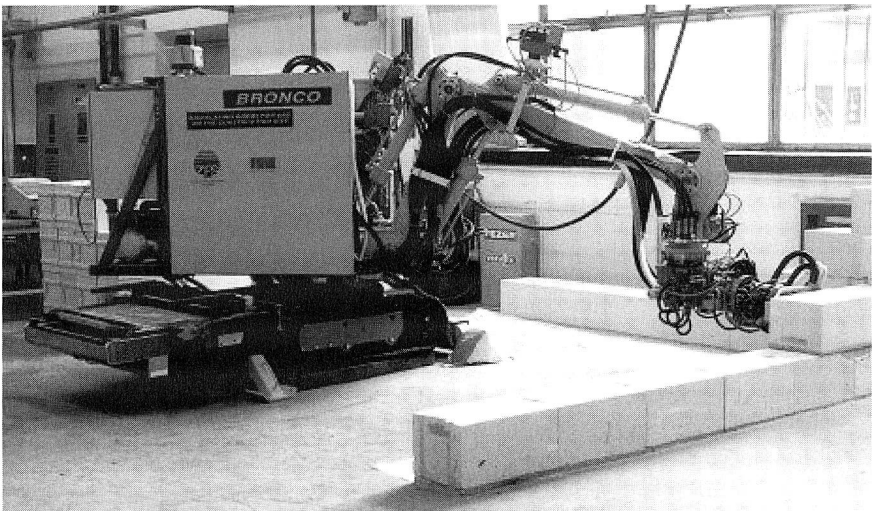


Bild 15: Hydraulisch angetriebener Mauerroboter mit Knickarmkinematik [97]

Zur Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit wird bei diesem Roboter ein planares Laser-scanner-Reflektor-System CAPSY (Computer Aided Positioning System) zur ebenen Positionserfassung verwendet. Dazu müssen Reflektoren in den Arbeitsraum einge-

messen werden, welche von einem Laser, der am Roboter befestigt ist, ca. 5-mal pro Sekunde abgetastet werden. Aus den gemessenen Winkelstellungen der einzelnen bekannten Reflektoren wird die Position des Roboters mit einer Genauigkeit von ca. ± 3 mm berechnet. Ähnliche Verfahren sind aus der Positionsbestimmung mobiler Roboter bekannt (vgl. Kapitel 5). Ein schwerwiegender Nachteil ist dabei das aufwändige und kostenintensive Einmessen der Reflektoren.

Darüber hinaus kommen berührungslose Abstandssensoren am Greifer zur Bestimmung der Relativposition des Greifers zur Wand, Neigungswinkelsensoren an der Basis und Greifer zur Neigungskorrektur sowie eine Messwaage zur Mörtelfüllstandsmessung zum Einsatz.

Um den Bediener bei der Handhabung des Robotersystems nicht zu überfordern, wird ein an dessen Bedürfnisse angepasstes Bedienungssystem benutzt. Dieses ermöglicht es, einerseits den Roboter von Hand zu bewegen, z. B. zum Arbeitsplatzwechsel, und andererseits den automatischen Fertigungsablauf vorzubereiten, zu starten, zu beeinflussen, abzubrechen, Störfälle zu beheben und nach Störfällen die Mauerwerksfertigung wieder aufzunehmen.

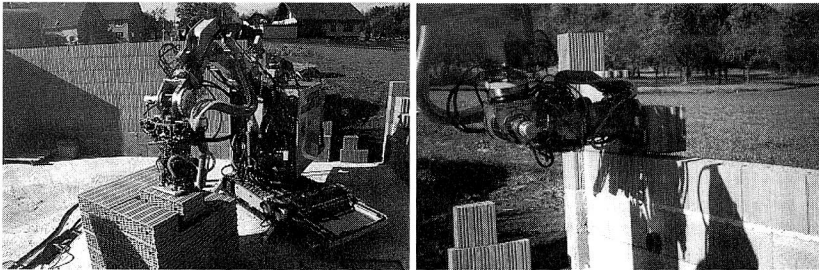


Bild 16: Abheben der palettierten Steine, Aufbringen des Mörtels und Setzen von Ziegeln mit dem Mauerroboter auf einer realen Baustelle [97]

Das Konzept des graphisch-interaktiven Bedienungssystems, in dem die Bedienelemente enthalten sind, ist auf Basis des Betriebssystems Windows95 und einer nachrichtenbasierten DDE-TCP/IP-Verbindung zur Robotersteuerung umgesetzt. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Darstellung von Plan- und Istdaten, die den Maschinenführer stets über den Fertigungsfortschritt und Abweichungen von den Plandaten informieren. Damit ist eine frühzeitige Erkennung von Fehlern und ein Eingreifen möglich. Durch die graphische Realisierung mit einer kontextbezogenen Anzeige von Statusinformationen erhält der Bediener eine anschauliche Richtschnur für das Vorgehen bei der Handhabung des Robotersystems.

Darüber hinaus gibt es einige weitere Entwicklungen, die sich mit der Errichtung von Mauerwerk mit Robotern befassen. Die meisten dieser Geräte werden jedoch in der Vorfertigung von Ziegelwänden in stehender Bauform eingesetzt oder aufgrund ihrer hohen Traglast für Palettierungsaufgaben benutzt. Nähere Angaben dazu sind beispielsweise in [2], [3] oder [113] zu finden.

2.2.3 Sonstige Automatisierungssysteme

Horizontalbohrmaschinen

Das Anbringen von Bohrlöchern für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle wie Befestigung von Decken, Eisenbahnschienen oder Anschlussbewehrungen stellt einerseits eine körperlich stark belastende, im Tunnel- oder Innenausbau andererseits auch eine sehr monotone Arbeit dar. Deshalb wurden für diese Tätigkeit Automatisierungslösungen entwickelt, die aktuell auf Baustellen getestet werden.

In einer Kooperation der holländischen Baufirmen HBW B.V. und Strukton Groep N.V., der HILTI-Niederlassung in den Niederlanden und der Abteilung für Building and Construction Research des TNO wurde ein Roboter entwickelt, der Bohrungen in Betonböden anbringen kann [44].

Das Hauptziel der Entwicklung war die Verbesserung der Arbeitsbedingungen, da der Bohrroboter die Handhabung der schweren Bohrgeräte übernimmt und auch Nebeneffekte wie Geräusch- und Staubentwicklung, die speziell in einem Tunnel sehr unangenehm sind, reduziert werden. So mussten zum Beispiel für einen Eisenbahntunnel beim Schiphol-Flughafen 20000 Löcher für die Eisenbahnschienen und ca. 100000 Löcher für die Anschlussbewehrungsstäbe gebohrt werden. Weiterhin steigt die Qualität und die Produktivität der Arbeit, da durch die automatische Positionierung und die Überwachung des Bohrprozesses durch die Robotersteuerung Fehler vermieden werden und die Genauigkeit erhöht wird.



Bild 17: Mobiler Bohrroboter zum Anbringen von Bohrungen für Anschlussbewehrungsstäbe in einem Tunnel [44]

Der Roboter ist ca. 300 cm lang, 80 cm breit und 120 cm hoch und wiegt ca. 1000 kg. Die einzige Verbindung nach außen ist der Anschluss für die Stromversorgung. Die Positionierung im Arbeitsraum erfolgt wie schon bei BRONCO (vgl. Kapitel 2.2.2) mit dem

Positioniersystem CAPSY. Die Bohreinheit besteht aus einer Schlagbohrmaschine mit einer vertikalen Führung, einer pneumatischen Bremseinheit und einer Staubabsaugung. Für die Befestigung von Eisenbahnschienen werden Bohrungen mit einem Durchmesser von 37 mm und einer Tiefe von 130 mm gebohrt. An der Vorderseite des Roboters ist ein Sensor zur Erkennung von Armierungen im Beton angebracht [53].

Montagehilfen im Trockenbau

Besonders in Japan wurden einige Hilfsgeräte zur Montage von abgehängten Decken oder von Gipskarton-Zwischenwänden vorgestellt. Bild 18 zeigt zwei davon. Das Gerät auf der linken Seite besteht aus einer Liefereinheit, auf der mehrere Gipskartonplatten gelagert sind, und einer Montageeinheit. Beide Einheiten werden im Handbetrieb an die jeweilige Arbeitsposition gebracht, die Montageeinheit unterstützt dann mechanisch die Bewegungen des Monteurs beim Verlegen der Deckenplatten.

Das Gerät auf der rechten Bildhälfte stellt eine Handhabungshilfe für die Montage von Trennwänden mit Gipskartonplatten dar. Mit einem Sauggreifers können die Platten aufgenommen und in die richtige Position gebracht werden. Der Greifarm folgt den Bewegungen des Monteurs und verfügt gleichzeitig über einen eigenen Antrieb für einige der Achsen, um das Plattengewicht abstützen zu können.

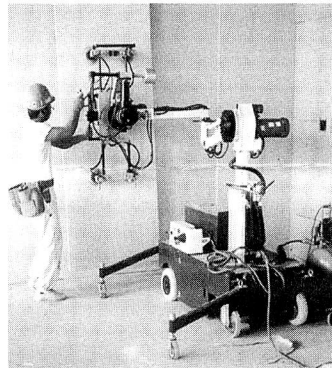
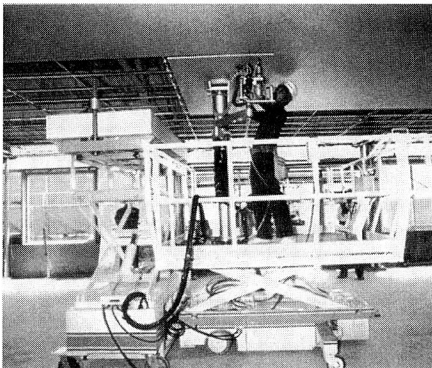


Bild 18: Montagehilfe zur Verlegung von abgehängten Decken oder Wandelementen aus Gipskartonplatten (Quelle: Fa. Kumagaigumi bzw. Fa. Tokyu Construction)

Diese Beispiele verdeutlichen auch die Tatsache, dass in japanischen Veröffentlichungen zahlreiche Geräte werbewirksam als „Roboter“ bezeichnet werden, die der europäischen Vorstellung von Roboter jedoch nicht gerecht werden. So sind die in Bild 18 vorgestellten Systeme weder in verschiedenen Achsen frei programmierbar noch finden sie ihre Arbeitspositionen selbständig oder platzieren die Platten selbständig an die korrekte Position. Ähnliche Systemlösungen gibt es mittlerweile von mehreren japanischen Konzernen, auf deutschen Baustellen hingegen sind diese Montagehilfen noch nicht im Einsatz.

Roboter für Estricharbeiten

Das Glätten von großen Estrichflächen stellt eine mühevolle und zeitaufwändige Tätigkeit dar. Japanische Bauunternehmen entwickelten auch für diese Arbeiten verschiedene Prototypen, die im Baustelleneinsatz getestet wurden.

In Bild 19 ist ein solches Gerät dargestellt. Es ist ca. 1990 x 800 x 910 mm groß, wiegt 100 kg und kann sowohl automatisch als auch ferngesteuert betrieben werden. Zum leichteren Transport an seinen Einsatzort ist er in kleinere Subeinheiten zerlegbar.

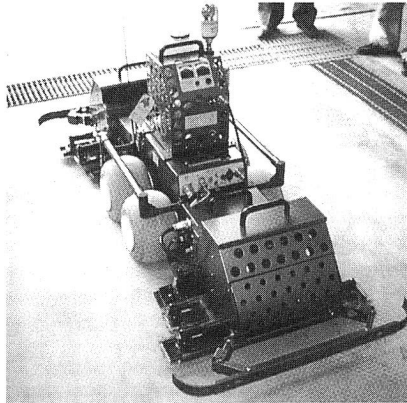


Bild 19: Roboter für das Glätten von Betonflächen (Quelle: Hamaza Corporation)

Zur Hinderniserkennung wurden Bumper am vorderen und hinteren Ende des Fahrzeugs angebracht, zusätzlich werden Öffnungen im Boden mit Hindernissensoren erkannt. Zum Glätten des Betons wird eine Ultraschall-Vibrationstechnik verwendet.

Der Roboter führt einen eigenen Generator mit 1,5 kW mit, daher kann er ohne ein Verlängerungskabel, welches den frisch vergossenen Betonestrich beschädigen würde, seine Energieversorgung autonom bewerkstelligen. Der Roboter erreicht eine Geschwindigkeit von 50 cm pro Sekunde und kann maximal eine Fläche 300 m² pro Stunde bearbeiten [88].

Darüber hinaus wurden Roboter entwickelt, die den Auftrag von Feuerschutzmaterial oder von Farbe durchführen können. Weiterführende Informationen dazu können beispielsweise in [23] oder [88] gefunden werden.

2.2.4 Roboter für die Instandhaltung und Wartung

Insbesondere bei Gebäuden mit ihrer langen Lebensdauer und ihrem hohen Repräsentationscharakter wird immer mehr Geld für Reinigung und Wartung ausgegeben. Auch unter ökologischen Gesichtspunkten ist die funktions- und werterhaltende Reinigung und Wartung sinnvoller als das Austauschen defekter Elemente oder der frühzeitige, unnötige Abriss eines Gebäudes aufgrund mangelnder Wartung. Unter diesen Gesichtspunkten wird besonderer Wert auf eine saubere Fassade gelegt. Bei größeren

Bauwerken ist die Reinigung der Fassade mit einem hohen Aufwand und einem großen Gefährdungspotential für die Arbeiter verbunden, da diese Tätigkeiten, insbesondere in Deutschland und im europäischen Ausland, meist von offenen oder geschlossenen Leiteranlagen, Wartungsbrücken, Fassadenaufzugsanlagen, hydraulischen Arbeitsbühnen oder vom Gebäudeinnern aus mit Hilfsmitteln ausgeführt werden. Daher gibt es auch auf diesem Arbeitsfeld einige Roboterentwicklungen, die diesen Prozess humaner und wirtschaftlicher machen sollen.

Roboter für Reinigungs- und Inspektionsarbeiten an Fassaden in Japan

In Japan wurden die ersten Fassaden- und Dachroboter bereits Anfang der achtziger Jahre entwickelt und zum Einsatz gebracht. Den Anfang machten schwere, schienengeführte Roboter wie der „Exterior Wall Painting Robot“ von TAISEI, der für den Farbauftrag auf die 100000 m² große Fläche des 220 m hohen Shinjuku Center Building in Tokio entwickelt wurde. Der 1,5 Tonnen schwere Roboter ist mit acht Spraydüsen ausgerüstet und erreicht bei einer Stundenleistung von 100 m² eine gleichbleibende Qualität auch bei unregelmäßigen und stark strukturierten Oberflächen[13] [18].

Leichtere Roboter wurden von verschiedenen Baumaschinenherstellern und Baufirmen in Japan für die Inspektion von gekachelten Fassaden und gemauerten Wänden oder für die Kontrolle des allgemeinen Zustands einer Außenwand entwickelt. Früher wurde diese Aufgabe manuell von Gerüsten und Aufzügen aus mithilfe eines Gummihammers durchgeführt. Dies war nicht nur gefährlich, sondern auch nicht sehr effizient. Zum einen hängt das Ergebnis stark von der Erfahrung des Prüfenden ab, der aufgrund des von der Wand wiederkehrenden Tones den Zustand der Kachel erkennen muss. Zum anderen ist auf diese Art und Weise keine exakte, reproduzierbare Messung möglich und es kann nicht festgestellt werden, ob die Kachel sich vom Mörtel gelöst hat oder zwischen dem Mörtel und der Wand dahinter Unregelmäßigkeiten aufgetreten sind. Außerdem konnten die Ergebnisse nur sehr schlecht erfasst werden, so dass man langfristig über die Entwicklung der Wand hinsichtlich Haltbarkeit und Lebensdauer keine Aussage treffen konnte.

Ein Gerät für diese Anwendung ist der „Tile Separation Detection Robot“ der Firma TAISEI, der eine gekachelte Außenwand oder ein Mauerwerk automatisch oder fernbedient systematisch abfährt und mit zehn kleinen Abklopfhämmern das wiederkehrende Echo der Wand erfasst und die genaue Lage der losgelösten Kachel zusammen mit dem Messwert auf einen am Boden stehenden Personalcomputer übermittelt. Die Ergebnisse werden gespeichert und für die Reparatur wird ein Ausdruck der Wand ausgeplottet, auf dem die zu ersetzenden Elemente genau gekennzeichnet sind. Dieses 70 kg schwere Gerät ist an zwei am Dach und am Boden gespannten Ketten befestigt und auch für die Kontrolle von Mörtelschichten auf Außenwänden geeignet.

Die KAJIMA Corporation hat mit dem „Tile Separation Detection Robot“ für die Erkennung losgelöster Kacheln den am weitesten entwickelten Roboter gebaut. Die vom japanischen Bauministerium seit 1984 geförderte Entwicklung kann sowohl automatisch als auch fernbedient gesteuert werden und gibt neben dem Ort auch die Art der defek-

ten Verbindung an. Das Gerät misst den durch einen kleinen schwingenden Schlaghammer ausgelösten rückkehrenden Schalldruck mittels eines Mikrofons und kann genaue Angaben über den Zustand der Kachel treffen. Parallel wird die Rückstoßkraft der Kachel auf den Schwinghammer gemessen. Diese Kraft ist davon abhängig, ob die Kachel vom Mörtel losgelöst ist oder ob sich die Kachel mitsamt dem Mörtel von der Außenwand abtrennt. Die Unterschiede in den Rückstoßkräften sind so groß, dass man eine fast 100%ige Genauigkeit der Aussage über die Art der Ablösung erhält. Wichtig ist dies vor allem für die Reparatur. Einzelne, nur vom Mörtel losgelöste Kacheln, kann man separat austauschen. Besteht aber zwischen Mörtel und Außenwand eine fehlende Verbindung, ist dies meist nicht nur auf eine Kachel beschränkt, sondern betrifft ganze Bereiche der Außenwand, die dann komplett neu gekachelt werden müssen [23].



Bild 20: Inspektion von gekachelten Wänden mit dem Tile Separation Detection Robot von TAISEI sowie dem Tile Separation Detecting Robot der Firma Kajima

Neben den bisher erwähnten Automatisierungsprojekten wurde von mehreren Firmen der Versuch unternommen, Roboter und Telemanipulatoren für die Reinigung von Glas- und Metallfassaden zu entwickeln. Dies hat sich als deutlich schwieriger als die zuvor erwähnten Aufgaben erwiesen. Glas- und Metallfassaden sind meist nicht sehr homogen, so dass sich ein Roboter bzw. ein fernbedientes Reinigungsgerät ständig über Vorsprünge, Pressleisten oder Fugen hinwegsetzen müssen, was eine komplizierte Kinematik und einen umfangreichen Steuerungs- und Programmieraufwand erfordert. Zudem ist die Aufgabe an sich schon schwieriger als bloße Inspektion oder Farbauftrag. Der Roboter muss entweder gleichmäßig auf so hohem Niveau reinigen, dass er auch die schwierigsten Verschmutzungen bewältigen kann, was zur Folge hat, dass wenig verschmutzte Flächen mit zu hohem Aufwand bearbeitet werden. Die andere Möglichkeit ist eine ständige Kontrolle des Arbeitsergebnisses mittels optischer Sensoren und, falls erforderlich, eine entsprechende Nachbearbeitung. Die erste Alternative erfordert höheren Zeit- und Reinigungsaufwand, die zweite teure technische Lösungen. Zwei Geräte, die von den Firmen SHIMIZU und TOSHIBA entwickelt wurden, befinden sich augenblicklich im zufriedenstellenden Einsatz.

Fassadenreinigungsroboter der Neuen Messe Leipzig

Dieses System stellt den weltweit ersten vollautomatischen Glasfassaden-Reinigungsroboter für gewölbte Hallen dar und wurde vom Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung (IFF) entwickelt. Die gewölbte Glashalle der neuen Leipziger Messe ist 243 m lang, 80 m breit und 28 m hoch und umfasst eine Glasfläche von 20000 m², die regelmäßig gereinigt werden muss, um die Transparenz und die Lichtdurchlässigkeit zu erhalten. Die Halle hat eine außenliegende Stahlkonstruktion, die sich im Abstand von 0,38 m über den Glasscheiben befindet. Die Breite des Roboters wird durch den Abstand zwischen den Glashalterungen auf 1,5 m beschränkt. Das maximale Gewicht des Roboters durfte wegen der beschränkten Traglast des Glases nicht mehr als 250 kg betragen. Auf dem Scheitelpunkt des Daches ist ein Wagen zur Positionierung der Reinigungsroboter installiert, der die ganze Länge des Daches befahren kann. An beiden Seiten des Wagens sind Aufzüge, um die beiden Roboter auf das Glas herabzulassen und nach durchgeführter Reinigung wieder anzuheben [108].

Die Reinigung selbst erfolgt während der Abwärtsbewegung der Roboter. Sie werden mit zwei Kevlarseilen navigiert, über die sie mit dem Wagen verbunden sind. So können kleinste Abweichungen in der Bewegung ausgeglichen werden. Die Roboter bewegen sich auf speziell beschichteten Rädern mit geringer Reibung über die Glasfläche, um selbst kleinste Kratzer auf den Scheiben zu vermeiden. Im oberen, flachen Bereich des Daches wird der Roboter durch ein fünftes Rad angetrieben, im unteren Teil der Halle reicht dafür die Schwerkraft der Roboter aus. So ist gewährleistet, dass beide Roboter über 45 m Fahrweg auch bei einer maximalen Neigung von 70° exakt die Halle herunterfahren können. Die Reinigungsleistung liegt bei ca. 60 m² Glasfläche pro Stunde pro Roboter [88].

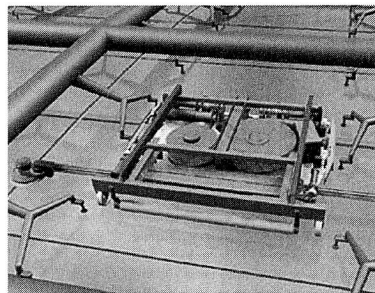


Bild 21: Außen- und Innenansicht des automatischen Fassadenreinigungsroboters

Die Glasscheiben werden mit Walzenbürsten und ausfahrbaren sowie schwenkbaren Tellerbürsten gereinigt. Es können so alle Scheibenhalterungen und die von ihnen verdeckten Bereiche erreicht werden. Geputzt wird ausschließlich mit warmem Wasser ohne Reinigungsmittel und einem optimierten Bürstensystem.

Die Zuleitungen für Strom, Wasser und Datenaustausch werden vom Halleninneren zum Wagen auf dem Dachfirst geführt. Von dort werden die beiden Putzmaschinen

über Schläuche und Kabel mit den notwendigen Medien versorgt. Alle Seil-, Kabel- und Schlauchtrommeln befinden sich auf den Robotern. Auf diese Weise werden diese nicht über das Glas gezogen, sondern auf den Glasscheiben und den Silikondichtungen ohne die Gefahr einer Beschädigung abgelegt. Ohne bauliche Veränderungen konnte so eine umweltfreundliche, vollautomatische Reinigung realisiert werden [59].

Putzfräse

Ein neues Verfahren ermöglicht bei Fassadensanierungen eine qualitativ hochwertige Untergrundvorbereitung bei minimaler Umweltbelastung und zu reduzierten Kosten, weil kein Gerüst vorgehalten werden muss. Bei dem System handelt es sich um eine Putzfräse, die nach dreijähriger Entwicklungsarbeit von der 1992 gegründeten Berliner Firma Groh, Prischmann & Schulz erstmals auf der BAUMA '95 in München zur effizienten großflächigen Beseitigung von Altputz an Fassaden präsentiert wurde [111].

Das Maschinensystem besteht aus drei Komponenten, dem Werkzeugkopf, einer Hubarbeitsbühne und der Absauganlage. Der Werkzeugkopf dient als Aufnahme- und Antriebsgehäuse für schnell rotierende Werkzeuge wie Fräsen, Bürsten oder Walzen. Damit können Beläge großflächig entfernt werden, beispielsweise Altputz mit der hartmetallmesser-bestückten Fräse [88].

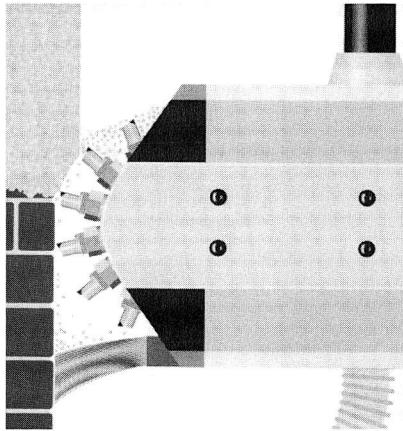


Bild 22: Prinzipbild des Werkzeugkopfes des Biber-Systems (Quelle: Fa. GPS GmbH)

Das Basisgerät für den optimalen Einsatz des Gesamtsystems ist die Hubarbeitsbühne, die je nach Hersteller unterschiedliche Arbeitshöhen erreichen kann. Diese erstrecken sich unter Berücksichtigung der erforderlichen Tragkraft von 280 Kilogramm (Gewicht des Fräskopfes) von 18 Meter bis zu 40 Meter. Es gibt darüber hinaus noch eine interessante Variante mit einem Kettenfahrzeug als Träger des Fräskopfes. Es ist sehr schmal und wendig, hat aber trotzdem eine Arbeitshöhe bis 26 Meter und kommt durch kleinste Toreinfahrten auf Hinterhöfe, was besonders in Großstädten wie Berlin wichtig ist. Mit

relativ einfachen Mitteln kann man die Fräse auch an Bagger, Teleskopstapler oder andere Arbeitsgeräte hängen.

Direkt hinter dem Werkzeug im Antriebsgehäuse befindet sich die Einsaugöffnung für die Staubabsaugung. Die Sauganlage schluckt die von der Fassade gelösten, staubfeinen Partikel des Altputzes und führt den Abfall durch einen Schlauch in die Sammelbehälter. Die Filter für die Saugersilos haben eine Nutzungsdauer von etwa 1000 Stunden, bevor sie gewechselt werden müssen. Auf diese Art und Weise werden die beim traditionellen Putzabschlagen entstehenden großen Brocken und das damit verbundene große Volumen des Materialabfalls vermieden. Der feine Frässtaub reduziert das Materialvolumen auf ein Drittel bis ein Viertel; die Abfuhr und Schuttkosten werden für den Bauherrn wesentlich geringer. Außerdem entsteht eine deutlich geringere Staubemission und somit eine bemerkenswerte Entlastung sowohl der Bewohner der Sanierungsobjekte als auch der Bauarbeiter.

Von einem Computer unterstützt, steuert ein Mitarbeiter den Werkzeugkopf an der Hauswand entlang. Bei geringer Lärmbelästigung entfernen die Schneidmesser aus Hartmetall den Putz und hinterlassen eine saubere, altputzfreie Frässpur. Mit der Fräse können 25 bis 35 m² Altputz pro Stunde mit nur einer Arbeitskraft von der Fassade entfernt werden [52].

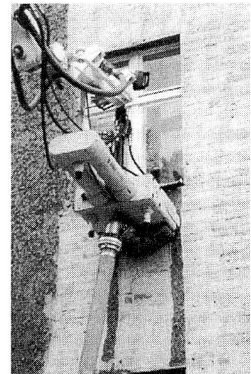
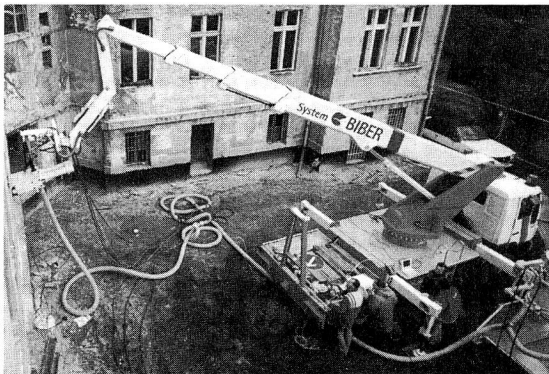


Bild 23: Einsatz der Biber-Putzfräse bei der Gebäudesanierung

2.3 Grundsätzliche Verfahren für die Baustellenautomatisierung

Die in diesem Kapitel vorgestellten Automatisierungslösungen lassen sich systematisch in zwei grundsätzliche Verfahren der Bauautomatisierung mit jeweils unterschiedlichen Voraussetzungen und Abläufen zu Errichtung eines Bauwerks aufteilen.

2.3.1 Komplette Bauwerkserstellung von oben bzw. außen

Das Verfahren mit dem höchsten erreichbaren Automatisierungsgrad stellt der vollständige Aufbau eines Bauwerks von außen dar, d. h. sowohl die Errichtung des Rohbaus

als auch das Einbringen sämtlicher Ausbauteile wird von außen bzw. von oben durchgeführt. Das zentrale Automatisierungsgerät bei diesem Szenario ist eine große, das gesamte Bauwerk überdeckende Portalanlage, ähnlich den japanischen Hochhausbaumaschinen (vgl. Kapitel 2.2.1). Mit diesem Portal ist es möglich, vorgefertigte Rohbauelemente aufzustellen und gleichzeitig vorgefertigte, raumhohe Ausbaumodule an die gewünschte Position auf einer Etage zu bringen. Die Vorfertigung der Rohbauelemente und Ausbaumodule kann in automatisierten Vorfertigungsbetrieben erfolgen.

Die Portalanlage bietet die Möglichkeit einer sehr hohen Positioniergenauigkeit. Erst nach der vollständigen Montage einer kompletten Etage wird mit dem darüber liegenden Stockwerk begonnen. Problematisch dabei ist, dass die Ausbauelemente möglicherweise nicht witterungsbeständig sind, besonders wenn diese aus Gipskartonplatten bestehen. Daher ist auf jeden Fall ein wirksamer Witterungsschutz des gesamten Bauwerks vorzusehen.

Vorteilhaft ist, dass der hohe Vorfertigungsgrad eine stabile hohe Fertigungsqualität und geringe Bauzeiten ermöglicht, außerdem könnten die unteren Stockwerke des Gebäudes bereits genutzt werden, während in den oberen Etagen noch gebaut wird. Nacharbeiten wegen Qualitätsmängel sollten mit diesem Verfahren auf ein Minimum reduziert werden können. Neben Rationalisierungseffekten durch die verkürzte Bauzeit und die Nutzung verschiedener Gebäudeteile noch während der Bauphase sind besonders Humanisierungseffekte zu verzeichnen, da ein Großteil der schweren Arbeiten entweder in den automatisierten Vorfertigungsanlagen oder durch das Portal auf der Baustelle übernommen wird.

Nachteilig an diesem Verfahren sind die hohen Investitionskosten für die Portalanlage, daher werden nur große Bauunternehmen in der Lage sein, derartige Systeme zu installieren. Logistische Probleme sind beim Transport der vorgefertigten Bauteile zur Baustelle zu erwarten, da die Größe der Bauelemente eine sorgfältige Vorausplanung der Transportwege erfordert. Ein weiterer Nachteil ist die vollständige Veränderung des bisherigen Bauablaufs, d. h. die Hemmschwelle zur Inbetriebnahme wird sehr hoch sein, da erst im Praxiseinsatz konkrete Erfahrungen gesammelt werden können. Die geringen Einsatzzahlen der japanischen Hochhausbaumaschinen bestätigen diese Vermutung.

2.3.2 Konventionelle Rohbauerstellung und automatisierter Innenausbau

Das zweite Szenario beruht auf der konventionellen Errichtung eines Gebäudes, d. h. zuerst wird der Rohbau entweder konventionell oder unter Einsatz von vorgefertigten Elementen errichtet. Sobald das Bauwerk witterungsdicht ist, wird mit dem Ausbau begonnen. Für die unterschiedlichen Bautätigkeiten können spezialisierte, mobile Automatisierungsgeräte verwendet werden. Diese Bautechnik impliziert, dass die Größe der vorgefertigten Bauteile geringer sein muss als bei der ersten Methode, da das Gewicht der zu montierenden Ausbaukomponenten durch die Tragkraft der Böden und der Traglast der Automatisierungsgeräte beschränkt wird. Für den Transport der Ausbaue-

räte und –bauteile muss ein Aufzug vorhanden sein. Die Automaten selbst können nur eine beschränkte Baugröße aufweisen.

Dieses Verfahren hätte den Vorteil, dass sich die Investitionskosten, die geringer wären als in der ersten Methode, zusätzlich auf mehrere Firmen (Zulieferer, verschiedene Ausbauunternehmer, ...) aufteilen ließen. Außerdem wären vom grundsätzlichen Bauablauf her weniger Änderungen vorzunehmen, so dass dieses Verfahren eher akzeptiert werden könnte. Erforderliche Änderungen in einem Prozess des Innenausbaus würden nicht zwangsläufig die anderen Prozesse oder Gewerke beeinflussen.

Allerdings sind logistische Änderungen und Planungsvorläufe im Ausbaubereich zwingend erforderlich, da die Automatisierungsgeräte freie Arbeitsflächen und einen konstanten Nachschub an Baumaterial benötigen, um teure Stillstandszeiten zu vermeiden. Außerdem sind bei den bisherigen Ausbaurverfahren meistens sehr komplexe Handgriffe durchzuführen, die es zu vereinfachen gilt. Diese Bauweise erfordert häufig einen Ausgleich der im Rohbau entstandenen Abweichungen (großen Toleranzen nach DIN 18202) unmittelbar auf der Baustelle, wodurch eine Programmierung der Automaten ziemlich erschwert wird.

Dennoch erscheint das zweite Verfahren als das mit den mittelfristig größeren Realisierungschancen, da die Investitionskosten niedriger als im ersten Szenario sind und die Automaten nach und nach für verschiedene Bauprozesse entwickelt und erprobt werden können, ohne dass auf andere Gewerke zu stark Einfluss genommen wird. In den weiteren Kapiteln wird daher nur noch auf den automatisierten Innenausbau eingegangen.

3 Rationalisierungs- und Humanisierungspotentiale von ausgewählten Montageaufgaben im Innenausbau

In den letzten fünfzig Jahren begann die Bauwirtschaft einen Übergang von lohn- zu maschinenintensiven Bauverfahren [50]. Dennoch erfordert die Errichtung eines Gebäudes immer noch überwiegend manuelle Handgriffe. Das Spektrum dieser Tätigkeiten reicht von einfachen Transportaufgaben ohne Hilfsmittel über das Handling der teilweise sehr schweren Geräte bis hin zur Bedienung komplexer Baumaschinen. Eine weitergehende Mechanisierung und Automatisierung der Bautätigkeiten bietet daher viele Rationalisierungs- und Humanisierungspotentiale.

Aus Sicht der Bauindustrie herrscht jedoch große Unklarheit darüber, wie eine Automatisierung der Bauprozesse aussehen kann und welche Auswirkungen diese auf die einzelnen Unternehmen haben könnte. Die Beseitigung dieser Unklarheiten soll helfen, die strategische Ausrichtung und Positionierung der Unternehmen für die kommenden Herausforderungen der Baubranche abzusichern und eventuell die frühzeitige Entwicklung neuer Produktlinien zu ermöglichen.

In diesem Kapitel wird auf der Basis von Umfrageergebnissen zuerst erörtert, welche Chancen und Hemmnisse die Bauindustrie selbst in einer Automatisierung des Bauwesens sieht. Anschließend werden die Humanisierungspotentiale von einigen ausgewählten Montagearbeiten im Innenausbau näher untersucht. Abschließend werden die Prozessketten verschiedener Tätigkeiten des trockenen Innenausbaus analysiert und ihre Rationalisierungspotentiale bewertet.

3.1 Chancen und Hemmnisse der Automatisierung im Bauwesen

Ziel einer breit angelegten Meinungsumfrage war es, fundierte Aussagen über die Potentiale der Automatisierung und Rationalisierung im Bauwesen zu erhalten und zu ermitteln, welche Hindernisse einem verstärkten Einsatz dieser neuen Technologien bislang entgegenstehen bzw. welche Trends der Bauautomatisierung erkennbar sind. Dazu wurden insgesamt 5300 Führungskräfte deutscher Bauunternehmen und Hochschulen in den Bereichen der Baubranche befragt, über 500 Personen haben die Fragebögen beantwortet.

3.1.1 Hindernisse einer Bauautomatisierung und deren Überwindung

Die wichtigsten Gründe, die gegen eine verstärkte Automatisierung am Bau sprechen, sind in der Individualität der Baustelle und in den Baustellenverhältnissen allgemein zu sehen.

Die Vorstellung, dass der Baubetrieb, bedingt durch die Individualität und den Unikatcharakter des Bauwerks fast keinerlei Ähnlichkeit mit der klassischen Serienfertigung aufweist, wird als das größte Hemmnis betrachtet. Dahinter verbirgt sich die Vorstellung, dass Automatisierungsgeräte oder Roboter am rationellsten arbeiten, wenn sie zyklisch immer wieder ein und denselben Arbeitsvorgang, wie zum Beispiel im Automo-

bilbau das Punktschweißen, ausführen können und möglichst wenig an veränderte Umgebungsbedingungen angepasst werden müssen.

Die ungünstigen Baustellenverhältnisse sind ein weiterer Hinderungsgrund. Alle Baustellen stellen hochdynamische Umgebungen dar, die sich laufend verändern und die zusätzlich stark schwankenden Witterungsbedingungen unterworfen sind. Automatisierungslösungen, die mit empfindlichen Sensoren o. Ä. ausgerüstet sind, könnten dabei leicht beschädigt werden. In diesem Zusammenhang werden Befürchtungen geäußert, dass die wertvollen Automatisierungsgeräte gestohlen werden könnten.

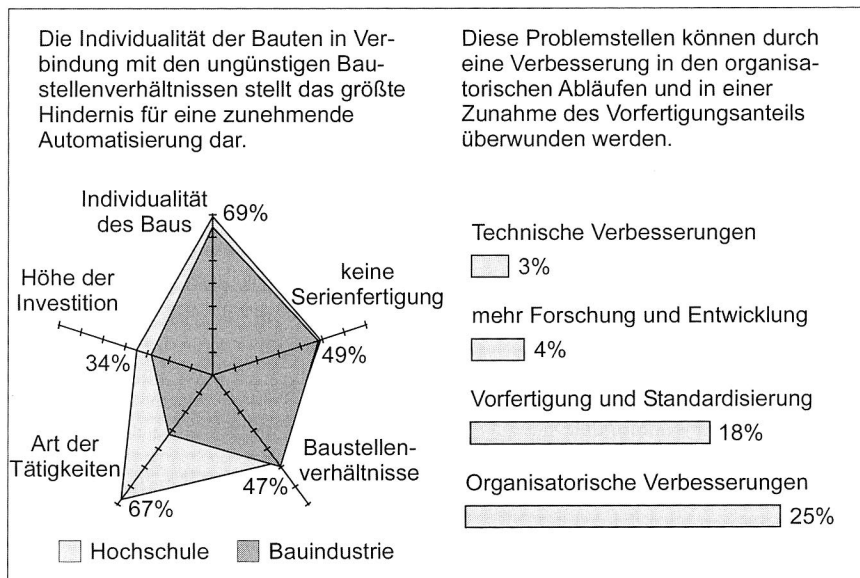


Bild 24: Hindernisse einer zunehmenden Automatisierung am Bau und Lösungsansätze zur Erhöhung des Automatisierungsgrades (Mehrfachnennungen waren möglich, die Antworten wurden auf die Anzahl der Teilnehmer normiert)

Die mögliche Höhe der zu tätigenen Investition ist ein weiteres Argument gegen eine zunehmende Automatisierung am Bau, besonders solange nach wie vor Arbeitskräfte aus Niedriglohnländern beschäftigt werden können. Ein weiteres Hindernis könnte der notwendigerweise höhere Planungsaufwand werden, der erforderlich wird, um den Einsatz der Automatisierungsgeräte mit den manuellen Tätigkeiten zu koordinieren.

Als weniger kritisch werden die Systemsicherheit und die geringen Änderungsmöglichkeiten auf der Baustelle angesehen. Die parallelen Gewerke spielen nach Meinung der Befragten keine allzu große Rolle. Ansonsten werden Termindruck, mangelnde Innovationsbereitschaft und allgemeine Berührungsängste genannt, auch die fehlende Bereitschaft der Architekten, die Planung auf die Automatisierungslösungen abzustimmen, wird aufgeführt.

Die Befragten wurden darüber hinaus um Vorschläge zur Überwindung der oben genannten Hindernisse gebeten. Die Mehrheit sieht die besten Möglichkeiten in einer Verbesserung im organisatorischen Bereich bzw. in einer erhöhten Vorfertigung in Verbindung mit mehr Standardisierung.

Die organisatorischen Verbesserungen enthalten alle Nennungen, die eine Weiterbildung von Bauarbeitern, Ingenieuren oder Architekten betreffen. Allerdings sind viele auch der Meinung, es bestehen kaum oder gar keine Möglichkeiten über diese Hindernisse hinwegzukommen, da die individuellen Lösungen am Bau überwiegen und keine Serienfertigung möglich sei. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass eine Zunahme der Automatisierung nicht möglich erscheint, so lange Arbeitskräfte aus Niedriglohnländern eingesetzt werden können.

Weiterhin wird die Meinung geäußert, es müsse zuerst ein Umdenken innerhalb der Bauwirtschaft und eine Zunahme der Konkurrenz von außen einsetzen, ehe weiter automatisiert werden kann. Zusätzlich sollten die Anstöße, die von der Zulieferindustrie bzw. dem Ausland kommen, beachtet und an die eigenen Anforderungen angepasst werden. Dem stehe aber bis jetzt die tradierte Struktur des Bauwesens und des Bauemarktes entgegen. Einige Antworten zielen darauf ab, dass durch Automatisierung höher qualifizierte Arbeitsplätze in der Bauindustrie entstehen und viele der ungelernten oder angelernten Baustellenkräfte ersetzen könnten, was sich eventuell sogar negativ auf das soziale System in Deutschland auswirken könnte, da die Bauwirtschaft eben auch viele Beschäftigungsmöglichkeiten für unqualifizierte Arbeitskräfte bietet.

3.1.2 Nutzenpotentiale der Bauautomatisierung

Zwangsläufig sind mit der in Kapitel 1 erläuterten Strukturkrise für die – zumeist mittelständisch strukturierten – Unternehmen erhebliche organisatorische bzw. technische Probleme verbunden, die zu einer Verminderung der gefertigten Qualität und zu Verzögerungen in der Baufertigstellung führen können. Damit verbunden ist oftmals eine Überschreitung der geplanten Baukosten. So werden die Bauunternehmer aufgrund des hohen Anteils manueller Tätigkeiten sowie des verschärften Preiskampfes zunehmend gezwungen, ungelernte oder ausländische Arbeitskräfte einzusetzen. Durch die Entwicklung angepasster Automatisierungskonzepte sollen Lösungswege für diese Probleme gefunden werden.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Unternehmer in der jetzigen Situation bereit sind, in Rationalisierungsmaßnahmen zu investieren. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass sich damit eine Steigerung der Produktion bei einer gleichzeitigen Senkung der Produktionskosten realisieren lässt.

Durch eine gezielte Automatisierung kann eine Erhöhung der gefertigten Qualität erreicht werden. Die ermüdenden und daher fehlerträchtigen Arbeiten werden von den Monteuren hin zur Maschine verlagert und können durch die vorhandene Sensorik der Maschinen besser überwacht und dokumentiert werden. Als Beispiele dazu lassen sich die in Kapitel 2.2.2 aufgeführten Mauerroboter oder die Automaten zum Setzen von Bohrungen nennen.

Die Handwerker werden eine deutliche Humanisierung ihrer Tätigkeiten erfahren. Gerade die Bauarbeit ist mit einer hohen körperlichen Belastung und einem Einsatz unter ungünstigen Witterungsbedingungen verbunden. Neue Automatisierungslösungen können helfen, die körperliche Belastung der Monteure zu reduzieren und ihnen einen Schutz vor Wind und Wetter gewähren.

Das Anforderungsprofil der Arbeiter wird hin zu einer höheren Qualifikation gehen, da die komplexen und technisch anspruchsvollen Maschinen qualifizierte Bediener und geschultes Servicepersonal erfordern. Dies wird den Bauberufen wieder zu einem gesteigerten Ansehen verhelfen. Ein für die nächsten Jahre prognostizierter höherer Baubedarf im kostengünstigen Wohnungsbau kann durch die heute vorhandenen Bauproduktionen ohne Rationalisierungsmaßnahmen weder quantitativ noch qualitativ befriedigend gedeckt werden, da im Gegensatz hierzu ein Mangel an Facharbeitern herrscht, so sind ca. 50 % aller Poliere über 50 Jahre alt. Diese starke Abwanderungstendenz wird verursacht durch die äußerst schlechten Arbeitsbedingungen auf der Baustelle, die einem Vergleich mit industriellen Arbeitsplätzen nicht standhalten können. Eine Möglichkeit dieser Problematik zu begegnen, ist die flexible Automatisierung der Baustellenmontage, mit der eine Rationalisierung und zugleich eine Humanisierung der Arbeitsplätze erreicht werden kann [3].

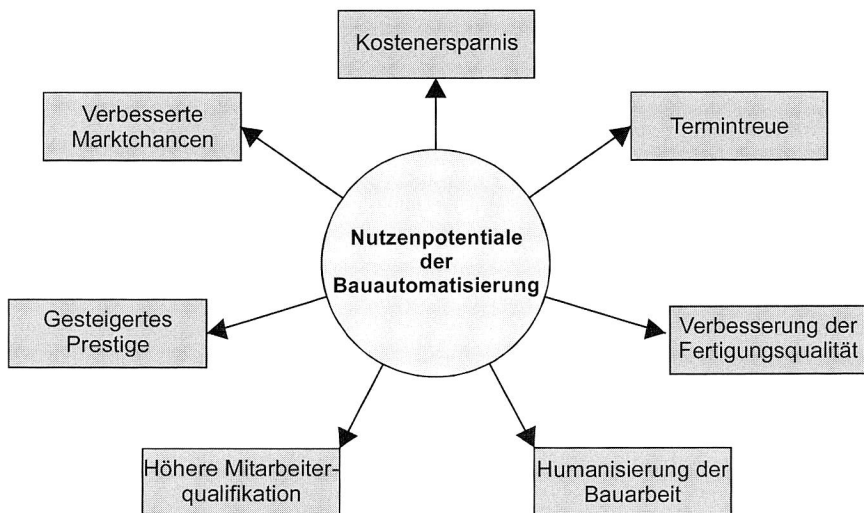


Bild 25: Mögliche Nutzenpotentiale einer Automatisierung im Bauwesen

Sogar die IG Bau Steine Erden steht der Einführung der Roboter zunehmend positiv gegenüber. In einem Positionspapier [120] hoffen die Gewerkschafter auf eine Steigerung der Attraktivität der Arbeit durch die Roboter, da die Tätigkeiten, die bisher durch Subunternehmer aus Niedriglohnländern ausgeführt werden, durch die Roboter und die verbleibenden Arbeiten von höherqualifizierten deutschen Arbeitern übernommen wer-

den sollen. Außerdem können dadurch in der Roboterindustrie neue Arbeitsplätze entstehen.

Bei der Einführung neuer Automatisierungslösungen müssen Eingriffe in die bisherigen Abläufe bei der Bauerstellung unternommen und bestehende Bauverfahren neu gestaltet werden. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Bauunternehmer dazu vor allem ihre Mitarbeiter schulen lassen bzw. höher qualifiziertes Personal einsetzen würden. Außerdem wären sie bereit, mehr Vorausplanung zu betreiben. Die Neigung, Änderungen im Montageablauf zu akzeptieren, ist bei den Vertretern der Bauindustrie eher gering.

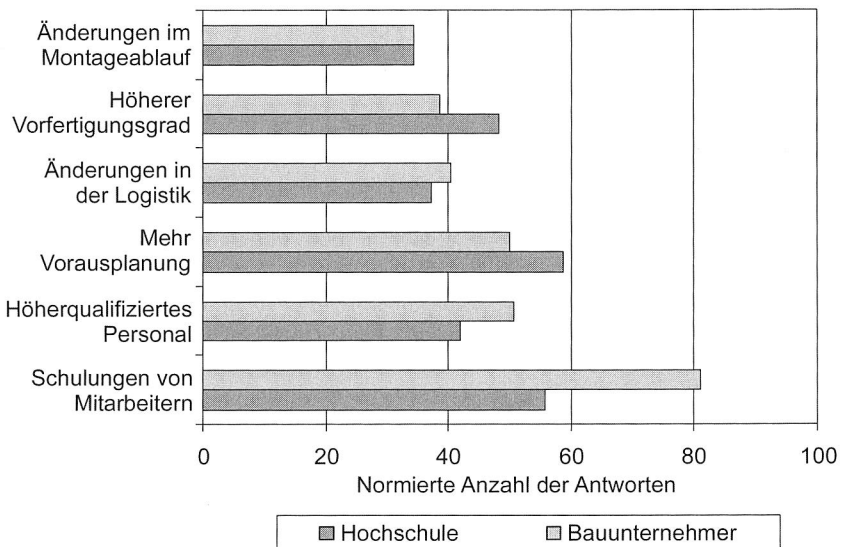


Bild 26: Akzeptable Änderungen im Bauumfeld bei der Einführung neuer Automatisierungslösungen (Mehrfachnennungen möglich, die Antworten wurden auf die Anzahl der Teilnehmer normiert)

Die Angehörigen der Hochschule dagegen favorisieren knapp eine Steigerung des Planungsaufwands neben der Schulung von Mitarbeitern und einer Zunahme des Vorfertigungsgrads. Es wird zwar erwartet, dass der Einsatz von Automaten und Robotern auf der Baustelle höherqualifiziertes Personal erfordern könnte, jedoch werden auch Befürchtungen geäußert, dass diese Fachkräfte dann nicht mehr finanzierbar sein könnten.

Es lässt sich also festhalten, dass trotz zahlreicher aktuell bestehender Hindernisse durchaus Nutzenpotentiale für eine Automatisierung im Bauwesen gesehen werden, jedoch können sich die Bauunternehmer im Moment noch nicht vorstellen, den Einsatz von Automatisierungssystemen durch aktive Veränderungen des Bauprozesses nachhaltig zu ermöglichen.

3.2 Humanisierungspotentiale von Montagearbeiten im Innenausbau

In den meisten Sparten der industriellen Produktion wird schon seit langer Zeit versucht, die Arbeitsplätze sowohl in produktionstechnischer als auch in ergonomischer Hinsicht zu optimieren. Ein besonders markantes Beispiel ist die Durchführung von Montagearbeiten am Unterboden einer PKW-Karosserie, welche lange Zeit über Kopf durchgeführt werden mussten. Im Zuge der Arbeitshumanisierung sind die heutigen modernen Fließbänder so beschaffen, dass die PKW-Karosserie gedreht werden kann und die Arbeitskräfte in aufrechter Körperhaltung ihre Tätigkeit verrichten können. Durch dieses so genannte „Schwenkgehänge“ wird die anstrengende und körperlich belastende Überkopfarbeit vermieden. Die Entlastung der Werker bringt außerdem eine Stabilisierung in der Fertigungsqualität mit sich, da die Arbeiter weniger schnell ermüden und so längere Zeit ihre Leistungsfähigkeit aufrecht erhalten können.

Die Arbeit auf Baustellen dagegen gilt als gefährlich und gesundheitsschädlich, zwangsläufig damit verbunden sind hohe Kosten für die Betriebe durch die Ausfallzeiten der Arbeiter und eine schlechte Arbeitsausführung [32]. Dies zeigt sich auch darin, dass die Bauwirtschaft, eine der wichtigsten Branchen der deutschen Wirtschaft, die schlechteste Unfallbilanz aufweist. Während von 1000 Arbeitnehmern in der gewerblichen Wirtschaft pro Jahr durchschnittlich 50 einen Arbeitsunfall haben [100], ist im Baugewerbe diese Rate fast doppelt so hoch. Erschwerend kommt hinzu, dass Unfälle auf Baustellen im Vergleich zu den Unfällen in anderen Wirtschaftszweigen meist deutlich schwerere Folgen haben [68].

Als Hauptursachen für die hohe Anzahl an Arbeitsunfällen auf Baustellen führt die Bau-Berufsgenossenschaft für Bayern und Sachsen folgende Gründe an [76]:

- Mängel bei der Konzeption der Baustelle (Planung, Ausschreibung, Koordination)
- Mängel bei der Organisation (Arbeitsvorbereitung, Aufsicht, Arbeitsanweisung)
- Mangelhafte Fähigkeiten und Motivation der Arbeiter und Führungskräfte

Um Leben und Gesundheit der Beschäftigten auf Baustellen zu schützen, wurde am 01. Juli 1998 in Deutschland die Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Baustellen (kurz Baustellenverordnung) in Kraft gesetzt. Mit ihr wurde die EG-Richtlinie Nr. 57 vom 24. Juni 1992 über die "auf zeitlich begrenzte oder ortsveränderliche Baustellen anzuwendenden Mindestvorschriften für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz" in deutsches Recht umgesetzt [68]. Der Gesetzgeber versucht auf diesem Weg, einen Mindestsicherheitsstandard auf Baustellen einzuführen.

Neben der unmittelbaren Gefährdung der Bauarbeiter durch die hohe Unfallwahrscheinlichkeit besteht eine mittelbare durch die körperlichen und psychischen Arbeitsbelastungen, denen die Monteure auf der Baustelle ausgesetzt sind [31]. Die wichtigsten Belastungsarten, die bei der Arbeit im Innenausbau auftreten, sind der hohe und zunehmende Anteil an Hautkrankheiten, was z. B. aus dem gesteigerten Kontakt der Trockenbauer mit gesundheitsgefährdenden Stoffen bzw. einer hohen Staubbelastung (z.B. bei der Bearbeitung von Gipskartonplatten) resultiert. So werden künstliche Mine-

ralfasern, denen bei unsachgemäßer Handhabung ein mögliches Krebspotential bzw. das Auslösen von Allergien und Hauterkrankungen zugeschrieben wird [74], als Dämmstoffe in Trennwänden und Deckenkonstruktionen eingesetzt. Isocyanate, die in Montageschäumen vorkommen, können zu Hautreizungen und Allergien führen [74].

Danach treten Schädigungen an Muskeln und Gelenken am zweithäufigsten auf. Dafür verantwortlich sind die extreme Beugehaltung mit einem Rumpfbeugewinkel von mehr als 90° und die Beugehaltung (zum Beispiel Knien oder Hocken) mit jeweils einem Arbeitsschichtanteil von 5 % [69]. Außerdem kommen Belastungen des Herz-Kreislauf-Systems (kardiovaskuläre Belastungen), der Lendenwirbelsäule und der Knie durch Heben und Tragen schwerer Lasten vor. Für Tätigkeiten mit manueller Lastenhandhabung müssen nach § 2 der Lastenhandhabungsverordnung geeignete Maßnahmen getroffen werden, um eine Gefährdung möglichst gering zu halten [114]. Expositionszeitannahmen bei der Berufskrankheitenermittlung der Trockenbauer gehen davon aus, dass das Heben bzw. Tragen (dynamische muskuläre Arbeit) von Lasten von mindestens 25 kg mit jeweils einem Arbeitsschichtanteil von ca. 10 % auftritt [69].

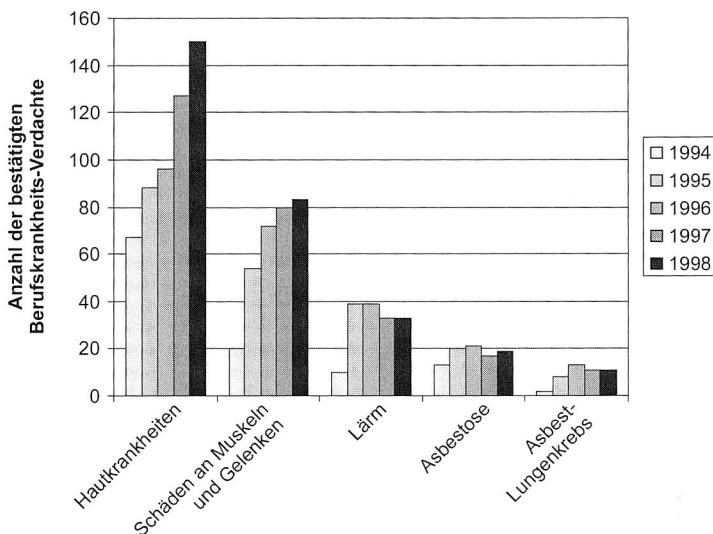


Bild 27: Anzahl der am häufigsten bestätigten Berufskrankheits-Verdachte des Arbeitsbereichs 431 (Innenwand- und Deckenverkleidung) [67]

Man spricht in diesem Zusammenhang von dynamischer Arbeit, wenn an den Muskel eine äußere Kraft angreift und die vom Muskel aufgebrauchte Kraft entweder größer (Bewegung in Richtung der resultierenden Kraft) oder kleiner (Bremskraft des Muskels) ist. Zu zunehmender Ermüdung kommt es bei dynamischer Arbeit erst, wenn dem Muskel eine zu lange oder zu hohe Kontraktionskraft abverlangt wird [105]. Die Höhe der Belastung der dynamischen Arbeit wird am Arbeitsenergieumsatz bemessen. Der energetische Dauerleistungs-Grenzwert wurde für den Mann auf Basis umfangreicher La-

bor- und Felduntersuchungen mit ca. 16,5 – 17,5 kJ/min im Mittel der 8-Stunden-Schicht bestimmt. Unterschreitet die dynamische Muskelbelastung im Schichtmittel die energetische Dauerleistungsgrenze, so besteht nach heutigem Wissensstand mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit für den durchschnittlich leistungsfähigen Mann keine Gefahr einer gesundheitlichen Schädigung [75].

Von statischer Kraft spricht man, wenn die auf einen Muskel einwirkenden äußeren Kräfte und seine Reaktionskräfte gleich groß sind. Zur Analyse der Wirkungen von statischen Belastungen kann als Interpretationsansatz die „Theorie der lokalen Ermüdung“ herangezogen werden [38]. Sie besagt, dass die aus der Zwangshaltung hervorgehende statische Belastung eine unzureichende kapillare Durchblutung einzelner Muskelanteile oder Muskelfasern, d. h. eine mangelnde Versorgung dieser Muskeln mit Nährstoffen, zur Folge hat. Diese können in Abhängigkeit der Belastungsintensität Spannungskopfschmerzen und Muskelverspannungen oder -verkrampfungen in den betroffenen Muskelbereichen verursachen. Die Beanspruchung des Körpers bei statischer Haltearbeit wächst bei konstanter Kraft nach [107] exponentiell mit der Arbeitsdauer und bei konstanter Arbeitsdauer exponentiell mit dem Verhältnis der aufzubringenden zur maximalen Haltekraft der jeweiligen Muskelgruppe. Die durchschnittliche Maximalkraft ist abhängig von der Krafrichtung und den einsetzbaren Muskelgruppen [75]. Die Ermüdung kann vermieden werden, wenn der Muskel in einem Bereich mit ausreichender Versorgung mit Blut arbeitet. Rohmert beschrieb 1960, dass dieser Bereich ungefähr bei 15 % der Maximalkraft des Muskels (MVC) liegt. Die Wahrscheinlichkeit zu ermüden nimmt mit steigender Haltekraft bzw. Haltedauer überproportional zu [105].

Erschwerend kommt im Innenausbau die häufige Überkopfarbeit hinzu. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg wurde untersucht, welche speziellen Belastungen bei dieser Tätigkeit auftreten und wie sich diese auf die Arbeiter auswirken [105]. Von besonderem Interesse dabei sind Daten, die in einer Feldstudie zum Anteil und Inhalt von Überkopfarbeit auf Baustellen gesammelt und analysiert wurden.

Wie bereits erwähnt, stellt besonders die statische Muskularbeit ein Krankheitspotential dar. Aus diesem Grund wurde eine ausgewählte Tätigkeit, nämlich das Setzen von Deckenabhängern bei der Montage abgehängter Decken, hinsichtlich der verschiedenen Belastungsarten analysiert und eine Bewertung unter arbeitsmedizinischer Sicht vorgenommen. Ein 41-jähriger Deckeninstallateur brachte in einem Zeitraum von ca. 2 Stunden 49 Abhänger an und setzte dazu insgesamt 58 Bohrlöcher. Wie Bild 28 zeigt, wurde knapp die Hälfte der Zeit Überkopf gearbeitet, davon wiederum ca. 58 % beidarmig. Bei der beidarmigen Überkopfarbeit konnte in dieser Studie kein oder nur ein sehr geringes Überschreiten der von Rohmert genannten 15 %-Schwelle ermittelt werden. Dagegen wurde der Arm bei der einarmigen Überkopfarbeit in knapp 70 % der Zeit durch das Schlagbohren mit ungefähr 38 – 68 % MVC belastet. Obwohl die Überkopfarbeit selten länger als eine Minute ohne Unterbrechung dauerte, d. h. durchaus Erholungspausen gegeben waren, besteht bei einer derartigen Belastung die Gefahr der Ermüdung mit den oben genannten negativen Folgen auf den Organismus.

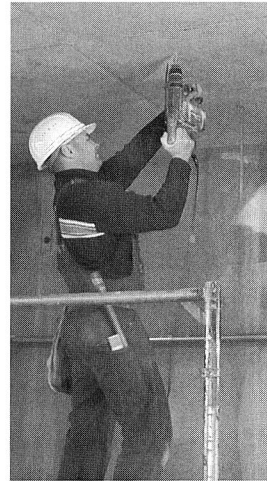
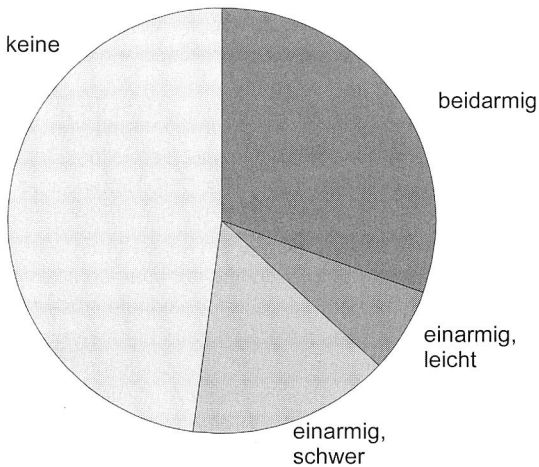


Bild 28: Anteil der verschiedenen Arten von Überkopfarbeit bei der Montage von abgehängten Decken [105]

Diese Ergebnisse deuten nicht auf eine starke kardiovaskuläre Beanspruchung bei ein-armiger Überkopfarbeit bei aufzubringenden Kräften bis 90 N hin. Dies gilt jedoch nur für Arbeiten, die ohne Ermüdung ausgeführt werden. In der Praxis aber muss davon ausgegangen werden, dass viele Arbeiten ohne angemessene Erholungsphasen durchgeführt werden, so dass durchaus muskuläre Ermüdungserscheinungen und damit kardivaskuläre Belastungen auftreten können.

Bei der Gestaltung der Überkopfarbeit in der Praxis sollte daher vor allem auf ein der muskulären Ermüdung vorbeugendes Pausenmanagement geachtet werden. Dazu können die aktuellen Empfehlungen von Rohmert [107] genutzt werden. Durch die Verwendung von leichteren Werkzeugen und Materialien, beidseitigem Arbeiten oder den Einsatz von Automaten kann die kardiovaskuläre Beanspruchung bei Überkopfarbeiten zusätzlich reduziert werden.

Ferner sind die Bauarbeiter einer relativ hohen durchschnittlichen Lärmbelastung ausgesetzt, die sog. Lärmschwerhörigkeit gehört mit zu den am meisten anerkannten Berufskrankheiten dieser Berufsfelder. Diese Krankheit kann auftreten, wenn man längere Zeit einem äquivalenten Schallpegel von 85 dB(A) ausgesetzt ist, wobei Impulslärm als schädigender anzusehen ist als Dauerlärm gleicher akustischer Energie [105]. In letzter Zeit wird davon ausgegangen, dass bei Lärmeinwirkungen nicht nur die Lärmschwerhörigkeit, sondern auch signifikante Blutdruckerhöhungen, Steigerungen der Herzfrequenz und Stoffwechselveränderungen mit Erhöhung des Gesamtcholesterins zu beobachten sind. Abhilfe lässt sich dadurch schaffen, dass die Geräte noch besser als bisher schallgedämpft werden. Modernes Werkzeug ist allerdings weitestgehend auch unter diesen Gesichtspunkten optimiert, so dass das größte Problem der Prozesslärm, z. B.

beim Bohren mit einer Schlagbohrmaschine, darstellt. Dagegen können sich die Bauarbeiter nur durch das Tragen von Gehörschutz, wie es in zahlreichen Verordnungen gefordert wird, schützen. Leider wird dieser jedoch oftmals als unpraktisch angesehen und daher weggelassen.

Ein weiteres, gesundheitsschädliches Phänomen können die Einwirkungen von Vibrationen, zum Beispiel durch Arbeiten mit einer Schlagbohrmaschine, darstellen. Der maximale Wirkungsgrad von Körperschwingungen liegt bei 4 – 8 Hz [75]. Neben einer Erhöhung der Herzfrequenz können bei längerfristigen Arbeiten unter Schwingungsbelastungen degenerative Veränderungen im Bereich der Gelenke entstehen [105]. Zur Reduzierung der Schwingungsbelastungen sind zwei Lösungswege denkbar, so kann zum einen versucht werden, die Entstehung der Schwingungen durch geeignete konstruktive Maßnahmen zu vermeiden bzw. ihre Übertragung aus dem Werkzeug hin zum Bediener durch geeignete aktive oder passive Dämpfungsmechanismen zu reduzieren [34]. Zum anderen führt der Einsatz geeigneter Automaten (vgl. beispielhafte Analyse verschiedener Kinematiken in Kapitel 4) dazu, dass die Bediener beinahe vollständig von der Schwingungsquelle entkoppelt werden können.

Die Automatisierungstechnik bietet zahlreiche Möglichkeiten, die Unfallwahrscheinlichkeit zu senken und die berufsbedingten Erkrankungen zu reduzieren. Staubabsaugungen in den Automaten können dazu beitragen, die Freisetzung von krankheitserregenden Fasern zu minimieren und so die Atemwegserkrankungen zu verringern. Das Tragen und Heben von schweren Lasten bietet sich ebenfalls für eine Unterstützung durch geeignete Hilfsmittel an, der verbreitete Einsatz von Hubwägen oder Handhabungsautomaten würde in diesem Bereich für Entlastung sorgen. Die oftmals unergonomischen Arbeitshaltungen lassen sich mit moderner Gerätetechnik vermeiden, so können zum Beispiel mit dem in Kapitel 6 beschriebenen Dübelroboter die Überkopfarbeiten beim Dübelsetzen umgangen und die Monteure deutlich entlastet werden. Andererseits hat aber in anderen Wirtschaftsbereichen gerade die Einführung automatisierter Maschinen dazu geführt, dass der Anteil an statischer Muskelarbeit mehr und mehr zugenommen hat. Auf diese Erfahrungen aufbauend, sollten Automaten für das Bauwesen so gestaltet sein, dass die statisch aufzubringende Muskelkraft innerhalb der vorgegeben Grenzen bleibt.

3.3 Rationalisierungspotentiale ausgewählter Tätigkeiten im Innenausbau

Neben der zwingend notwendigen Humanisierung der Bauarbeit bietet die Bauindustrie eine Vielzahl von wirtschaftlichen Ansatzpunkten für den Einsatz von Automatisierungstechnik. Im Überblick zum Stand der Technik fällt vor allem auf, dass es insbesondere für den Bereich des Innenausbaus kaum Automatisierungslösungen gibt. Diese Tatsache lässt sich mit den beengten Raumverhältnissen, den komplexen Tätigkeiten und der erforderlichen Genauigkeit in der Ausführung begründen. Dennoch gibt es auch auf diesem Gebiet Prozesse, die für eine Automatisierung geeignet erscheinen. Besonders der sog. Trockenbau, d. h. „die trockene Montage und das Zusammensetzen vor-

gefertigter Baustoffe und Bauteile zu Konstruktionen“ [6], wie Trenn- oder Montagewände, Wand- und Deckenbekleidungen sowie Trockenunterböden, ist besonders geeignet. Nassprozesse werden dabei lediglich zum Schließen der Fugen eingesetzt. Mit Trockenbaukonstruktionen lassen sich alle Anforderungen an den Brandschutz, Schallschutz und Wärme-/Feuchteschutz erfüllen sowie zusätzlich dekorative und funktionsbezogene Konstruktionen (z. B. Klimadecken, Räume mit reinraumtechnischen Anforderungen) erstellen. Der moderne Trockenbau begann mit US-Importen und erlebte als Bautechnik in den 70er und 80er Jahren seinen Durchbruch auf den gewerblichen Baustellen in Deutschland [6]. Typische Prozessketten für die Raumvermessung sowie für die Decken-, Wand und Bodenmontage werden im Folgenden analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für Automatisierungsprojekte bewertet.

3.3.1 Vermessung von Räumen und Durchführung von Markierungsarbeiten

Die Vermessung von Räumen stellt einen wesentlichen Teil bei der Abnahme von Bauleistungen nach der Rohbauphase dar und liefert zusätzlich die realen Baudaten für die darauf aufbauenden Gewerke, denn das reale Bauwerk entspricht aufgrund der zugestanden und unvermeidbaren Herstellungstoleranzen des Rohbaus nicht exakt dem vom Architekten gezeichneten Zustand. Im Regelfall sind die in der DIN 18202 (Toleranzen im Hochbau) festgelegten Maßabweichungen der tatsächlichen Ausführung bezogen auf den Planzustand zu beachten, so können zum Beispiel Längenmaße bei einem Nennmaß von 15 – 30 m um ± 24 mm abweichen [27]. Diese Abweichungen sind erfahrungsgemäß zu groß, um Einbauteile für den Innenausbau, wie beispielsweise Metall-Deckenplatten oder Zwischenwände, in der geforderten Qualität nur aufgrund der Architektenpläne zu fertigen. Daher müssen nach der Fertigstellung des Rohbaus die realen Baumaße auf der Baustelle ermittelt werden. Erst dann können die vorzufertigenden Teile produziert werden. Bei der Sanierung von Altbauten, bei denen oftmals keine oder nur ungenaue Baupläne vorhanden sind, ist die Vermessung des Sanierungsobjekts bereits zwingend für die Erstellung des Sanierungsplans erforderlich [101].

Diese Vorgänge sind zeit- und kostenaufwändig und erfordern ein Höchstmaß an Erfahrung. Besonders kritisch gestalten sich Messfehler oder fehlende Maße, welche häufig erst bei der Nacharbeit der Messdaten im Büro erkannt werden und zu teuren Nachmessungen auf der Baustelle führen können.

Rationalisierungspotentiale sind neben einer möglichen Verkürzung der Messzeit daher in der Vereinfachung oder Einsparung der Nachbereitung der Messdaten und in der Vermeidung von Nachmessungen zu sehen. Ein Vermessungssystem sollte den realen Bauzustand, auch bei komplexen Raumgeometrien, in allen drei Koordinatenachsen selbständig erfassen und die Messwerte in digitaler Form zur Verfügung stellen können. Ein derartiges System sollte schnell zu installieren, tragbar und einfach in der Handhabung sein. Im optimalen Fall wird als Ergebnis der Vermessung ein dreidimensionaler CAD-Plan des gesamten Bauwerks ausgegeben und allen Beteiligten des Bauwerks für die jeweilige Werkplanung übergeben. Außerdem könnte der Plan für das Facility-Management des späteren Gebäudes verwendet werden.

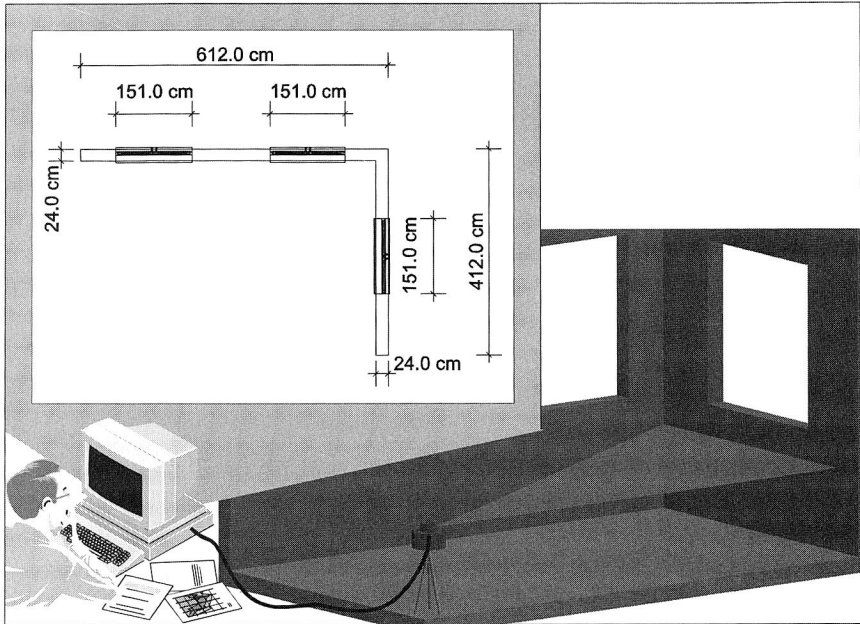


Bild 29: Automatisierte Erfassung von realen Baudaten mit einem Vermessungslaser

Neben der Vermessung von Räumen stellt das exakte Markieren von Arbeitspunkten, d. h. das Anzeichnen der unterschiedlichen Arbeitspunkte oder Rasterlinien, wie zum Beispiel die Auflagepunkte für Stützfüße bei Hohlraumböden oder die Dübelpositionen für Deckenbefestigungen, eine zweite Tätigkeit dar, die wesentlich für die Qualität der ausgeführten Arbeiten ist. Nachdem bis jetzt auf den Baustellen nur die Architektenpläne, nicht jedoch Pläne mit realen Baumaßen vorhanden sind, stellt die Durchführung des Aufrisses eine der schwierigsten Arbeiten beim Innenausbau dar. Die zu markierenden Positionen müssen exakt getroffen werden, um eine einwandfreie Optik der zu fertigenden Ausbauteile zu gewährleisten, obwohl viele dieser Positionen oft erst auf der Baustelle ermittelt werden müssen. Eine weitere Schwierigkeit kann auftreten, wenn vorhergehende Gewerke nicht exakt gearbeitet haben und dadurch die eigenen Arbeitspunkte nicht mehr zugänglich sind. Besonders zeitraubend gestaltet sich das Markieren von Arbeitspositionen an der Decke, da hier entweder über Kopf vermessen und markiert werden muss, oder aber zuerst eine Hilfsmarkierung am Boden angebracht wird und diese dann in einem zweiten Arbeitsschritt mithilfe eines Baulasers nach oben hochgelotet werden muss.

Rationalisierungspotentiale bei der Markierung von Arbeitspunkten liegen also zum einen in einer verbesserten Planung und Koordination aller Gewerke, um Überschneidungen und Ungenauigkeiten zu vermeiden. Die Grundlage dazu stellen Baupläne mit realen Maßangaben dar, die zentral allen Gewerken zur Verfügung stehen. Die Bauplä-

ne können zum Beispiel nach dem oben beschriebenen Verfahren erzeugt werden. Alle Gewerke können die eigenen Arbeitspunkte am Rechner exakt eintragen und auf Kollisionen mit anderen Gewerken überprüfen.

Zum anderen ist das Markieren der Arbeitspunkte, gerade wenn an der Decke gearbeitet werden soll, sehr umständlich. Zur Vereinfachung müssen entweder die darauf aufbauenden Bauprozesse so umgestaltet werden, dass ein Aufriss an der Decke nicht mehr notwendig wird, oder es müssen Markierungshilfen entwickelt werden, welche ohne eine Hilfsmarkierung am Boden die vorgegebenen Arbeitspunkte an der Decke anzeichnen können.

3.3.2 Automatisierte Montage von Systemböden

Bei den Systemböden sind zwei grundsätzlich verschiedene Bodentypen zu betrachten. Zum einen gibt es die sog. Doppelböden, hierbei handelt es sich um meist 600 x 600 mm große, 30 – 40 mm dicke, bis zu 25 kg schwere und stabile Trägerplatten, auf die zum Teil bereits Bodenbeläge fertig appliziert sind. Diese Platten werden in der Regel auf Metallstützen gelegt, welche auf Höhe justiert werden und die Platten an den Ecken stützen (eine Stütze nimmt somit 4 Plattenecken auf).

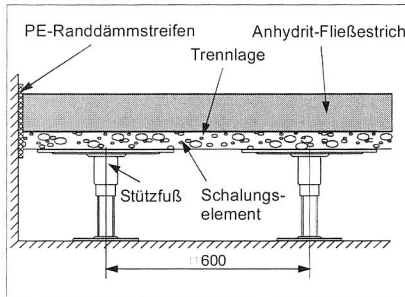
Beim Doppelboden müssen zuerst Stützfüße auf dem Rohbeton, der je nach verwendeten Stützen vorher noch versiegelt werden muss, aufgestellt bzw. aufgeklebt und anschließend über ein Schraubgewinde auf die gewünschte Höhe nivelliert werden. Die einzelnen Justiervorgänge müssen im Zehntel-Millimeter-Bereich erfolgen, um eine abnahmefähige Oberflächenqualität, z. B. hinsichtlich des Fugenverlaufes, der Ebenheit und einer wackelfreien Auflage, zu erzielen. Anschließend werden die Stützen versiegelt, um ein späteres Verstellen der eingestellten Höhe zu verhindern, und die Bodenplatten aufgelegt. Bei Bedarf müssen einzelne Stützfüße nachjustiert werden.

Zum anderen werden sog. Hohlraumböden verwendet, welche meist aus gipsgebundenen Spezialplatten (Abmessung z. B. ca. 1200 x 600 mm, Gewicht ca. 15 kg) bestehen, die auf Stützen aus Metall oder Kunststoff, aufliegen. Darauf wird dann ein sich selbst nivellierender Estrich gegossen, so dass im Gegensatz zu den Doppelböden eine homogene Fläche entsteht, auf der anschließend der sichtbare Bodenbelag verlegt werden kann.

Beim Hohlraumboden werden die Stützfüße zuerst in die Bodenplatten geklebt und die Platten dann an der gewünschten Stelle positioniert. Die Genauigkeit in der Höhenjustierung ist beim Hohlraumboden nicht so hoch, da der später zu vergießende Estrich kleinere Höhenunterschiede ausgleichen kann. Problematisch bei der Justierung ist, dass oftmals unter die Platten gegriffen werden muss, um innenliegende Stützen erreichen und in der Höhe verstellen zu können. Falls Hindernisse, wie Heizungs- oder Klimainstallationen, vorhanden sind, muss der Monteur diese mit Hilfskonstruktionen überbrücken. Sobald alle Bodenplatten im Raum verlegt sind, werden sog. Wandanschlussbänder verklebt, um ein Eindringen des Estrichs im Wandbereich zu vermeiden und um Schallschutzerfordernisse gerecht zu werden. Anschließend wird die sog.

Trennlage, eine transparente PE-Folie, verlegt und die vorhandenen Revisionsöffnungen werden abgeklebt. Dann erfolgt das Vergießen des Estrichs.

Rationalisierungs- und Humanisierungspotentiale sind vor allem in der Positionierung und der Höhenjustierung der Stützfüße zu sehen. Die Monteure müssen diesen Arbeitsabschnitt in gebückter Haltung durchführen und nehmen gerade bei großen Flächen über längere Zeit eine ungünstige Arbeitsposition ein. Die Befestigung und Ausrichtung der Stützen ist monoton und erfordert keine komplexen Handgriffe, so dass dieser Arbeitsvorgang dem Einsatz eines Automaten entgegen kommt.



Rationalisierungs- und Humanisierungspotentiale:

- ☐ Bodenversiegelung aufbringen
- ☐ Höhennivellierung
- ☐ Handhabung der schweren Platten

Hemmnisse:

- ☐ Bodenhindernisse
- ☐ Traglasten
- ☐ Erreichbare Genauigkeiten

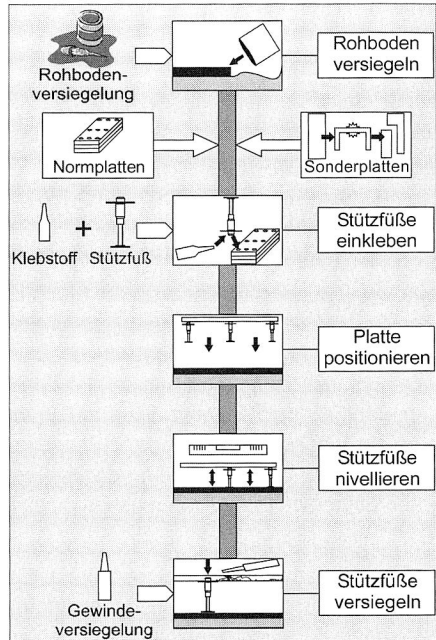


Bild 30: Prozesskette bei der manuellen Verlegung der Gipskartonplatten zur Erstellung eines Hohlraumbodens (Quelle Schnittbild: [85])

Dazu könnte mit einem Baulaser die Höhenjustierung optisch im Bauraum erzeugt und mit entsprechenden Detektoren erfasst werden. Dieser Empfänger ist an einem Werkzeug befestigt, das so lang die Höhenverstellung der jeweiligen Stützen verdreht, bis die gewünschte Justierung erreicht ist. Problematisch dabei ist, dass es bisher noch keine kostengünstigen Bau-Lasersysteme gibt, die mit einer Genauigkeit von 1/10 mm einen rotierenden Laserstrahl erzeugen und erfassen können.

Ein weiteres Rationalisierungs- und Humanisierungspotential besteht in der Handhabung der schweren Platten, die ebenfalls in gebückter Haltung aufgelegt werden müssen. Montagehilfen, die eine exakte Positionierung der Platten, zum Beispiel durch Aus-

richtung an bereits verlegten Elementen, in stehender Arbeitshaltung ermöglichen würden, wären hierzu denkbar.

Ein derartiges Gerät könnte zum Beispiel mit einer Hebevorrichtung mit einem Vakuumgreifer ausgestattet sein, welcher an einem frei beweglichen Ausleger befestigt ist. Problematisch für eine derartige Unterstützung sind allerdings Bodenhindernisse, die bei Doppelböden in Form der Stützen immer vorhanden sind. Zwar könnten die Stützen durch eine genügend hohe Bodenfreiheit des Gerätes überwunden werden, jedoch stellen andere Hindernisse, wie zum Beispiel Heizungsrohre, große Probleme hinsichtlich der Fortbewegung des Gerätes dar, zumal ein größerer Vorrat an Platten mitgeführt werden sollte, was das Gewicht der Vorrichtung stark erhöht. Die Gewichtsproblematik verhindert auch einen Einsatz des Gerätes auf den bereits verlegten Platten, da zum einen durch den zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausgehärteten Stützenkleber die Gefahr besteht, die Stützen umzuwerfen und zum anderen besonders bei Hohlraumböden die Traglast der Platten zu gering ist.

3.3.3 Montage von nicht tragenden inneren Trennwänden nach DIN 4103

Montagewände in Trockenbauweise sind nichttragende Wände in Ständerbauart, die auf der Baustelle aus standardisierten Bauteilen montiert werden. Als Unterkonstruktion werden vorgefertigte Metallprofile bzw. Holzständer verwendet. Die Beplankung besteht aus dünnen Platten wie zum Beispiel Gips- oder Holzplatten und wird kraftschlüssig zu beiden Seiten an der Unterkonstruktion verschraubt. Je nach Ausführung werden mehrere Schichten der Platten übereinander montiert. In den inneren Hohlraum zwischen den Ständern werden je nach Anforderung und Konstruktion aus Brand- oder Schallschutzgründen Dämmmaterialien eingelegt, bei bestimmten Konstruktionsarten können auch Installationselemente im Inneren der Wände untergebracht werden. Die Fugen an den Plattenstößen werden jeweils verspachtelt.

Im Einzelnen gestaltet sich der Montageablauf bei diesen Wänden folgendermaßen: Zuerst müssen die Lagen der Wände mithilfe einer Schlagschnur am Boden angezeichnet und mit Lot oder Laser auf die seitlichen Begrenzungswände und Decke übertragen werden. Danach können die U-förmig ausgebildeten sog. UW-Anschlussprofile an Boden und Decke verankert werden. Für Betondecken oder -böden werden dazu Drehstiftdübel verwendet, die voneinander einen Abstand unter 1 m haben sollten. Zwischen die Profile an Decke und Boden können nun die sog. CW-Profile eingeschoben werden, die ca. 10 – 15 mm kürzer als die lichte Raumhöhe sein sollen, um eine Durchbiegung der Decke zu ermöglichen. Zu den Seitenwänden hin werden Randanschlussprofile verdübelt. Der Abstand zwischen den einzelnen CW-Profilen soll exakt 62,5 mm betragen. Dann kann die erste Wandseite mit senkrecht angeordneten Gipskartonplatten beplankt werden, diese sollen ebenfalls 10 – 15 mm kürzer als die lichte Raumhöhe sein. Die Platten werden nun mit Schnellbauschrauben mit der Unterkonstruktion verschraubt, der Schraubabstand beträgt 25 cm. Die obersten Schrauben dürfen dabei nicht in die UW-Profile an der Decke eingeschraubt werden, da sonst eine Durchbiegung der Decke eine Beschädigung der Trennwand hervorrufen würde. Je nach Aus-

führungsart der Wand kann eine zweite Schicht aus Gipskartonplatten angebracht werden, dabei müssen die Platten versetzt zur ersten Schicht montiert werden. Nun können von der anderen Wandseite her die Installationsleitungen verlegt werden, die CW-Profile besitzen H-Ausstanzungen zur Durchführung der Elektroleitungen. Anschließend wird eine Hohlraumdämmung aus Mineralfaser zwischen die Profile geklemmt, der Zugschnitt der Dämmmatten soll ca. 1 cm breiter als der Profilabstand ausfallen. Die zweite Wandseite kann jetzt beplankt werden, wobei die Plattenstöße zur gegenüberliegenden Wandseite versetzt angeordnet werden sollen. Abschließend werden die Plattenfugen und die Schraubköpfe verspachtelt, um eine glatte Wandoberfläche zu erhalten [19].

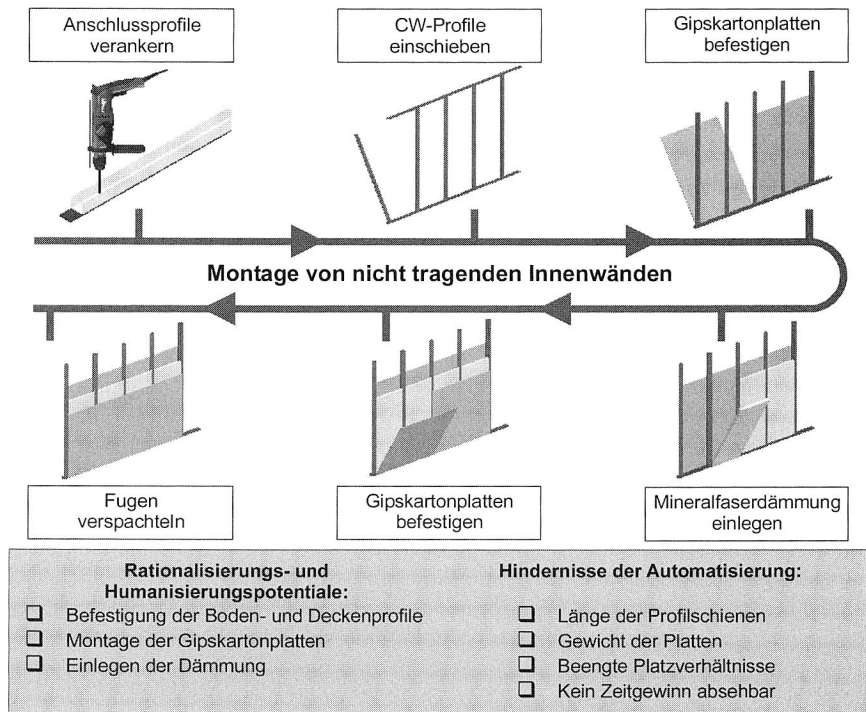


Bild 31: Prozesskette bei der Errichtung von nicht tragenden Innenwänden mit Gipskartonplatten (hier einfach beplankte Ausführung)

Wandöffnungen, zum Beispiel für Türen, müssen vor der Montage der UW-Bodenprofile eingemessen werden. Über der Öffnung werden weitere UW-Profile über eine Stützkonstruktion befestigt. Bei der Beplankung ist darauf zu achten, dass keine Plattenstöße in der Verlängerung der Türzarge liegen, da sonst die Gefahr der Rissbildung in der fertigen Wand besteht [19].

Das Rationalisierungspotential bei der Montage von nicht tragenden inneren Trennwänden erscheint auf den ersten Blick relativ hoch, da diese Trennwände weitgehend stan-

dardisiert sind und in großer Zahl auf der ganzen Welt zum Einsatz kommen. Eine detaillierte Analyse des Montageprozesses zeigt jedoch, dass für diesen Bereich des trockenen Innenausbaus geringe Möglichkeiten bestehen, durch den Einsatz von Automatisierungstechnik Rationalisierungspotentiale zu erschließen.

Das Einmessen und Festlegen der Positionen der Wände ist sehr zeitaufwändig und erfordert wegen der vorherrschenden Toleranzen im Hochbau sehr oft das Wissen der Monteure, wenn die im Plan eingezeichneten Positionen der Trennwände von den realen Lagen abweichen. Zudem sind überwiegend kurze Fluchten einzumessen, da die Trennwände normalerweise zwischen zwei Räumen aufgestellt werden, die Raumlänge aber selten größer als 10 m sein wird. Ein weiteres Hindernis gegen eine automatisierte Vermessung stellt die gewünschte Rechtwinkligkeit der Trennwand zur Stützwand dar. Zudem variiert der Abstand der Profilschienen voneinander in Abhängigkeit der späteren Verwendung der zu erstellenden Räume. Alle Problemstellen lassen eine automatische Vermessungsarbeit für diesen Montageprozess als nicht sinnvoll erscheinen.

Die Montage der Profilschienen erfordert normalerweise zwei Monteure, wobei einer die Fixierung der Schienen und der andere die Befestigung am Untergrund durchführt. Diese Tätigkeit würde somit ein großes Rationalisierungspotential beinhalten. Die Länge der Schienen und die relativ beengten Platzverhältnisse, sowie die erforderlichen Arbeiten an Decke, Wand und Boden und das maschinell schwierig zu realisierende Einführen der CW-Profile erweisen sich jedoch als zu aufwändig für eine Automatisierung.

Für die Montage der Gipskartonplatten sind ebenfalls zwei Monteure notwendig, problematisch gestaltet sich wegen der großen Plattenabmessungen (in der Regel 1,25 m breit, bis 3 m hoch mit einem Gewicht von ca. $12,5 \text{ kg/m}^2$) und der Empfindlichkeit der Platten gegen Bruch und Beschädigung (zum Beispiel der Plattenecken), vor allem das Handling der Platten, zumal die Plattenlänge oftmals der geplanten Raumhöhe entspricht. Besonders das Handling der schweren Platten könnte durch geeignete Hubwerkzeuge so vereinfacht werden, dass nur noch ein Monteur erforderlich ist. Nachdem das Verschrauben der Platten mit der Unterkonstruktion nur 1–3 sec pro Schraube in Anspruch nimmt, könnte ein Rationalisierungseffekt nur durch eine Reduzierung dieser Zeitspanne erreicht werden, was zwangsläufig eine große Anzahl an parallel arbeitenden Schraubbohrern erforderlich machen würde. Wegen der unterschiedlichen Rastermaße müsste zudem eine Schnellverstellung der jeweiligen Schraubachsen möglich sein. Außerdem besteht beim Einschrauben immer die Gefahr des seitlichen Ausbrechens der Schraube, so dass bei der Verschraubung insgesamt wenig Möglichkeiten einer Rationalisierung gesehen werden.

Das Einlegen des Dämmmaterials stellt ein großflächiges Arbeiten dar, die verwendeten Materialien sind sehr leicht. Allerdings ist abzusehen, dass die manuelle Durchführung dieser Tätigkeit mit Sicherheit so schnell und unkompliziert abläuft, dass eine Automatisierung ebenfalls nicht wirtschaftlich erscheint.

Das Verspachteln der Fugen stellt wegen der großflächigen Arbeitsweise auf den ersten Blick ebenfalls eine Rationalisierungsmöglichkeit dar. Bei genauerer Betrachtung fällt

jedoch auf, dass automatisch ausgeführte Spachtelarbeiten ein sehr flexibles Gerät mit entsprechender Materialzuführung verlangen würden. Darüber hinaus erfordert der Spachtelvorgang ein großes manuelles Geschick, um eine möglichst ebene Oberfläche zu erzeugen und somit einen nachgeschalteten Schleifvorgang weitgehendst zu erübrigen. Hinzu kommt, dass sich Spachtelarbeiten sehr schnell und äußerst preisgünstig von darauf spezialisierten Monteuren durchführen lassen. Der Kostenanteil von Spachtelarbeiten, gemessen am Gesamtaufwand zum Montieren von Trennwänden, ist zudem recht niedrig, so dass nur ein geringes Rationalisierungspotential zu erwarten ist.

3.3.4 Deckenmontage

Im trockenen Innenausbau müssen Deckenbekleidungen oder Unterdecken mit einer Unterkonstruktion an tragende Deckenkonstruktionen befestigt werden. Der Montageablauf ist in seiner grundsätzlichen Ausgestaltung, selbst für die große Anzahl an unterschiedlichen Deckensystemen, wie zum Beispiel Rasterdecken, Paneel- und Lamellendecken sowie fugenlose Deckenverkleidungen, sehr ähnlich.



Bild 32: Abgehängte Decken (hier mit Metaldecken und integrierten Beleuchtungskörpern) werden für eine einwandfreie Optik an das Fassadenraster angepasst (Quelle: Lindner AG)

So muss in jedem Fall eine Unterkonstruktion (überwiegend aus Metall oder Holz) mit geeigneten Dübeln, Schrauben oder Halteklammern (zur Fixierung an Stahlträgern) an den tragenden Bauteilen befestigt werden. Handelt es sich bei dem tragenden Bauteil um Betondecken, kommen ausschließlich Dübel zum Einsatz. Bei Deckenbekleidungen werden die Deckenelemente anschließend unmittelbar auf der Unterkonstruktion angebracht, bei Unterdecken stellen sog. Abhänger (überwiegend aus Metall) die Verbin-

derung zwischen Verankerungselementen und Unterkonstruktion her [19]. Wichtig bei der Deckenmontage ist die Beachtung gewisser Zwangsbedingungen, um eine einwandfreie Optik der Decke zu gewährleisten, so werden die Stoßkanten der Deckenplatten zum Beispiel an Fassadenelementen ausgerichtet.

Bisher wird die Montage abgehängter Decken vollständig manuell ausgeführt, wobei normalerweise nur eine Bohrmaschine verwendet wird. Zuerst muss der Monteur die geplanten Platzierungen der Dübel mit den realen Gegebenheiten auf der Baustelle vergleichen, um eventuelle Abweichungen zum Plan feststellen und korrigieren zu können. Dann wird mit einer Schlauchwaage oder einem Baulaser die Höhenlage der endgültigen Deckenunterkante an den angrenzenden Wänden angezeichnet. Danach werden die Achsen der Grundprofile und die Dübelabstände mit Metermaß und Schlagsehnur in der Regel auf dem Boden angezeichnet.

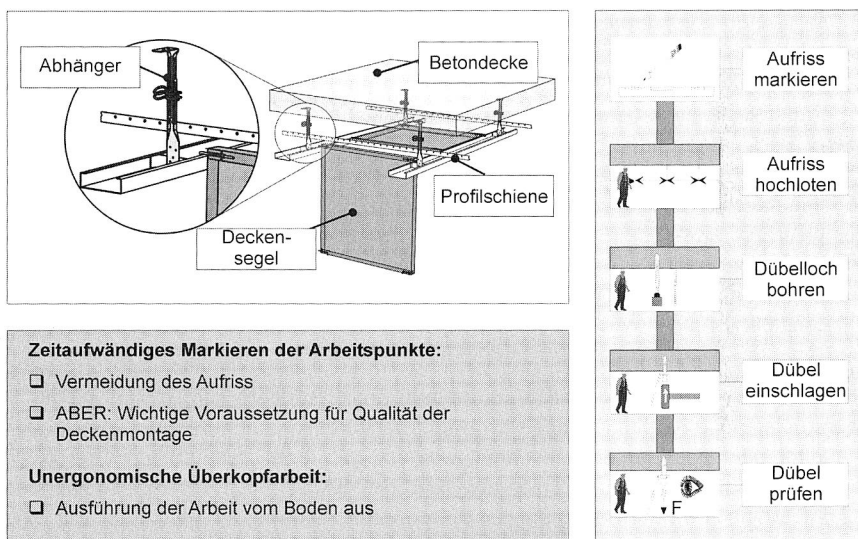


Bild 33: Prozesskette und Rationalisierungspotential bei der Montage von Befestigungselementen für abgehängte Decken

Die Arbeitspunkte (Kreuzungspunkte der Grundprofil- und Dübelachsen) werden anschließend mit einem Baulaser senkrecht auf die Decke projiziert und dort markiert. Problematisch dabei ist, dass dieser Arbeitsvorgang oft parallel mit anderen Gewerken des Innenausbaus durchgeführt wird und so der Zugang zum Boden oder zur Decke mit Hindernissen oder bereits vorher angebrachten Installationen (Heizungsrohre, Trennwände, ...) erschwert ist. Anschließend bohrt der Monteur das Dübelloch. Nach dem Bohren des Dübelloches wird der Dübel mit dem Hängeroberteil verbunden und mit einem Hammer eingeschlagen. Abschließend erfolgt eine Prüfung der Haltekraft entsprechend der baulichen Zulassungsbestimmungen für den verwendeten Dübeltyp.

Nun können an den angrenzenden Wänden sog. Wandanschlussprofile verdübelt werden. In diese werden dann die Grundprofilschienen eingeschoben und an den Abhängern befestigt, wobei schon eine grobe Höhenjustierung erfolgt. Schließlich werden daran die Tragprofile angebracht und mit einer Wasserwaage oder einem Baulaser feinjustiert. Ja nach geplanter Deckenausführung kann jetzt noch eine Faserdämmstoffschicht eingelegt werden. Abschließend werden die Deckenplatten montiert, bei der Verwendung von Gipskartonplatten als Deckenelemente müssen die Fugen noch verspachtelt werden.

Eine Analyse dieses Arbeitsvorgangs liefert im Wesentlichen folgende Schwachpunkte, die mithilfe der Automatisierungstechnik verbessert werden können [48]:

Zum einen ist das Markieren und Übertragen der Arbeitspunkte besonders zeitaufwändig, da das Markieren am Boden einen eigentlich unnötigen Zwischenschritt darstellt, das Anzeichnen der Arbeitspunkte an der Decke aber oft gar nicht möglich oder aber zumindest sehr mühsam ist. Daher sollte ein Verfahren erarbeitet werden, welches ohne angezeichneten Aufriss ein exaktes Positionieren der Dübel ermöglicht. Andererseits ist gerade die Position der Abhänger für die Qualität der Deckenmontage von entscheidender Bedeutung und erfordert insbesondere bei Abweichungen zwischen dem Bauplan und der realen Baustelle häufig das Know-how der Monteure, so dass eine vollständige Automatisierung nicht sinnvoll erscheint. Vielmehr muss ein Kompromiss erreicht werden, etwa indem nicht mehr an der Decke sondern nur noch am Boden markiert wird, dafür aber die Projektion an die Decke entfällt, oder nur noch die Achsen der Grundprofile angezeichnet und die Dübelabstände über geeignete Entfernungsmessungen ermittelt werden.

Zum anderen fällt beim Bohren und Einschlagen der Dübel vor allem die ungünstige Überkopfarbeit auf. Diese ist nicht nur zeitaufwändig, sondern der Monteur nimmt auf Dauer belastende Arbeitshaltungen ein. Außerdem müssen nach wenigen Dübellöchern die Leiter oder das Gerüst verschoben werden, was einen zusätzlichen Zeitaufwand darstellt. Es sollte daher vom Boden aus gearbeitet werden, d. h. es erfolgt sowohl das Bohren als auch das Einschlagen der Dübel unter Verwendung geeigneter Hilfsmittel vom Boden aus.

Die Befestigung der seitlichen Wandanschlussprofile, das Justieren der Profilschienen auf die richtige Höhe sowie das Einhängen der Deckensegel erscheint wegen der komplexen Handgriffe bzw. der Größe der verwendeten Teile mit den derzeit am Markt verfügbaren Deckensystemen nicht sinnvoll zu automatisieren. Eine Modifizierung dieser Komponenten wäre sinnvoll, sie lässt sich aber wegen der hohen Kosten für mögliche Systemänderungen am Markt kaum durchsetzen.

3.4 Bewertung der unterschiedlichen Einsatzgebiete

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt einzelne, ausgewählte Montageprozesse des trockenen Innenausbaus bezüglich ihres Rationalisierungspotentials beschrieben wurden, sollen diese nachfolgend bezüglich wirtschaftlicher, technischer und ergonomi-

scher Kriterien beurteilt werden. Zur Bewertung wurden die in der nachstehenden Tabelle aufgeführten Beurteilungskriterien herangezogen und mit Unternehmen des trockenen Innenausbaus diskutiert.

Beurteilungskriterien	Vermessung von Räumen	Bodenmontage	Trennwandmontage	Deckenmontage
Weitgehend standardisierte Arbeitsvorgänge und Bauteile	-	+	0	+
Ersatz von schwerer körperlicher Arbeit	--	++	++	++
Weitgefächertes, breites Anwendungsgebiet, zukunftsfähiger Markt	++	-	0	+
Positive Wirtschaftlichkeitsabschätzung	-	0	-	++
Technische Erfolgswahrscheinlichkeit	0	0	-	+

++ sehr positiv + positiv 0 befriedigend - negativ -- sehr negativ

Tabelle 1: Gegenüberstellung der betrachteten Prozesse

Der automatisierten Vermessung von Räumen würde wegen des großen und weit gefächerten Einsatzgebietes ein breiter Anwendermarkt offen stehen, zumal der Anteil an Sanierungsprojekten im Hochbau in den nächsten Jahren deutlich ansteigen wird (vgl. Bild 87 in Kapitel 8) und gerade für solche Gebäude oft keine verlässlichen Planungsunterlagen existieren. Je komplexer die Bauprodukte und je höher der Vorfertigungsgrad der Baumaterialien werden, desto wichtiger wird eine rasche und genaue Vermessung der Bauräume. Erste Ansätze [86], die sich mit dieser Thematik befassen, lassen außerdem auf eine zunehmend erfolgreiche Automatisierung dieses Bereiches hoffen. Dagegen würde eine Automatisierung unter Humanisierungsgründen nicht unbedingt erforderlich sein, da die Vermessungstechnik körperlich nicht anstrengend ist. Insgesamt ist das Rationalisierungspotential den Hindernissen deutlich überlegen, so dass an die Entwicklung entsprechender Lösungen gedacht werden kann.

Eine Automatisierung im Bereich der Montage von Systemböden würde zu einer deutlichen Humanisierung dieser Tätigkeiten beitragen, da die belastende und körperlich schwere Arbeit in gebückter Haltung von Maschinen übernommen werden würde. Der Einsatz von Systemböden ist weit verbreitet, so dass ein ausreichend großes Anwendungsgebiet gegeben wäre. Die zu verarbeitenden Teile sind überwiegend standardisiert oder könnten an Anforderungen einer automatisierten Montage angepasst werden. Gegen eine Automatisierung sprechen das große Gewicht und die großen Abmessungen

gen der einzelnen Bauteile. Die Justierung der Stützen und die Platzierung der Platten erfordert ein erhebliches manuelles Feingefühl und handwerkliches Geschick, so dass ein hoher Entwicklungsaufwand für eine Automatisierungslösung abzuschätzen ist. Wegen der großen Gewichte müsste ein Automat am Rohboden bewegt werden, hier sind aber mit hoher Wahrscheinlichkeit Leitungen für Heizung, Elektrik oder Klimaanlage im Weg, die auch durch eine bessere Abstimmung der einzelnen Gewerke nicht beseitigt werden können. Trotz großer Flächen sind wegen der oftmals verwinkelten Raumgeometrie viele Anschnittplatten, gerade in den Randzonen, mit entsprechender Handarbeit zu erwarten. Eine Automatisierung im Bereich der Systemböden erscheint daher nicht erfolgsversprechend.

Bei der Trennwandmontage wäre ebenfalls ein großes Humanisierungspotential erkennbar. Die überwiegend standardisierten Einbauteile kämen dem Einsatz von Automaten entgegen. Jedoch sprechen wiederum die großen Abmessungen und Gewichte der zu verarbeitenden Materialien und das hohe erforderliche manuelle Geschick beim Einbau gegen eine Automatisierung. Wegen der meist relativ kleinen Räume und der vielen Anschlüsse sind sehr viele Schnittplatten zu erwarten, die nach wie vor von Hand montiert werden müssten. Zudem schränken übermäßig lange Rüstzeiten durch häufiges Umsetzen der Automaten die Wirtschaftlichkeit stark ein. Eine Automatisierung der Trennwandmontage, auch von Teilprozessen, erscheint zum jetzigen Zeitpunkt daher als nicht sinnvoll.

Bei der Deckenmontage erfordert das Einhängen der Profile oder der Deckenplatten ebenfalls ein zu großes handwerkliches Geschick, um sinnvoll automatisiert werden zu können. Dagegen könnte für den Teilprozess „Bohren und Dübelsetzen“ sehr gut eine Automatisierungslösung gefunden werden. Der Prozess ist gut strukturierbar und es werden überwiegend standardisierte Komponenten, die weder zu schwer noch zu groß sind, verwendet. Darüber hinaus wäre ein großes Humanisierungspotential durch die Vermeidung der Überkopfarbeit zu erschließen. Die Wirtschaftlichkeit einer derartigen Lösung wäre sehr hoch, da zum einen das langwierige Aufreißen an der Decke wegfallen könnte und zum anderen die Monteure nicht mehr mit Leitern oder Gerüsten, die nach wenigen Bohrungen wieder versetzt werden müssen, zur Decke gelangen müssten. Weil der Prozess „Bohren und Dübelsetzen“ auch in anderen Gewerken des Innenausbaus, wie zum Beispiel im Installationsbereich, häufig vorkommt, ist ein breites Anwendungsspektrum erkennbar. Daher wird der Prozess „Montage von Befestigungselementen an der Decke“ als Applikation für die in den folgenden Kapiteln zu erarbeitenden Roboter und Automatisierungslösungen ausgewählt.

4 Vergleich von Automatisierungsansätzen zur Montage von Befestigungselementen an der Decke

Die Analyse in Kapitel 3 hat gezeigt, dass der trockene Innenausbau eine Vielzahl an Ansatzpunkten zur Rationalisierung und Humanisierung von verschiedenen Montageprozessen bietet. Besonders das Anbringen von Bohrungen an der Decke und die Montage von Befestigungselementen in diese Bohrungen beinhalten, wie in Kapitel 3.3.4 gezeigt, ein großes Automatisierungspotential. In diesem Kapitel werden verschiedene Realisierungsansätze zur Automatisierung dieses Montageprozesses mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden konzipiert und bewertet. Ziel dieser Untersuchung ist es, ein realisierbares Konzept zu erstellen und dessen prototypenhafte Umsetzung vorzubereiten.

4.1 Automatisierung von Montageaufgaben im Innenausbau

Zuerst werden allgemeine Möglichkeiten erläutert, wie Montageaufgaben des Innenausbaus durchgeführt werden können. Daran schließt sich eine Analyse der besonderen Anforderungen an Automatisierungslösungen im Innenausbau an.

4.1.1 Möglichkeiten zur Automatisierung von Prozessen im Innenausbau

Montageprozesse im trockenen Innenausbau werden bisher überwiegend manuell auf der Baustelle durchgeführt. Dabei werden aus Platzgründen und wegen der einfacheren Handhabung vor allem kleine und leichte Baumaschinen, wie Schlagbohrer oder Bolzensetzer, verwendet. Die manuelle Fertigung bietet die größte Flexibilität hinsichtlich der verschiedenen Tätigkeiten, die ausgeführt werden können. Ein einziger Monteur ist in der Lage, die unterschiedlichsten Produkte des trockenen Innenausbaus zu verarbeiten. Auf Hindernisse im Bauraum, auf Abweichungen zum Plan des Architekten oder auf Änderungswünsche des Bauherrn kann er schnell und ohne großen Aufwand reagieren. Diesen Vorteilen steht die mangelhafte Produktivität der manuellen Bauausführung gegenüber, da nur mit einem entsprechend hohen Einsatz an menschlicher Arbeitskraft die Bauleistung erbracht werden kann. Darüber hinaus können die meisten zur Zeit realisierten Bauvorhaben nur deshalb wirtschaftlich abgewickelt werden, weil vor allem Arbeiter aus Niedrig-Lohn-Ländern eingesetzt werden.

Mit bedienergeführten Automaten kann demgegenüber die Produktivität erhöht werden. Die jeweiligen Automaten werden speziell für eine bestimmte Tätigkeit konstruiert, daher besteht keine Flexibilität in Bezug auf die Durchführung von unterschiedlichen Arbeiten. Jedoch ermöglicht eine Einbeziehung des Bedieners in den Montageprozess eine schnelle Reaktionsfähigkeit hinsichtlich Abweichungen und Änderungen der geplanten Montagetätigkeit. Der Einsatz von Automaten erfordert einen im Vergleich zur manuellen Montage gesteigerten Planungsaufwand, da für einen wirtschaftlichen Einsatz die logistischen Probleme, wie Transport zum Einsatzort, Zugänglichkeit der Arbeitsfläche oder kontinuierliche Versorgung mit Arbeitsmaterialien, beachtet werden müssen.

Durch den Einsatz von Robotern lässt sich die Produktivität weiter erhöhen, allerdings steigt der dafür notwendige Planungsaufwand im Vergleich zum Einsatz von Automaten deutlich an, da in diesem Fall kein menschlicher Bediener mehr in den programmierten Ablauf eingreifen soll. Roboter können, bedingt durch ihre konstruktiven Merkmale, für eine große Anzahl an unterschiedlichen Fertigungsaufgaben und -varianten programmiert werden. Nachteilig beim Einsatz von Robotern ist der hohe Aufwand an zusätzlicher Sensorik und Steuerungstechnik, der notwendig wird, falls der Roboter auch innerhalb seines programmierten Ablaufs flexibel auf Abweichungen in der Geometrie oder der Lage der zu verarbeitenden Teile, welche speziell in einer hochdynamischen Baustellenumgebung die Regel sind, reagieren soll. Außerdem gestaltet sich die Programmierung eines Roboters, die von besonders qualifiziertem Personal durchgeführt werden müsste, als sehr aufwändig, da die dynamische Arbeitsumgebung des Roboters flexible Programme oder fortlaufende Umprogrammierungen erfordert.

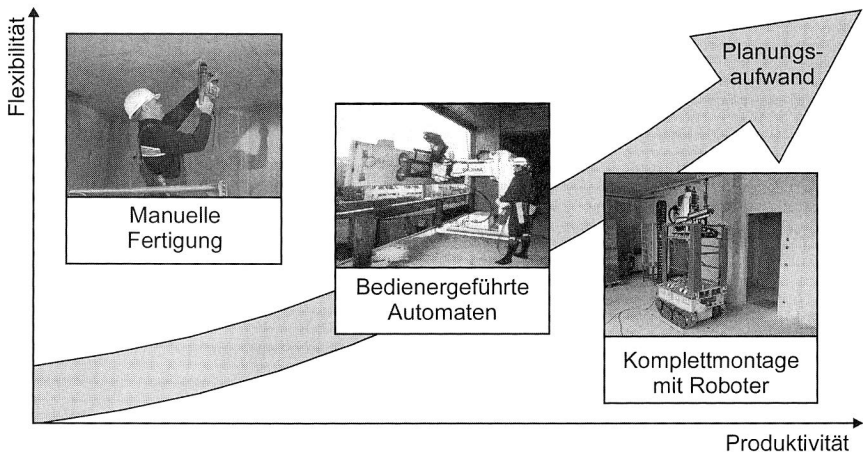


Bild 34: Vergleich unterschiedlicher Ausführungsarten von Montagetätigkeiten im Innenausbau

4.1.2 Problemstellen und Anforderungen an Automatisierungslösungen im Innenausbau

Die Entwicklung von Automatisierungssystemen für das Bauwesen setzt eine genaue Kenntnis der jeweiligen Einsatzbedingungen voraus, da diese besonders ungünstig sind. Daher werden im Folgenden die speziellen Rahmenbedingungen, die sich aus Gesprächen mit Projektleitern und Monteuren des trockenen Innenausbaus ergeben haben, zusammengestellt.

Im Gegensatz zur industriellen Produktion, bei der die Automatisierungsgeräte fest installiert sind und das zu fertigende Produkt zu der jeweiligen Bearbeitungsstation transportiert wird, stellt sich auf der Baustelle die entgegengesetzte Situation dar. Für den Automaten bedeutet dies, dass er unbedingt mobil sein muss. Je nach Ausführung des

Gerätes ist eine tragbare Variante oder der Einbau eines eigenen Fahrwerks (mit oder ohne eigenen Antrieb) erforderlich [45].

Bevor der Automat im Innenausbau eingesetzt werden kann, muss er zuerst in das Gebäude transportiert werden. Problematisch dabei ist, dass zu diesem Zeitpunkt normalerweise bereits die Fassade geschlossen ist und häufig Engstellen in Form von Türen oder aufgebauten Zwischenwänden zu erwarten sind. Für den Transport auf die jeweilige Etage steht entweder nur das Treppenhaus oder ein Lastenaufzug zur Verfügung. Es ist zu erwarten, dass ein Transport in die Etagen über Lastkräne, zumindest ohne aufwändige Vorausplanung, nicht zu gewährleisten ist, da oftmals bereits Gerüste den Zugang durch die Außenwand behindern. Die Automaten müssen daher entweder niedriger als 2 m und schmaler als 0,9 m sein, um durch bestehende Türöffnungen zu passen, oder aber so schnell in kleinere Einzelteile zerlegt werden können, dass diese Abmessungen eingehalten werden. Ideal wäre der manuelle Transport an den Einsatzort, da dieser dann unabhängig von Aufzügen oder Lastkränen sehr flexibel organisiert werden könnte.

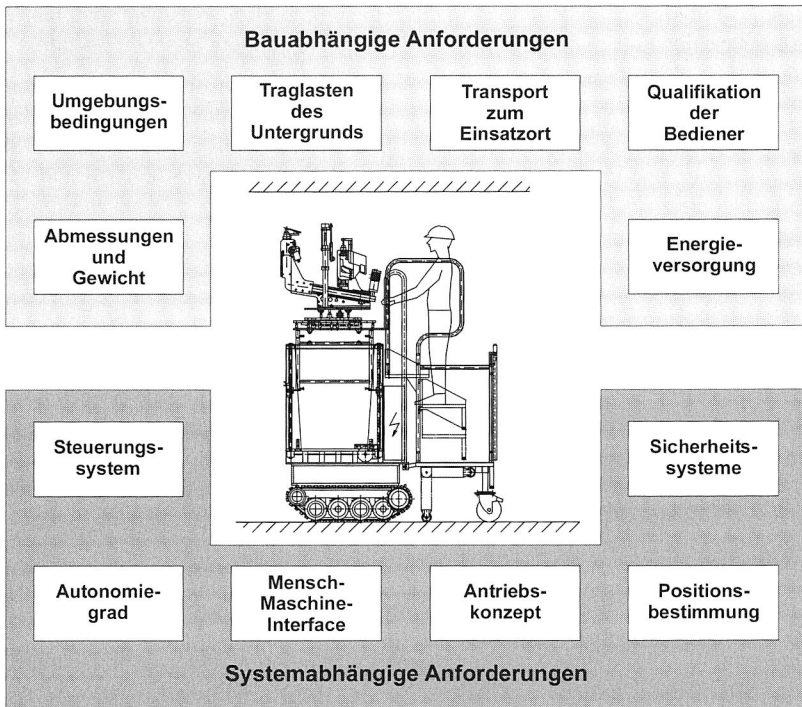


Bild 35: Anforderungen des Innenausbaus an Automatisierungslösungen

Im Innenausbau ist ein Automat nicht unmittelbar ungünstigen Witterungsbedingungen wie Regen oder Schnee ausgesetzt. Allerdings ist es wahrscheinlich, dass das Gerät

mit Spritzwasser und vor allem Staub in Berührung kommt und den unterschiedlichsten Temperaturen ausgesetzt sein wird. Ein entsprechender Schutzgrad der mechanischen Komponenten muss daher unbedingt eingehalten werden.

Die Energieversorgung gestaltet sich, vor allem bei größeren Automaten mit leistungsstarken Antrieben, problematischer als bei einem Betrieb im Freien, da keine Verbrennungsmotoren eingesetzt werden dürfen. Bisher ist die sinnvollste Alternative die Versorgung mit elektrischer Energie über ein mitgeführtes Kabel, allerdings ist gerade bei mobilen Systemen die Gefahr sehr groß, dass das Kabel überfahren und beschädigt wird. Batteriebetriebene Automaten kommen ebenfalls in Betracht, jedoch ist der Betrieb mitgeführter Werkzeuge und Handhabungssysteme dann teilweise nur mit eingeschränkter Leistung möglich, außerdem erhöhen Batterien das Gewicht wesentlich. Mit der Weiterentwicklung der Wasserstofftechnik könnte sich im Bereich der Energieversorgung eine interessante Alternative ergeben.

Die Bodenbeschaffenheit ist im Innenausbau gut einzugrenzen, da normalerweise mindestens Rohbetonböden vorhanden sind. Problematisch wird der Einsatz eines mobilen Systems, falls bereits Zwischenböden (z. B. Hohlraumböden) installiert sind, hier müssen die zulässigen maximalen Gewichtsbelastungen besonders beachtet werden.

Falls sich ein Automat selbständig auf der Baustelle bewegen kann, ist die zuverlässige Erkennung von Hindernissen aller Art von besonderer Bedeutung. Zum einen ist zu erwarten, dass diese Bauroboter in nächster Nähe der Monteure auf der Baustelle arbeiten werden, zum andern müssen auch stationäre Hindernisse wie Absätze, Öffnungen im Bauwerk oder Installationen etc. rechtzeitig lokalisiert werden. Für ein störungsfreies Arbeiten ist das selbständige Umfahren oder Überwinden der Hindernisse, ohne diese zu beschädigen, eine wesentliche Forderung. Dazu muss das Gerät entweder rasch in tragbare Einzelteile zerlegt und wieder zusammengesetzt werden können, oder es muss, zum Beispiel durch ein Kettenfahrwerk, selbständig die Bodenhindernisse überwinden können. Automaten, die Arbeiten an der Decke ausführen, müssen dort bereits befestigte Installationen oder Unterzüge unterfahren können.

Allen in Kapitel 3.3 beschriebenen Bauprozessen, die für eine Automatisierung in Frage kommen, ist gemeinsam, dass die Arbeitsposition des Automaten mit einer relativ hohen Genauigkeit innerhalb des Bauraums ermittelt werden muss. Lösungen zur kostengünstigen Bestimmung der Position werden in Kapitel 5 detailliert erläutert.

Ein weiteres Handicap stellt der geringe technische Ausbildungsgrad der künftigen Bediener dar. Die Bedienung der Geräte sollte daher ohne teuren Schulungsaufwand möglich sein.

Die Wirtschaftlichkeit künftiger Automatisierungslösungen ist ein großes Problem. Die Geräte sollten lange Betriebs- und kurze Stillstandszeiten aufweisen, was eine ausgefeilte Steuerung und eine an die Geräte angepasste Ablaufplanung für das Bauvorhaben voraussetzen. Die Wirtschaftlichkeit bisheriger Prototypen wurde immer wieder durch das niedrige Lohnniveau von Arbeitern aus Niedriglohnländern, welche besonders oft die einfachen Tätigkeiten als Subunternehmer übernehmen, in Frage gestellt.

4.2 Realisierungsansätze mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden

Die in Kapitel 4.1.1 erläuterten vier unterschiedlichen Möglichkeiten zur Durchführung von Montageprozessen sollen nun an dem in Kapitel 3.4 ausgewählten Beispiel, dem Anbringen von Befestigungselementen an der Decke, untersucht und anschließend einander gegenübergestellt werden. Da die manuelle Montage bereits in Kapitel 3.3.4 im Wesentlichen beschrieben wurde, wird an dieser Stelle der Schwerpunkt auf die Automatisierungsgeräte gelegt und es werden entsprechend den oben definierten Anforderungen und Problemstellen mögliche Lösungsalternativen für die Bereiche „Montage von Fertigteilen“, „bedienergeführte Automaten“ sowie „Komplettmontage mit Roboter“ erörtert.

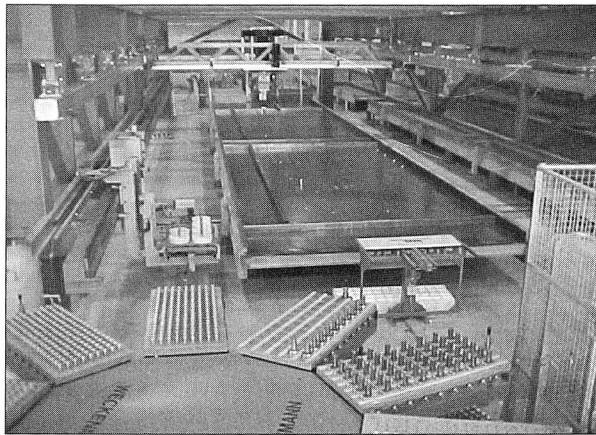
4.2.1 Integration von Befestigungsmöglichkeiten in der Vorfertigung

Als mögliche Variante zur Rationalisierung von Montageprozessen im Bauwesen wurde in Kapitel 4.1.1 die Vorfertigung angesprochen. Der Einsatz von Betonelementdecken gewinnt seit einiger Zeit mehr und mehr Marktanteile, so dass Überlegungen sinnvoll erscheinen, Befestigungselemente bereits während der Vorfertigung in die Decken zu integrieren.

Ein solches Verfahren aus dem Bereich der Befestigungstechnik zeigt Bild 36. Es wurde in einem erst 1999 von der Firma Weckenmann gebauten japanischen Fertigteilwerk aufgenommen und zeigt eine Anlage zur Vorfertigung von Betondecken und Wänden, die um ein Einlegegerät für Gewindehülsen erweitert wurde. Diese ersetzen die Dübel und Nägel bei der konventionellen Montage und erlauben das Einschrauben von Befestigungselementen wie z. B. Abhänger. Die Vorfertigung der Elementdecken wird nach dem in Kapitel 2.1.3 dargestellten Verfahren durchgeführt, d. h. große Portalanlagen stellen zuerst Schalungselemente nach gegebenen CAD-Plänen auf, anschließend wird darin der Beton vergossen. Als Erweiterung dazu werden in dem japanischen Werk die Gewindehülsen auf einem Drehtisch in verschiedenen Größen auf Paletten bereitgestellt und dort von einem Einlegegerät aufgegriffen. Zur einfachen Zuordnung der verschiedenen Gewindehülsen zu den unterschiedlichen Gewerken auf der Baustelle sind unterschiedliche Hülsen mit verschiedenen Farben gekennzeichnet. Anschließend wird die etwas verbreitete Unterseite der Gewindehülse mit Klebstoff bestrichen und an eine vorher geplante Position auf der Arbeitsfläche abgesetzt. Das Ankleben auf der Arbeitsplatte soll das Kippen der Hülsen beim Vergießen mit Beton bzw. beim Rütteln verhindern. Nachdem alle Hülsen gesetzt und auch die seitlichen Schalungen angebracht sind, wird die Decke durch Einfüllen des Betons fertiggestellt.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der genauen Positionierbarkeit der Hülsen durch die Portalroboter und einer hohen Zuverlässigkeit der Zugfestigkeit der Befestigungselemente durch das Einbetonieren. Erkennbar ist ein Humanisierungserfolg, da zumindest die Überkopfarbeit beim Bohren vermieden werden kann. Das Einbringen der Befestigungselemente durch den Portalroboter kann um ein Vielfaches schneller

erfolgen als die vergleichbare manuelle Tätigkeit auf der Baustelle, daher kann auch ein Rationalisierungseffekt festgehalten werden. Dazu trägt zusätzlich bei, dass auf das Anbringen eines Aufrisses auf der Baustelle verzichtet werden kann.



Vorteile

- ✎ Präzise Montage im Werk
- ✎ Zugfestigkeit der Befestigung
- ✎ Humanisierung

Nachteile

- ✎ Schrauben ist zeitaufwendig
- ✎ unflexibel gegenüber Änderungen
- ✎ Abstimmung der Gewerke

Bild 36: Alternatives Verfahren zur Integration der Befestigungstechnik in die Vorfertigung [Quelle: Fa. Weckenmann]

Nachteilig ist allerdings, dass die Voraussetzung zur Anwendung dieses Verfahrens eine vollständig abgeschlossene Planung des Bauwerks ist, da ansonsten die Befestigungen nicht an der richtigen Stelle eingebracht werden würden. Dies erfordert zum einen, dass die Verwendungssituation des Bauwerks bereits in der Rohbauphase geklärt ist. Gerade diese Tatsache ist bei vielen Bauprojekten nicht gegeben, da die Mieter noch nicht feststehen. Zum anderen müssen sich alle Gewerke, die Befestigungselemente nutzen wollen, frühzeitig sehr eng abstimmen, um Überschneidungen des zur Verfügung stehenden Raumes zu vermeiden. Ergeben sich trotz aller Vorausplanung noch Änderungen, müssen diese geänderten Befestigungselemente wie bisher auch manuell eingebracht werden. Der Zeitgewinn, der durch das Einlegen der Hülsen mit Robotern erzielt wird, kann durch das aufwändigere Einschrauben der Befestigungselemente wieder zunichte gemacht werden. Außerdem liegen die Kosten für eine einzelne Hülse deutlich über den Kosten für einen Dübel oder Nagel.

Da diese Art der Rationalisierung nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist, soll im Folgenden auch nicht mehr weiter darauf eingegangen werden.

4.2.2 Anbringen von Befestigungselementen an der Decke mit bedienergeführten Automaten

Zusätzlich zu den in Bild 35 dargestellten allgemeinen Anforderungen an Automatisierungslösungen im Innenausbau, beinhaltet dieser spezielle Prozess weitere besondere Ansprüche an Automatisierungsgeräte. So betrifft eine erste grundsätzliche Entscheidung, die bei der Konzeption von bedienergeführten Automaten zum Anbringen von

Befestigungselementen an der Decke getroffen werden muss, die Frage, ob der Automat vom Boden oder von der Decke aus operiert. Die Befestigung des Automaten an der Decke würde bedeuten, dass – ähnlich einem Hängebahnsystem in der industriellen Produktion – ein Schienensystem installiert werden muss, von dem aus der Automat dann arbeitet. Diese Art des Betriebs wäre jedoch mit Sicherheit unwirtschaftlich, da die Installationsmaßnahmen zu teuer wären. Eine andere Möglichkeit der Bewegung an der Decke wären Sauggreifer (vgl. [124]). Automaten, die auf dieser Technik basieren, bewegen sich jedoch nur sehr langsam fort, außerdem sind die notwendigen Sicherheitsvorrichtungen (Fangseile oder Netze) zu aufwändig. Damit scheidet diese Technik ebenfalls als unwirtschaftlich aus. Daher sollte der Automat auf jeden Fall vom Boden aus arbeiten.

Wie schon in Kapitel 4.1.2 erläutert, muss das Gerät dann entweder leicht getragen werden können oder über ein eigenes Fahrwerk verfügen. Nachdem das Tragen jedoch dem Humanisierungsanspruch widerspricht, soll im Folgenden ein Automat mit eigenem Fahrwerk betrachtet werden. Einerseits kann das Gerät durch den Benutzer geschoben werden. Denkbar ist andererseits auch die Verwendung eines Antriebs mit elektrischen Motoren. Dadurch würden aber die Kosten und das Gewicht des Gerätes deutlich erhöht. Je nach gewünschtem Automatisierungsgrad sind beide Varianten realisierbar.

Die nächste Entscheidung betrifft den in Kapitel 3.3.4 als wichtigen Rationalisierungseffekt identifizierten Punkt „Bestimmung der Arbeitsposition“. Während bei der manuellen Montage die Vorgabe der Arbeitspositionen zwingend an der Decke erfolgen muss, ermöglicht der Einsatz eines Automaten vom Boden aus die Möglichkeit, die Dübelpositionen am Boden zu markieren. Damit ist eine große Zeitersparnis verbunden, da das Hochloten jedes einzelnen Punktes an die Decke entfällt. Je nachdem wie aufwändig die Steuerung des Automaten ausgeführt wird, könnten auch verschiedene, in Kapitel 5 erläuterte Verfahren zur Positionsbestimmung angewandt werden.

Wird von einer Markierung der Arbeitspunkte auf dem Boden ausgegangen, benötigt der Automat eine Einrichtung, die das Hochloten der Punkte an die Decke bzw. die lotrechte Ausrichtung der Bohrspitze über dem markierten Punkt gewährleistet. Im Bauwesen gibt es dazu die sog. Laserlote.

Einfache Gerätevarianten, wie zum Beispiel in Bild 37 dargestellt, justieren den Laserstrahl über einen Flüssigkeits-Kompensator ohne mechanische oder elektrische Steuerungen lotrecht aus. Dazu ist eine mit einer zähen Flüssigkeit teilweise befüllte Zelle unterhalb der Laserdiode angebracht. Die Flüssigkeit richtet sich immer horizontal aus, unabhängig von der Neigung des Gesamtgerätes. Da die Zelle nur teilweise befüllt ist, entsteht eine Art Prisma mit veränderlichen Prismenflächen bzw. -winkeln. Das virtuelle Prisma, das sich durch die Neigung des Gerätes innerhalb des Flüssigkeitsbehälters bildet, setzt sich zusammen aus der waagrechten Seite der Flüssigkeit und der unteren Begrenzung des Flüssigkeitsbehälters, somit ergibt sich ein Prismenwinkel, der genau so groß wie die Neigung des Gerätes ist [65].

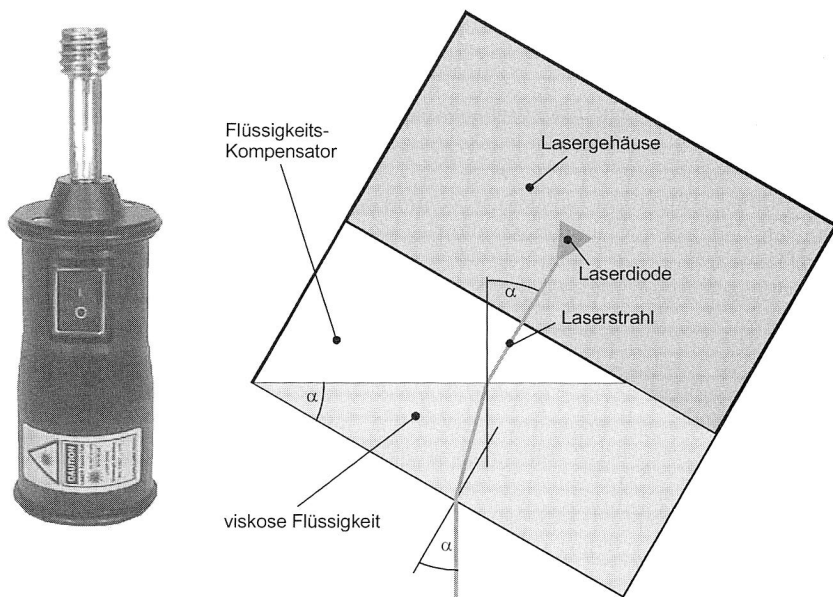


Bild 37: Laserlot mit Flüssigkeits-Kompensator zur einfachen Übertragung der Arbeitspunkte vom Boden an die Decke (Quelle: [91])

Der Einfallswinkel des Lotstrahls auf die waagrechte Seite der Flüssigkeit entspricht dann genau der Neigung des gesamten Gerätes. Für Flüssigkeiten mit einer Brechzahl von zwei ($n=2$) stellt sich als Ablenkungswinkel ein Wert ein, der – bis auf einen vernachlässigbaren Fehler – dem Einfallswinkel des Lotstrahls entspricht. Somit wird der Laserstrahl immer senkrecht nach unten projiziert. Die verwendeten Flüssigkeiten verhalten sich träge, so dass der Laserstrahl relativ schnell nivelliert wird, da sich die Flüssigkeit entsprechend schnell ausschwingt. Die erzielbare Lot-Genauigkeit liegt bei ca. 0.08° , bei einer Neigung von $\pm 10^\circ$ in jede Richtung. Bei einer Deckenhöhe von 3,6 m entsteht mit dieser Messmethode eine maximale Abweichung von 5 mm.

Bringt man einen solchen Laser exakt unter der Bohrspitze der am Automaten integrierten Bohrmaschine an, muss der Laserpunkt am Boden nur noch mit der entsprechenden Markierung zur Deckung gebracht werden, um eine exakte Übertragung der Arbeitspunkte an die Decke zu erhalten.

Ein weiterer Detailspekt betrifft das mühsame manuelle Einschlagen der Dübel in das vorgebohrte Dübelloch. Dazu kann zum einen neben der Bohrmaschine ein zweites Gerät in Form eines Dübelsetzers verwendet werden. Dieser Apparat kann unterschiedliche Dübelelemente mit einem Bolzen-Mechanismus, der von einer Kartusche angetrieben wird, in den Beton eintreiben. Für den Einsatz von Bohrmaschine und Bolzen-setzer in einem Automaten muss dieser über ein System zum Wechseln der Werkzeuge unter dem aktuellen Arbeitspunkt verfügen, damit der Bolzensetzer den Dübel immer in

das vorgebohrte Loch setzen kann. Dieser Werkzeugwechsel kann automatisch oder manuell erfolgen, jedoch werden dadurch auf jeden Fall neben dem Gewicht des Gerätes entweder die Taktzeiten oder aber die Gerätekosten deutlich erhöht.

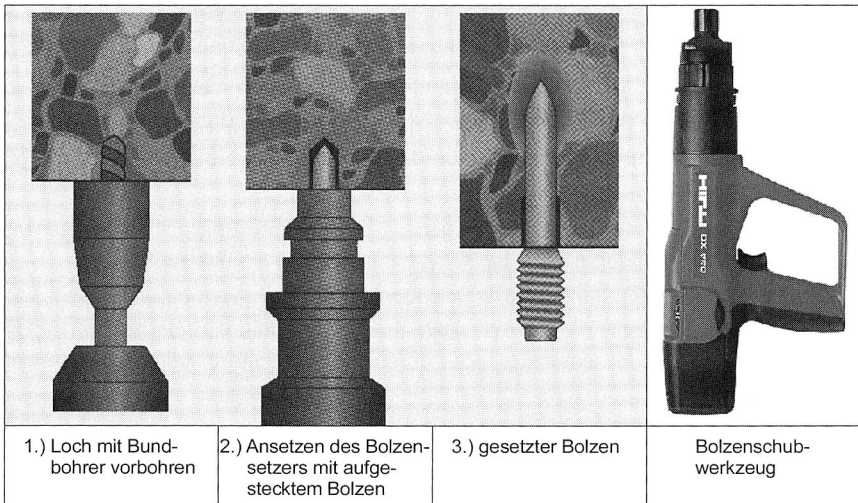


Bild 38: Maschinelles Dübelsetzen mit einem Bolzenschubwerkzeug (Quelle: [82])

Zum anderen gibt es Dübelssysteme am Markt, die den Schlagmechanismus der Bohrmaschine verwenden, um den Dübel in das vorgebohrte Loch zu bringen, also aus dem Bohrhämmer einen Schlaghammer machen. Dazu wird eine kleine Hülse über den Bohrer geführt, die auf dem Bohrfutter aufliegt und einen so großen Innendurchmesser hat, dass sich der Bohrer weiter drehen kann ohne die Hülse mitzubewegen. Am anderen Ende weist diese Hülse eine Aufnahme auf, in die der Dübel gesteckt werden kann. Wird dieser in das vorgebohrte Loch gesteckt und anschließend die Bohrmaschine eingeschaltet, wird der Dübel mit dem Schlagwerk der Bohrmaschine eingetrieben.



Bild 39: Einschlagen von Dübeln mit der Schlagkraft der Bohrmaschine ohne Verwendung von Zusatzgeräten (Quelle: [87])

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass nur eine Maschine verwendet wird und der zeit- aufwändige Werkzeugwechsel damit entfällt. Allerdings bereitet das Zuführen der Dübel Schwierigkeiten, da die Hülse mit Dübel und eventuell bereits daran befestigter Abhänger über die Bohrspitze geführt werden müssen. Dies bedeutet, dass entweder die Bohrmaschine bis auf eine bequem zu erreichende Zuführposition abgesenkt (Zeitauf-

wand!) oder aber mit einem Hilfsmittel das Einfädeln der Hülse in einer relativ großen Höhe durchgeführt werden muss.

Da sich die Entwicklungs- und Anschaffungskosten für einen Automaten am schnellsten amortisieren, wenn er auf möglichst vielen unterschiedlichen Baustellen eingesetzt werden kann, muss er auch für unterschiedliche Deckenhöhen geeignet sein.

Gespräche mit Projektleitern des Innenausbaus haben ergeben, dass Arbeitshöhen von 2,60 m bis 3,60 m anzustreben sind. Weitere wesentliche Forderungen sind:

- Die Abhänger, die mit den Dübeln an der Decke befestigt werden, können zwischen 0,20 m und 1,20 m lang sein.
- Die Dübel müssen mit einer Toleranz von ± 5 mm um ihre Sollposition gesetzt werden, um eine einwandfreie Optik der fertigen Decke zu gewährleisten.
- Zur Realisierung der unterschiedlichen Arbeitshöhen wird eine Höhenverstellung der Werkzeuge angestrebt, die zugleich auch zum Ausweichen von möglichen Deckenhindernissen, wie z. B. Unterzüge oder bereits angebrachte Installationen, verwendet werden kann.

Mögliche technische Umsetzungen dieser Charakteristiken sollen an zwei Beispielen erläutert werden.

Manuell geführter Bohrständer

Ein erster Lösungsvorschlag ist ein einfacher Bohrständer mit dem in Bild 40 gezeigten Aufbau. Auf einer Grundplatte mit Lenkrollen wird eine beliebig in der Höhe verstellbare Teleskopstange befestigt. An deren oberen Ende ist eine handelsübliche Bohrmaschine angebracht, welche über einen Fußhebel gegen die Decke gedrückt werden kann. Die Bohrmaschine benötigt eine 240 V-Versorgung, die über ein einfaches Verlängerungskabel zugeführt werden kann. Das Gerät kann aufgrund der Lenkrollen sehr einfach auf der Baustelle bewegt werden, außerdem ist der Transport in das Gebäude unproblematisch, da das Gerät in kleinere Einzelteile zerlegt und schnell wieder zusammengesetzt werden kann. Das Einschlagen der Dübel erfolgt nach dem in Bild 39 gezeigten Vorgehen. Die Positionierung des Bohrständers muss der Monteur manuell vornehmen, dazu müssen die Aufrisspunkte nur noch am Boden markiert werden, die Übertragung an die Decke erfolgt mit einem unter der Bohrspitze angebrachten Laserlot, welches nach dem in Bild 37 gezeigten Aufbau funktioniert. Zur einfachen Absenkung bei Deckenhindernissen (z. B. Unterzüge, bereits montierte Installationen, ...) kann die Bohrmaschine mit dem Kniehebel einfach um ca. 50 cm abgesenkt werden.

Die Vorteile dieser Lösung liegen in ihrem einfachen, kostengünstigen Aufbau und der unkomplizierten Bedienbarkeit, d. h. die Arbeit mit diesem Gerät kann nach kurzer Einweisung durch jeden Baufacharbeiter oder sogar durch ungelernte Hilfsarbeiter erfolgen. Rationalisierungseffekte ergeben sich durch die vereinfachte Vorgabe der Arbeitspunkte am Boden, Humanisierungseffekte stellen sich durch die Vermeidung der Überkopfarbeit ein. Schwierigkeiten beim Transport des Gerätes an seinen Einsatzort

sind nicht zu erwarten, da die rasche Zerlegung in kleine Einheiten einen schnellen Transport in das Gebäude oder einen Geschosswechsel, unabhängig von Aufzügen, erleichtert. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, eine Bohrmaschine mit integrierter Staubabsaugung zu verwenden. Die hohe Belastung der Monteure durch den Bohrstaub kann damit beinahe vollständig vermieden werden.

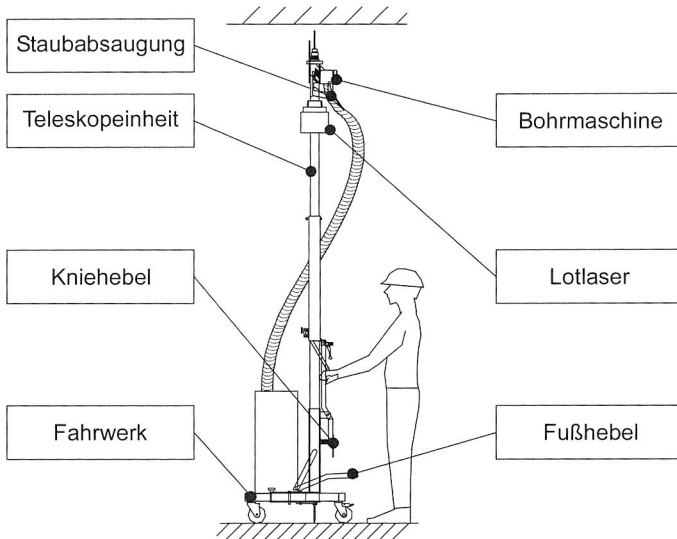


Bild 40: Prinzipskizze eines einfachen Bohrständers zum Anbringen von Befestigungselementen an der Decke

Nachteilig ist, dass immer noch ein vollständiger Aufriss am Boden angezeichnet werden muss. Bedingt durch die Übertragung der Aufrisspunkte mit dem Laserlot und dem nicht biegesteifen, hohen Aufbau der Teleskopstange entsteht ein Fehler in der Positionierung, der ein exaktes Arbeiten an der Decke verhindert. Die Lenkrollen erlauben zwar ein einfaches Verfahren des Gerätes, jedoch muss, wegen fehlender Ausgleichsmechanismen von Positionierfehlern, der Lotstrahl durch kleine Korrekturbewegungen des gesamten Gerätes mit dem Aufrisspunkt zur Deckung gebracht werden. Diese kleinen Erschütterungen bringen die Flüssigkeit im Laserlot zum Schwingen und erschweren das exakte Positionieren zusätzlich, da der Lotpunkt nicht richtig zur Ruhe kommen kann. Nachdem die Bohrmaschine zur Zuführung der Dübel und Abhänger vor dem Einschlagen der Dübel mit dem Schlagwerk der Bohrmaschine nicht auf eine leicht zu erreichende Bedienposition abgesenkt werden kann, gestaltet sich die Zuführung der Dübel als relativ umständlich, da die Aufsteckhülse, der daran befestigte Dübel und der Abhänger zusammen auf die Bohrspitze aufgesteckt werden müssen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass dieser Bohrständer nicht geeignet sein wird, den Prozess „Anbringen von Befestigungselementen an der Decke“ sinnvoll zu automatisieren.

Dübelautomat mit automatisierter Positionierhilfe

Ein manuell geführter Dübelautomat stellt den zweiten Lösungsvorschlag dar. Der grundsätzliche Aufbau ist vom Bohrständer übernommen worden, die Funktionalität wurde jedoch wesentlich erweitert. Zum einen entfällt größtenteils das manuelle Markieren der Arbeitspunkte, stattdessen werden diese nun durch eine Kombination aus Entfernungsmessung und Laser-Leitstrahl ermittelt.

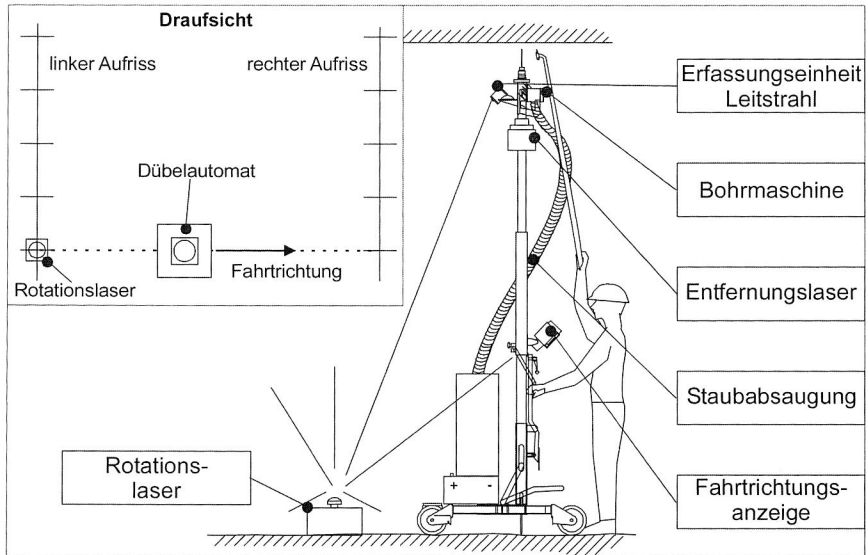


Bild 41: *Prinzipskizze eines Dübelautomaten mit automatisierter Positionierhilfe zum Anbringen von Befestigungselementen an der Decke*

Dazu müssen nur noch die Platzierungen der Dübelreihen an zwei gegenüberliegenden Seiten eines Arbeitsraumes ausgemessen und angezeichnet werden. Ein Baulaser wird dann so ausgerichtet, dass er mit seinem Laserstrahl eine vertikale Verbindungsebene zwischen zwei markierten Punkten, die eine Dübelreihe kennzeichnen, erzeugt. Der Dübelautomat wird nun in diese Leitebene gebracht und kann mithilfe einer Empfangseinrichtung erkennen, ob eine Korrektur der Bewegung nach links oder rechts erforderlich ist. Zusätzlich wird die Entfernung zu einer der Referenzseiten gemessen und je nach gewünschtem Abstand der Dübel innerhalb einer Reihe ein Haltesignal bzw. eine Fahrtrichtungsanzeige auf einem übersichtlichen Display ausgegeben.

Diese Art der Positionierung erfordert bereits ein einfaches Steuerungssystem, das jedoch mit verfügbaren Systemen (Mikrocontroller, ...) aufgebaut werden kann. Der Bediener muss vor Beginn der Arbeit als einzige Eingabe das gewünschte Rastermaß der Dübel eingeben. Dadurch sind auch bei diesem System die schnelle Erlernbarkeit und eine kurze Einarbeitungszeit gegeben.

Zusätzlich könnte als Erweiterungsmöglichkeit eine motorische Unterstützung der Bewegung des Dübelautomaten vorgesehen werden.

Die Vorteile dieses Systems liegen wie schon bei dem einfacheren Bohrständler in der Vermeidung der Überkopparbeit, in dem einfachen Aufbau, der Vermeidung von Bohrstaub und der einfachen Transportierbarkeit an den Einsatzort. Zusätzlich entfällt bei diesem Dübelautomaten das Anzeichnen des Aufrisses beinahe vollständig, so dass ein weiterer Zeitgewinn erzielt werden kann. Durch die Erfassung des Leitstrahls bzw. die Abstandsmessung zur Referenzwand kann die Arbeitsgenauigkeit deutlich erhöht werden.

Nachteilig ist jedoch, dass die hohe Genauigkeit in der Positionserfassung durch das schwerfällige Rangieren mit den Lenkrollen und dem Fehlen eines Ausgleichsmechanismus wieder zunichte gemacht wird. Die umständliche Zuführung der Dübel und Abhänger auf die Bohrspitze wird den Einsatz dieses Dübelautomaten ebenso erschweren wie schon beim Bohrständler.

4.2.3 Anbringen von Deckenabhängern mit mobilen Robotern

Wie schon in Kapitel 4.1.1 beschrieben, stellen Roboter die flexibelste Systemvariante zur Automatisierung von Montage- oder Bearbeitungsvorgängen dar, gleichzeitig ist damit ein hohes Humanisierungspotential verbunden, da die Werker oder Monteure beinahe vollständig von mühsamen Tätigkeiten entlastet werden können.

Der Begriff „Roboter“ wurde 1922 durch Karel Capeks satirisches Stück „R.U.R.“ (Rossum's Universal Robot) eingeführt (das slawische Wort „robota“ bedeutet soviel wie „schwere Arbeit“ oder „schwer arbeiten“) [22]. Industrieroboter sind in mehreren Bewegungsachsen frei programmierbare, mit Greifern oder Werkzeugen ausgerüstete, automatische Handhabungseinrichtungen, die für den industriellen Einsatz konzipiert sind. Sie haben mindestens drei Bewegungsachsen, deren Ablauffolge und Richtung frei programmierbar sind, also ohne mechanischen Eingriff veränderbar und gegebenenfalls sensorgesteuert sind. Sie können Handhabungs- und Fertigungsaufgaben vollautomatisch ausführen. Die erstellten Roboterprogramme können entweder manuell ausgewählt, von externen Signalen gestartet oder mithilfe von externen Sensoren an die jeweilige Situation adaptiert werden [117].

Normalerweise sind Industrieroboter fest mit dem Untergrund verbunden, die am weitesten verbreiteten Aufbauvarianten Knickarm-, Scara- und Portalroboter sind in Bild 43 dargestellt. Im Gegensatz zur industriellen Produktion ist es im Bauwesen unbedingt erforderlich, dass die Geräte mobil sind, da die zu verarbeitenden Bauteile in der Regel an verschiedenen Stellen am Rohbau angebracht werden müssen. Ein weiterer Unterschied sind die deutlich höheren Traglasten und Prozesskräfte, die im Bauwesen auftreten können. Diese Tatsache erfordert einen sehr robust ausgeführten mechanischen Aufbau der Roboterarme. Dafür sind die geforderten Genauigkeiten am Bau deutlich geringer als in der industriellen Produktion, wo zum Beispiel die bei der Laserbearbeitung erforderliche Bahngenauigkeit im Bereich einiger Zehntelmillimeter liegt.

Bei der Konzeption eines mobilen Bauroboters ist somit einerseits festzulegen, wie die Mobilität gewährleistet werden kann und andererseits muss eine geeignete Kinematik für den Roboterarm selbst gefunden werden. Eine getrennte Betrachtung dieser beiden Aspekte führt beinahe zwangsläufig zu einem modularen Aufbau des gesamten Systems, d. h. der mobile Bauroboter soll aufgebaut sein aus einem Transportmodul, das für alle Transport- und Positionierabläufe zuständig ist, und einem Technologiemodul, welches die prozessabhängigen Technologien bereitstellt. Die Verbindung der beiden Einheiten wird durch standardisierte Schnittstellen gewährleistet. Wie Bild 42 veranschaulicht, können auf diese Weise zahlreiche Prozesse des Innenausbaus flexibel automatisiert werden.

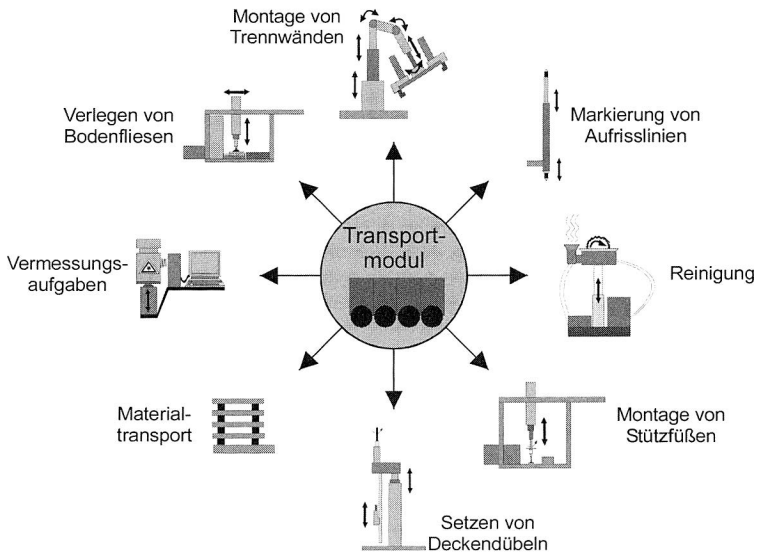


Bild 42: Ein universelles Transportmodul kann über standardisierte Schnittstellen mit prozessspezifischen Technologiemodulen erweitert werden [49]

Transportmodul

Der erforderliche robuste Aufbau des Technologiemoduls erfordert hohe Traglasten des Transportmoduls. Für die Aufgabe des Transportmoduls eignen sich prinzipiell fahrerlose Transportsysteme (FTS), jedoch müssen neue Wege hinsichtlich Navigation und Fortbewegungsfähigkeit beschritten werden. Die Fabrik-FTS werden meistens mittels Leitlinien oder mit fest vermessenen Referenzmarken geführt. Beide Möglichkeiten können nicht für eine Baustelle verwendet werden, da sie zu viel Installationsaufwand erfordern. Die FTS bewegen sich auf kleinen Gummirädern und sind nur für glatte Hallenböden geeignet. Wie oben erläutert, muss sich ein Bauroboter auf verschmutzten und rauen Betonböden bewegen können und benötigt ausgeprägte Rangiermöglichkeiten, um seine Zielpunkte möglichst schnell zu erreichen. Ein weiteres Problem sind

Installationen, wie z. B. Heizungsrohre, die sich bereits auf dem Fußboden befinden. Darüber hinaus darf das Transportmodul die oben angegebenen Abmessungen nicht überschreiten.

Eine grundlegende Frage bei der Realisierung des Transportmoduls ist somit die Art der Fortbewegung. In der Literatur (z. B. [116], [58], [41], [61], [78], [9]) werden verschiedene Lenk- und Fortbewegungsarten genannt. In Tabelle 2 werden vier Grundtypen anhand der Kriterien Bahngenaugkeit, Robustheit, Beweglichkeit auf Baustellen und Kosten bewertet.

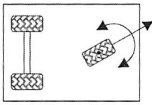
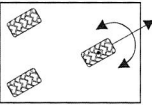
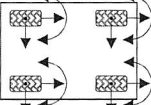
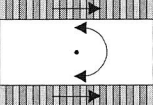
Beurteilungskriterien	Fahrzeug mit Dreiradlenkung	Fahrzeug mit Synchronlenkung	Omni-direktionales Fahrzeug	Kettenfahrzeug
				
Bahngenaugkeit	O	+	+	--
Robustheit	-	-	-	++
Kosten	++	+	--	O
Beweglichkeit	--	+	++	+

Tabelle 2: Entscheidungskriterien zur Beurteilung von vier Grundfahrzeugtypen
++ sehr positiv + positiv o befriedigend - negativ -- sehr negativ

Bezüglich der Kosten ist ein Fahrzeug mit Dreiradlenkung sehr günstig. Der Aufbau dieses Fahrzeugtyps ist im Vergleich zu den anderen Möglichkeiten sehr einfach, doch hat er entscheidende Nachteile in der Beweglichkeit. Das Fahrzeug kann sich normalerweise nicht um seinen Schwerpunkt drehen, sondern nur um den Schwerpunkt der Hinterachse. Fährt das Fahrzeug eine Schräge hinauf, verlagert sich der Schwerpunkt in Richtung der Hinterräder. Dies führt zu einem Verlust der Zugkraft.

Da der Einsatz des Fahrzeuges auf einer Baustelle geplant ist, müssen Unebenheiten des Bodens ohne Schwierigkeiten überwunden werden können. Dies ist der ausschlaggebende Vorteil des Kettenfahrzeugs gegenüber allen anderen Fahrzeugtypen. Es kann sich auf unebenem Terrain sicher bewegen, Steigungen und Gräben lassen sich leicht bewältigen. Jedoch hat der Einsatz von Ketten auch einen schwerwiegenden Nachteil: Ein Kettenfahrzeug lässt sich nur mithilfe von externen Positionsangaben exakt positionieren, da der Schlupf zwischen Ketten und Boden sehr groß ist und interne Sensoren (vgl. Kapitel 5) keine verlässlichen Angaben über den zurückgelegten Weg liefern können.

Exaktere Regelungs- und Steuermöglichkeiten sind beim Fahrzeug mit Synchronlenkung gegeben, weil sich alle Reifen sowohl in Richtung als auch in Geschwindigkeit gleich bewegen. Um diese Genauigkeit zu erreichen, ist ein komplexer Aufbau des Verbindungsgerüsts der Räder notwendig. Ebenfalls hoch ist der konstruktive und vor allem der finanzielle Aufwand für ein omnidirektionales Fahrzeug mit je einem Antrieb pro Reifen, wobei die Räder meistens Spezialanfertigungen sind. Andererseits werden dadurch die größte Wendigkeit und Manövrierfähigkeit innerhalb der Fahrzeuggruppen erreicht. Bedauerlicherweise gibt es kein für den Einsatz auf Baustellen genügend robustes, aber nicht zu teures, omnidirektionales Fahrzeug, so dass die Entscheidung zugunsten des Kettenfahrzeugs, welches auch einen hohen Grad an Bewegungsfreiheit besitzt, getroffen wird. Durch den gegenphasigen Antrieb der Ketten kann es sich um seinen Schwerpunkt drehen, und der Aufbau erfordert keine komplexe Lenkgeometrie. Das Problem der schlechten Regelbarkeit durch den Schlupf der Ketten spielt keine große Rolle, da die exakte Arbeitsposition immer von außen vorgegeben wird.

Nach einer gründlichen Marktrecherche wird ein kettengetriebenes Manipulatorfahrzeug der Firma Telerob ausgewählt, welches normalerweise für ferngesteuerte Wartungsarbeiten in gefährlicher Umgebung oder zur ferngesteuerten Entschärfung von Spreng- oder Brandeinrichtungen zum Einsatz kommt.

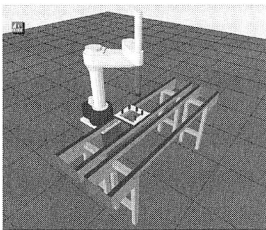
Die Abmessungen des Fahrzeugs entsprechen in etwa den Vorgaben, so dass kaum Modifizierungen notwendig werden. Lediglich zur Verbesserung der seitlichen Kippstabilität muss das Fahrzeug von 60 cm auf 80 cm verbreitert und zur Optimierung der Fahreigenschaften ein Getriebe mit einer Untersetzung von 1 : 104 (ursprünglich 1 : 80) eingebaut werden. Jede der beiden Ketten wird mit einem 24 V-Gleichstrommotor mit einem Nennstrom von 40 A angetrieben. Die Nenndrehzahl im Leerlauf beträgt 3000 U/min. Im Originalfahrzeug sind keine Möglichkeiten zur Erfassung des zurückgelegten Weges vorhanden, da es nur für einen ferngesteuerten Einsatz vorgesehen ist. Aus diesem Grund müssen an jedem Motor Inkrementalgeber (1 Umdrehung entspricht 500 Striche) angeflanscht werden, um eine Koppelnavigation aufbauen zu können. Die Spannungsversorgung erfolgt durch zwei in Serie geschaltete 12 V-Batterien. Um die Ausfallzeiten des Bauroboters durch Ladezeiten der Batterien zu vermeiden, wird zusätzlich ein Ladegerät installiert. Während des normalen Betriebes werden die Batterien über das Ladegerät und eine externe Stromversorgung ständig nachgeladen. Falls die externe Spannungsversorgung ausfallen sollte, können die Batterien den Steuerrechner des Fahrzeugs versorgen, um Datenverlust zu verhindern. Längere Fahrstrecken sind dann jedoch zu vermeiden, da sonst die Batterien zu schnell entladen werden würden. Mit den Batterien ist es allerdings möglich, das Fahrzeug von seinem Anlieferungsort auf der Baustelle an seinen Einsatzort zu bringen, ohne besondere Transportmittel, wie zum Beispiel Gabelstapler, in Anspruch nehmen zu müssen.

Da kein Fahrwerk das exakte Erreichen der Sollposition gewährleistet, muss zum einen eine Korrekturmöglichkeit der Werkzeugposition – entweder am Technologiemodul oder am Transportmodul – vorgesehen werden, welche ohne eine erneute Fahrbewegung des Transportmoduls durchgeführt werden kann.

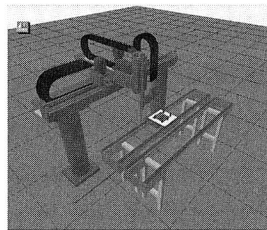
Zum anderen muss für die Möglichkeit einer autonomen Fahrt auf jeden Fall eine geeignete Hindernissensorik in Form von Laserscannern, Ultraschall- oder Infrarotsensoren oder einer Kombination aus diesen Systemen realisiert werden. Details zur Steuerung des Fahrzeugs finden sich in Kapitel 6.

Intelligentes Technologiemodul als Arbeitsplattform

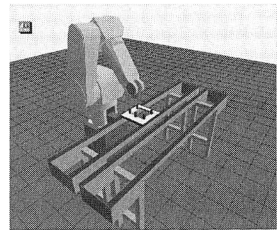
Das Technologiemodul lässt sich entweder als Roboterarm oder als speziell entwickelte Mechanik mit mindestens drei Freiheitsgraden ausführen. Der Einsatz eines Roboterarms mit einem in Bild 43 dargestellten Aufbau würde die Vorteile einer hohen Positionier- und Wiederholgenauigkeit und der völlig freien Erreichbarkeit jeder beliebigen Position in einem großen Arbeitsraum ermöglichen. Ausgereifte Steuerungssysteme beschleunigen die Entwicklungszeit und senken die Herstellungs- und Entwicklungskosten. Verbreitete Programmiersprachen für die einzelnen Roboter erlauben die schnelle Erstellung der Roboterprogramme durch geschulte Techniker. Nachteilig daran ist, dass das Verhältnis Traglast zu Eigengewicht der Industrieroboter sehr ungünstig ist, beispielsweise wiegt ein Kuka-Roboter mit einer Traglast von 30 kg ca. 930 kg [95].



Scara-Roboter



Portal-Roboter



Knickarm-Roboter

Bild 43: Vergleich der drei häufigsten Aufbauvarianten von Industrierobotern [37]

Die Steuerung des Roboters selbst wiegt je nach Leistungsbedarf der Antriebe des Roboters ebenfalls einige 100 kg. Dies würde bedeuten, dass das Transportmodul weit über 1000 kg Traglast aufweisen müsste und somit selbst entsprechend schwer werden würde. Die Flächenlast, die dann auf den Untergrund wirken würde, kann dann nur noch mit Methoden des Leichtbaus auf Werte gebracht werden, die für die Standardgeschossdecken im Rohbau bzw. bereits installierte Zwischenböden ausgelegt sind. So beträgt zum Beispiel die in der DIN 1055 (Lastannahmen für Bauten) geforderte minimale Tragfähigkeit von Rohbetondecken im Verwaltungsbau 300 kg/m^2 , nach Angaben von Baustatikern kann damit ein Roboter ca. 1500 kg schwer werden, ohne die Statik zu gefährden.

Die Versorgung der Steuerung der Industrieroboter erfordert normalerweise einen fünfphasigen 400 V-Drehstromanschluss. Die dazu erforderlichen Kabel sind zu schwer, als dass sie von einem mobilen System gezogen werden könnten.

Deshalb wird für den Aufbau des Technologiemoduls eine spezielle Mechanik vorgeschlagen. Da der Roboter einen Arbeitszyklus ohne Eingriffe von außen durchführen

soll, wird zum Einschlagen der Dübel das System nach Bild 38 verwendet. Die Verlängerung der Zykluszeit, die durch das Aufstecken der Hülse im Kunkel-System erforderlich wird, bzw. der komplexe mechanische Aufbau, den ein automatisiertes Aufstecken der Hülse erforderlich machen würde, sprechen bei der Konzeption des Roboters für das Hilti-System, obwohl dabei ein Werkzeugwechsel notwendig wird.

Das Arbeitsmodul (Technologiemodul) wird so konzipiert, dass es auf das oben beschriebene Transportmodul aufgesetzt werden kann. Wie bereits erläutert, dient das Transportmodul zur Grobpositionierung der Anlage. Die Aufgabe, die Werkzeuge auf Deckenhöhe zu bringen und eine Feinjustierung der Arbeitspositionen vorzunehmen, wird vom Technologiemodul auf der Basis der vom Fahrmodul gelieferten Werte übernommen. Die Steuerung des Technologiemoduls wird so ausgelegt, dass sie auch dann funktioniert, wenn das Technologiemodul nicht mit dem Transportmodul verbunden ist. Durch diese Modularität kann zum einen der Entwicklungsaufwand durch paralleles Arbeiten reduziert werden. Zum anderen kann das Technologiemodul auch dann noch bewegt werden, falls die Steuerung des Transportmoduls ausfallen sollte. Dazu wird ein Bedienfeld am Schaltschrank des Technologiemoduls angebracht, über das alle Komponenten des Arbeitsmoduls einzeln angesprochen und getestet werden können. Im zusammengebauten Zustand erfolgt die Bedienung des Arbeitsmoduls dann ausschließlich über das im Kapitel 6 beschriebene Bedienpult.

Der grobe Aufbau des Technologiemoduls ist in der untenstehenden Zeichnung ersichtlich und wird im Anschluss detailliert erläutert.

Wie bereits mehrfach erwähnt, soll das gesamte Gerät im Transportzustand nicht höher als 2 m und nicht breiter als 0,8 m sein, andernfalls sind mögliche Türöffnungen nicht mehr zu durchfahren. Auf der anderen Seite sollen aber Deckenhöhen von bis zu 3,6 m bearbeitet werden können. Dies hat zur Folge, dass in das Technologiemodul eine Hubmechanik integriert werden muss, die ein automatisches Hochfahren der Werkzeuge auf die benötigte Arbeitshöhe ermöglicht und darüber hinaus auch den Vorschub für die Bohrmaschine und den Bolzensetzer in z-Richtung übernehmen kann. Die komplette Hubanlage besteht aus vier Spindelhubgetrieben, die über Kegelradgetriebe und Verbindungswellen von einem Drehstrommotor angetrieben werden. Die sich drehenden Spindeln werden mit Spiralfederabdeckungen vor Eingriff bzw. Verschmutzung geschützt.

Da mit den Hubspindeln alleine die geforderte Arbeitshöhe nicht erreichbar ist, müssen Zwischenstücke, sog. H-Stücke, zwischen dem Arbeitstisch und den Spindelmuttern befestigt werden. Diese H-Stücke stehen in zwei verschiedenen Längen zur Verfügung. Damit können die in Tabelle 3 angegebenen Arbeitshöhen erreicht werden. Zum Einbau der Zwischenstücke wird der Arbeitstisch ganz hoch gefahren und mit zwei Auflagengangen arretiert. Die Spindelmuttern können nun abgesenkt und die H-Stücke eingesetzt werden. Durch Hochfahren der Spindelmuttern kann der Arbeitstisch wieder aufgesetzt werden.

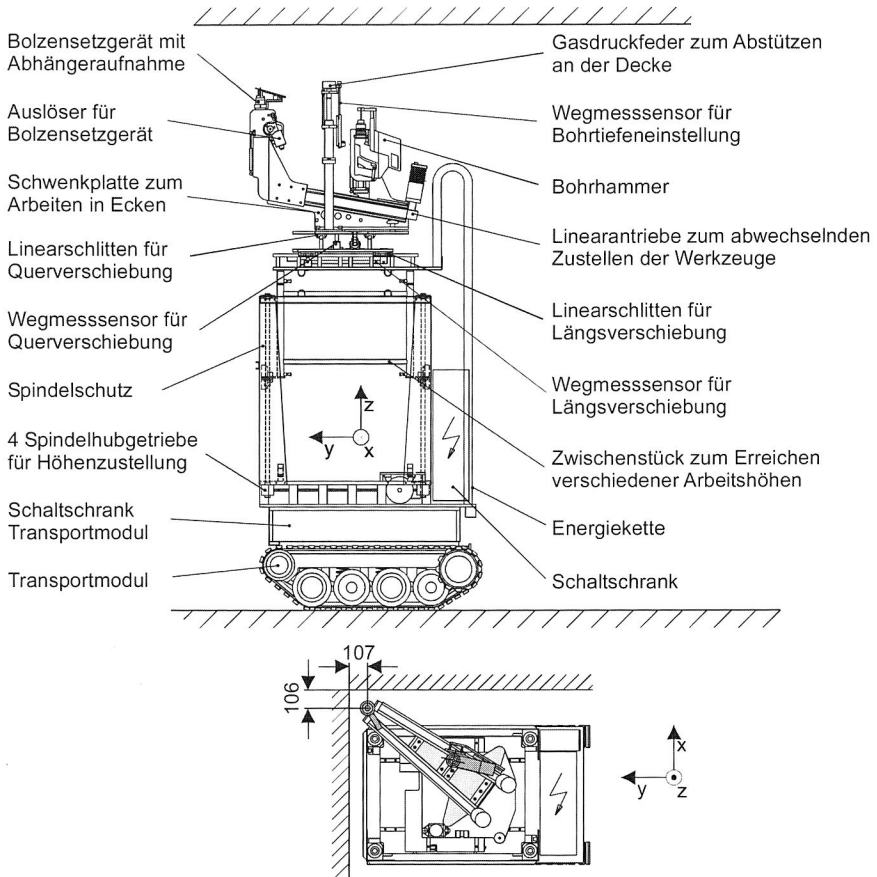


Bild 44: Aufbau des Technologiemoduls „Deckendübler“

Verwendete Adapter	Arbeitsbereich
Keine	2300 mm .. 2800 mm
Länge 1	2500 mm .. 3300 mm
Länge 2	2900 mm .. 3600 mm

Tabelle 3: Erreichbare Arbeitshöhen für unterschiedliche H-Stücke

Hiermit wird der vertikale Freiheitsgrad des Arbeitsmoduls in zwei Stufen realisiert (zweistufiges Heben und Senken), indem Werkzeugträger und Hubvorrichtung getrennt ausgeführt sind. Somit kann durch einen manuellen Eingriff (Entfernung der H-Stücke) die Arbeitshöhe des Werkzeugträgers in der Transportstellung unter die Höhe der Spindeln gebracht und die geforderten Abmessungen realisiert werden.

Der Arbeitstisch selbst besteht aus einem Kreutztisch und einer Schwenkplatte, auf der schließlich die Werkzeuge befestigt sind. Der Kreutztisch ermöglicht eine Längs- und Querverschiebung der Schwenkplatte zum Ausgleich von Positionsfehlern, die zum einen durch absolute Fehler in der Positionierung des gesamten Gerätes und zum anderen durch die Neigung des Gerätes entstehen. Die Toleranzen, welche bei der Neigung des Bodens auftreten können, gewährleisten zwar eine relativ genaue Positionierung des Roboters am Boden, beeinflussen jedoch die Achse des Montagewerkzeugs. So hat schon eine Neigung des Bodens von 0,6 Grad, bei einer Deckenhöhe von 3,6 Meter, einen horizontalen Versatz des Setzwerkzeugs von 3,7 cm zur Folge.

An jeder Achse des Kreuzzisches wird eine Wegmesseinheit angebracht, um die vom Transportmodul errechneten Positionen exakt anfahren zu können. Die Schwenkplatte fungiert im Wesentlichen als Werkzeugträger. Durch das Schwenken um einen definierten Drehpol kann erreicht werden, dass sich die Werkzeuge in den drei möglichen Positionen in der Arbeitsstellung jeweils auf gleicher Höhe befinden (siehe Draufsicht im Bild 44). Dadurch können auch Arbeitspunkte im Abstand von nur 10 cm von Ecken erreicht werden. Aufbauend auf der Schwenkplatte befinden sich zwei schräg angeordnete Linearantriebe für die abwechselnde Zustellung der Werkzeuge. Mit der v-förmigen Anordnung wird sichergestellt, dass sich beide Werkzeuge (Bohrmaschine mit integrierter Staubabsaugung und Bolzensetzgerät) in der Arbeitsstellung mit ihren Achsen im selben Arbeitspunkt treffen. Durch die Schrägstellung wird gewährleistet, dass sich nur das benötigte Werkzeug im Eingriff befindet. Es ist daher kein separater z-Hub erforderlich, was Kosten und zusätzliches Gewicht spart.

Bei den Werkzeugen handelt es sich um handelsübliche Standardwerkzeuge der Firma HILTI. Dadurch wird im Schadensfall die Ausfallzeit verkürzt, da die Geräte nahezu überall erhältlich sind und somit schnell ersetzt werden können. Die Werkzeuge selbst sind mit Linearführungen in z-Richtung verschiebbar auf den Linearantrieben befestigt. Bei beiden Werkzeugen wird die Zustellung in z-Richtung mit Gasdruckfedern realisiert. Die Bohrtiefe wird über einen Wegmesssensor, der an einem Stempel befestigt ist, eingestellt. Über die Gasdruckfeder erfolgt dann die Zustellung bis zum Erreichen der Bohrtiefe.

Beim Bolzensetzgerät wird über einen bestimmten Weg der Gasdruckfeder in z-Richtung die benötigte Druckkraft aufgebracht, um den Schuss auslösen zu können. Dies geschieht über einen kleinen Motor mit exzentrisch angebrachter Kurvenrolle. Das Bolzensetzgerät selbst ist nochmals auf einer Schiebeplatte gelagert, um im Falle des Nichtauslösens des Abzuges ein Ausweichen des Werkzeuges zu ermöglichen und somit eine Zerstörung des Abzuges durch die Kurvenrolle zu verhindern. Des Weiteren

ist am Bolzensetzgerät eine Abhängeraufnahme mit Federbolzen zur Führung der Abhänger angeschraubt.

Der oben erwähnte Stempel besteht aus einer großen Gasdruckfeder mit aufgesetztem Gummielement. An der Gasdruckfeder ist ein Wegmesssensor angebracht. Dieser regelt über die Kommunikation mit der Steuerung die Zustellung in z-Richtung mit den Hubspindeln und somit auch das nötige Einfedern der Werkzeuge. Der Stempel kann mit zwei Klemmschrauben jeweils auf die Gegenseite versetzt werden, falls die Schwenkplatte gedreht werden soll. Seine Hauptaufgabe ist das Verspannen der ganzen Vorrichtung zwischen Boden und Decke, um diese gegen Umfallen bzw. Kippen zu sichern und damit auch ein Treffen der beiden Werkzeugmittelachsen im Arbeitspunkt zu gewährleisten.

An das Technologiemodul kann außerdem eine Arbeitsplattform angehängt werden, auf der ein Monteur Platz findet. Dies hat den Vorteil, dass bei diesem Prototypen auf eine sehr aufwändige Entwicklung von Magazinen für die Abhänger und die Bolzen verzichtet werden kann, da das Beladen der Werkzeuge nun vom Monteur übernommen wird. Außerdem übernimmt der Arbeiter von diesem Platz aus die Bedienung des Transportmoduls über das bereits angesprochene Bedienpult. Damit wird auch sicherheitstechnischen Aspekten Rechnung getragen, da das gesamte Gerät vom Bediener gesteuert wird und nicht als autonomes Fahrzeug bewertet werden muss. In weiteren Ausbaustufen können allerdings Magazine angebracht und ein autonomes Fahren realisiert werden.

Bewertung des Dübelroboters

Nachteilig an der Umsetzung eines derartigen Robotersystems sind die hohen Kosten, die sowohl für die Entwicklung als auch für die Herstellung aufgebracht werden müssen. Die hohen Kosten werden es nur wenigen Unternehmen ermöglichen, derartige Robotersysteme einzusetzen, d. h. es sind keine großen Stückzahlen für mögliche Seriengeräte zu erwarten. Erst im Praxiseinsatz wird es sich zeigen, ob mit einem derartigen System ein wirtschaftlicher Vorteil erzielt werden kann. Ein weiteres Problem kann dadurch entstehen, dass noch keinerlei Erfahrungen über optimale Einsatzbedingungen von Robotern auf Baustellen vorliegen, d. h. die Baustelle selbst kann noch nicht optimal vorbereitet werden.

Vorteilhaft dagegen ist, dass durch eine gezielte Automatisierung eine Erhöhung der gefertigten Qualität erreicht wird. Die ermüdenden und daher fehlerträchtigen Arbeiten werden von den Monteuren hin zur Maschine verlagert und können durch die vorhandene Sensorik des Roboters besser überwacht und dokumentiert werden. Gleichzeitig können unter idealen Einsatzbedingungen sowohl die Bauzeit als auch die Baukosten reduziert werden. Die Handwerker werden eine deutliche Humanisierung ihrer Tätigkeiten erfahren. So kann mit einer Reduzierung des Krankenstandes in dieser Branche gerechnet werden und zugleich können die hohen Ausfallkosten in dieser Branche gesenkt werden. Darüber hinaus wird das Anforderungsprofil der Arbeiter zu einer höheren Qualifikation hin gehen, da die komplexen und technisch anspruchsvollen Maschi-

nen qualifizierte Bediener und geschultes Servicepersonal erfordern. Dies wird den Bauberufen wieder zu einem gesteigerten Ansehen verhelfen und den sich abzeichnenden Mangel an Facharbeitern mindern können [46].

Das Konzept des Dübelroboters stellt damit insgesamt zwar den aufwändigsten und anspruchsvollsten Vorschlag, zugleich aber auch den technisch ausgereiftesten und fortschrittlichsten Entwurf dar. Da der Nutzen in dieser Bewertung den Aufwand überwiegt, wird dieses Konzept realisiert.

In den nächsten beiden Kapiteln werden zum einen der Themenbereich der Positionsbestimmung für das Transportmodul behandelt und zum anderen die Realisierung wesentlicher Komponenten des Steuerungssystems des Dübelroboters besprochen.

5 Möglichkeiten der Positionsbestimmung für mobile Roboter am Bau

Ein wesentliches Merkmal mobiler Roboter ist deren Fähigkeit, sich von einem gegebenen Startpunkt zu einem Zielpunkt bewegen zu können. Dazu benötigt das Steuerungssystem des Roboters eine Komponente zur Bestimmung seiner Position und eine zur Planung des Weges zwischen Start- und Zielpunkt. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass ein Positioniersystem für mobile Roboter im Bauwesen ganz spezielle Anforderungen erfüllen muss. Diese werden im Folgenden zuerst erläutert. Danach werden allgemeine Messverfahren zur Positionsbestimmung vorgestellt. Abschließend wird für das Verfahren zur optischen Bahnführung ein Lösungsvorschlag unterbreitet.

5.1 Problemstellen der Positionsbestimmung von Baurobotern

Das Positioniersystem soll in der Lage sein, Position und Orientierung eines mobilen Roboters in einem bekannten realen Raum zu bestimmen und diese Daten der Fahrzeugsteuerung zur Weiterverarbeitung zu übergeben. Problematisch dabei ist, dass normalerweise nicht auf Pläne des Raumes in CAD-Form zurückgegriffen werden kann, da die zulässigen Toleranzen im Hochbau nach DIN 18202 zu groß sind, um diese Pläne als Grundlage für eine exakte Positionierung zu verwenden bzw. oftmals gar keine CAD-Dateien der Pläne existieren. Falls dennoch kartengestützte Positionierungsverfahren verwendet werden sollen, ist unbedingt ein Abgleich zwischen den geplanten und den realen Abmessungen des Arbeitsraums notwendig. Die Reichweite des Systems sollte so ausgelegt sein, dass Räume in der Größenordnung von 50 m x 50 m abgedeckt werden können. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung sollte besser als ± 3 mm, der maximale Winkelfehler der Orientierung sollte kleiner als $0,5^\circ$ sein. Für normale Montagetätigkeiten im Innenausbau sind diese Werte selten gefordert, es muss jedoch beispielsweise bei der Montage von abgehängten Decken damit gerechnet werden, dass sichtbare Montagebohrungen mit dieser Genauigkeit angebracht werden müssen. Während der Bewegung des Roboters zwischen zwei Arbeitspunkten sind jedoch auch größere Messfehler tolerierbar.

Die Aufgaben des Bedieners sollten sich ausschließlich auf die notwendige Vorbereitung des Arbeitsraumes und die Installation sowie die Inbetriebsetzung des Systems beschränken. Dabei ist zu beachten, dass die Bedienung durch Baufacharbeiter möglich sein soll, es darf jedoch keine darüber hinausgehende Qualifikation (z. B. im Bereich Vermessungstechnik) notwendig sein.

Wegen des vorrangigen Einsatzes des Robotersystems für den Innenausbau scheiden Systeme, die ausschließlich für den Außeneinsatz gedacht sind (z. B. Satellitennavigation) von vornherein aus. In einem späteren Ausbaustadium ist jedoch auch ein Einsatz im Freien denkbar, weshalb ein modularer Aufbau des Systems aus einem austauschbaren Positionsmodul mit standardisierter Schnittstelle und einem festen Modul zur Datenverarbeitung, Wegeplanung und Steuerung wünschenswert wäre.

Da es sich bei dem Robotersystem um ein Kettenfahrzeug handelt, sind rein odometrische Verfahren, speziell wenn die Encoder direkt an den Antrieben angebracht sind, ungeeignet. Aufgrund des erfahrungsgemäß hohen Schlupfes der Ketten wären die zu erwartenden Genauigkeiten weit jenseits der Toleranzgrenze. Systeme mit eigenem Laufrad, an welchem der Encoder angebracht ist (so genannte Trailer) könnten hier zu einer Verbesserung der Genauigkeit führen, sind jedoch auch nur zur groben Navigation und Positionsschätzung zwischen zwei genau bestimmten Positionen geeignet.

Die Qualität der Positionsdaten ergibt sich vor allem aus der Genauigkeit und Frequenz der Messungen. Eine grobe Positionierung des Roboters soll auf 25 cm genau möglich sein, woraus sich bei einer maximalen Fahrgeschwindigkeit des Roboters von 1 m/s eine minimale Messfrequenz von 4 Hz während der Betriebsphase ergibt. Die Kalibrierung und Bestimmung der Startposition des Systems werden während der Vorbereitungsphase durchgeführt, weshalb dafür auch ein längerer Zeitraum toleriert werden kann.

Messprinzip:	Referenzmarken, Referenzstationen ideal: keine Zusatzinstallationen keine reinen odometrische Verfahren keine satellitengestützten Verfahren
Reichweite:	ca. 50 m
Umgebung:	Bauraum mit Toleranzen nach DIN 18202
Genauigkeit:	Position: max. ± 3 mm radialer Abstand von Sollposition Orientierung: max. 0.5° Winkelfehler
Messfrequenz:	min. 4 Hz während Betriebsphase (Folgepositionierung) Erstpositionierung/Kalibrierung max. 60 min
Inbetriebnahme:	Einfach, durch Baufacharbeiter Vorbereitungszeit: max. 2 h für 50 x 50 m ²
Bedienung:	Einfach, durch Baufacharbeiter Geringer Schulungsaufwand
Robustheit:	Tolerant gegen Schwingungen und Vibrationen unempfindlich gegen Baustelleneinflüsse (Staub, Feuchtigkeit, Stöße, ...)
Schnittstellen:	RS 232 oder andere Standardschnittstellen
Ausgabedaten:	Position: min. 2-dim. Koordinaten (x/y) bzgl. definierten Ursprung Orientierung: Drehwinkel bzgl. x-Achse

Tabelle 4: Anforderungsdefinition an ein Positioniersystem für autonome Roboter im Baustellenwesen

Um Positionsbestimmungen von konstant hoher Qualität zu erhalten, müssen die Messergebnisse weitgehend unabhängig von allen in einer Baustellenumgebung vorhandenen Einflüssen, wie zum Beispiel Feuchtigkeit, Staub oder Fahrzeugvibrationen, sein.

Als Ausgaben des Positioniersystems sollen die x -/ y -Koordinaten des Referenzpunktes am Roboter in der Grundebene der Arbeitsumgebung, sowie seine Orientierung als Winkel zwischen der x -Achse des Roboters und der x -Achse des Koordinatensystems der Arbeitsumgebung bereitgestellt werden.

Zur Kopplung des Meßsystems an das Wegeplanungs- und Steuerungsmodul sind Standardschnittstellen erforderlich. Als Hardwareschnittstelle bietet eine serielle Schnittstelle nach der RS232-Spezifikation die größte Flexibilität, da nahezu alle gängigen Computersysteme über diese Anschlussmöglichkeit verfügen.

5.2 Überblick über Verfahren der Positionsbestimmung

Die Einteilung der verschiedenen Navigationsverfahren zur Positionsbestimmung und Bahnführung von autonomen mobilen Robotern wurde an das von Drunk in [29] entwickelte Schema angelehnt. Dabei wird primär zwischen internen und externen Verfahren unterschieden, die einzelnen Möglichkeiten werden im Folgenden kurz erläutert.

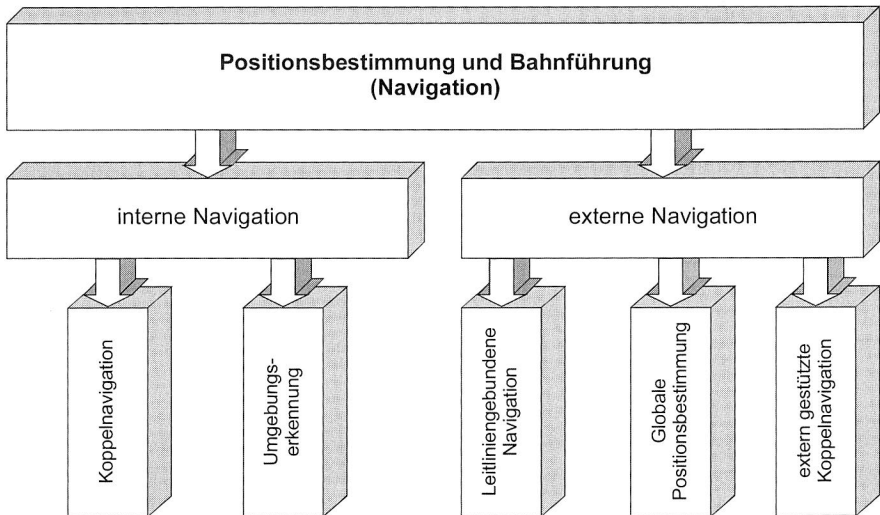


Bild 45: Methoden der Positionsbestimmung und Bahnführung [29]

Allen aufgeführten Verfahren ist gemeinsam, dass die Positionsangaben nur relativ bezüglich eines definierten Referenzpunktes erfolgen. Einzige Ausnahme ist die globale Positionsbestimmung über Satellitensignale, die hier nicht näher betrachtet werden soll, da die Satellitensignale im Innenbereich nicht störungsfrei empfangen werden können.

5.2.1 Interne Verfahren zur Positionsbestimmung

Interne Navigationsverfahren sind solche, die ohne eine Vorbereitung der Umgebung mit Magneten, Leitdrähten, Reflektoren oder ähnlichen Navigationshilfen auskommen.

Innerhalb dieser Kategorie wird weiter unterschieden zwischen Koppelnavigation und Umgebungserkennung, wobei auch eine Kombination beider Verfahren möglich ist.

Koppelnavigation

Die einfachste Methode zur Positionsbestimmung ist die so genannte Koppelnavigation, auch Odometrie genannt. Odometrische Verfahren messen die Bewegung durch direkt an den Antrieben oder an zusätzlich installierten Messachsen angebrachten Drehgebern (Odometer bzw. Encoder). Die Referenzierung einer Bewegungsachse kann nur mithilfe von externen Lagesensoren erfolgen, da die Drehbewegung ausschließlich über die zyklischen Pulse der Drehgeber ermittelt werden kann und die Odometer keine Informationen über die absolute Lage der Achse ausgeben können.

Darüber hinaus werden zur Koppelnavigation auch Verfahren der Trägheitsnavigation verwendet. Dieses Prinzip basiert auf der Messung der Krafteinwirkung auf einen Körper, d. h. es wird eine zeitabhängige Größe wie Geschwindigkeitsänderung oder Beschleunigung erfasst. Zur Berechnung des eigentlichen Ergebnisses werden diese Messwerte einmal (Geschwindigkeit), bzw. zweimal (Beschleunigung) integriert. Als Sensoren kommen Akzelerometer und Gyroskope zum Einsatz.

Im praktischen Einsatz entsteht ein Messfehler durch die unpräzise Kraftübertragung der Räder auf den Untergrund. Wird ein Drehgeber an einer Antriebsachse angebracht, so wird deren Umdrehung zwar korrekt gemessen, es ist aber nicht sichergestellt, dass sich das Fahrzeug proportional zu dieser Umdrehung fortbewegt. Insbesondere bei Kurvenfahrten oder schlechter Bodenhaftung wird der gemessene Weg vom tatsächlich zurückgelegten Weg möglicherweise stark abweichen. Diesen Fehler bezeichnet man als Schlupffehler. Abhilfe kann das Anbringen mehrerer Drehgeber an verschiedenen Achsen oder ein eigenes Messrad zusätzlich am Fahrzeug schaffen. Eine genaue Betrachtung zu Wegberechnungen bei odometrischen Verfahren bezogen auf unterschiedliche Antriebskonzepte findet sich in [20].

Ein entscheidendes Problem dieser Verfahren ist die Akkumulation der genannten Fehler über den zurückgelegten Weg. Längere Bewegungen ohne zwischenzeitlich erfolgtes externes Referenzieren werden dadurch zwangsläufig immer ungenauer. Aufgrund dieser Messfehler sind die gewünschten Genauigkeiten der Position von ± 3 mm auf eine Länge von 50 m nicht zu realisieren. Zusätzlich werden durch die auf Baustellen typischerweise vorhandenen Unebenheiten und Verschmutzungen der Böden die Genauigkeiten der Bewegungsgrößen weiter verschlechtert. Die Koppelnavigation ist im Bauroboter somit nur als Ergänzung eines der im Folgenden beschriebenen Navigationsverfahren zu sehen.

Umgebungserkennung ohne externe Ortsmarken

Die Erkennung der Umgebungssituation mit Sensoren als Grundlage für die Positionsbestimmung von autonomen mobilen Robotern ist aus Sicht des erforderlichen technischen Aufwandes, der zu erwartenden Kosten und der benötigten Rechenzeit die mit

Abstand aufwändigste Lösung. Im Gegenzug dafür steht aber ein modellbasiertes Navigationsverfahren zur Verfügung, welches eine Positionsbestimmung unabhängig von der zum Einsatz kommenden Transporttechnologie und ohne aufwändige Installationen an der Umgebung ermöglicht. Man kann dieses Verfahren in die Untergruppen der bildverarbeitenden und der abstandsmessenden (optisch, akustisch, ...) Umgebungserkennung unterteilen.



Bild 46: Verschiedene Sensorvarianten zur Umgebungserkennung ohne externe Ortsmarken

Zur Bestimmung der Position wird vom Navigationssystem anhand von Sensorinformationen eine lokale Karte erzeugt. Diese wird mit einer gespeicherten Karte, der so genannten globalen Karte, in einem Korrelationsprozess verglichen und liefert so die Positionsinformation. Die globale Karte kann entweder durch Vermessen der Umgebung vor dem Einsatz des Navigationssystems oder durch „Kennen lernen“ der Umgebung in Form von Auswertung und Speicherung der Sensordaten während der Navigation erzeugt werden.

Als Sensorinformation zum Erstellen der lokalen Karte werden hauptsächlich Entfernung- und Richtungsmessungen herangezogen, obgleich auch der Einsatz von Kameras und bildverarbeitenden Systemen möglich ist. In diesem Fall ist die ortsmarkenfreie Navigation gewissermaßen als Erweiterung der Navigation mit natürlichen Ortsmarken zu sehen, wobei als Ortsmarken nicht mehr nur einzelne Elemente der Umgebung, sondern die gesamte Umgebung verstanden werden.

Obwohl dieses Verfahren keine hoch genauen Positionsbestimmungen erlaubt, nimmt man den sehr aufwändigen und rechenintensiven Lern- und Korrelationsprozess in Kauf, da damit eine Möglichkeit gegeben ist, sich auch in unbekannten Umgebungen zurechtzufinden und echte Autonomie zu realisieren. So spielt zum Beispiel bei Reinigungsrobotern die Genauigkeit eine relativ kleine Rolle, hier ist vorrangig, dass alle Bereiche flächendeckend abgefahren werden.

Es lässt sich festhalten, dass keines der internen Verfahren geeignet ist, einen mobilen Bauroboter mit den in Tabelle 4 geforderten Werten zu positionieren. Dennoch werden die Methoden der Koppelnavigation eingesetzt, um eine Grobpositionierung des Roboters zwischen zwei externen Positionsmessungen zu ermöglichen. Die Technik der abstandsmessenden Umgebungserkennung eignet sich zur Vermeidung von Kollisionen

mit Hindernissen oder auch zum Umfahren von Objekten. Somit muss zur Erreichung der in Tabelle 4 angegebenen Kennwerte ein externes Positionierungsverfahren gewählt werden.

5.2.2 Externe Verfahren zur Positionsbestimmung

Den externen Navigationsverfahren ist gemeinsam, dass stationäre Einrichtungen in Form von fest verlegten Leitlinien, fest installierten Erkennungsmarken oder Peilsendern benötigt werden, was zwangsläufig die Flexibilität in der Spurführung einschränkt und zu einem erhöhten Aufwand und damit verbunden zu höheren Kosten führt. Unterschieden wird zwischen leitliniengebundener Navigation, der extern gestützten Koppelnavigation sowie der globalen Positionsbestimmung.

Leitliniengebundene Navigation

Bei leitliniengebundenen Navigationssystemen werden die Fahrzeuge entlang mechanischen, induktiven, kapazitiv magnetischen oder optischen Leitlinien auf vorgegebenen Bahnen durch den Raum geführt. Da der genaue Verlauf der Leitlinien bekannt ist, genügt zur exakten Positionsbestimmung des Fahrzeuges die Bestimmung der aktuellen Lage entlang der Leitlinie. Diese Position lässt sich am einfachsten durch die bereits beschriebenen Verfahren der Odometrie oder mit speziell markierten Haltepunkten (Transponder) oder bei hohen Anforderungen an die Genauigkeit auch mit einer Abstandsmessung entlang der Leitlinie, zum Beispiel mit Laser-Entfernungsmessern, bestimmen.

Den leitliniengebundenen Verfahren ist gemeinsam, dass mit einem relativ hohen Installationsaufwand die Leitlinien entlang der abzufahrenden Bahn anzubringen sind. Eine spätere Veränderung des einmal gewählten Bahnverlaufs ist mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Weiterhin ist eine freie Bewegung der Fahrzeuge im Raum nicht möglich.

Eine Verringerung des Installationsaufwandes stellen optische Bahnführungen mit aufgeklebten, aufgezeichneten oder aufgesprützten Leitlinien nach unterschiedlichen physikalischen Prinzipien dar. Für diese passiven Verfahren kommen reflektierende Bänder, ein- oder mehrstreifige Farbbänder sowie aufgezeichnete oder aufgesprühte Lumineszenzstreifen zum Einsatz. Ein nicht zu vernachlässigender Nachteil dieser passiven optischen Verfahren ist allerdings die hohe Empfindlichkeit gegenüber Licht- und Staubeinflüssen. Zu den Verfahren der optischen Bahnführung zählt auch das später erläuterte Bildverarbeitungssystem.

Eine Weiterentwicklung zu mehr Flexibilität und Zuverlässigkeit bieten die aktiven optischen Verfahren unter Verwendung von Lasern. Zur Navigation mit einem Laser-Leitstrahle wird das Fahrzeug mit einem positionsempfindlichen Detektor (PSD-Element) ausgestattet und auf einer linearen Bahn bewegt [96]. Als Referenz seiner Bahn dient ein Laserstrahl, dessen Zielpunkt auf dem PSD detektiert wird. Ein Prozessor bestimmt die Position des Laserflecks auf dem PSD-Element und berechnet daraus

die Lage des Fahrzeugs zur Sollbahn. Die dabei ermittelte Abweichung wird an einer Schnittstelle der Fahrzeugsteuerung zur Bahnkorrektur zur Verfügung gestellt. Alternativ könnte auch ein Rotationslaser verwendet werden, welcher eine vertikale Leitebene erzeugt. Mithilfe von IR-Dioden kann dieser Strahl erfasst und ausgewertet werden. Zur exakten Positionierung entlang der Linie ist dann in beiden Fällen noch eine zusätzliche Abstandsmessung in Richtung der Linie erforderlich. Dies kann beispielsweise mit handelsüblichen Entfernungsmessern auf Laserbasis erfolgen.

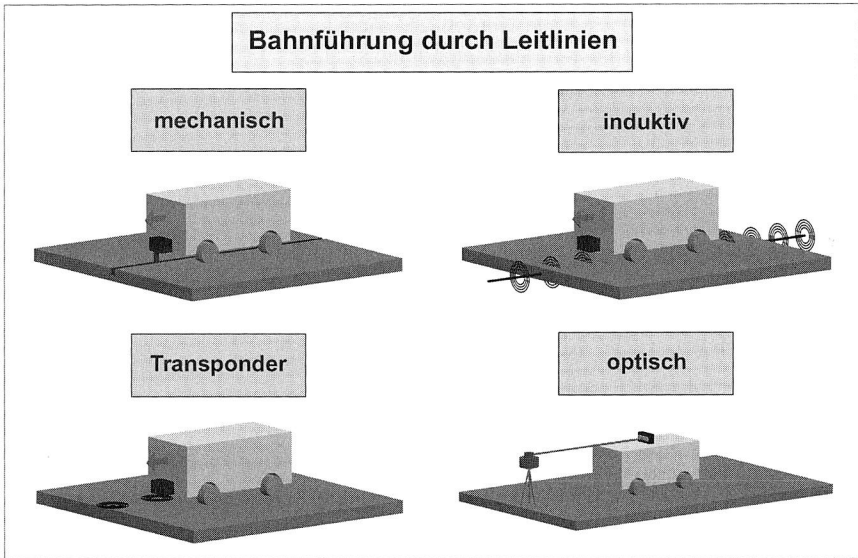


Bild 47: Verfahren der Positionierung für leitliniengebundene Fahrzeuge [93]

Extern gestützte Koppelnavigation

Im Gegensatz zu den Verfahren der internen Umgebungserkennung erfolgt die Stützpunktmessung im Fall der externen Umgebungserkennung gegenüber flächen-, linien- oder punktförmigen passiven Marken, die als Navigationshilfen in der Umgebung installiert werden [29]. Man unterscheidet zwischen dem Verfahren der Navigation mit Laserscannern sowie dem Navigationsverfahren auf Basis von Kamerasystemen.

Bei den kamerabasierten Koppelnavigationsverfahren nehmen am Roboter montierte CCD-Kameras die Umgebung permanent auf [92]. Um die gesamte Umgebung mit nur einer Kamera erfassen zu können, kann diese über eine spiegelnde Halbkugel als sphärisches Kamerabild aufgenommen werden [94].

Aus den gewonnenen Bildern werden vom Bordrechner die Bildmuster extrahiert, die den zuvor an bekannten Positionen angebrachten Landmarken entsprechen. Aufgrund der Größe und Geometrie der erkannten Muster können der Abstand des Roboters zur

Marke sowie der Sichtwinkel berechnet werden. In Verbindung mit den Daten der Odometrie wird eine exakte Positionsbestimmung durch Triangulation ermöglicht.

Die erzielbaren Genauigkeiten dieses Verfahrens sind von der maximalen Bildauflösung des CCD-Kameramoduls in Verbindung mit der gewählten Kameraoptik und somit direkt vom erfassten Umgebungsausschnitt abhängig. Die in Tabelle 4 geforderten Werte lassen sich vor allem im Hinblick auf Verarbeitungsgeschwindigkeit und Genauigkeit mit einem vertretbaren Aufwand nicht erreichen.

Neben Bildverarbeitungssystemen werden vor allem Laserscanner verwendet, welche künstliche Ortsmarken abtasten. Das Grundprinzip dieses Messverfahrens beruht auf der Berechnung der Winkel eines bestimmten Koordinatensystems zu Ortsmarken mit exakt bekannten Positionen.

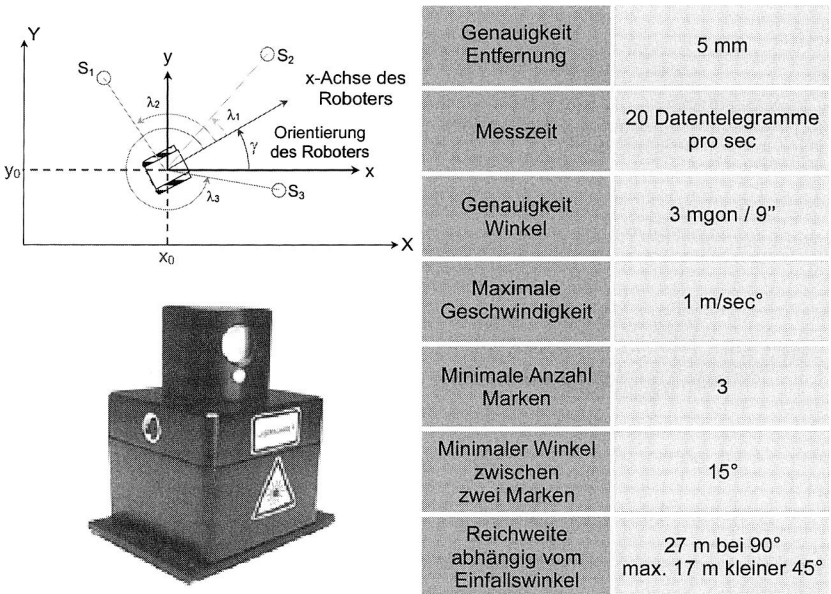


Bild 48: Triangulationsproblem (nach [20], adaptiert) und Messkopf der Firma Götting zur Erfassung von externen Ortsmarken [81] mit typischen technischen Daten

Im Raum sind eine Reihe von Ortsmarken verteilt, deren Positionen genau bekannt sind. Das Navigationssystem ermittelt die Position des Roboters bezogen auf die einzelnen Ortsmarken und kann anhand deren fester Koordinaten die Roboterposition berechnen. Im Gegensatz zu den Funkmessverfahren (z. B. GPS) wird die Position nicht durch Bestimmung der Entfernung zu den einzelnen Ortsmarken (Satelliten) errechnet, sondern Bild 48 folgend durch Messung der Winkel λ_1 , λ_2 und λ_3 zwischen der x-Achse des Roboters und den Ortsmarken S_1 , S_2 und S_3 mit anschließender Triangulation. Eine

ausführlichere Diskussion der mathematischen Vorgehensweisen bestimmter Triangulationsmethoden findet sich in [51]. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass im Rahmen der Messung die Koordinaten und gleichzeitig die Orientierung des Roboters bestimmt werden können.

Der technische Aufbau besteht aus einer rotierenden Lasereinheit, deren Basis fest am Roboter installiert ist und aus Ortsmarken, die vom Benutzer im Raum zu installieren sind. Diese müssen durch eine besondere Geometrie oder zusätzliche Kennzeichnungen identifizierbar sein. Möglich sind hier z. B. Ortsmarken mit zusätzlich aufgedruckten Strichcodes oder eine bestimmte Anordnung der reflektierenden Bereiche.

Je nach Sichtbedingungen in der Arbeitsumgebung kann die Genauigkeit der ermittelten Position stark variieren. Aufgrund der Auflösung des optischen Systems (Lasergenauigkeit, Linsen, Sensorsystem) nimmt die Genauigkeit generell mit zunehmender Entfernung zwischen Roboter und Ortsmarke ab. Auch die Lichtverhältnisse können die Zuverlässigkeit des Systems negativ beeinträchtigen.

Da die so induzierten zufälligen Fehler nicht durch einen Korrekturwert bereinigt werden können, verwendet man mehr als die drei theoretisch notwendigen Ortsmarken zur Positionsbestimmung. Mit verschiedenen Gruppen dieser Ortsmarken werden durch Triangulation verschiedene mögliche Positionen des Roboters bestimmt. Aus diesen möglichen Positionen kann eine Schätzung über die tatsächliche Position des Roboters angegeben werden. Durch geeignete Auswahl und Gewichtung der einzelnen Messungen kann der Positionsfehler sukzessive verringert werden. Zum Beispiel erreicht der gemäß diesem Prinzip arbeitende Algorithmus „Position Estimator“ nach [8] in einer Simulation mit 20 Ortsmarken, von denen 18 mit einem Winkelfehler von 1 % und zwei mit einem Winkelfehler von 10 % gemessen werden, eine Genauigkeit von 6,5 cm in einem Arbeitsraum von 10 m x 10 m.

Da die Navigation mit künstlichen Ortsmarken eine intensive und exakte Vorbereitung des Arbeitsraumes voraussetzt, bietet sich der Einsatz nur in begrenzten, genau bekannten Umgebungen an, in denen auch alle Punkte, an denen Ortsmarken angebracht werden müssen, zugänglich sind. Die Qualität der Vorbereitung wirkt sich dabei direkt auf die erreichbare Positionsgenauigkeit aus und ist somit als wichtigster Einflussfaktor für Fehlerbetrachtungen zu sehen.

Im praktischen Einsatz in einem geschlossenen Raum, der die Anbringung von Ortsmarken nur an den umgebenden Wänden erlaubt, können die oben angeführten geometrischen Beschränkungen zu toten Bereichen führen, in denen keine zuverlässige Positionsbestimmung möglich ist. Somit lässt sich auch mit einer durch extern angebrachte Ortsmarken gestützten Koppelnavigation das Anforderungsprofil nicht vollständig erfüllen.

Eine weitere Möglichkeit der externen Positionsbestimmung bieten die so genannten Laser-Tachymeter. Der hauptsächliche Einsatzbereich dieser Systeme liegt in der Landschafts- und Baustellenvermessung. Neuere Konzepte erlauben die Führung von Baumaschinen mithilfe der vom Tachymeter gelieferten Positionsdaten [99]. Zur Unter-

stützung bieten einige Hersteller auch die Möglichkeit, über GPS-Signale eine absolute Positionierung des Standortes der Tachymeter-Station vorzunehmen, um die Messwerte so in einem globalen Koordinatensystem angeben zu können.

Die Positionsbestimmung mit Tachymeter-Systemen basiert auf der Messung der Distanz zu einem Reflektor (einfache Folien oder Prismen) und der Bestimmung des Winkels relativ oder absolut zu einer bestimmten Referenzebene. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, ein ATR-System (Automatic Target Recognition) zu integrieren. Diese Option registriert den reflektierten Laserstrahl mit einem Videosensor und steuert die Motoren des Tachymeters entsprechend den Bewegungen des Reflektors nach. Diese Betriebsart wird auch als Trackingmessung bezeichnet. Verschwindet der Reflektor völlig aus dem Blickfeld des Videosensors, so beginnt das ATR-System, ausgehend vom letzten bekannten Punkt mit Sichtkontakt, spiralförmig nach dem Reflektor zu suchen.

Das Tachymeter-System AP-L1A der Firma Topcon besitzt diese Eigenschaften. Typische technische Daten sind in Bild 49 angegeben, unterschieden wird dabei zwischen einer Standardmessung mit hoher Genauigkeit und einer beschleunigten Messung bei der Verfolgung des Prismas.



	Stillstand	Tracking
Genauigkeit Entfernung	3 mm + 2 ppm	10 mm +2 ppm
Messzeit	2,5 sec	0,3 sec
Genauigkeit Winkel	0,6 mgon / 2"	
Reichweite	bis 1000 m mit 360° Reflektor bei Normalbedingungen	

Bild 49: Laser-Tachymetersystem mit typischen technischen Daten für Stillstands- und Trackingmessungen [64]

Für den Einsatz derartiger Systeme zur Positionierung von mobilen Baurobotern im Innenausbau gelten jedoch einige Einschränkungen. So darf für eine zuverlässige Verfolgung des Reflektors eine bestimmte Winkelgeschwindigkeit bezüglich der Drehachse des Tachymeters nicht überschritten werden. Je näher der Reflektor am Tachymeter vorbeifährt, um so langsamer muss die tangentielle Geschwindigkeitskomponente sein, um die maximal zulässige Winkelgeschwindigkeit (vorgegeben durch den Servoantrieb des Tachymeters) nicht zu überschreiten. Daher ist normalerweise unterhalb einer bestimmten Minimalentfernung keine zuverlässige Messung mehr möglich.

Ein Versetzen der Station ist darüber hinaus in beinahe jedem Anwendungsfall im Innenausbau zu erwarten, da die Raumgeometrien und die vorhandenen Säulen, Stützen oder Mauervorsprünge in den meisten Fällen große tote Winkel erzeugen, in denen der Reflektor am Fahrzeug von der Tachymeterstation nicht mehr erfasst werden kann.

Die Bestimmung der Orientierung des Fahrzeugs ist mit tachymetrischen Systemen nur umständlich möglich. Zwar ist das System in der Lage, die Koordinaten eines auf dem Fahrzeug angebrachten Reflektors genau zu bestimmen, für eine weiterführende Wegplanung ist jedoch der Drehwinkel des Fahrzeugs notwendig, dieser kann aus der Lage des Reflektors nicht ermittelt werden. Zur Lösung dieses Problems wäre es denkbar, zusätzlich ein Gyroskop in das Fahrzeug einzubauen, wobei mit steigender Winkelauflösung auch die Kosten stark ansteigen. Eine weitere Alternative könnte das Anbringen eines zweiten Reflektors am Fahrzeug sein, da damit eine eindeutige trigonometrische Berechnung der Orientierung aus den beiden Reflektorkoordinaten möglich ist. Bei mehreren Reflektoren kann jedoch der ATR-Modus nicht mehr verwendet werden, so dass diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt werden kann.

Ein weiterer Nachteil der Tachymeter ist, dass diese stationär im Bauraum aufgestellt werden müssen. Aus diesem Grund liegen die Messergebnisse zuerst nur in der Totalstation vor und müssen mit einer Funkdatenübertragung erst zum Steuerrechner des Fahrzeugs gesendet werden. Trotz der hohen erzielbaren Genauigkeit lässt die aufwändige Installation eines solchen Systems keinen wirtschaftlichen Einsatz in einem Bauroboter erwarten, eine Integration in den Roboter wird deshalb nicht durchgeführt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass keines der vorgestellten Systeme der eigentlichen Wunschvorstellung eines alle Anforderungen erfüllenden Fertigprodukts nahe kommt. Haupthindernisse sind zum einen die hohen Kosten für die Lasersysteme, die den Anforderungen an die Genauigkeiten der Positionsbestimmung entsprechen würden, und zum anderen der hohe Installationsaufwand, der bei kostengünstigeren Systemen zu verzeichnen ist. Wie schon erwähnt, müssten bei allen vorgestellten Positioniersystemen die Arbeitspunkte an die Steuerung des Roboters bezogen auf ein Koordinatensystem, das im zu bearbeitenden Raum liegt, übergeben werden. Dazu wäre aber zwingend ein Abgleich zwischen den geplanten Positionen der Abhänger und den realen Gegebenheiten auf der Baustelle erforderlich. Dies würde einen Zeitverlust bedeuten, der aus wirtschaftlicher Sicht auch durch eine automatisierte Montage nicht mehr egalisiert werden könnte. Außerdem treten häufig erst während der Bauausführung Abweichungen von den geplanten Positionen auf, die der Roboter dann ohne aufwändige Umprogrammierungen nicht mehr berücksichtigen könnte. Aus diesem Grund wird ein System vorgestellt, das mit einer Kamera die bereits bestehenden Aufrisslinien der manuellen Montagetätigkeiten des Innenausbaus verfolgen kann und an geeignet markierten Haltepunkten den in Kapitel 4 konzipierten Roboter anhält, damit dort die Deckenabhänger gesetzt werden können.

5.3 Optische Bahnführung des mobilen Bauroboters

Das realisierte System bindet zum einen das Know-how der Monteure vor Ort ein und ist daher sehr flexibel und zum anderen werden keinerlei Zusatzinstallationen benötigt. Die Grundidee des Systems ist es, die bestehenden Aufrisslinien bei der Kennzeichnung der Arbeitspunkte zu verwenden. Diese Linien werden von erfahrenen Monteuren je nach Deckenspiegelplan im Bauraum mit einer Schlagschnur auf den Fußboden gezeichnet. Diese Tätigkeit fällt auch bei der manuellen Montage der Decken an, die Baufacharbeiter sind mit dieser Arbeit daher bestens vertraut. Das System im Roboter wird nun so ausgelegt, dass mithilfe eines Bildverarbeitungssystems diese Linien verfolgt werden können. Abweichend von der manuellen Prozesskette müssen nur noch die einzelnen Haltepunkte in einer geeigneten Form markiert werden.

5.3.1 Aufbau einer geeigneten Beleuchtungseinheit mit Infrarot-Dioden

Es hat sich gezeigt, dass die Wahl der Beleuchtung in der digitalen Bildverarbeitung ein zentrales Thema darstellt, welche für die erfolgreiche Lösung einer Bildverarbeitungsaufgabe mindestens ebenso wichtig ist wie die Aufnahmetechnik. So haben die vorherrschenden Lichtverhältnisse einen sehr starken Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Bilderkennung. Beispielsweise treten durch Oberlichter im Gebäude teilweise sehr starke Beleuchtungsschwankungen auf, die sich durch Lichtflecken bzw. Schattenwurf im Bodenbereich bemerkbar machen. Auch zeitlich bedingte Schwankungen der Beleuchtung durch Witterungseinflüsse können eine sonst gut funktionierende Bildauswertung unbrauchbar machen.

Die Lösung des Problems wird mit einer Beleuchtungseinheit auf der Basis von Infrarot-Leuchtdioden (IR-LED) realisiert, die zum einen mit der 24 V-Gleichspannung des Bordnetzes betrieben werden kann und über eine geringe Leistungsaufnahme verfügt und zum anderen von natürlich bedingten Lichteinflüssen nicht überstrahlt wird.

Leuchtdioden erlauben beim Aufbau von Beleuchtungen eine sehr große geometrische Variation und haben gegenüber anderen Lichtquellen einen größeren Wirkungsgrad. Sie haben zudem eine sehr hohe Lebensdauer und sind unempfindlich gegenüber Erschütterungen. Mit großen LED-Arrays können bei relativ geringer Leistungsaufnahme sehr große Lichtstärken erreicht werden. Ein zusätzlicher Vorteil ist dabei, dass LED-Beleuchtungen, die im roten und nahen infraroten Bereich arbeiten, für die Silizium-CCD-Sensoren der digitalen Kameras sehr empfindlich sind. Außerdem können Fremdlichteinflüsse mit einem Daylight-Cut-Filter an der Kamera abgeschirmt werden, wenn der Erfassungsbereich mit Infrarotbeleuchtung angestrahlt wird. Durch die große Anzahl an Dioden bleibt die Funktion der Beleuchtungseinheit gewährleistet, selbst wenn einzelne Dioden ausfallen sollten.

Die realisierte Infrarot-Beleuchtungseinheit besteht aus zwei Komponenten, dem LED-Modul und der LED-Spannungsversorgung. Das in Bild 50 gezeigte LED-Modul beinhaltet die mittig befestigte CCD-Kamera und eine mit LEDs bestückte Platine, die über einen Stecker mit der LED-Spannungsversorgung verbunden ist.

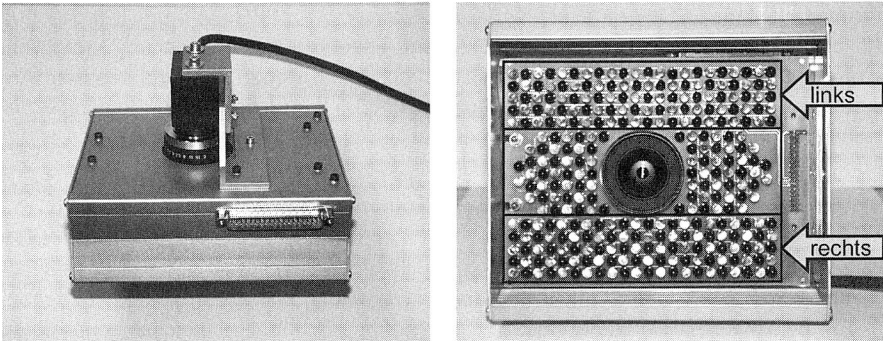


Bild 50: Das LED-Modul [Gehäuse mit CCD-Kamera und LED-Platine] bestehend aus 28 LED-Ketten mit jeweils 11 in Reihe geschalteten LEDs

Die LED-Platine ist symmetrisch mit zwei Arten von LEDs bestückt, die aufgrund der unterschiedlichen Halbwinkel für ein annähernd diffuses Licht sorgen.



IR-Diode	Nennstrom [mA]	Strahlstärke [mW/sr]	Halbwinkel [°]	Wellenlänge [nm]	Abbildung
SFH484-2	100	>80	16	880	
SFH415-T	100	25	34	950	

Tabelle 5: Wesentliche Daten der verwendeten Infrarot-Leuchtdioden

Die Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung beider Dioden liegen laut Tabelle 5 im nahen Infrarot-Bereich. Das Frequenzspektrum der beiden Dioden ist im Vergleich zum Spektrum des Tageslichtes deutlich verschoben. Da nur bei einer geringen relativen Intensität eine Überlappung der Frequenzspektren stattfindet, ist durch Vorschalten eines so genannten Daylight-Cut-Filter vor den CCD-Chip der Kamera ein Schutz gegenüber Tageslichteinflüssen gewährleistet.

Wie Bild 50 zeigt, kann die LED-Platine in drei Bereiche eingeteilt werden. Der in Fahrtrichtung betrachtete linke und rechte Teil sorgt für eine symmetrische und gleichmäßige Ausleuchtung des Suchbereiches in Fahrtrichtung. Diese beiden Bereiche bestehen aus je fünf Zeilen mit 2 x 11 in Reihe geschalteten LEDs. Der mittlere Teil der Platine ist aus acht Gruppen von jeweils elf in Reihe geschalteten LEDs aufgebaut. Dieser Teil dient unterstützend zur optimalen Ausleuchtung des engeren Suchbereiches und des Weiteren zur Vermeidung von schlecht ausgeleuchteten Stellen im Bild der Kamera, die durch falsch ausgerichtete LEDs verursacht werden können.

Insgesamt ist die LED-Platine mit je 154 IR-LEDs vom Typ SFH484-2 und der gleichen Anzahl vom Typ SFH415-T bestückt. Die oben erläuterte Reihenschaltung ermöglicht eine Ansteuerung von je 14 Ketten der entsprechenden Bauart. Da eine separate Ansteuerung der insgesamt 28 Ketten möglich ist, kann experimentell eine optimale Beleuchtung des Suchbereiches ermittelt werden.

Versorgt wird das LED-Modul über ein 34-pol. Anschlusskabel von der LED-Spannungsversorgung. Über Festspannungsregler wird die eingespeiste Akkumulatorspannung von 24 V in die entsprechende Festspannung zur Versorgung der LED-Ketten umgewandelt. Somit ist unter Berücksichtigung einer Reserve für die Festspannungsregler eine optimale Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Akkumulatorspannung gewährleistet. Die Höhe dieser Festspannung wird über Abgleichsmechanismen für beide LED-Typen so eingestellt, dass in der jeweiligen Dioden-Kette ein Nennstrom von 100 mA fließt. Somit bleibt die Leistungsaufnahme der gesamten Diodenkette unter 100 W.

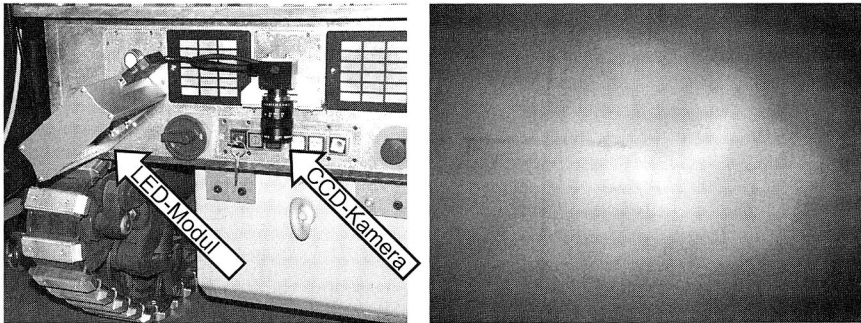


Bild 51: Befestigung des LED-Moduls in schräger Anordnung am Fahrzeug und Ausleuchtung des Bodens durch die LEDs

Eine senkrechte Anordnung des Beleuchtungssystems unmittelbar über dem Erfassungsbereich ist jedoch ungünstig, da – besonders auf glatten Böden – starke Reflexionen in der Bildmitte auftreten und gleichzeitig die Randbereiche nicht genügend ausgeleuchtet sein können. Deshalb wird die Beleuchtungseinheit, wie Bild 51 zeigt, schräg versetzt angebracht. Aufgrund dieser Anordnung trifft das zu untersuchende Objekt kein direktes Licht und störende Reflexionen können vermindert werden.

5.3.2 Einsatz eines industriellen Komplettsystems

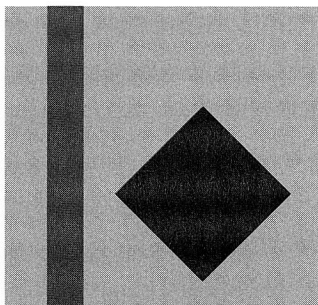
Steigende Rechenleistung der Prozessrechner, leistungsfähigere Frame-Grabber-Karten und ausgereifte Algorithmen der Bildverarbeitung haben wesentlich dazu beigetragen, dass sich diese Technologie in der automatisierten Produktion immer besser etabliert und leistungsstarke Komplettsysteme zu erschwinglichen Preisen am Markt verfügbar sind. Daher wird für die Aufgabe der Bildverarbeitung keine Eigenentwicklung angestrebt, sondern ein kommerziell verfügbares System entsprechend modifiziert.

Bei dem im Folgenden beschriebenen System handelt es sich um die Bildverarbeitungssoftware OMI 2.2 der Cognex MVS-8000-Serie in Verbindung mit einer Cognex Frame-Grabber-Karte vom Typ 8100. Die enge Verbindung von Soft- und Hardware ermöglicht es, Algorithmen direkt auf dem Prozessor der Frame-Grabber-Karte ablaufen zu lassen und so den Hauptprozessor des Windows-Steuerrechners zu entlasten, um die Ausführungsgeschwindigkeit des gesamten Programms weiter zu steigern.

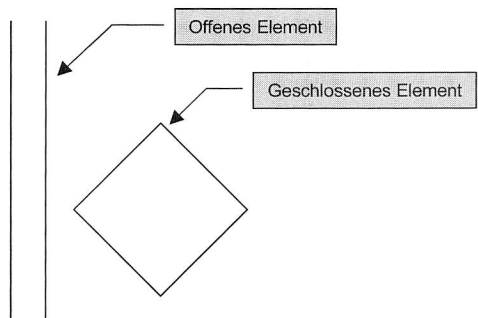
Das in der vorliegenden Bildverarbeitungsaufgabe eingesetzte Modul der Bildverarbeitungssoftware OMI 2.2 heißt PatMax. Dabei wird das zu suchende Muster trainiert (Train-Vorgang) und innerhalb des definierten Suchbereiches eines oder mehrerer aufgenommener Kamerabilder gesucht. Die Unterschiede zu herkömmlichen Bildverarbeitungsmodulen liegen in der sicheren Erkennung von Objekten, die gegenüber dem trainierten Muster gedreht oder verzerrt sind, und im Erkennungsalgorithmus, der sich auf Formen beruft und nicht auf Pixel-Grauwerte.

Arbeitsweise von PatMax

Das Modul erstellt eine eigene Darstellung des Objektes in Form eines Musters, wenn PatMax für ein bestimmtes Objekt trainiert wird. Das so genannte PatMax-Muster ist dabei eine geometrische Abbildung der Form des trainierten Objektes, wobei diese Abbildung aus zusammengesetzten geometrischen Elementen besteht, die, wie in Bild 52 dargestellt, offen oder geschlossen sein können.



Bildausschnitt



PatMax Muster

Bild 52: Das PatMax-Muster als eine Abbildung zusammengesetzter geometrischer Elemente

Ein einzelnes Element wird dabei als eine ununterbrochene Grenze zwischen Regionen ungleichartiger Pixel verstanden. Die Regionen grenzen sich dabei durch unterschiedliche Intensität, Kontrast oder Beschaffenheit voneinander ab [70]. Die einzelnen Elemente des PatMax-Musters bestehen aus einer Aneinanderreihung von Grenzpunkten, die charakterisiert werden durch eine Position, einen Winkel und Verweisen zu den benachbarten Grenzpunkten. Der Winkel dieser Grenzpunkte wird zwischen der in Bild 53 eingezeichneten x-Achse und einem Linienelement gemessen, das senkrecht auf der

Elementgrenze liegt und in die dunkel-hell Richtung zeigt. Damit wird jedem Grenzpunkt eine eigene Polarität zugeordnet, die bei entsprechender Konfiguration von PatMax für den Suchvorgang berücksichtigt werden kann. Dies hat auch den Vorteil, dass der Zeitbedarf für den Suchvorgang um ca. zehn Prozent reduziert wird.

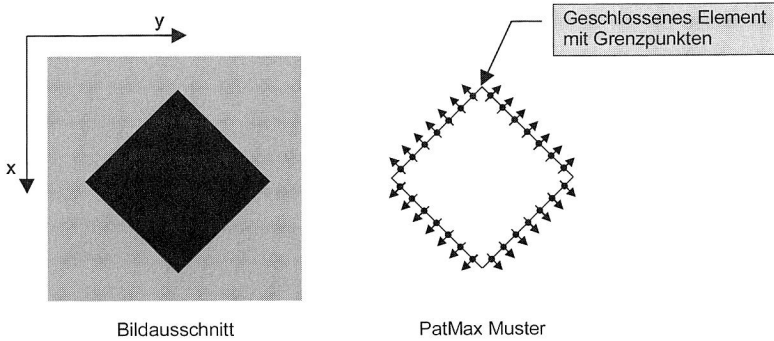


Bild 53: Grenzpunkt-Informationen an der Element Grenze eines PatMax-Musters

Auffinden von Objekten innerhalb eines Bildes

Vor dem Starten des Suchvorganges wird ein Suchbereich für PatMax definiert. Nur Elemente, die sich innerhalb dieses Suchbereiches befinden, werden nach dem Start als für die Mustererkennung relevant erkannt. PatMax lokalisiert zunächst nur Elemente, die in der geometrischen Ausdehnung entsprechend dem trainierten Muster am größten sind, und geht dann in die Ortung der kleineren Elemente über, aus der die präzise Bestimmung der Transformation zwischen dem trainierten Muster und dem gefundenen Objekt innerhalb des Suchbereiches hervorgeht. Inwieweit PatMax auf evtl. vorhandene Transformationen nach Tabelle 6 eingehen soll, wird mit einer entsprechenden Konfiguration der zur Verfügung gestellten Freiheitsgraden festgelegt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit jedem zusätzlich aktivierten Freiheitsgrad indirekt die Suchgeschwindigkeit reduziert wird, und somit immer der Zeitfaktor bei der Auswahl mit einbezogen werden sollte. Dieser wird nicht direkt durch die Aktivierung eines Freiheitsgrades, sondern durch die Festlegung der Bereichsgrenzen, in der die jeweilige Transformation noch berücksichtigt wird, beeinflusst. Wird zum Beispiel die in Tabelle 6 angedeutete Rotation auf einen Bereich von $\Delta\varphi = \pm 5^\circ$ eingeschränkt, dann ist die negative Auswirkung auf den Zeitfaktor reduziert. Eine Mustererkennung unter PatMax ist auch möglich, wenn das zu suchende Objekt z. B. einer Skalierung in Kombination mit einer Rotation unterworfen wurde. Dies kann durch die Aktivierung mehrerer Freiheitsgrade abgefangen werden. Für die Realisierung einer Bildverarbeitungsaufgabe bedeutet dies, dass schon im Vorfeld festgelegt werden muss, wie und in welchen Grenzen das zu suchende Objekt im Suchbereich der Bildverarbeitung zu liegen kommt.

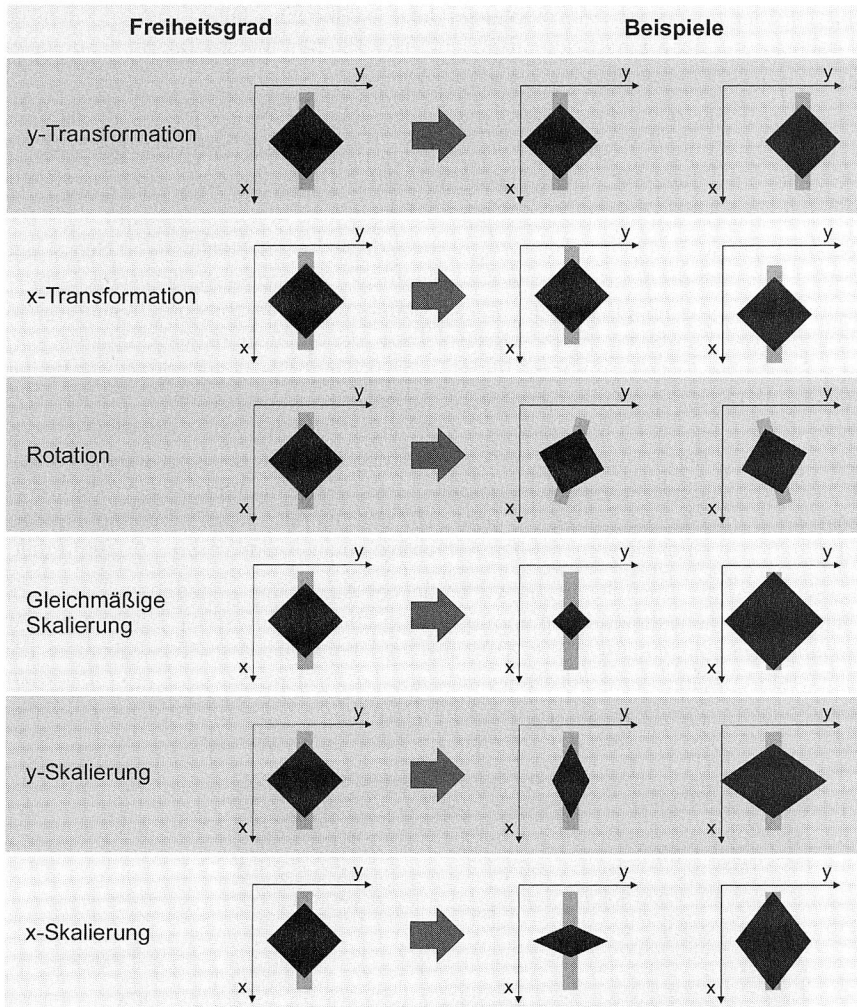


Tabelle 6: Mögliche Freiheitsgrade, die unter PatMax berücksichtigt werden können

Der Train-Vorgang für Aufrisslinie und Aufrisspunkt

Wie bereits erwähnt, wird mit dieser Software ein Train-Vorgang für Aufrisslinie und Haltepunkt eingeführt. Dies hat den Vorteil, dass sich der Bediener auf der Baustelle nicht mit für ihn unverständlichen Parametern der Bildverarbeitung auseinandersetzen muss, sondern für seine Situation vor Ort einfach ein Bild der Aufrisslinie und ein Bild des verwendeten Haltepunktes aufnimmt und dem Bildverarbeitungssystem als Muster

übergibt. Dieser Vorgang wird menüunterstützt im Bereich „Setup“ vorgenommen und ist nach einer kurzen Einarbeitungszeit innerhalb von fünf Minuten auch von ungelerten Bauarbeitern durchzuführen.

Das Anlernen hat den Vorteil, dass die spezielle Situation des jeweiligen Arbeitsraumes (Bodenbeschaffenheit, Farbe der Aufrisslinie, ...) automatisch berücksichtigt wird. Außerdem können nun völlig unterschiedliche Muster (Kreise, Rauten, ...) zur Kennzeichnung der Haltepunkte verwendet werden.

Bei Aktivieren des entsprechenden Dialogfeldes über eine Schaltfläche im Setup-Menü werden dem Kamera-Erfassungsbereich, wie in Bild 54 dargestellt, grafische Elemente zur Markierung der anzulernenden Objekte überlagert. Diese zeigen dem Benutzer an, wie und in welchen Grenzen die Aufrisslinie bzw. der Aufrisspunkt liegen dürfen, damit ein erfolgreicher Train-Vorgang gestartet werden kann. Die hell eingezeichneten Linienelemente kennzeichnen die Mitte des Kamera-Erfassungsbereiches in Fahrtrichtung, wobei der Benutzer den teilautonomen Roboter so über die Aufrisslinie fahren muss, dass diese mit den Linienelementen zur Deckung kommen. Dies ist wichtig, da eine mögliche Winkelabweichung der Aufrisslinie zur Fahrtrichtung bei der Durchführung des Train-Vorganges für die Aufrisslinie nicht berücksichtigt wird und PatMax bei dem späteren Auffinden einer gleich geeigneten Aufrisslinie einen Winkel von $\alpha = 0^\circ$ zurückgibt.

Im Bild 54 ist die Darstellung zum Anlernen der Aufrisslinie angegeben. Der für den Train-Vorgang notwendige Rahmen muss mittig über die Aufrisslinie bzw. für den Aufrisspunkt symmetrisch über den Aufrisspunkt verschoben werden. Zu beachten ist, dass beim Train-Vorgang der Aufrisslinie der Aufrisspunkt nicht innerhalb des editierbaren Train-Fensters liegen darf. Bei beiden Train-Vorgängen muss sich jedoch das jeweilige dunkle Train-Fenster innerhalb des hellen Kreiselementes befinden.

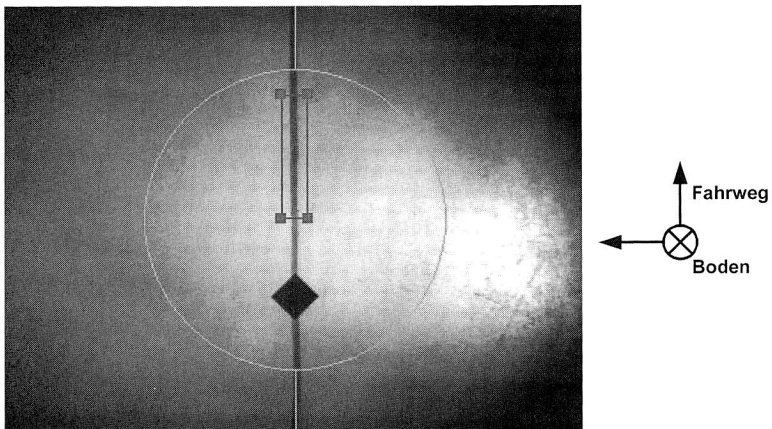


Bild 54: Kamerabild mit dem Rahmen für den Train-Vorgang der Aufrisslinie

Speziell im Hinblick auf die exakte Lokalisation des Aufrisspunktes ist das Train-Fenster möglichst genau über den Aufrisspunkt zu verschieben, da ausgehend von dessen Mittelpunkt das Bohrloch errechnet wird. Grundsätzlich bedeutet eine Vergrößerung des Train-Fensters immer eine Reduzierung der von PatMax benötigten Zeit für einen Suchvorgang innerhalb des gleichen Suchbereiches. Da die Zykluszeit eine entscheidende Rolle für das sichere Navigieren des teilautonomen Roboters darstellt, würde demzufolge ein groß dimensioniertes Train-Fenster ein Optimum bedeuten. Andererseits werden dann evtl. vorhandene überflüssige Strukturelemente, die sich ebenfalls im Innenbereich des Train-Fensters befinden, während des Train-Vorganges als zur Aufrisslinie bzw. zum Aufrisspunkt zugehörig synthetisiert, was sich negativ auf das Suchverhalten für die Aufrissliniensuche bzw. für die Aufrisspunktsuche auswirkt.

Des Weiteren ist zu beachten, dass bei einer Verbreiterung des jeweiligen Train-Fensters konsequenterweise auch die Suchbreite um diesen Wert automatisch erhöht wird. Die notwendigen Richtlinien für die optimale Abstimmung des Train-Fensters auf das zu erkennende Objekt (Aufrisslinie bzw. Aufrisspunkt) sind zusammenfassend in Tabelle 7 festgehalten.

Geometrie des Train-Fensters	Richtlinien für das Trainieren der Aufrisslinie	Richtlinien für das Trainieren des Aufrisspunktes
Position	Mittig über der Aufrisslinie, jedoch den Aufrisspunkt nicht kreuzend	Mittig über dem Aufrisspunkt
Höhe	Ca. die Hälfte des hell eingezeichneten Kreises	Symmetrisch den Aufrisspunkt umschließend (abhängig von der jeweiligen Gestalt des Aufrisspunktes)
Breite	Ca. die dreifache Breite der Aufrisslinie	

Tabelle 7: Richtlinien bezüglich der Größe und Position des Train-Fensters für den Train-Vorgang der Aufrisslinie bzw. des Aufrisspunktes

Hat der Benutzer den Rahmen exakt positioniert, wird er zur Eingabe eines charakteristischen Namens des Train-Vorgangs aufgefordert, der als Identifizierung des jeweiligen Train-Vorgangs und als Name für das entsprechend zugehörige Bitmap dient. Das Bitmap wird in einem weiteren Dialogfeld angezeigt und soll dem Benutzer die spätere Wahl des trainierten Objektes erleichtern.

Unabhängig vom Teach-Vorgang wird der Bediener dazu angehalten, die gewählten Muster für Aufrisslinie und Aufrisspunkt einmal zu bestätigen, um eine hohe Trefferwahrscheinlichkeit sicherzustellen, sobald das Steuerprogramm des Roboters aktiviert (vgl. Kapitel 6) wird. Dazu wird in das Live-Bild der Kamera eine Markierung um den Ausschnitt der Aufrisslinie im Bild gelegt, welcher mit der größten Wahrscheinlichkeit

dem angelernten Objekt gleicht. Der Benutzer wird dann zur Bestätigung dieser automatischen Auswahl aufgefordert. Ist die richtige Markierung für die Aufrisslinie erkannt worden und hat der Bediener dies bestätigt, wird die Prozedur noch einmal für den Aufrisspunkt wiederholt. Wird auch der Aufrisspunkt, der sich zu diesem Bestätigungsvorgang im Bild befinden muss, richtig erkannt, kann mit der eigentlichen Montagearbeit des Roboters begonnen werden. Zugleich werden die Mittelpunktskordinaten des gefundenen Aufrissliniensegments und des Aufrisspunktes zwischengespeichert, um die weiteren Suchergebnisse, die während einer Fahrt mit dem Roboter auftreten, verifizieren zu können (vgl. Kapitel 5.3.3).

Falls entweder Aufrisslinie oder Aufrisspunkt nicht automatisch richtig gefunden wurden, wird jeweils der Treffer mit der nächsthöheren Wahrscheinlichkeit angeboten, dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis entweder eine richtige Auswahl getroffen wurde oder keine weiteren Suchergebnisse des Bildverarbeitungssystems mehr vorliegen. In diesem Fall wird der Benutzer dazu aufgefordert, die vorliegende Aufrisslinie und die ausgewählten Markierungen für die Aufrisspunkte neu zu teachen.

Untersuchungen für geeignete Kennzeichnungsverfahren der Haltepunkte

Unterschiedliche Geometrien der Aufrisspunkte lassen nach den bisherigen Ausführungen unterschiedliche Zykluszeiten und Trefferquoten der Bilderkennung erwarten. Deshalb soll im Folgenden die am besten geeignete Form der Kennzeichnung eines Aufrisspunktes ermittelt werden. Dazu wird zunächst das Suchverhalten der Bildverarbeitung bei stehendem Bauroboter im Vollautomatik-Modus (d. h. zyklischer Suchvorgang für Aufrisslinie und Aufrisspunkt) charakterisiert werden.

Bei der manuellen Kennzeichnung der Arbeitspunkte wird als Aufrisspunkt ein quer zur Aufrisslinie gezogener gleichgearteter, relativ langer Strich gesetzt. Aus dieser Geometrie des Aufrisspunktes (siehe auch Tabelle 8, 1. Aufrisspunkt) ist zu erkennen, dass aufgrund der Länge dieses Aufrisspunktes das Train-Fenster nur einen Teil umfasst. Das daraus resultierende PatMax-Muster (hell eingezeichnet) besteht somit nur aus zwei parallel liegenden Linien, die zusammen ein offenes Element bilden. Im direkten Vergleich dazu sind für die weiteren Aufrisspunkte schmälere geometrische Formen gewählt worden, so dass diese immer vom Train-Fenster umschlossen werden. Bei Betrachtung der Zykluszeit ist im Hinblick auf PatMax-Muster, die ein geschlossenes Element bilden, eine deutliche Zeitersparnis zu bemerken.

Eine entscheidende Optimierung der Zykluszeit wird durch die Wahl eines kreisförmigen Aufrisspunktes erreicht. Dies kann damit erklärt werden, dass eine Verringerung von zusätzlichen Freiheitsgraden (Rotation) auch eine Reduzierung der für einen Suchvorgang benötigten Zeit bedeutet. Aus geschwindigkeitsrelevanten Gründen kann demnach für die Wahl des Aufrisspunktes nur eine kreisförmige Geometrie nach Tabelle 8 gewählt werden. Zur genaueren Positionierung des Aufrisspunktes sollte dieser jedoch mittig mit einem kreisförmigen Loch versehen werden.

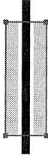
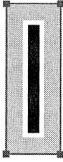

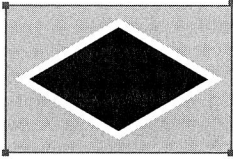
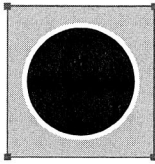
Unterscheidungsmerkmale	1. Aufrisspunkt	2. Aufrisspunkt	3. Aufrisspunkt	4. Aufrisspunkt	5. Aufrisspunkt
Geometrie der Aufrisspunkte (mit Train-Fenster und PatMax-Muster)					
Fläche Train-Fenster [cm ²]	9	9	35	23	23
Fläche Aufrisspunkt [cm ²]	2,5	1,8	10,5	6,3	9,6
Zykluszeit T_{zykl} [ms] (von der Akquisition bis zur Bildauswertung)	200	192	172	180	166
Bilder pro Sekunde (nur vollständig ausgewertete)	5	5	5	5	6
dadurch maximal mögliche Fahrzeuggeschwindigkeit [cm/sec]	15	15	15	15	18
Motor-Drehzahl [U/min]	1241	1241	1241	1241	1490

Tabelle 8: Suchverhalten der Bildverarbeitung bei verschiedenen Varianten der Aufrisspunkte und Stillstand des Bauroboters

5.3.3 Verarbeitung der Suchergebnisse für Aufrisslinie und Aufrisspunkt

Bei der Fahrt des Bauroboters wird fortwährend jedes aufgenommene Bild nach einer Aufrisslinie und einem Aufrisspunkt durchsucht.

Zunächst soll die Verarbeitung der Suchergebnisse für die Aufrisslinie betrachtet werden, wobei Winkelabweichungen der Aufrisslinie zur Fahrtrichtung von maximal $\pm 45^\circ$ durch die Festlegung des maximalen Such-Winkels in den Setup-Einstellungen eingeschränkt werden können.

Da PatMax nach jedem Suchvorgang zur weiteren Verarbeitung mehrere Suchergebnisse zur Verfügung stellen kann, besteht die Notwendigkeit, genau ein für die sichere Navigation relevantes Ergebnis auszuwählen. Zu diesem Zweck werden die aus dem bestätigten Automatik-Train (vgl. Kapitel 5.3.2) resultierenden Mittelpunkt-Koordinaten (x-Koordinate, y-Koordinate und Winkel zur y-Achse) des gefundenen Aufrisslinien-Segmentes als temporäre Daten abgespeichert. Die Mittelpunkt-Koordinaten werden nach jedem Suchvorgang für jedes gefundene Aufrisslinien-Segment von PatMax zur Verfügung gestellt und sind entsprechend Bild 55 definiert.

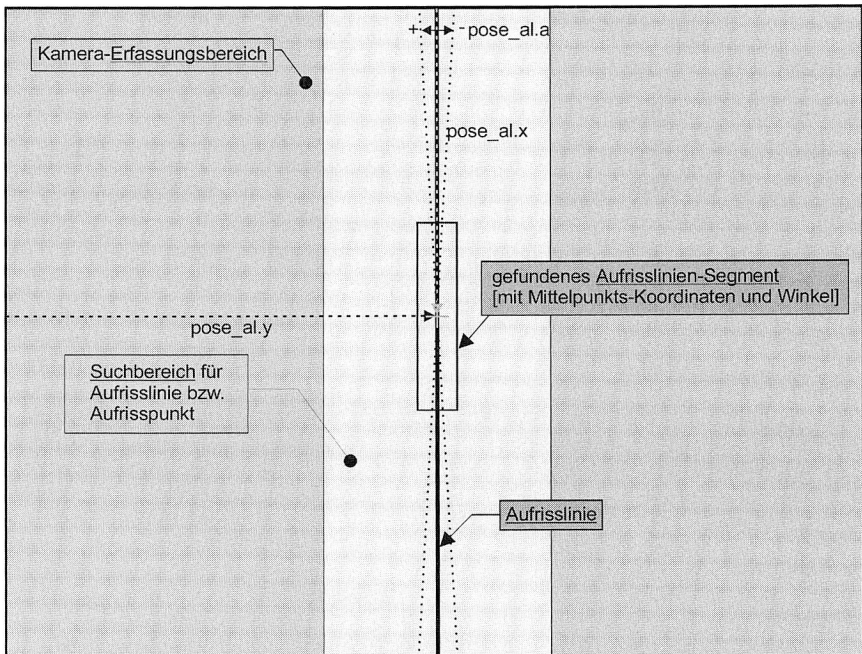


Bild 55: Die für die Navigation relevanten Werte nach erfolgter Aufrissliniensuche

Zur Prüfung eines von PatMax gefundenen Aufrisslinien-Segmentes wird dessen theoretische Lage in jedem Zyklus aus dem in dem vorangegangenen Zyklus ermittelten Mittelpunktsdaten berechnet. Dazu wird die theoretische y-Position bei gegebener x-

Position des aktuell gefundenen Aufrisslinien-Segmentes mithilfe der Geradengleichung des im letzten Zyklus gefundenen Aufrisslinien-Segmentes nach folgender Gleichung bestimmt:

$$pose_al.y_{theor} = \tan(pose_al.a_{alt}) \cdot (pose_al.x_{neu} - pose_al.x_{alt}) + pose_al.y_{alt}$$

und mit dem von PatMax gelieferten Wert für die y-Position verglichen.

Sollte die Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Wert größer als eine Toleranzschwelle sein, wird das gefundene Aufrisslinien-Segment als ungültig verworfen. Die Toleranzschwelle bestimmt sich dabei durch die Winkeländerung, die von der Fahrzeugregelung zwischen zwei aufgenommenen Bildern bei Korrektur der Fahrtrichtung zurückgelegt werden kann. Falls im gleichen Suchvorgang ein weiteres Aufrisslinien-Segment von PatMax gefunden wurde, wird nun dieses auf Zugehörigkeit überprüft. Dieser Vorgang wird solange fortgesetzt, bis innerhalb von drei gestarteten Suchvorgängen kein Aufrisslinien-Segment als gültig erkannt wurde. Dann wird die Bilderkennung mit einer entsprechenden Fehlermeldung abgebrochen.

Liegt der Differenzwert unterhalb der Toleranzschwelle, d. h. das gefundene Aufrisslinien-Segment wird als gültiger Teil der trainierten Aufrisslinie erkannt, so wird zusätzlich noch ein Kontrast-Wert-Vergleich durchgeführt. Entsprechend dem obigen Positions-Vergleich wird jetzt der Kontrast-Wert, unter Einbeziehung des Kontrast-Toleranzbereiches der Setup-Einstellung, zwischen dem aktuellen und dem zuvor erkannten Aufrisslinien-Segment durchgeführt. Dies soll die Verfolgung von nicht relevanten (kontrastschwächeren oder kontraststärkeren) Aufrisslinien verhindern, die von der zutreffenden Aufrisslinie aus in eine nicht gewünschte Richtung führen. Bei fehlendem Kontrast-Wert-Unterschied ist der Übergang zur nicht relevanten Aufrisslinie lediglich leicht zu retuschieren (verwischen). Sobald auch diese Prüfung fehlerfrei abgeschlossen werden konnte, werden die Mittelpunktswerte der gefundenen Aufrisslinie an die Fahrzeugsteuerung übergeben.

Die Aufrisspunktsuche wird in jedem Zyklus direkt nach dem Suchvorgang der Aufrisslinie gestartet, wobei sich die in Bild 56 dargestellte Situation bei der Fahrt über einen Aufrisspunkt ergibt. Die Filterung der jeweiligen Suchergebnisse von PatMax für die Aufrisspunktsuche wird unter Einbeziehung der Randbedingung so durchgeführt, dass der Aufrisspunkt immer mittig auf der Aufrisslinie zu liegen kommen muss. Unter Verwendung des Winkels und der x-Position des aktuell gefundenen Aufrisslinien-Segmentes wird wiederum die theoretische y-Position dieser Aufrisslinie berechnet, jedoch unter Berücksichtigung der (x,y)-Koordinaten des gefundenen Aufrisspunktes. Im Vergleich der theoretischen y-Position

$$pose_al.y_{theor} = \tan(pose_al.a) \cdot (pose_al.x - pose_ap.x) + pose_ap.y$$

mit der gegebenen y-Position des aktuell gefundenen Aufrisslinien-Segmentes und unter Berücksichtigung der maximalen x-Abweichung für die Aufrisspunkt-Suche wird der aktuelle Aufrisspunkt als gültig oder ungültig erkannt.

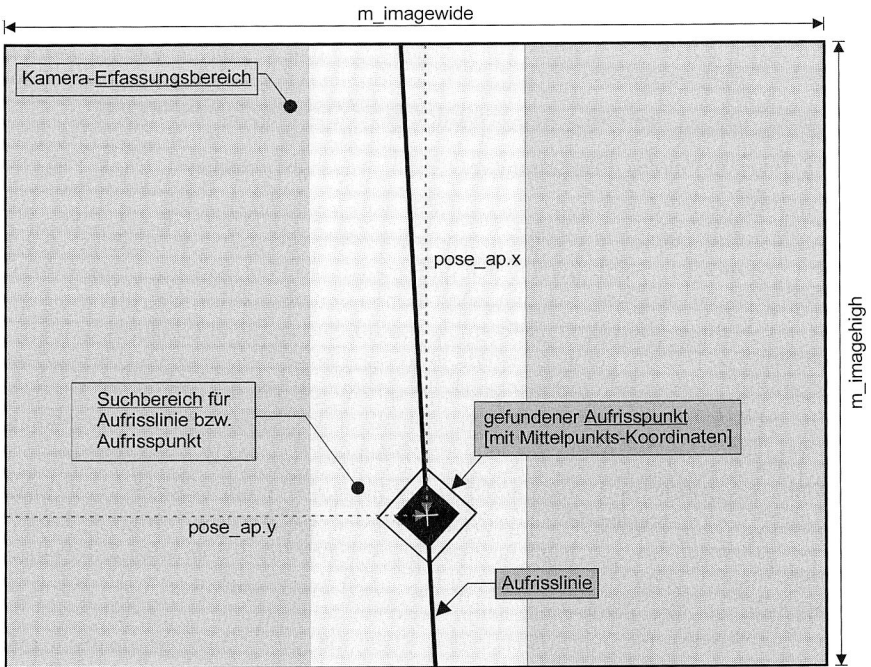


Bild 56: Die für die Positionsbestimmung des Aufrisspunktes relevanten Werte

Sollte dieser Vergleich negativ ausfallen (d. h. der Aufrisspunkt liegt nicht mittig auf der Aufrisslinie), wird die Fahrt mit der Verfolgung der Aufrisslinie fortgeführt. Ansonsten wird die Fahrt gestoppt und die (x,y)-Koordinaten des gültigen Aufrisspunktes werden entsprechend der folgenden Gleichungen in Mittelpunkts-Abweichungen vom Kamera-Erfassungsbereich umgerechnet und an die Fahrzeugsteuerung zur weiteren Verarbeitung übergeben:

$$\Delta x_{ap} = pose_ap.y - m_imagewide/2$$

$$\Delta y_{ap} = pose_ap.x - m_imagehigh/2$$

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch den kombinierten Einsatz einer Beleuchtungseinheit auf Infrarot-Basis und eines kommerziellen Bildverarbeitungssystems ein baustellentaugliches und den Anforderungen aus Tabelle 4 entsprechendes Positioniersystem entwickelt werden konnte. Durch die Möglichkeit, Haltepunkte und Aufrisslinien anzulernen, lässt sich das System einfach an die unterschiedlichsten Einsatzbedingungen anpassen und von angelernten Kräften handhaben.

6 Entwicklung eines modularen Robotersystems zur Montage von Deckenbefestigungen

Ausgehend von der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Konzeption des mobilen Roboters und der Entwicklung eines geeigneten Systems zur Positionsbestimmung wird im Folgenden die Steuerung des realisierten Robotersystems erläutert. Die zentrale Einheit des Systems ist die Steuerung des Transportmoduls, welche zum einen die Mobilität gewährleisten und zum anderen alle für das Technologiemodul erforderlichen Daten bereitstellen muss.

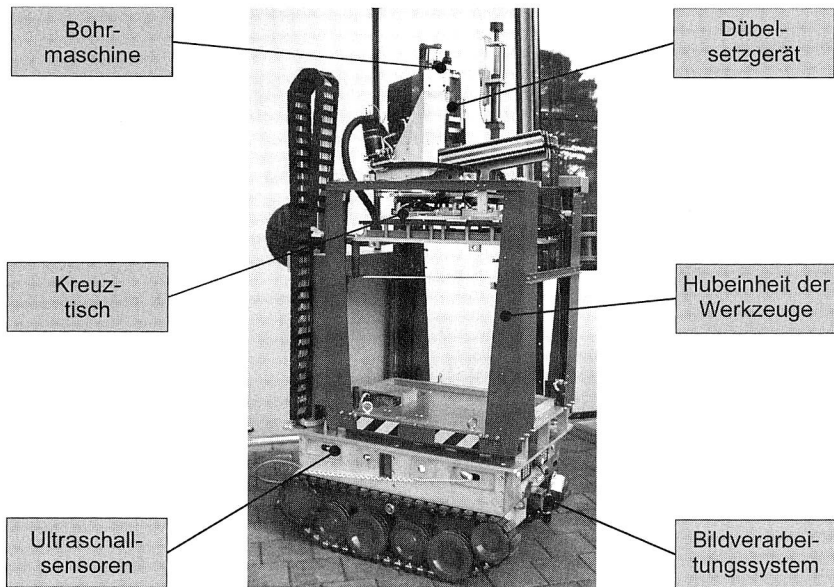


Bild 57: Prototyp des Roboters zur Montage von Befestigungselementen an Decken

In der Steuerungstechnik für autonome mobile Systeme gibt es die unterschiedlichsten Konzepte, eine derartige Steuerung zu realisieren (z. B. [29], [102], [35]). In der vorliegenden Arbeit wird bewusst auf den Einsatz neuronaler Netze oder von agentenbasierten Steuerungen (z. B. [4], [28]) verzichtet, da die Komplexität der Steuerung klein gehalten werden sollte. Viele der in wissenschaftlichen Veröffentlichungen vorgestellten Steuerungssysteme ermöglichen den Einsatz der autonomen mobilen Systeme in bekannter und unbekannter Umgebung und versetzen das System in die Lage, seine Umwelt selbständig zu erkunden und Karten seiner Umgebung anzufertigen, welche für eine spätere Navigation erneut genutzt werden können. Ein mobiler Bauroboter dagegen muss als Hauptaufgabe bestimmte Positionen mit der erforderlichen Genauigkeit (vgl. Kapitel 5) anfahren und dort seine Montagetätigkeit durchführen können. Dazu benötigt er zwar Funktionen zur Kollisionsvermeidung mit verschiedenen Hindernissen,

nicht jedoch „hochintelligente, selbstlernende“ Fähigkeiten zur Navigation, wie sie zum Beispiel bei Servicerobotern zur Bodenreinigung notwendig sein können. Aus diesem Grund wird eine relativ einfache Steuerungsarchitektur ausgewählt. Die wichtigsten Funktionen dieser Architektur werden im Folgenden erläutert.

6.1 Prinzipieller Aufbau des Steuerungssystems für den mobilen Bauroboter

Neben einer sorgfältigen und robusten Konstruktion der mechanischen Komponenten ist besonders auf eine fehlertolerante und bedienerfreundliche Steuerung zu achten. Die steuerungstechnische Aufgabe des mobilen Bauroboters lässt sich folgendermaßen beschreiben:

Verfolge die Leitlinie solange, bis ein Haltepunkt erkannt wird oder die Linie nicht mehr sichtbar ist. Verlangsame die Geschwindigkeit, falls ein Hindernis in deiner Umgebung auftaucht und halte notfalls an. Stoppe, sobald ein Arbeitspunkt erkannt wird. Ermittle die Abweichung von dem markierten Haltepunkt und addiere die Abweichung der Werkzeugpositionen, die durch die Bodenneigung entsteht. Übermittle den Korrekturwert an den Kreutztisch und starte den Arbeitszyklus des Technologie-moduls. Nach Beendigung des Arbeitsvorgangs verfolge erneut die Leitlinie.

Das Verfahren zur Verfolgung der Aufrisslinie wurde bereits in Kapitel 5 erläutert. Die dort eingesetzte Software erfordert einen PC mit dem Betriebssystem Windows NT 4.0 als Steuerrechner. Die grafischen Möglichkeiten von Windows ermöglichen zusätzlich die Entwicklung eines geeigneten Mensch-Maschine-Interface. Gerade im Bauwesen muss davon ausgegangen werden, dass die Arbeiter nicht mit der Bedienung eines Steuerrechners oder PCs vertraut sind. Deshalb muss das Mensch-Maschine-Interface dieser Steuerung so einfach wie möglich aufgebaut sein. Die Bedienung des Roboters durch den Monteur soll daher über einen Touch-Screen erfolgen, auf dem die Anweisungen bzw. Fehlermeldungen in verständlicher Form angezeigt werden. Optional kann bei Bedarf ein umfassendes Hilfesystem mit kontextsensitiven Hilfstexten hinterlegt werden.

Die weiteren Steueraufgaben, wie Hindernisüberwachung, Bahnplanung und Durchführung verschiedenster Hardwareüberwachungsabfragen erfordern dagegen, dass das Steuerungssystem in der Lage sein muss, die anfallenden Daten innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne zu verarbeiten und unabhängig vom aktuellen Zustand des Steuerungssystems auf bestimmte Ereignisse zu reagieren. Dazu ist auf jeden Fall die Echtzeitfähigkeit der Steuerung notwendig. Windows NT 4.0 kann diese Funktionalität ohne aufwändige und kostenintensive Erweiterungen nicht gewährleisten (vgl. z. B. [26], [40] oder [123]). Zur Realisierung werden deshalb zwei PCs verwendet. Auf dem einen laufen alle zeitkritischen Anwendungen unter einem Echtzeit-Betriebssystem ab. Mit dem anderen wird das Mensch-Maschine-Interface und das Bildverarbeitungssystem reali-

siert. Die beiden PCs sind über eine Kommunikationsschnittstelle miteinander verbunden und tauschen zyklisch Daten und Betriebsmeldungen aus.

Außerdem soll das Fahrzeug auch bei einem Ausfall der automatischen Steuerung bewegt werden können, deshalb wurde zusätzlich auf Hardwareebene eine Joystick-Steuerung installiert, die über einen Schlüsselschalter zu- bzw. abgeschaltet werden kann.

Die Ansteuerung der Hub- und Werkzeugachsen des Technologiemoduls erfordert keine komplexen Rechenoperationen oder grafische Ausgaben wie bei der Steuerung des Transportmoduls. Daher wird als Steuereinheit des Technologiemoduls eine SPS S595U von Siemens mit einer Klartextanzeige OP7 verwendet. Diese Einheit arbeitet völlig eigenständig von der restlichen Steuerung, lediglich bestimmte Parameter können über eine serielle Kommunikationsschnittstelle übertragen werden. Diese Selbständigkeit ermöglicht zum einen die parallele Entwicklung des Transport- und Technologiemoduls und somit eine Verkürzung der Entwicklungszeit. Zum anderen kann das Technologiemodul bei einem Ausfall der Steuerung des Transportmoduls noch bewegt und in eine sichere Ruhestellung gebracht werden.

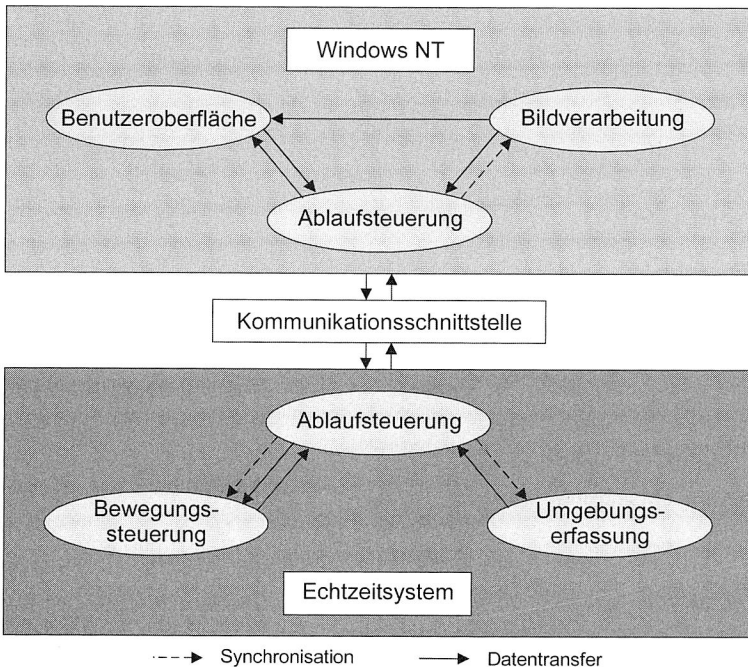


Bild 58: Komponenten der Steuerungssysteme für den Dübelroboter [45]

Im Folgenden werden die in Bild 58 dargestellten Systemblöcke im Einzelnen besprochen.

6.2 Steuerungsfunktionen unter Windows NT 4.0

Wie bereits erwähnt, besteht die wesentliche Aufgabe dieses Teils der Steuerung darin, die Plattform für die Positionsbestimmung mit dem Bildverarbeitungssystem und die Benutzerschnittstelle bereitzustellen. Die Anforderungen an die Hard- und Software dieser Steuerungselemente liegen daher mehr im grafischen Bereich als im Einhalten fester Zyklus- oder kurzer Reaktionszeiten.

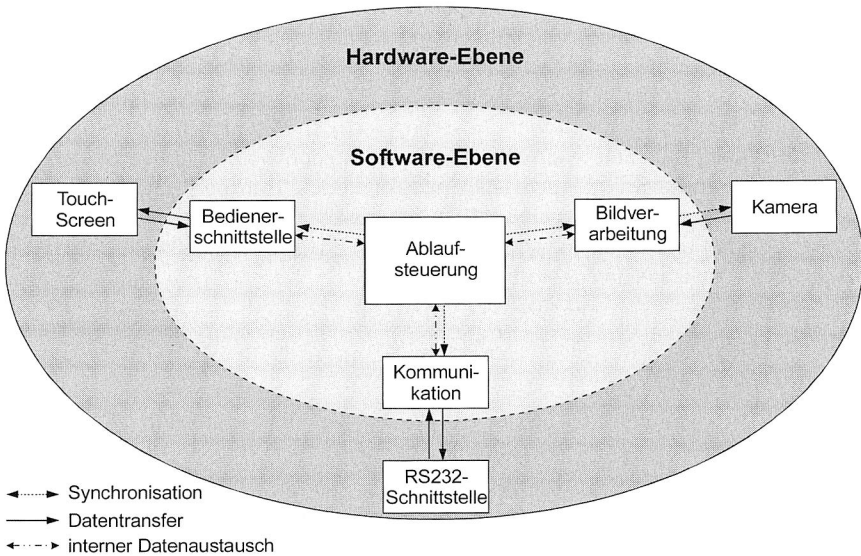


Bild 59: Abhängigkeit der wichtigsten Programmmodule im Windows-Teil des Steuerungssystems

Die einzelnen Steuerungsfunktionen werden in vier Modulen, der Ablaufsteuerung, der Kommunikationsschnittstelle, der Bildverarbeitung sowie der Benutzerschnittstelle bereitgestellt, die jeweils als Klassen realisiert werden. Die Kommunikation zwischen diesen Modulen erfolgt über benutzerdefinierte Nachrichten.

6.2.1 Mensch-Maschine-Interface

Das Mensch-Maschine-Interface (MMI) muss so gestaltet sein, dass sich ein Bediener, der keine Erfahrung im Umgang mit Computern oder Robotern hat, unter einer fachkundigen Anleitung schnell einarbeiten kann. Aus diesem Grund wurde die Benutzerschnittstelle – ähnlich dem Geldautomaten einer Bank – mit einem Touch-Screen aufgebaut. Der Touch-Screen wurde in ein Bedienpult integriert. Dieses enthält außerdem einen Not-Aus-Taster, einen Joystick, um das Fahrzeug auch bei deaktivierter Steuerung bewegen zu können, einen Schlüsselschalter, um zwischen den beiden Betriebsmodi (Fahren mit Joystick und Automatikbetrieb) umschalten zu können, sowie die Zweihand-Taster, die als Sicherheitseinrichtung sämtliche Antriebe des Roboters erst

dann freigeben, wenn beide Taster gleichzeitig gedrückt werden. Damit wird sichergestellt, dass das Transportmodul vom Bediener sofort angehalten werden kann und während der Bewegungen des Technologiomoduls keine Verletzungsgefahr durch Quetschungen oder ähnliche Unfälle auftreten kann.

Im Bild 60 ist die Bedienoberfläche des Roboters dargestellt. Der Bediener sieht in der linken Hälfte das Bild der Kamera, um das Fahrzeug auf die Linie zu bringen und den Fahrvorgang überwachen zu können. In der rechten Hälfte hat er verschiedene Steuerbuttons, um die oben beschriebenen Eingaben vornehmen zu können. Mithilfe einer baumartigen Struktur der Benutzerführung kann erreicht werden, dass der Monteur nur jeweils zwei oder drei Optionen zur Auswahl hat, zwischen denen er sich entscheiden muss.

Das grundlegende Layout bleibt während aller Zustände, die das Fahrzeug und das Technologiomodul durchlaufen, erhalten. Es ändern sich nur die Hinweistexte in den entsprechenden Rahmen, die mit „Fahrzeug“, „Technologiomodul“, „Bildverarbeitung“ und „Meldungen“ überschrieben sind. Dort erscheinen im Klartext Status- und Fehlermeldungen und es kann dem Benutzer auch eine Anleitung zur Fehlerbeseitigung gegeben werden. Zusätzlich ist ein Bereich des Bildschirms für eine graphische Darstellung verschiedener Warnhinweise, wie zum Beispiel den Ausfall der Netzspannung oder der verschiedenen Zustände jedes einzelnen Sensors, vorgesehen.

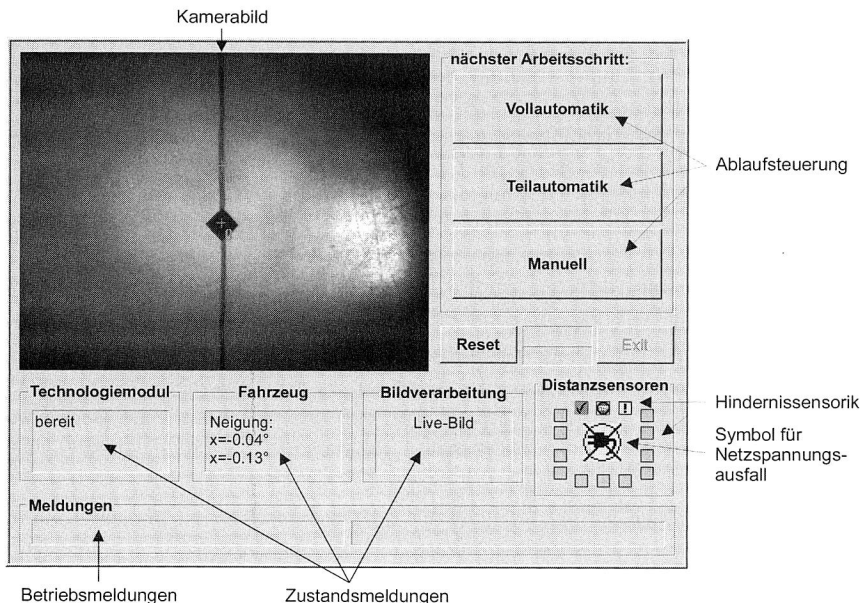


Bild 60: Bedienoberfläche der Steuerung des Prototypen

Außerdem gibt es einige automatisch erscheinende Dialogfenster, die dann eingeblendet werden, wenn vom normalen Ablauf abweichende Handlungen des Bedieners notwendig werden. So werden zum Beispiel Hinweise visualisiert, wenn der Not-Aus-Schalter gedrückt wurde oder wenn zur Fortsetzung des Arbeitsablaufes die Zweihand-Taster betätigt werden sollen. Eine weitere Meldung zeigt an, dass mit dem Schlüsselschalter die Joystick-Steuerung aktiviert wurde, aber ein automatisches Fahren notwendig ist. Alle diese Dialogfenster verschwinden von selbst wieder, sobald der Zustand, der diese Meldung erforderlich machte, beseitigt wird.

Die Tests auf den verschiedenen Baustellen haben gezeigt, dass mit dieser Oberfläche eine schnelle Einarbeitung für die Bauarbeiter möglich ist und Berührungsängste mit dem Roboter dadurch rasch abgebaut werden können. Für ein mögliches Seriengerät hätte dieser Aufbau der Benutzerschnittstelle den Vorteil, dass zusätzlich ohne großen Aufwand mehrere Sprachen der Benutzerführung adaptiert werden könnten.

6.2.2 Ablaufsteuerung

Die Koordination der einzelnen Module im Windows-Teil der Steuerung wird von der so genannten Ablaufsteuerung übernommen, welche zyklisch alle 50 ms über einen internen Windows-Timer aktiviert wird. Dann wird der Status der Bildverarbeitung überprüft, es werden die Ausgaben auf dem Touch-Screen dargestellt, mögliche Eingaben des Benutzers verarbeitet und es wird die Kommunikationsschnittstelle auf neu empfangene Meldungen abgefragt.

Mit dem Start des Programms erscheint die Startmaske der Bedienoberfläche auf dem Touch-Screen, welche dem Benutzer die Wahl bietet zwischen dem Start des regulären Arbeitsablaufs oder der Durchführung verschiedener Setup-Einstellungen, wie zum Beispiel das im Kapitel 5.3.2 beschriebene „Teachen“ der Aufrisslinie. Weitere Setup-Werte betreffen die Aktivierung oder Deaktivierung der einzelnen Hindernissensoren, die Vorgabe von Drehzahlwerten, der Bohrtiefe, der Deckenhöhe und vieles mehr. Dabei besteht die Möglichkeit, diese Werte zur Kontrolle anzusehen, eine Veränderung dieser Einstellungen kann nur nach der Eingabe eines Passwortes erfolgen und sollte ausschließlich von einem erfahrenen Maschinenführer vorgenommen werden.

Nach dem Start des Programms und Drücken des „Start-Buttons“ im Hauptfenster der Software gelangt man nach erfolgreicher Initialisierung der Bildverarbeitung in das Menü-Fenster „Automatik“, in dem man zwischen den drei grundsätzlichen Bedienmodi „Manuell“, „Teilautomatik“ und „Vollautomatik“ wählen kann. Die grundlegenden Unterschiede dabei sind:

- Der manuelle Arbeitsablauf ist dadurch gekennzeichnet, dass der Bediener den Roboter mit dem Joystick über einen Arbeitspunkt bewegt und diesen mit einem Spezialstift auf dem Touch-Screen markiert. Anschließend ermittelt der Roboter die notwendigen Korrekturdaten für den Kreutztisch und startet den Dübelsetzvorgang nach Drücken der Zweihandschalter. Dieses Verfahren kann dann verwendet werden, falls eine teil- oder vollautomatische Fahrt wegen Problemen bei der Linienerken-

nung nicht funktioniert oder eine Einarbeitung in die Arbeitsweise des Gerätes erfolgen soll.

- Im teilautomatischen Betriebsmodus verfolgt der Roboter die Linie selbständig, der Bediener muss das Gerät durch Loslassen der Zweihandschalter abstoppen, sobald ein Aufrisspunkt im Kamerafeld erscheint. Nach dem Stillstand des Roboters wird die Abweichung von der Sollposition automatisch ermittelt und nach einem erneuten Drücken der Zweihandtaster der restliche Montageablauf automatisch durchgeführt. Dieser Modus dient ebenfalls zur Einarbeitung in die Funktionsweise des Roboters und kann zusätzlich bei undeutlich markierten Aufrisspunkten eingesetzt werden.
- Im vollautomatischen Modus schließlich positioniert der Bediener das Gerät an den Anfang einer Aufrisslinie, das Gerät verfolgt daraufhin automatisch diese Linie, stoppt jeweils an einem erkannten Arbeitspunkt ab und bohrt das Dübelloch bzw. setzt den Dübel. Dazu muss der Bediener nur noch die Zweihandtaster drücken, um die Antriebe des Roboters frei zu schalten. Lediglich die Wechsel zwischen verschiedenen Aufrisslinien muss der Monteur mit dem Joystick vornehmen. Dieser Modus stellt den normalen Anwendungsfall dar und wird am häufigsten eingesetzt werden.

Aufgrund der Komplexität der gesamten Ablaufsteuerung soll an dieser Stelle exemplarisch nur ein kleiner Teil detailliert erläutert werden, nämlich die Betriebsvariante „Vollautomatik“.

Nach der Auswahl des Modus „Vollautomatik“ durch Drücken des entsprechenden Buttons erfolgt zunächst eine Initialisierung. Dabei wird im Wesentlichen überprüft, ob die angelernte Aufrisslinie und der Aufrisspunkt seit dem Start des Steuerprogramms bereits einmal bestätigt wurden (vgl. Kapitel 5.3.2). Können an dieser Stelle keine Linie und kein Arbeitspunkt erkannt werden, wird mit einer Fehlermeldung „Bitte Trainingsvorgang wiederholen“ in das Start-Menü der Steuerung gesprungen, um von dort in das Setup-Menü gelangen zu können. Konnte der Trainingsvorgang bestätigt werden, wird die zyklische Suche für die Aufrisslinie und den Aufrisspunkt aktiviert. Falls dieser Suchvorgang dreimal hintereinander erfolglos ist, wird mit einer Fehlermeldung „Keine Aufrisslinie gefunden“ in das Start-Menü gesprungen und der Bediener kann von dort in das Setup-Menü gelangen und dort die Linie und den Aufrisspunkt neu teachen.

Wird die Aufrisslinie erkannt, wird auf das Drücken der Zweihand-Taster gewartet. Falls zusätzlich ein Aufrisspunkt im Bild gefunden wird (zum Beispiel, falls an dieser Stelle bereits gedübelt wurde) wird zuerst eine bestimmte Strecke nach vorne verfahren, ohne auf die Meldung „Arbeitspunkt gefunden“ zu reagieren. Damit wird gewährleistet, dass einmal bearbeitete Punkte nie ein zweites Mal angefahren werden. Falls nur die Linie erkannt wird, werden die Liniendaten über die Kommunikationsschnittstelle übertragen und die Echtzeit-Steuerung übernimmt nach dem Drücken der Zweihand-Taster die Führung des Roboters entlang der Linie entsprechend den vom Bildverarbeitungssystem ermittelten Abweichungen von der Führungslinie.

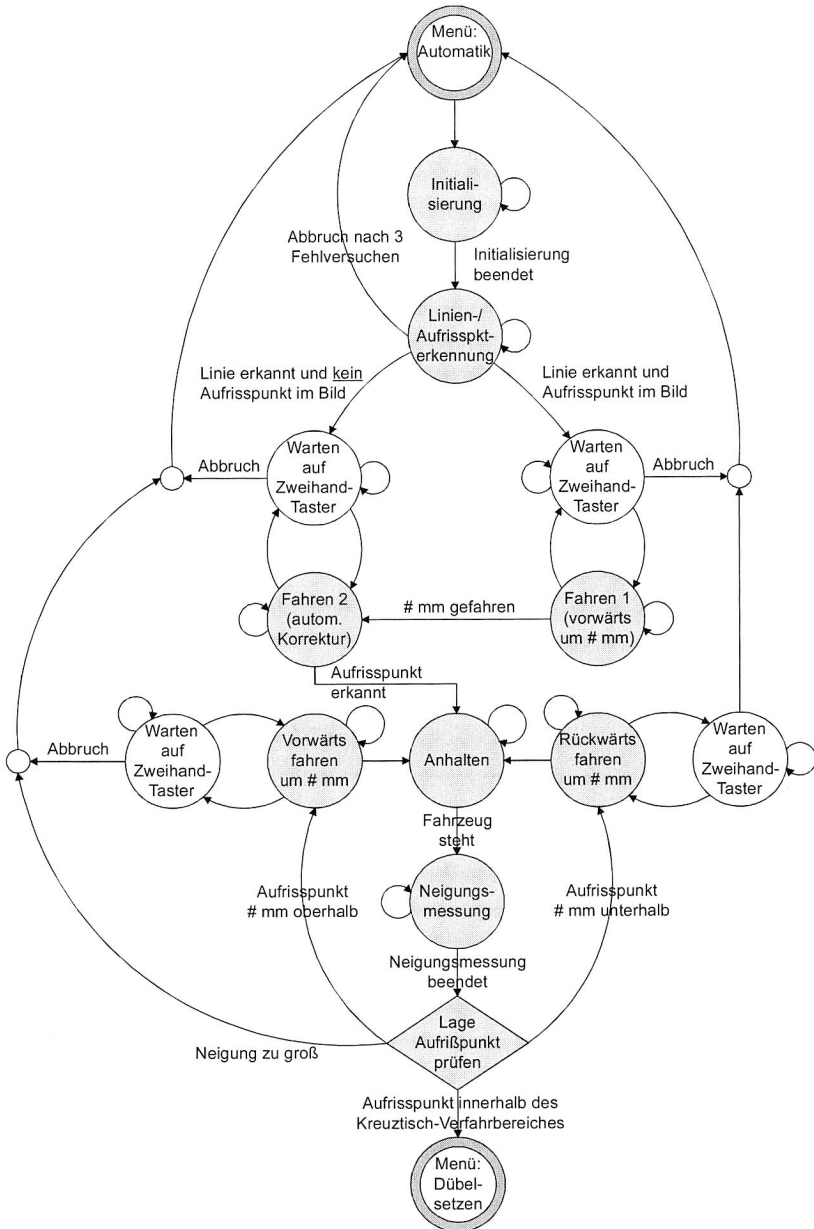


Bild 61: Ablaufgraph zum Betriebsfall „Vollautomatik“

Der Roboter setzt sich in Bewegung und verfolgt die Linie solange, bis entweder ein Aufrisspunkt erkannt oder die Linie länger als 200 mm unterbrochen war und nicht mehr im Bild zu erkennen ist. Sobald ein Aufrisspunkt gefunden wird, wird über die Kommunikationsschnittstelle der entsprechende Befehl zum Anhalten des Roboters gesendet. Nachdem das Anhalten bestätigt ist, wird nach einer kurzen Sicherheitspause die Neigungsmessung des Roboters ausgelöst. Anschließend wird überprüft, ob der Aufrisspunkt innerhalb oder außerhalb des Korrekturbereichs des Kreutzes ist. Falls der Aufrisspunkt außerhalb liegt, werden die entsprechenden Korrekturbewegungen (Roboter bewegt sich vorwärts oder rückwärts) veranlasst, befindet sich der Aufrisspunkt innerhalb des Verfahrbereichs des Kreutzes, werden die Korrekturdaten für den Kreutzes mit der gemessenen Neigung und der ermittelten Abweichung vom Aufrisspunkt berechnet (vgl. Kapitel 6.2.3) und an die Echtzeit-Steuerung übertragen. Schließlich wird auf das Menü „Dübelsetzen“ umgeschaltet.

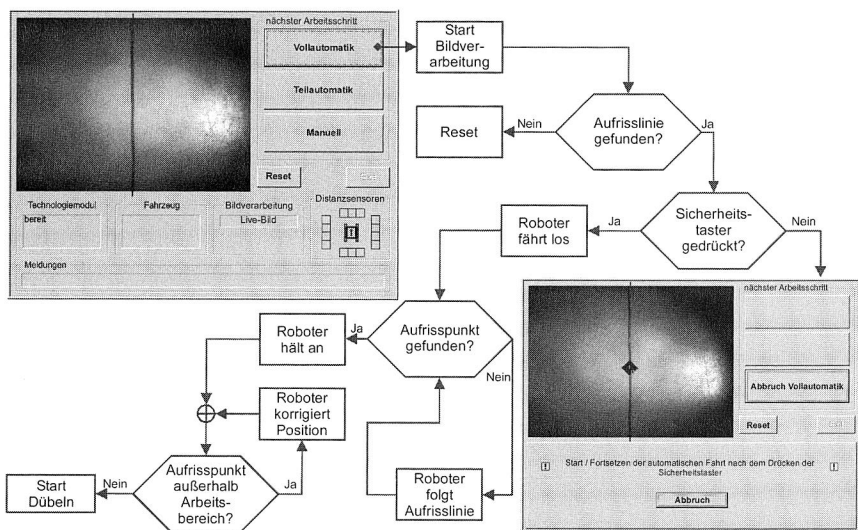


Bild 62: Ablaufdiagramm und Erscheinungsbild der Benutzerschnittstelle während des Betriebsmodus „Vollautomatik“

Alle anderen Betriebsmodi bzw. Unterfunktionen lassen sich in einer ähnlichen Struktur darstellen und brauchen an dieser Stelle nicht detailliert betrachtet zu werden.

6.2.3 Neigungs- und Positionskorrektur

Es ist unmittelbar einsichtig, dass mit dem gewählten Fahrwerk ein exaktes Erreichen der gewünschten Sollposition nicht gewährleistet werden kann, kleinere Abweichungen werden immer in Kauf genommen werden müssen. Zusätzlich tritt ein Positionsfehler der Bohrmaschine durch die Toleranzen bei der Neigung des Bodens auf. Eine Neigung von 0,6 Grad hat bei einer Deckenhöhe von 3,6 Meter bereits einen Versatz des Setz-

werkzeuges von 3,7 cm zur Folge. Die genaue Position des Dübels darf aber nur um ± 5 mm abweichen. Neigungen des Bodens wirken sich demnach kritisch auf die einzuhaltenden Positionierungstoleranzen aus. Da mit einer Höhengschwankung des Bodens aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten zu rechnen ist, muss ein Ausgleichsmechanismus vorgesehen werden. Dazu wird die Neigung des Bodens mithilfe von Neigungssensoren gemessen und das Ergebnis bei der Positionierung der Werkzeugachse berücksichtigt. Die Achse trifft dann zwar immer noch schräg auf die Decke, der seitliche Versatz wird aber eliminiert.

Die vom Bildverarbeitungssystem bestimmte Lage des Aufrisspunktes wird relativ zum Mittelpunkt der Kamera ausgegeben, der an das Technologiemodul zu übermittelnde Wert muss jedoch relativ zum Mittelpunkt des Kreuztisches übertragen werden. Da die Mittelpunkte des von der Kamera erfassten Bereiches und des Verfahrbereichs des Kreuztisches nicht exakt übereinstimmen, müssen die für diese Berechnung notwendigen Korrekturwerte zuerst im Experiment einmalig ausgemessen und anschließend im Setup-Menü des Transportmoduls eingegeben werden. Die Lage der lokalen Koordinatensysteme wird dabei so gewählt, dass die Orientierungen übereinstimmen.

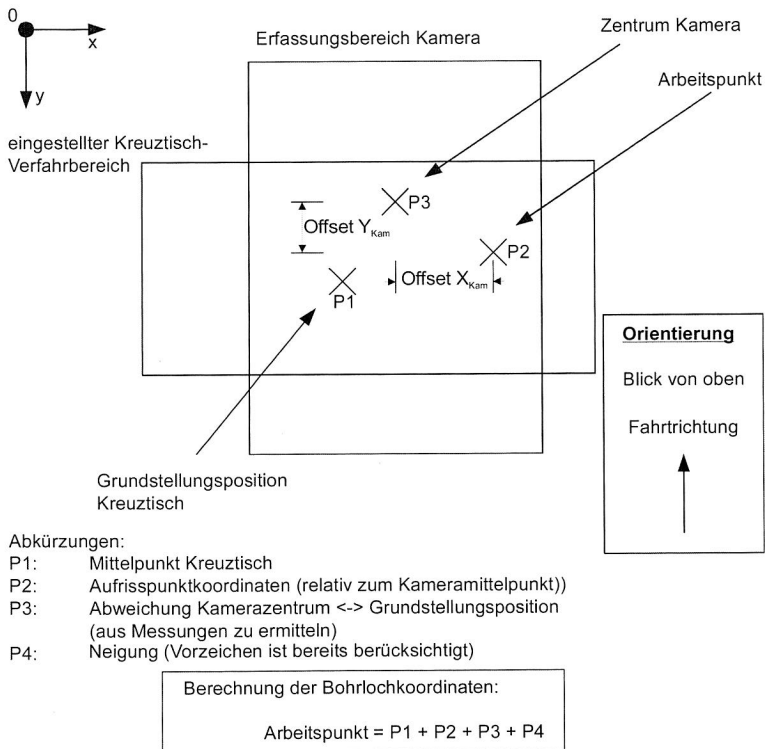


Bild 63: Zusammenfassung der Berechnungen zur Neigungs- und Positionskorrektur

Der zu übertragende Korrekturwert berechnet sich dann als einfache Addition des Offsets des Kameramittelpunktes zum Mittelpunkt des Kreutztischs und den Punktkoordinaten im Kamerasystem. Schließlich muss der durch die Neigung verursachte Versatz berücksichtigt werden, dieser Wert ermittelt sich nach folgender Formel, die sowohl für die x- als auch die y-Richtung gilt:

$$\text{Versatz} = \text{Deckenhöhe} * \tan(\text{gemessener Winkel})$$

Ein positiver Winkel in der Querneigung bedeutet, dass der Roboter von hinten betrachtet nach rechts geneigt ist, die Korrekturbewegung des Kreutztischs also nach links gehen muss. Entsprechend ist die Längsneigung positiv, wenn der Roboter nach hinten geneigt ist, der Kreutztisch also nach vorne bewegt werden muss. Insgesamt resultiert daraus die in Bild 63 angegebene Formel.

6.3 Steuerungsfunktionen im Echtzeit-Betriebssystem

Die für ein zuverlässiges Gesamtsystem kritischsten Komponenten sind die Bewegungssteuerung und die Hinderniserkennung. In Kapitel 6.1 wurde schon darauf hingewiesen, dass dafür Echtzeitfunktionalitäten der Steuerung unbedingt notwendig sind.

Ein wichtiger Grund hierfür ist die Verwendung von digitalen Regelalgorithmen, beispielsweise in der Bewegungssteuerung. So würde ein digitaler Regelungsalgorithmus, mit dessen Hilfe in der Theorie nach jedem konstanten Zeitintervall T eine neue Stellgröße u berechnet wird, ein völlig unvorhersehbares Verhalten der geregelten Strecke verursachen, wenn das Zeitintervall T einer plötzlichen Schwankung (sog. Jitter) unterworfen wäre [33]. Die Einhaltung von konstanten Zeitintervallen ist aber auch für die Koordination mehrerer Prozesse unabdingbar. Dies erst ermöglicht eine zeitgenaue Planung der unterschiedlichen, abzuarbeitenden Aufgaben.

Ein weiterer Grund ist, dass die Meldungen über den Zustand der Fahrzeugumgebung, welche die Funktionen der Hinderniserkennung generieren, auf jeden Fall rechtzeitig verarbeitet werden müssen, um bei möglichen Hindernissen entsprechend reagieren zu können. Dies bedeutet, dass die Steuerungssoftware auf keinen Fall völlig ausgelastet sein darf und definierte Reaktionszeiten gewährleisten muss.

Besonders unter dem Aspekt der kostengünstigen Realisierung des Gesamtsystems ist die DOS-Erweiterung RTKernel als Echtzeit-Multitasking-System eine gute Wahl, da spezielle Echtzeitbetriebssysteme, wie VxWorks, hohe Investitionen verursachen, spezielle Entwicklungssysteme und einen entsprechend hohen Einarbeitungsaufwand erfordern. Bei RTKernel handelt es sich um eine Bibliothek, die in die Software eingebunden werden kann, d. h. die fertige Applikation läuft innerhalb eines einzigen ausführbaren Programms ab. RTKernel kann dabei unbeschränkt viele Tasks verwalten und hält die Taskwechselzeiten für jede Anzahl von Tasks konstant. Durch maximal 64 Prioritäten lässt sich das Verhalten der Programme sehr genau festlegen, die Kommunikation zwischen den Tasks kann über Semaphoren oder Mailboxen erfolgen. Die Entscheidung, welche Task zu welchem Zeitpunkt läuft, wird vom sog. Scheduler auf Basis der Zustände und Prioritäten der einzelnen Tasks gefällt. So läuft immer die Task, die von

allen Tasks im Zustand „Bereit“ die höchste Priorität hat. Haben mehrere Tasks die gleiche Priorität, wird die Task, die am längsten nicht gelaufen ist, aktiviert [66].

In Bild 64 sind die einzelnen Module, aus denen der Echtzeitteil der Steuerung besteht, und ihre Abhängigkeiten voneinander dargestellt.

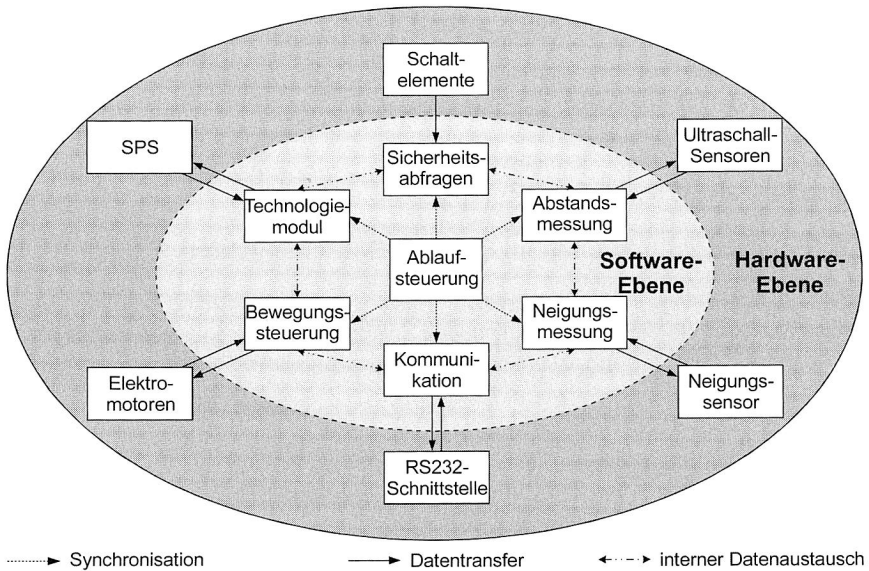


Bild 64: Module im Echtzeitteil der Steuerung

Jedes dieser Module ist als eigene Task realisiert, die parallel nebeneinander abgearbeitet werden. Da auf einem Ein-Prozessor-System die verschiedenen Tasks nicht gleichzeitig ablaufen können, muss vom Betriebssystem die Umschaltung zwischen den einzelnen Tasks vorgenommen werden (s. o.). Nachdem die einzelnen Tasks nicht völlig unabhängig voneinander laufen können, müssen sie mithilfe von Mechanismen der Inter-Task-Kommunikation (im vorliegenden Fall vor allem mit sog. Semaphoren“) untereinander synchronisiert werden. Zwischen den unterschiedlichen Tasks besteht eine hierarchische Abstufung, d. h. Tasks mit einer höheren Priorität können solche mit einer niedrigeren Priorität jederzeit unterbrechen. Im vorliegenden Fall weist die Task „Ablaufsteuerung“ die höchste Priorität auf, die Steuerungstasks „Bewegungssteuerung“, „Hinderniserkennung“ und „Kommunikation“ haben untereinander eine gleichwertige, im Vergleich zur Ablaufsteuerung aber niedrigere Priorität. Mit dieser Struktur wird gewährleistet, dass auf jeden Fall alle 20 ms die Ablaufsteuerung aktiviert wird, welche dann nacheinander die in Bild 64 angegebenen Steuerungstasks anspricht. Nachdem bei der Entwicklung von Echtzeit-Betriebssystemen dafür Sorge getragen werden muss, dass das System nie überlastet ist, kommen aber auch die restlichen Tasks jeweils einmal zum Zuge.

6.3.1 Ablaufsteuerung

Der Ablaufsteuerung obliegen die Koordinierung der einzelnen Module, die Überwachung deren ordnungsgemäßen Ausführung und die Reaktion auf Fehlerzustände [29]. Sie bildet somit die zentrale Funktion des Steuerungssystems. Die Unterfunktion Fehlerbehandlung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht als vollautomatisch ablaufende Prozedur implementiert, vielmehr unterbricht im Fehlerfall die Ablaufsteuerung die weitere Ausführung der Aufgabe und gibt an die Mensch-Maschine-Schnittstelle eine Fehlermeldung inklusive Fehlerbeschreibung weiter. Der Bediener ist dann für die manuelle Behebung des Fehlers und die Entscheidung über das weitere Vorgehen verantwortlich. Dabei liefert ihm die Mensch-Maschine-Schnittstelle eine der aktuellen Situation angemessene Auswahl an möglichen Alternativen.

Die Funktionalität der Ablaufsteuerung wird in Form eines diskreten Automaten verwirklicht. Die Beschreibung erfolgt durch seinen Automatengraph, dargestellt in Bild 65. Beim Entwurf wurde bewusst auf eine Minimierung verzichtet, um den vorgesehenen Arbeitsablauf möglichst genau darzustellen und den Graphen auf diese Weise für Erweiterungen offen zu halten.

Nach dem Programmstart erfolgt die Initialisierung. Dabei werden u. a. die Tasks „Bewegungssteuerung“ und „Kollisionsvermeidung“ erzeugt und die Kommunikation mit dem Windows NT-Rechner gestartet. Über das Mensch-Maschine-Interface (Button „Setup“) kann der Bediener zu diesem Zeitpunkt erforderliche Grundeinstellungen vornehmen oder ändern. Das Ende dieses Zustands wird vom Benutzer signalisiert und damit der Wechsel in den Zustand „Bereit“ initiiert. Hier findet zunächst eine Überprüfung aller sicherheitsrelevanten Parameter statt. So werden z. B. die Neigung des Fahrzeugs und der Zustand des Technologiemoduls kontrolliert. Befinden sich alle Parameter innerhalb der vorgesehenen Toleranzgrenzen, kann bei entsprechenden Eingaben am Mensch-Maschine-Interface in den Zustand „Fahren mit Programm“ übergegangen werden. In diesem Zustand wird die Bewegungssteuerung aktiviert, die dann das Kettenfahrzeug verfährt. Wenn über die Kommunikationsschnittstelle gemeldet wird, dass die angestrebte Position innerhalb der Toleranzgrenzen erreicht wurde, wird in den Zustand „Stehen am Arbeitspunkt“ gewechselt. Mittels Bildverarbeitung wird nochmals die Abweichung des Fahrzeugs von der exakten Sollposition ermittelt und über die Kommunikationsschnittstelle der Echtzeit-Steuerung mitgeteilt. Dieser Korrekturwert wird anschließend mit der Neigung des Fahrzeugs (vgl. Kapitel 6.2.3) verrechnet, um die exakte Position für den Kreuztisch zu erhalten. Nach positivem Abschluss einer Sicherheitsüberprüfung, in deren Rahmen u. a. kontrolliert wird, ob sich das Arbeitsgerät auch korrekt zwischen Decke und Boden verspannt hat, wird mit dem Übergang zum Zustand „Arbeiten“ der Steuerung des Arbeitsgerüsts die Freigabe erteilt, worauf der eigentliche Arbeitsvorgang - Bohren von Löchern und Setzen von Deckenabhängern - ausgeführt wird. Dabei erfolgt eine ständige Statusmeldung an die Ablaufsteuerung, die beim Auftreten von Komplikationen zunächst eine Meldung an den Benutzer mit der Frage nach der weiteren Vorgehensweise absetzt.

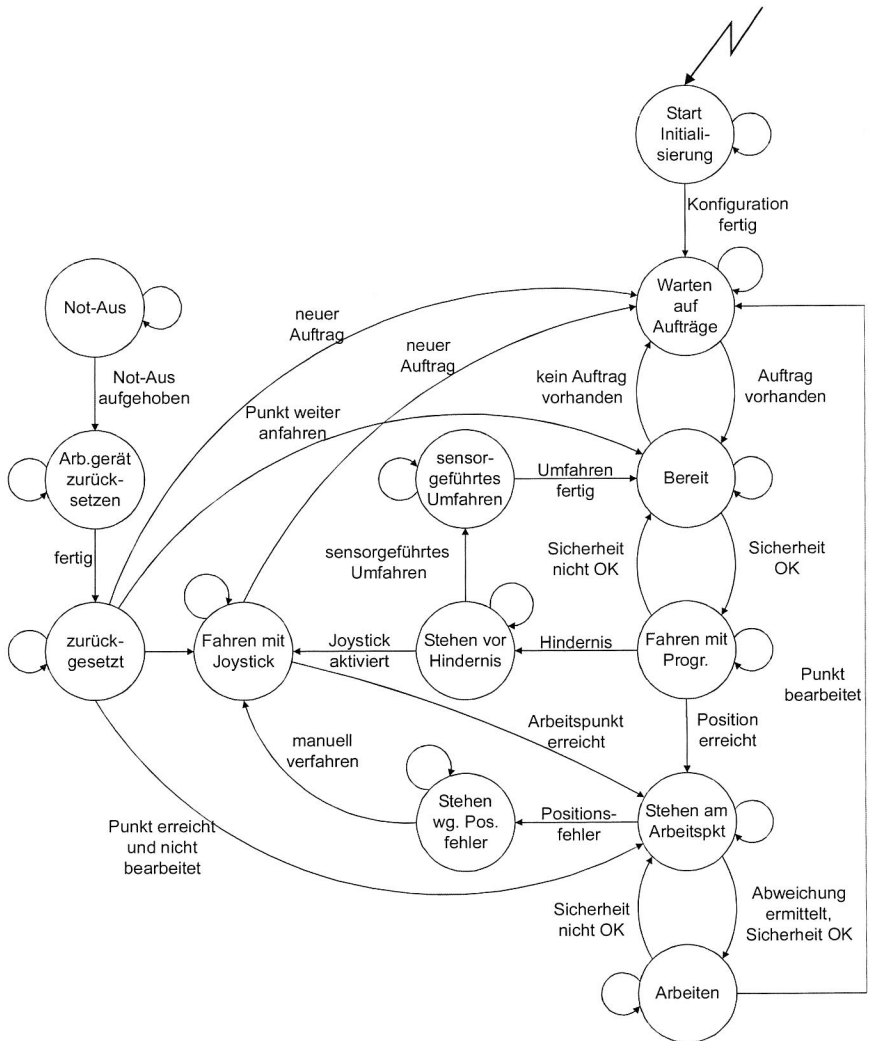


Bild 65: Automatengraph der Ablaufsteuerung (der Zustand „Not-Aus“ kann von jedem anderen Zustand aus erreicht werden, aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung dieser einzelnen Übergänge verzichtet)

Kritische Fehlerzustände führen zu einem sofortigen Wechsel in den Zustand „Not-Aus“. Dieser Zustand kann von jedem anderen Zustand zu jedem beliebigen Zeitpunkt erreicht werden. Der Pfad aus dem Zustand „Not-Aus“ beinhaltet zwei weitere Zustände „Arbeitsgeräte zurücksetzen“ bzw. „zurückgesetzt“, die vom Benutzer die Ausführung gewisser manueller Prozeduren bzw. die Entscheidung über die weitere Verfahrensweise

se verlangen. Es sind noch zwei mögliche Fehlerzustände, nämlich „Stehen vor Hindernis“ und „Stehen wegen Positionsfehler“ sowie deren Fehlerbehandlung „sensorgeführtes Umfahren“ und das manuelle „Fahren mit Joystick“ in dem Automatengraph implementiert. Ausgelöst werden diese Fehlerzustände durch die Funktionen „Umgebungserfassung“ bzw. „Kollisionsvermeidung“ sowie der Bildverarbeitung (dann durch eine entsprechende Mitteilung über die Kommunikationsschnittstelle).

6.3.2 Kommunikationsschnittstelle

Die Kommunikation zwischen den beiden Steuerrechnern findet über die serielle Schnittstelle mit 56000 Baud statt, d. h. es könnten theoretisch maximal 56000 Bytes pro Sekunde übertragen werden. Pro Kommunikationszyklus werden vier Datenbytes, ein Byte mit der Checksumme sowie ein Synchronisationsbyte zu Beginn der Datenübertragung und ein Bestätigungsbyte bei fehlerfreier Datenübertragung gesendet. Das Synchronisationsbyte ist erforderlich, da der Windows-Steuerrechner unabhängig vom Zustand des RT-Rechners sendet und das Echtzeitbetriebssystem nicht dadurch blockiert werden darf, indem es auf Sendedaten des Windows-Rechners wartet.

Die Checksumme wird nach dem CRC-Verfahren (Cyclic Redundancy Checksum) berechnet. Dabei wird nicht, wie zum Beispiel bei der Paritätsprüfung, ein einziges Bit zur Fehlererkennung verwendet, sondern eine Prüfsumme aus mehreren Bits ermittelt [115], [118]. Der Algorithmus kann auf eine beliebige Anzahl der pro Kommunikationszyklus übertragenen Bytes angewandt werden und bietet eine hohe Sicherheit bezüglich einer fehlerfreien Datenübertragung.

Die vier Datenbytes kennzeichnen den übertragenen Datentyp („datatype“), den Zustand bestimmter Sicherheitseinrichtungen („secbyte“) sowie den eigentlichen Zahlenwert („highbyte“, „lowbyte“) der übertragenen Information. Die Information im Datentyp wird nochmals unterteilt in ein High-Nibble (obere vier Bits) und ein Low-Nibble (untere vier Bits). Im High-Nibble wird abgelegt, ob der Roboter eine Aktion ausführen soll (z. B. Anhalten, Fahrt geradeaus, Arbeitsvorgang starten,...) oder ob es sich um Liniendaten oder das Ergebnis einer Neigungsabfrage handelt.

Bei Liniendaten wird das Low-Nibble mitverwendet, um die Auflösung der übertragenen Werte zu erhöhen. Das Bit 1 des Bytes „datatype“ ist gesetzt, wenn der absolute Winkel zwischen Aufrisslinie und Fahrzeugachse negativ ist, d. h. der Roboter muss sich gegen den Uhrzeigersinn drehen, um den Winkel zu verkleinern. Der eigentliche Wert des Winkels wird im „lowbyte“ übertragen. Ein gesetztes Bit 2 zeigt an, dass der absolute Abstand zur Aufrisslinie größer als 255 mm ist. Der eigentliche Linienabstand wird im „highbyte“ gesendet. Mit dieser Konstruktion der Datenübertragung kann erreicht werden, dass eine minimale Anzahl von Datenbytes gesendet wird.

Für die permanente Anzeige der Sicherheitsinformationen auf dem MMI wird mit jedem Kommunikationszyklus das „secbyte“ gesendet. Darin sind Informationen codiert, ob zum Beispiel der Not-Aus- oder die Zweihand-Taster gedrückt wurden, ob der Schlüsselschalter auf „Joystick-Steuerung“ steht oder ob der Roboter gerade im Modus „Batteriebetrieb“ arbeitet. Alle diese Informationen werden nur zur Weitergabe an den Bedie-

ner übertragen, alle sich daraus ableitenden sicherheitsrelevanten Funktionen werden unmittelbar nach Eintritt des Ereignisses vom Echtzeitbetriebssystem ausgelöst.

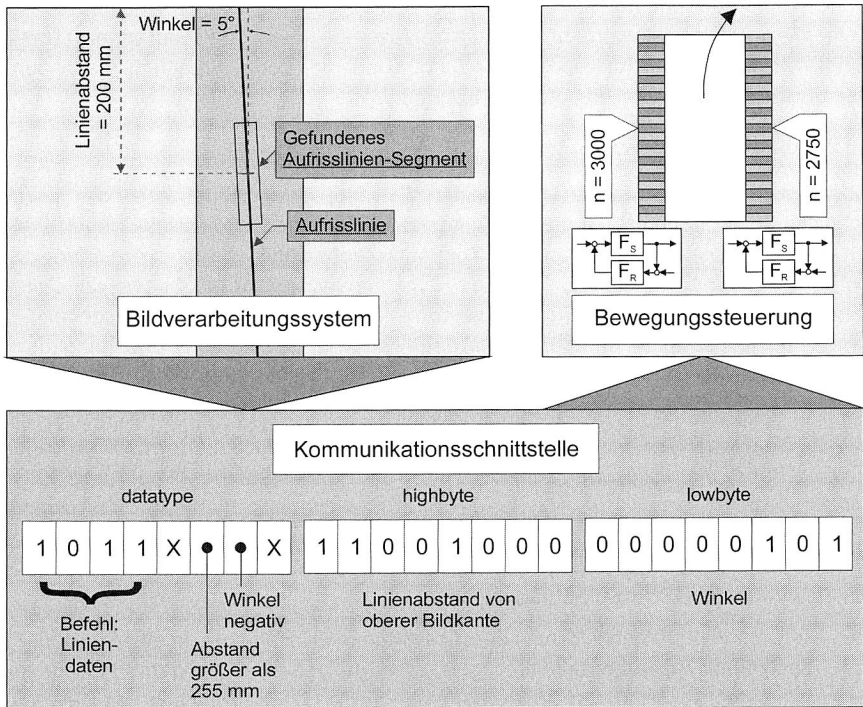


Bild 66: Zusammensetzung der Liniendaten aus drei gesendeten Bytes

Sobald der NT-Rechner etwas senden möchte, gibt er als erstes ein Synchronisationsbyte aus. Dieses wird spätestens 20 ms (entspricht der Zykluszeit des Echtzeitbetriebssystems) später vom Echtzeitbetriebssystem erkannt und bestätigt. Unmittelbar danach werden die zu sendenden Daten des RT-Rechners zum Windows-Rechner geschickt. Unabhängig davon sendet Windows die vier Datenbytes und das Ergebnis der Checksummenberechnung an den Echtzeitrechner und liest seinerseits dessen Daten. Der Windows-Rechner prüft dann die Korrektheit der Checksumme. Stimmt die berechnete Checksumme mit der Checksumme im Datenpaket überein, bestätigt Windows den korrekten Empfang der Daten. Auf Seiten des Echtzeitrechners erfolgt nun eine Plausibilitäts- und Checksummenprüfung der empfangenen Zeichen. Nur bei einer fehlerfreien Übertragung werden die empfangenen Daten den restlichen Tasks verfügbar gemacht und ebenfalls eine Bestätigung an den Windows-Rechner geschickt.

Tritt in einem Kommunikationszyklus ein Fehler auf, zum Beispiel kann durch einen Übertragungsfehler ein Unterschied in der berechneten und empfangenen Checksumme bestehen, wird dieser Kommunikationszyklus abgebrochen und mit unveränderten

Sendedaten auf beiden Seiten wiederholt, indem der Windowsrechner das Synchronisationsbyte sendet.

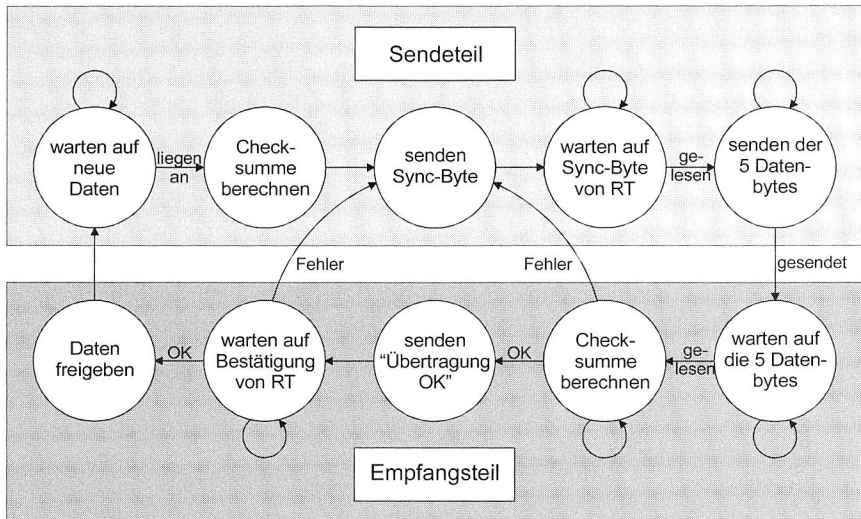


Bild 67: Ablauf der Datenübertragung zwischen dem Windows- und dem RT-Rechner

Auf der Seite des Echtzeitbetriebssystems besteht die Möglichkeit, dass ein voller Kommunikationszyklus nicht innerhalb eines Durchlaufs beendet werden kann, da die Datenübertragung von Windows asynchron zum Takt des Echtzeitsystems initiiert wird, andere Tasks die Prozessorleistung des RT-Steuerrechners benötigen und der Kommunikationstask der Prozessor entzogen wird. In diesem Fall wird bei der erneuten Zuteilung des Prozessors exakt an dieser Stelle fortgefahren, an der unterbrochen wurde. Taskwechsel im Echtzeitbetriebssystem verursachen also keine Übertragungsfehler bei der Kommunikation.

6.3.3 Bewegungssteuerung

Die Bewegungssteuerung setzt die von der Ablaufsteuerung vorgegebenen elementaren Bewegungsaktionen wie z. B. Geradeausfahrt oder Kurvenfahrt, in einen zeitlichen Ablauf von Antriebs-Sollwerten um [29]. Dazu müssen die vorgegebenen Wegstücke entsprechend der tatsächlichen Verfahrensmöglichkeiten der zugrunde liegenden Fahrwerkkinematik interpoliert werden. Zusätzlich ist die Unterstützung durch Sensorsignale der Umgebungserfassung möglich, z. B. um einem Hindernis auszuweichen [36], [60], [21].

Die elementaren Bewegungsaktionen für die Fahrzeugplattform, wie z. B. Geradeausfahrt oder Kurvenfahrt, sind von der Bewegungssteuerung in einen zeitlichen Ablauf von Antriebs-Sollwerten für die Motoren unter Berücksichtigung der statischen und dynamischen Eigenschaften der Fahrwerkskinematik umzusetzen. Grundlage zur Realisierung

der Bewegungssteuerung bildet daher die Kenntnis der Kinematik des Fahrzeugs. Dem Kettenfahrzeug liegt die so genannte Panzerlenkung zugrunde [116]. Das Konstruktionsprinzip dieser Lenkconfiguration ermöglicht die Lenkung und den Vortrieb des Fahrzeugs allein durch die Drehzahl der beiden Antriebe.

Bild 68 zeigt ein vereinfachtes Modell eines Raupenfahrzeuges. Der Schwerpunkt S ist der Mittelpunkt des Fahrzeuges bei halber Fahrzeugbreite $b/2$ und halber Fahrzeuglänge $l/2$. Die in der Skizze grau unterlegten Ketten des Fahrzeuges werden für die weiteren Berechnungen als beliebig schmal angenommen, d. h. der Schlupf zwischen Ketten und Boden wird nicht berücksichtigt. Dieser Schlupf kann bis heute nicht exakt modelliert werden, man ist daher immer auf Erfahrungs- bzw. Schätzwerte angewiesen.

Sowohl der linken als auch der rechten Kette wird eine Beschleunigung a zugeordnet, die im Abstand $b/2$ vom Schwerpunkt S auf der Fahrzeugquerachse liegend angreift. Aus diesen Beschleunigungen a_L und a_R lassen sich die momentanen Tangentialgeschwindigkeiten v_L und v_R gewinnen.

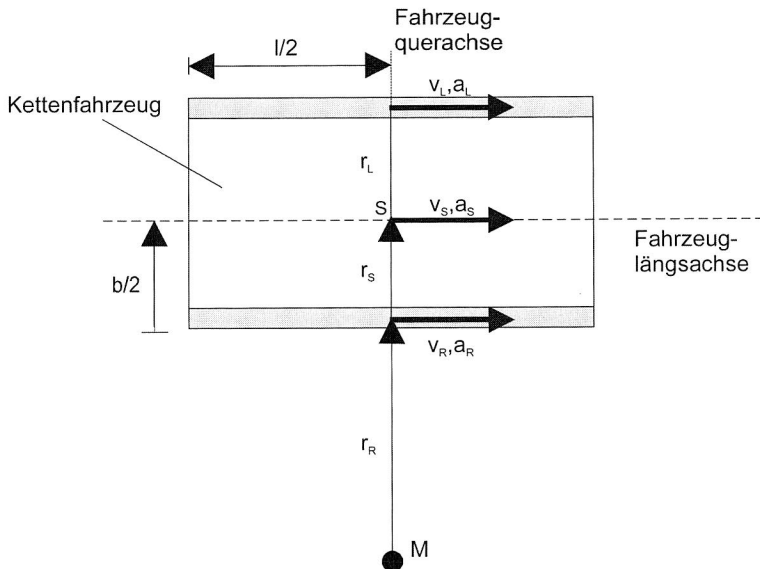


Bild 68: Kinematik eines Kettenfahrzeugs

Zur Berechnung der Fahrzeugbahn wird das Fahrzeug als starrer Körper, der seine Form nicht verändert und dessen Komponenten immer die gleiche Lage zueinander haben, gesehen. Das Raupenfahrzeug führt eine ebene Bewegung aus, die zwei Freiheitsgrade der Translation und einen Freiheitsgrad der Rotation besitzt; d. h. Unebenheiten des Bodens werden nicht berücksichtigt. Nach [54] lässt sich die ebene Bewegung eines starren Körpers außer als Überlagerung von Translation und Rotation auch als reine Drehung um einen momentanen Drehpol M beschreiben. Hierzu muss die ki-

nematische Fahrzeugachse den Mittelpunkt der Fahrzeugbahn enthalten. Gerade Bahnen werden als entartete Kreise mit unendlich großem Radius gesehen.

Einige grundsätzliche Überlegungen erleichtern die Vorstellungen von den Bewegungen des Kettenfahrzeugs:

- Das Fahrzeug bewegt sich auf einer Kreisbahn, wenn das Verhältnis der Geschwindigkeit der linken Kette v_L zu dem der rechten Kette v_R konstant, aber verschieden von eins ist.
- Das Kettenfahrzeug fährt geradeaus, wenn die Tangentialgeschwindigkeiten v_L und v_R gleich groß sind.
- Das Fahrzeug dreht sich um den Fahrzeugschwerpunkt, wenn $v_L = -v_R$ gilt.

Im Folgendem werden die mathematischen Beziehungen, die eine reine Drehung um einen momentanen Drehpol beschreiben, hergeleitet.

Mithilfe des Strahlensatzes können aus den gegebenen Größen - den Radien r_L und r_R , den Beschleunigungen a_L und a_R und den geometrischen Abmessungen b und l - die für die Bestimmung der Bewegung notwendigen Schwerpunktvariablen berechnet werden (siehe Bild 68). Es gilt:

$$\frac{v_L}{v_R} = \frac{r_L}{r_R} \quad (\text{Strahlensatz}), \text{ wobei} \quad \begin{aligned} r_L &= r_S + b/2 \\ r_R &= r_S - b/2 \end{aligned}$$

Die Geschwindigkeiten $v_L(t)$ und $v_R(t)$ ergeben sich aus den Anfangsbedingungen v_{L0} und v_{R0} und den Beschleunigungen a_L und a_R gemäß

$$v_L(t) = v_{L0} + \int_0^t a_L(\tau) d\tau \quad v_R(t) = v_{R0} + \int_0^t a_R(\tau) d\tau$$

Mit dem Radius des Schwerpunktes

$$r_S = \frac{b}{2} \cdot \frac{(v_L + v_R)}{(v_L - v_R)}$$

und seiner Translationsgeschwindigkeit

$$v_S = \frac{(v_L + v_R)}{2}$$

ergibt sich die Winkelgeschwindigkeit ω_S zu

$$\omega_S = \frac{v_S}{r_S} = \frac{v_L - v_R}{b}$$

Das Vorzeichen von r_S gibt Auskunft über die Drehrichtung des Raupenfahrzeugs. Ist der Schwerpunktradius größer Null, dann fährt das Fahrzeug eine Rechtskurve, bei $r_S < 0$ macht es eine Linkskurve.

Zur Bestimmung des Systemverhaltens des Fahrzeugs und zur Ableitung eines mathematischen Modells werden Versuche zum Fahrverhalten auf verschiedenen Bodenbelägen oder unter verschiedenen Gewichtsbelastungen durchgeführt. Es werden Fahrsituationen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, verschiedenen Kurvenradien und Fahrrichtungen aufgenommen. Darüber hinaus wird ein Vergleich zwischen der tatsächlich zurückgelegten Strecke und der mit den Encodern gemessenen Distanz ange-

stellt, um Aussagen über den Schlupf der Ketten zu erhalten. Als Ergebnis dieser Versuche können die notwendigen Parameter für die Umsetzung der Bewegungssteuerung bestimmt werden.

Die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Wie die Vergleiche der Sprungantworten der beiden Motoren und der Vergleich der Sprungantworten von Vor- und Rückwärtsfahrt für einen Motor zeigen, sind die Drehzahlen trotz gleicher Sollwertvorgaben unterschiedlich groß. In der Bahnregelung muss daher ein Ausgleich zwischen dem linken und rechten Motor stattfinden.
- Alle Sprungantworten haben den gleichen Verlauf bezüglich der Anstiegsrampen. Die Kurven zeigen das Verhalten eines $P-T_1$ -Systems. Die interne analoge Drehzahlregelung ist vollkommen ausreichend, so dass eine Überlagerung durch einen digitalen Regler nicht notwendig wird.
- Da der Schlupf auf einen konstanten Wert abklingt, ist es möglich als Approximation einen konstanten Schlupffaktor zum Ausgleich der Differenz zwischen berechnetem und gefahrenem Weg einzubauen. Somit ergibt sich für die Bahnregelung ein P-Regler, der die annäherungsweise Korrektur des Schlupfes vornimmt.

Basierend auf diesen Ergebnissen kann nun die Wegregelung entworfen werden. Der komplette Regelkreis für eine Kette ist in Bild 69 dargestellt. In der Steuerelektronik des Fahrzeugs ist bereits eine Drehzahlregelung mit einer unterlagerten Stromregelung analog realisiert. Der Drehzahlregler ist dabei als PI-Regler ausgeführt, bei der Stromregelung handelt es sich um einen Zweipunkt-Regler, der innerhalb eines vom Hersteller eingestellten Toleranzbandes den Strom regelt.

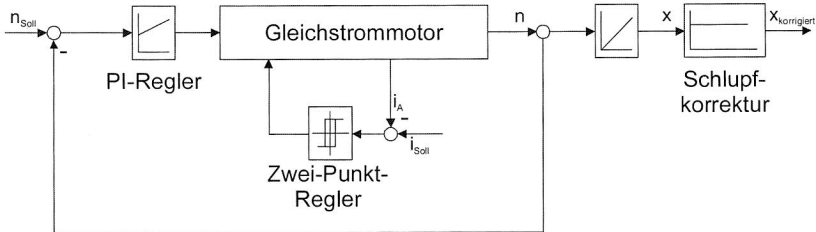


Bild 69: Regelkreis für eine Kette bestehend aus Drehzahlregler mit unterlagelter Stromregelung und Schlupfkompensation

Die Wegregelung des Fahrzeugs beschränkt sich daher auf jeweils einen P-Regler für jede Kettenseite, der die Korrektur des Schlupfes, ebenfalls nach den Erkenntnissen der Systemidentifikation, durchführt sowie einer übergeordneten Instanz, welche den Abgleich der beiden Regler vornimmt, um beispielsweise den Gleichlauf der Ketten bei einer Geradeausfahrt zu gewährleisten. Je nach Fahrsituation wird dabei für einen der beiden Motoren der Drehzahlsollwert (z. B. 2500 U/min) festgelegt und der Sollwert für den anderen Motor entsprechend angepasst. Dies ist notwendig, da die Sollwerte für

die Drehzahlen analog vorgegeben werden müssen, bei der Umsetzung der digitalen Werte in analoge Größen treten aber systembedingt Abweichungen in den Kennlinien auf, so dass bei Vorgabe gleicher Spannungswerte die Drehzahlen der Motoren leicht voneinander abweichen können und eine fehlerfreie Geradeausfahrt dann nicht mehr gewährleistet werden kann.

Grundsätzlich können mit jedem neuen Systemzyklus neue Fahrparameter (Weglänge, Drehradius oder Drehwinkel und die Drehzahl) für jeden Motor vorgegeben werden. Damit ist eine schnelle Reaktion auf externe Änderungswünsche der Bewegungsrichtung gewährleistet. Die Art der Fahrparameter hängt von der jeweiligen Bewegungsfunktion ab. Im Einzelnen werden folgende Funktionen zur Verfügung gestellt:

• Geradeausfahren vorwärts	• Drehen gegen den Uhrzeigersinn
• Geradeausfahren rückwärts	• Drehen im Uhrzeigersinn
• Rechtskurve vorwärts	• Rechtskurve rückwärts
• Linkskurve vorwärts	• Linkskurve rückwärts

Tabelle 9: Funktionen der Bewegungssteuerung

Falls keine Änderungen der Fahrparameter erfolgen, wird die zuletzt gestartete Bewegung weiter ausgeführt, danach bleibt das Fahrzeug stehen. Dabei ist zu beachten, dass das Fahrzeug nur dann bewegt wird, wenn der Bediener die externen Zwei-Hand-Taster betätigt. Ohne diese Freigabe werden keine Werte an die Bewegungssteuerung vorgegeben und zusätzlich werden über Relais die Motoren von der Spannungsversorgung abgetrennt.

Der modulare Aufbau der Steuerung ermöglicht es, verschiedene Fahrwerkskinematiken zu verwenden, ohne die gesamte Steuerung ändern zu müssen. Es muss lediglich das Systemverhalten des Fahrzeugs durch einige der oben angesprochenen Versuche ermittelt werden, dann lässt sich die Bewegungssteuerung sehr schnell an das neue Fahrwerk anpassen.

6.3.4 Hinderniserkennung

Aufgabe der Hinderniserkennung ist es, Informationen über die momentane Umgebungssituation bereitzustellen oder einen Bezug zu einem bekannten Umgebungsmodell, z. B. bei Erstellung von Fahrtrouten in einem CAD-System, herzustellen [29]. Die von den Sensoren der Umgebungserfassung gelieferten Informationen werden in einigen Anwendungsfällen gleichzeitig für die Funktionen der Positionsbestimmung und des Kollisionsschutzes verwendet. So lassen sich zum Beispiel die durch die Umgebungssensorik gewonnenen Informationen zur Positionsbestimmung verwenden, indem selbständig ein Umgebungsmodell erzeugt wird und dieses mit einem bereits bekannten Umgebungsmodell verglichen wird (vgl. Kapitel 5). Darüber hinaus können die Informationen zur selbständigen Erstellung eines Umgebungsmodells in unbekannten Umge-

bungen, beim sensorgeführten Umfahren von bekannten Hindernissen und bei der direkten Steuerung des Fahrzeugs durch Sensoren dienen. Einen Überblick über Sensoren zur Umgebungserkennung, basierend auf unterschiedlichen physikalischen Grundprinzipien, gibt Bild 70.

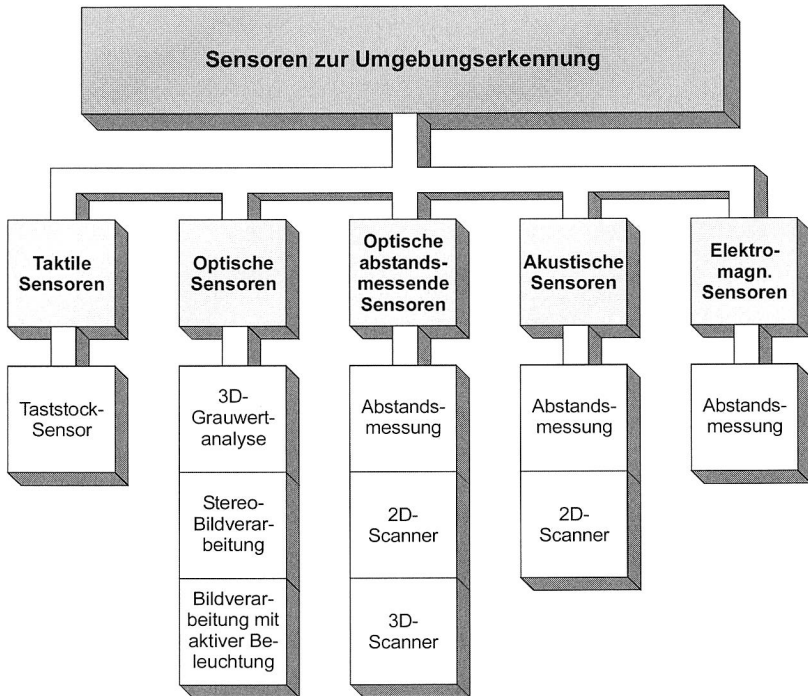


Bild 70: Sensoren zur Umgebungserkennung [29]

Taktile Sensoren können lediglich bereits aufgetretene Kollisionen feststellen. Daher bietet sich zur Minimierung von kollisionsbedingten Stillstandszeiten die Verwendung berührungslos messender Sensoren an. Um eine flexible Programmierung eines Algorithmus für den Kollisionsschutz zu ermöglichen, ist es zudem erforderlich, dass die verwendeten Sensoren über die Fähigkeit, Distanzen messen zu können, verfügen. Dazu sind besonders Ultraschall-Sensoren geeignet. Sie verfügen gegenüber optischen Sensoren, die in der einfachsten Anordnung jeweils nur punktuell die Umgebung absichern, über eine weitwinklige Schallkeule, durch die sich mit wenigen Ultraschall-Sensoren ein umfassender Kollisionsschutz realisieren lässt.

Jedoch ist derzeit ein vollständiger Kollisionsschutz, allein auf Ultraschallsensoren basierend, nur durch erhebliche Mehrkosten realisierbar. Dies ist auf die sicherheitstechnischen Anforderungen zurückzuführen, die an automatische Fertigungssysteme gestellt werden. Laut VDI-Richtlinie 2854 müssen Teile von Steuerungen, die Sicher-

heitsfunktionen erfüllen, so ausgelegt sein, dass beim Auftreten von Fehlfunktionen innerer Fehler oder äußerer Störeinflüsse keine Gefahr für Personen entstehen. Dies bedeutet zum Beispiel für ein Sensorsystem, dass selbst bei Beschädigung der Sensorik durch Überspannung ihre Ausgangsschaltelemente in jedem Fall in den für das Fahrzeug sicheren Zustand übergehen müssen und damit das Fahrzeug sofort stoppen.

Bei Ultraschallsystemen würde ein Ausfall der Sendeelektronik, des Sendewandlers, des Empfangswandlers oder der Empfangselektronik dazu führen, dass kein Echosignal empfangen werden kann. Damit könnte jedoch ein anwesendes Hindernis nicht erkannt werden und bei herkömmlichen Ultraschallsystemen würde eine freie Bahn vorge täuscht werden. Deshalb überprüft bei speziellen Kollisionsschutz-Sensoren eine aktive Sensorüberwachung bei jeder Messung die Sensoren auf ihre sicherheitstechnischen Funktionen. Es wird zum Beispiel überprüft, ob ein Sendeimpuls abgestrahlt wurde und ob der Empfangswandler mit der nachgeschalteten Elektronik in der Lage ist, ein Echo zu empfangen. Darüber hinaus haben speziell für den Kollisionsschutz ausgelegte Systeme im Gegensatz zu den herkömmlichen Ultraschallsensoren keine Blindzone im Nahbereich. Somit kann selbst das Abdecken eines Ultraschallsensors durch einen Gegenstand, wie zum Beispiel einen Lappen, erkannt werden. Die Steuerung kann durch Erkennen dieses Zustands das Fahrzeug sofort stoppen bzw. die Freigabe zum Fahren verweigern.

Jedoch bringt der Einsatz derartiger Systeme erheblich höhere Kosten mit sich. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Projektes auf herkömmliche Ultraschallsensoren ohne aktive Sensorüberwachung zurückgegriffen. Auf einen Bumper als zusätzlichen Kollisionsschutz wurde ebenfalls verzichtet, da ansonsten der Vorteil, kleinere Hindernisse überwinden zu können, zunichte gemacht werden würde.

Vollkommener Kollisionsschutz im Sinne der sicherheitstechnischen Vorschriften ist somit in der derzeitigen Entwicklungsstufe des Projektes nicht vollständig erfüllt. Da letztendlich der Bediener über die Zweihandschaltung das Gerät im Gefahrfall stoppen kann, dient die Umsetzung einer Kollisionsvermeidung bisher zum Testen der entwickelten Steuerungsalgorithmen. Die Erfüllung aller geforderten sicherheitstechnischen Verordnungen wird daher erst in einem weiteren Entwicklungsschritt gewährleistet werden.

Nach einem ausführlichen Vergleich von Sensorsystemen wurde die in Bild 71 dargestellte Variante gewählt. Dabei kommen 12 Ultraschallsensoren mit einer Reichweite von zwei Metern und zwei Sensoren mit einer Reichweite von vier Metern zum Einsatz. Diese Alternative zeichnet sich bei vertretbaren Gesamtkosten durch die günstige Abdeckung des Gebietes um das Fahrzeug durch die Erfassungsbereiche der Sensoren aus. Der Bereich in Richtung der Fahrzeugquerachse muss nicht überwacht werden, da dort kein Gefahrenbereich vorhanden ist. Dieser wird erst nach einer Drehbewegung des Fahrzeugs erreicht, mögliche Hindernisse werden dann von den Sensoren auf der Seite erfasst, ehe eine Kollision auftreten kann.

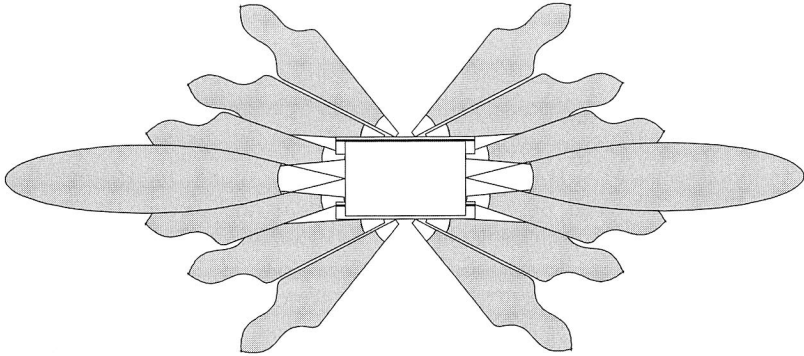


Bild 71: Anordnung der Sensoren zur Kollisionsvermeidung mit den Erfassungsbereichen

Ein Algorithmus zur Kollisionsvermeidung besteht zum einen aus einer Hinderniserkennung und zum anderen aus den entsprechenden Vorgaben für die Bewegungssteuerung. Bei der Hinderniserkennung werden die Informationen ermittelt, mit deren Hilfe die Bewegungssteuerung Steuerbefehle an den Roboter gibt, um eine Kollision zu vermeiden. Die ermittelten Daten eines Hindernisses müssen Informationen sowohl über die Richtung des erfassten Objektes als auch die Entfernung zu diesem beinhalten. Durch die Richtung und Entfernung eines Hindernisses ist die Position genau festgelegt. Die Richtung eines Hindernisses kann über die Kenntnis des Sensors, mit dem das Hindernis erfasst wurde, ungefähr ermittelt werden. Die genaue Entfernung eines Hindernisses steht aufgrund des eingesetzten Messprinzips ohnehin zur Verfügung.

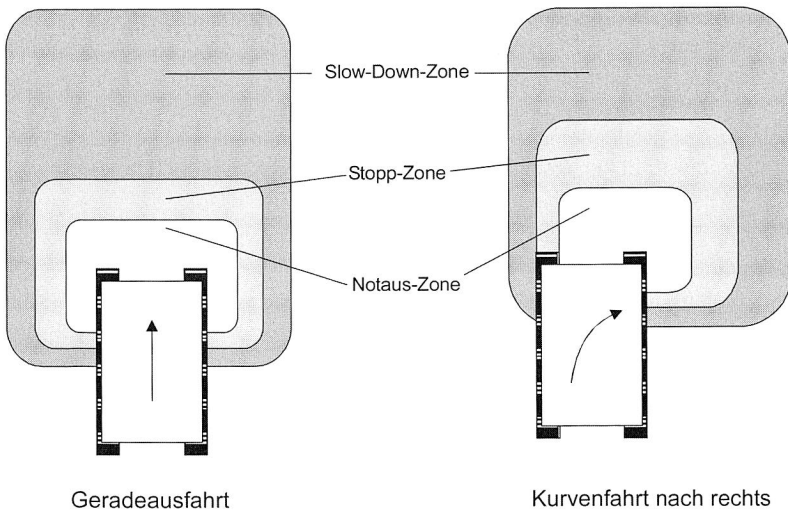


Bild 72: Ausrichtung und Größe der von der Fahrsituation abhängigen Zonen

Ein Konzept einer Kollisionsvermeidung sieht vor, dass nur aufgrund der Entfernungsinformation eines erkannten Hindernisses die Geschwindigkeit des Roboters beeinflusst wird. Dazu wird das Gebiet um das Kettenfahrzeug in drei verschiedene Zonen unterteilt. Die einzelnen Zonen um das Kettenfahrzeug sind in Bild 72 für unterschiedliche Fahrsituationen dargestellt.

Die Größen der jeweiligen Zonen müssen ausreichend dimensioniert werden, damit ein Verlangsamen bzw. Stoppen des Fahrzeugs innerhalb der Zone ermöglicht wird, ohne dass die Stabilität des Gesamtfahrzeugs gefährdet wird.

Um die Ausrichtung und Größe der Zonen flexibel an die jeweilige Fahrsituation anpassen zu können, müssen die Zonengrenzen für jeden Sensor getrennt definiert werden. Dies ermöglicht unter anderem eine Anpassung der Zonen an den jeweiligen Fahrzustand des Fahrzeugs, der dabei gemäß den Funktionen der Bewegungssteuerung definiert ist.

So müssen nur die Bereiche um das Fahrzeug überwacht werden, die durch die Bewegung des Roboters direkt gefährdet sind. Dies ist zum Beispiel bei „Geradeausfahren vorwärts“ in starkem Maße das Gebiet direkt vor dem Fahrzeug und in einem schwächeren Maße das Gebiet seitlich des Fahrzeugs. Der Rückraum muss bei dieser Fahrsituation nicht überwacht werden, da eine direkte Gefährdung durch die Bewegungsrichtung des Roboters ausgeschlossen ist. So wäre es unnötig, die Fahrt des Fahrzeuges bei „Geradeausfahren vorwärts“ aufgrund eines hinter dem Roboter befindlichen Objektes zu verlangsamen bzw. zu stoppen. Weiterhin könnten die Größe und Ausrichtung der einzelnen Zonen in Abhängigkeit von der Fahr- bzw. Drehgeschwindigkeit des Fahrzeugs und bei Kurvenfahrten von dem Radius der zu fahrenden Kurve festgelegt werden.

Wird ein Objekt innerhalb einer dieser Zonen erfasst, werden entsprechende Steuerungsbefehle an die übergeordnete Steuerung übergeben. Im Einzelnen wird folgendermaßen vorgegangen:

Befindet sich ein Objekt innerhalb der Notaus-Zone, so wird auf Software-Ebene ein Notaus von der übergeordneten Steuerung gefordert, der unverzüglich eine Notbremsung auslösen muss.

Bei Erkennen eines Objektes innerhalb der Stopp-Zone wird ebenfalls die Fahrzeuggeschwindigkeit auf null reduziert, jedoch wird kein Notaus eingeleitet und somit das Programm nicht unterbrochen. Verlässt zum Beispiel ein bewegliches Hindernis die Stopp-Zone wieder, so setzt der Roboter selbständig die Fahrt fort.

Bei Hindernissen innerhalb der Slow-Down-Zone soll die Geschwindigkeit des Roboters bei stetiger Annäherung schrittweise reduziert werden, bis das Objekt die Stopp-Zone erreicht, woraufhin das Fahrzeug gestoppt wird. Die schrittweise Reduzierung der Geschwindigkeit des Roboters bei Annäherung an ein Hindernis veranschaulicht noch einmal Bild 73.

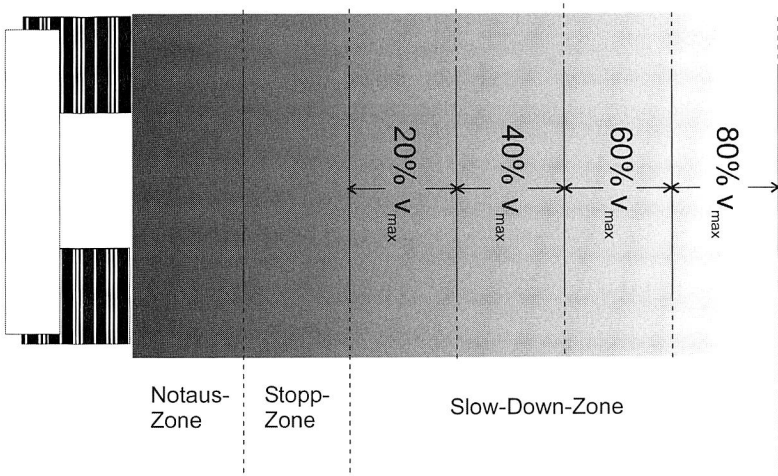


Bild 73: Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit innerhalb der einzelnen Zonen

Bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer Hindernisse muss die Bewegungssteuerung entscheiden, auf welches der Hindernisse reagiert werden muss. Die Entscheidung wird aufgrund der Priorität der einzelnen Zonen getroffen. Die höchste Priorität besitzt die Notaus-Zone, die niedrigste die Slow-Down-Zone. Die Steuerung des Fahrzeuges reagiert auf das Hindernis, welches sich in der Zone mit der höchsten Priorität befindet. Bei Erkennen eines Hindernisses in der Notaus-Zone wird unverzüglich ein Notaus eingeleitet. Es werden keine weiteren Sensoren ausgewertet. Wird ein Hindernis in der Stopp-Zone entdeckt, so werden die restlichen Sensoren daraufhin überprüft, ob ein anderes Hindernis in der Notaus-Zone ist. Bei einem Hindernis in der Slow-Down-Zone werden die Sensoren darüber hinaus auf Hindernisse in der Stopp-Zone abgefragt. Sind mehrere Objekte in der Slow-Down-Zone, so wird die Geschwindigkeit infolge des Hindernisses reduziert, das im Verhältnis zur Zonengröße den kürzesten Abstand zum Fahrzeug aufweist.

Das vorgestellte Konzept wurde in die Steuerung des Fahrzeugs implementiert und getestet. Es wird damit ein grundsätzlicher Schutz vor Hindernissen geboten. Als Erweiterungsmöglichkeit muss das sensorgeführte Umfahren von Hindernissen in Betracht gezogen werden. Diese Option ist bisher nicht realisiert, wird allerdings bei einer eventuellen Erweiterung des Fahrzeugs zu einem freinavigierenden System unbedingt notwendig.

6.4 Betriebsverhalten des Bauroboters während der Fahrt

Im Folgenden soll das Betriebsverhalten des Bauroboters während der Fahrt betrachtet werden, wobei die Streckenführung so gestaltet ist, dass in einem Abstand von jeweils einem Meter fünf gleichartige Aufrisspunkte zu liegen kommen. Zunächst wird die Strecke mit der jeweils in Tabelle 8 errechneten Motordrehzahl bei Verwendung des

entsprechend zugehörigen Aufrisspunktes abgefahren. Speziell bei der Wahl des 1. und 2. Aufrisspunktes, die gegenüber den anderen die höchste Zykluszeit in Anspruch nehmen, können diese während der Fahrt nicht immer von der Bildverarbeitungssoftware eindeutig erkannt werden. Die Ursache hierfür ist, neben der verringerten Anzahl ausgewerteter Bilder, auch in dem integrierenden CCD-Kameramodul zu sehen, das aufgrund der Fahrzeugbewegung an der Stelle des Aufrisspunktes einen „verschmierten Kontrastbereich“ detektiert. Damit verringert sich der resultierende Grauwertgradient, und eine entsprechende Übereinstimmung mit dem trainierten PatMax-Muster ist nicht mehr gegeben. Weniger problematisch ist dies für Aufrisspunkte mit größerem Ausmaß. Die eindeutige Erkennung ist, mit der in Tabelle 8 angegebenen Motordrehzahl, beim 3., 4. und 5. Aufrisspunkt immer sichergestellt. Erst bei einer Erhöhung der Motordrehzahl auf Werte $n \geq 2000$ umdr/min ist auch hier eine sichere Erkennung der verwendeten Aufrisspunkte nicht mehr gewährleistet. Diesem Problem kann jedoch durch Verringerung des Kontrastwertes entgegengewirkt werden.

Um das Verhalten des Bauroboters bei der Verfolgung von gekrümmten Aufrisslinien zu untersuchen, werden Aufrisslinien mit unterschiedlichen Krümmungsradien angebracht. Die voll- bzw. teilautomatische Navigation des Roboters entlang einer Aufrisslinie, die einen Krümmungsradius $r \gg 100$ cm hat, verläuft mit der Bildverarbeitung unter Berücksichtigung der vorliegenden Umgebungsbedingungen störungsfrei. Der Suchbereich wird dabei zyklisch, entsprechend der Lageänderung des errechneten Schnittpunktes der Aufrisslinie mit der Bildoberkante, seitlich verschoben. Somit ist immer gewährleistet, dass die Aufrisslinie, trotz kurzzeitig ausbleibender Fahrtrichtungskorrektur der Fahrzeugregelung (z. B. durch erhöhten Schlupf auf Geröll), nicht aus dem Suchbereich „herausläuft“.

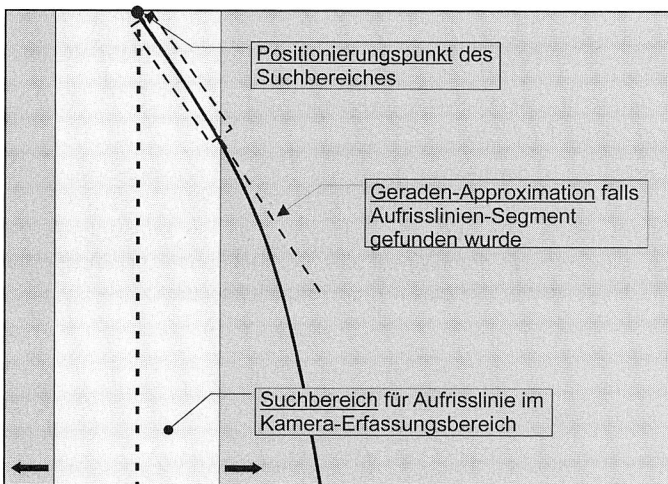


Bild 74: Falsche Positionierung des Suchbereiches bei Verfolgung von stark gekrümmten Aufrisslinien

Problematisch hingegen ist die Verfolgung von Aufrisslinien kleinerer Radien, wie in Bild 74 dargestellt. Da die Länge der Aufrisslinie innerhalb des Suchbereiches für einen Vergleich mit dem trainierten PatMax-Muster unzureichend ist, sind Änderungen hinsichtlich der Verschiebung des Suchbereiches notwendig. Entsprechend der in Bild 75 gezeigten Verschiebung umfasst der Suchbereich jetzt einen wesentlich größeren Anteil der Aufrisslinie, wodurch wieder eine betriebssichere Aufrisslinien-Erkennung möglich ist.

Die veränderte Positionierung des Suchbereiches wird realisiert, indem dieser immer so verschoben wird, dass der Mittelpunkt des Suchbereiches genau über dem Mittelpunkt der errechneten Geraden des gefundenen Aufrisslinien-Segmentes zu liegen kommt.

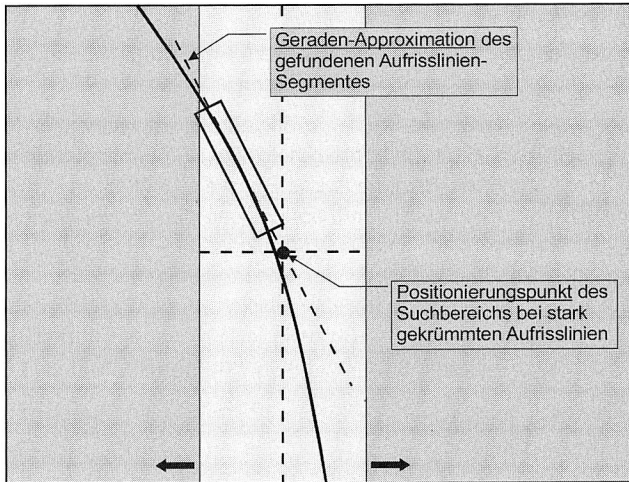


Bild 75: Veränderte Positionierung des Suchbereiches zur verbesserten Verfolgung von stark gekrümmten Aufrisslinien

Um die gesamte Länge der gekrümmten Aufrisslinie im Kamera-Erfassungsbereich zu analysieren, ist es zusätzlich notwendig, die Breite des Suchbereiches zu vergrößern. Dadurch erhöht sich jedoch auch die Zykluszeit. Da die Fahrzeugregelung die Geschwindigkeit entsprechend dem Winkel bzw. der Mittelpunktsabweichung der approximierten Aufrisslinie reduziert, ist dies jedoch vernachlässigbar.

7 Optimierung der Einsatzbedingungen des Roboters

Bereits während der Entwicklungsphase wurde der Prototyp immer wieder auf verschiedenen Baustellen getestet, um frühzeitig technische und organisatorische Schwachstellen aufdecken zu können. Auf Seite der technischen Probleme trat besonders das unruhige Fahrverhalten des Roboters hervor. Die Eingrenzung und Behebung dieses Fehlers werden im ersten Teil dieses Kapitels erläutert.

Neben dieser maschinenbaulichen Frage stellten sich organisatorische Hürden als Haupthindernis für einen wirtschaftlichen Einsatz des Roboters heraus. Dies wird im zweiten Teil des Kapitels diskutiert und es werden daraus Anforderungen für eine ideale, automatisierungsgerechte Baustelle abgeleitet.

7.1 Optimierung des Fahrwerks zur Verbesserung der Bewegungseigenschaften des Prototypen

Bei der Durchführung der ersten Baustellentests zeigte es sich, dass das Fahrverhalten des Bauroboters nicht den Erwartungen entsprach. Es waren sehr starke Schwingungen zu beobachten, die besonders bei Kurvenfahrten auf rauem Rohbeton auftraten. Die Schwingungen erschwerten zunächst auch das Verfolgen der Aufrisslinie durch die Kamera und hätten langfristig eine schnellere Abnutzung der Roboterhardware verursacht. Deshalb sollten mit den im Folgenden beschriebenen Versuchen die Ursachen dieser Schwingungen eingegrenzt und daraus Vorschläge zur Verbesserung des Fahrverhaltens abgeleitet werden.

7.1.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Zur Ermittlung der Schwingungsursachen mussten die Schwingungen an bestimmten Punkten am Roboter gemessen werden. Durch einen Vergleich der Schwingungssplituden und der -frequenzen zwischen den einzelnen Versuchen konnten dann Aussagen über die Entstehung der Schwingungen und die Wirksamkeit der zu ergreifenden Maßnahmen getroffen werden.

Daher wurde zur Durchführung der Versuche zuerst ein kostengünstiges Sensorsystem (siehe Bild 76) zur Messung der Fahrzeugschwingungen aufgebaut. Den Kern des Systems bildet ein integrierter Beschleunigungsmesser der Firma Analog Devices vom Typ ADXL202 [77]. Mit diesem Baustein ist es möglich, Beschleunigungen von $\pm 2 \text{ g}$ sowohl in der x- als auch in der y-Richtung des ICs zu messen. Die Ausgangssignale des Bausteins werden verstärkt und zur Auswertung auf eine analoge Eingangskarte des Steuerrechners des Transportmoduls gelegt. Die Abtastung der Spannung geschieht 1000 mal pro Sekunde. Da die zu erwartenden Schwingungen deutlich unter 100 Hz liegen, ist eine zuverlässige Erfassung der Sensorsignale gewährleistet (nach dem Abtasttheorem muss die Abtastung mindestens mit dem Doppelten der Signalfrequenz erfolgen). Insgesamt wurden 5 Sensormodule am gesamten Roboter angebracht, so dass eine vollständige Erfassung der Schwingungen an allen kritischen Bereichen innerhalb einer

Versuchsdurchführung sichergestellt war. Die Sensormodule wurden jeweils so am Roboter befestigt, dass eine Messrichtung des ICs in Fahrtrichtung, die andere senkrecht dazu ausgerichtet ist.

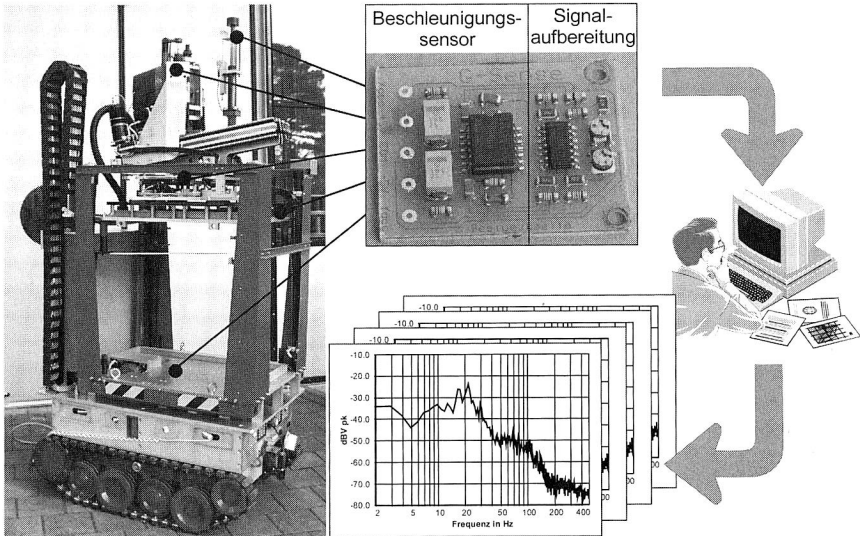


Bild 76: Ansicht eines Sensormoduls zur Messung der Schwingungen bei verschiedenen Fahrsituationen über einen Beschleunigungsmesser

Eine Kalibrierung der Sensoren, d. h. eine eindeutige Zuordnung der gemessenen Spannungswerte zur Größe der Beschleunigung, erfolgte nicht, da nicht der Wert der Beschleunigung, sondern die Frequenz der Schwingung die entscheidende Messgröße war. Allerdings können die gemessenen Amplituden der einzelnen Sensorsignale und der einzelnen Versuche miteinander verglichen werden, wodurch eine qualitative Aussage über die Stärke der jeweiligen Schwingung möglich ist.

7.1.2 Fahrverhalten auf Industrieestrich mit Gummikettengliedern

Die ersten Versuche wurden auf einem glatten, versiegelten Industrieestrich durchgeführt, um das Fahrverhalten frei von unkontrollierbaren Einflüssen unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten dokumentieren zu können. Es wurde mit maximaler Geschwindigkeit geradeaus gefahren, wobei das Technologiemodul in der sog. Transportstellung (also ohne eingebaute Zwischenstücke und vollständig abgesenkter Hubspindel) gehalten wurde. Diese Stellung ist durch die niedrigste Schwerpunktlage gekennzeichnet, die der Roboter erreichen kann. Die Ergebnisse dieses Versuches sollen im Folgenden als Referenz für die weiteren Betrachtungen verwendet werden.

Zur Bestimmung der charakteristischen Frequenz der Schwingung wurde mit geeigneten Software-Tools eine Fourieranalyse der jeweiligen Signale durchgeführt. Das Ergebnis einer solchen Analyse ist beispielhaft in Bild 77 dargestellt.

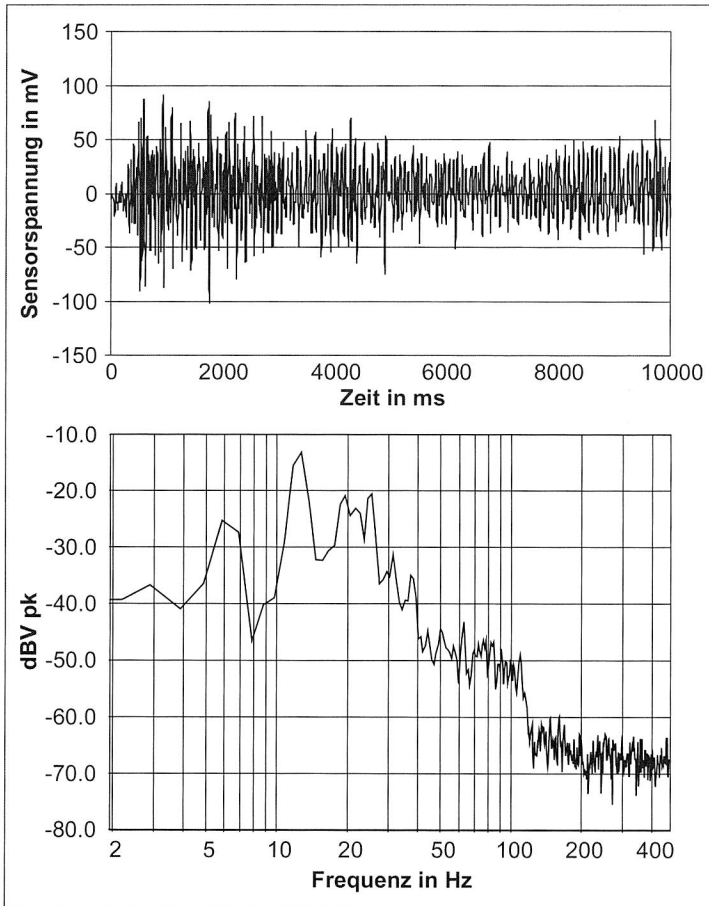


Bild 77: Gemessene Sensorspannung und Ergebnis der Frequenzanalyse bei Geradeausfahrt auf Industriestrich mit Kettengliedern aus Gummi

Charakteristisch sind dabei die Frequenzen von ca. 6 Hz, 12 Hz und 24 Hz. Als Ursache dieser Frequenzen lässt sich die Erregungsfrequenz durch die Kettenglieder nach folgender Rechnung ermitteln:

Bei einer Fahrt mit maximaler Geschwindigkeit beträgt die Motordrehzahl ca. 3300 Umdrehungen pro Minute, das entspricht 55 Umdrehungen pro Sekunde. Das eingebaute Getriebe zwischen Motorwelle und Antriebsrad besitzt eine Untersetzung von 1 : 104.

Somit führt das Antriebsrad ca. 0,5 Umdrehungen pro Sekunde aus. Da das Antriebsrad auf seinem Umfang insgesamt 12 Zähne verteilt hat, sind pro Sekunde ca. 6 Kettenglieder im Eingriff. Durch diese Rechnung lässt sich zeigen, dass diese Schwingungen vor allem durch den Eingriff der Kettenglieder in das Antriebsrad hervorgerufen werden. Dieser Effekt wird auch als Polygoneffekt bezeichnet, er entsteht dadurch, dass der Zugstrang (die kraftführende Faser) im Gegensatz zu den reibschlüssigen Antrieben nicht mit dem Wirkkreis der Scheibe übereinstimmt, sondern diesen durch Sehnenelemente mit der Teilungslänge nur annähert [7].

Ein weiterer Einflussfaktor, der im Spektrum aber davon nicht getrennt werden kann, ist das Abrollen der Räder im Fahrwerk über die relativ großen Öffnungen (ca. 30 mm) zwischen den einzelnen Kettengliedern, welches gerade in Verbindung mit dem hart gefederten Fahrwerk weitere Schwingungen in den Roboter einleitet. Ähnliche Ergebnisse lassen sich auch aus den Analysen für die restlichen 9 Sensorsignale ableiten.

Verstärkt wird die negative Wirkung der Schwingungen noch dadurch, dass die Eigenfrequenz vieler Teile des Technologiemoduls gerade 6 Hz oder ein Vielfaches davon beträgt und so die betreffenden Teile in Resonanz schwingen. Abhilfe könnte hier nur durch eine Versteifung oder eine deutliche Veränderung der Massen erreicht werden. Eine Versteifung würde eine Erhöhung des Gesamtgewichts zur Folge haben, diese Maßnahme scheidet jedoch aus, da das Gewicht des Roboters schon an seiner oberen Grenze ist. Eine Reduzierung der einzelnen Massen könnte durch Methoden der Leichtbauweise erzielt werden, welche jedoch für einen Prototypen dieser Art zu aufwändig sind.

Dieser Versuch wurde anschließend in verschiedenen Variationen durchgeführt, wie zum Beispiel mit unterschiedlichen Höhen des Arbeitsmoduls. Auch bei diesen Versuchen lassen sich im Wesentlichen die selben Aussagen wie bei der Durchführung des Grundversuchs treffen. Es kann daher mit ziemlicher Sicherheit gesagt werden, dass die Schwingungen bei Geradeausfahrt vor allem durch den Polygoneffekt und die große Teilung der Ketten hervorgerufen werden. Eine Reduzierung der Drehzahl bringt keine nennenswerten Verbesserungen, da durch die hohe Untersetzung des Getriebes die Höhe der Drehzahl nur unwesentlich auf die Kettenfrequenz durchschlägt und durch eine Verlangsamung der Fahrt die gesamte Taktzeit des Roboters gesenkt werden würde.

Versuche zum Fahrverhalten bei Kurven ergaben im Wesentlichen identische Ergebnisse, so dass auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet werden kann.

7.1.3 Fahrversuche auf Betonfliesen mit Gummikettengliedern

Zur Dokumentation der negativen Fahreigenschaften der Gummiketten auf Betonböden wurden dieselben Versuche auf Betonfliesen wiederholt. Exemplarisch wird ein Versuch gezeigt, bei dem jeweils Rechts-Links-Drehungen im Stand durchgeführt wurden.

Die auftretenden charakteristischen Frequenzen liegen erneut im Wertebereich wie bei den anderen Versuchen, auffallend ist aber die extrem hohe Schwingungsamplitude der

gemessenen Sensorspannung. Bedingt durch die starken Schwankungen des Fahrzeugs und die daraus resultierende extreme Belastung des Materials wurde der Versuch auch nach ca. sechs Sekunden abgebrochen.

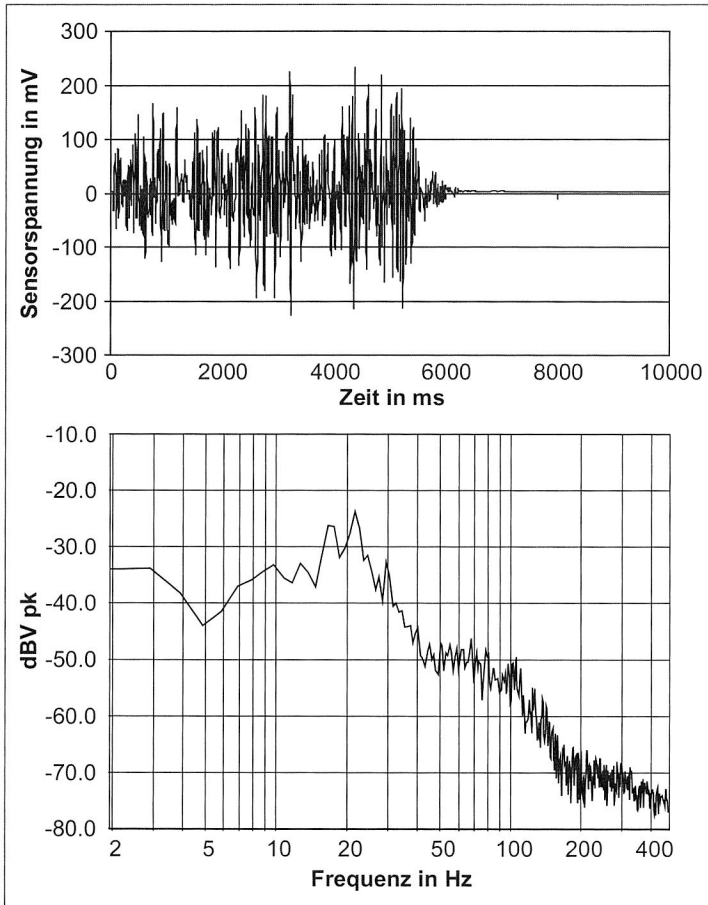


Bild 78: Gemessene Sensorspannung und Ergebnis der Frequenzanalyse für Kurvenfahrten auf Betonfliesen mit Kettengliedern aus Gummi

Ursache für diese starken Schwingungen ist die relativ große Haftreibung zwischen Kettengliedern und Betonboden in Verbindung mit dem etwas knapp ausgelegten Antriebssystem des Roboters. Die zu schwach dimensionierte Antriebsleistung vermag den Roboter nicht vom Zustand der Haftreibung in einen konstanten Zustand der Gleitreibung zu bringen. Das Drehmoment der Motoren baut zu Beginn der Drehung eine Kraft zwischen Ketten und Boden auf. Sobald diese größer als die Haftreibung wird, fährt der Roboter ein kleines Stück in die gewünschte Richtung, allerdings eher in

Form eines kleinen Sprungs. Mit der ersten Bewegung sinkt das benötigte Drehmoment ab, aber bereits bei der „Landung“ nach dem Sprung wird erneut eine große Kraft benötigt, um den Roboter weiter anzutreiben. Diese steht nicht zur Verfügung, die Motoren müssen das Drehmoment erneut aufbauen, es folgt ein weiterer Sprung. Der Verlauf der zur Verfügung gestellten Kraft hat also die Form eines Sägezahns, wobei die Kraft während der Bewegung nie ausreichend ist, um eine Gleitreibung zwischen Ketten und Boden zu erzielen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine Aufteilung der beobachteten Effekte notwendig ist. Die Schwingungen des Roboters bei Geradeausfahrten werden vor allem durch den Polygon-Effekt und die ungünstige Teilung der Ketten (im Moment 64 mm) hervorgerufen. Die so eingebrachte Erregungsfrequenz fällt zusätzlich mit den Eigenfrequenzen von verschiedenen Teilen des Aufbaus zusammen. Diese Problematik kann hier nur durch eine verringerte Teilung der Ketten behoben werden.

Die wesentlich schwerwiegenderen Schwingungen bei Kurvenfahrten oder Drehungen im Stand (vor allem auf rauen Betonböden) werden insbesondere durch die Haftreibung zwischen den Kettengliedern aus Gummi und dem Boden, in Verbindung mit dem etwas schwach ausgelegten Antriebssystem des Fahrwerks und dem hohen Gewicht des Roboters, verursacht.

Abhilfe kann somit zum einen dadurch geschaffen werden, dass die Kettenglieder aus einem Material gefertigt werden, welches einen niedrigeren Reibkoeffizienten als die vorhandenen hat. Zum anderen kann die Teilung der Ketten verringert werden, wenn Zwischenstücke in die bestehenden Lücken der Ketten eingefügt werden. Dadurch kann die Zahnung der Antriebsräder erhalten werden, die übrigen Laufräder rollen dann jedoch nicht mehr über die relativ großen Öffnungen zwischen den einzelnen Kettengliedern ab, sondern auf einer „quasi ebenen“ Lauffläche.

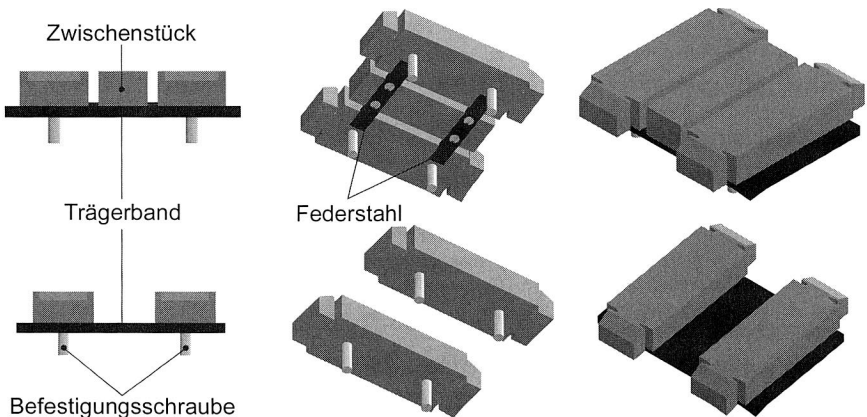


Bild 79: Vergleich der Originalkettenglieder aus Gummimaterial mit den modifizierten Kettengliedern aus UHMW-Polyethylen mit Schmierstoff

Die Originalkettenglieder bestehen aus einem dünnen Metallträger, auf den das eigentliche Gummikettenglied aufvulkanisiert ist. Mit zwei Schrauben wurden insgesamt je 49 derartiger Kettenglieder für jede der beiden Ketten an das Trägerband, das aus einem mit einem Metallgeflecht verstärkten Gummiband von ca. 80 mm Breite und ca. 6 mm Dicke gebildet ist, befestigt. Um den grundsätzlichen Aufbau des Fahrwerks erhalten zu können, wurden zum einem Kettenglieder aus UHMW-Polyethylen [79] gefertigt, die in den äußeren Abmessungen exakt den Originalkettengliedern entsprachen und mit denselben Befestigungen an der Kette angebracht werden konnten. Die Zwischenstücke wurden als einfache Quader aus dem selben Material ausgeführt, zur Befestigung an der Kette wurden dünne Streifen aus Federstahl an den Quadern fixiert, die, wie in Bild 79 dargestellt, auf beiden Seiten überstehen. Diese Überstände wurden jeweils in Kerben zwischen der Kette und den neuen Hauptkettengliedern geklemmt. Dadurch sind die Zwischenstücke gegen Herausfallen gesichert, trotzdem können sie sich in ihrem Abstand zwischen den Hauptkettengliedern leicht verändern, um bei der Umlenkung des Trägerbandes um die vordere und hintere Umlenkrolle die Kette nicht zu sehr zu versteifen.

7.1.4 Verbesserung der Fahreigenschaften durch neue Kettenglieder

Im Vergleich zu den Fahrversuchen auf dem Industrieestrich (vgl. Bild 77) ist in Bild 80 die gemessene Spannung für den selben Sensor mit den neuen Kettengliedern, jedoch für eine Fahrt auf einem glatten Betonestrich dargestellt. Die Fahrten wurden jeweils mit voller Drehzahl, mit eingebauten kurzen Distanzstücken und halber Hubhöhe durchgeführt.

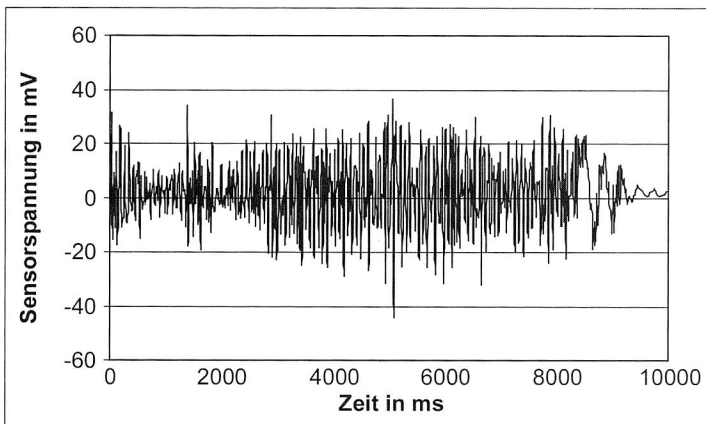


Bild 80: Gemessene Sensorspannung für eine Fahrt geradeaus mit den Kettengliedern aus UHMW-Polyethylen auf glattem Estrich auf einer Testbaustelle

Während mit den alten Kettengliedern auf dem Industrieestrich Schwingungsamplituden von durchschnittlich 50 mV auftraten, sind mit den neuen Kettengliedern nur noch Am-

plituden von durchschnittlich 20 – 30 mV zu messen und dies, obwohl der Versuchsaufbau durch die eingebauten Distanzstücke und den im Vergleich zum Industrieestrich raueren Estrich der Testbaustelle eher ungünstiger geworden ist.

Dieselben Versuche wurden auch auf Rohbeton durchgeführt, beispielhaft wird hier das Ergebnis für eine Messung erläutert, bei dem der Roboter eine Drehung nach rechts vollzogen hat.

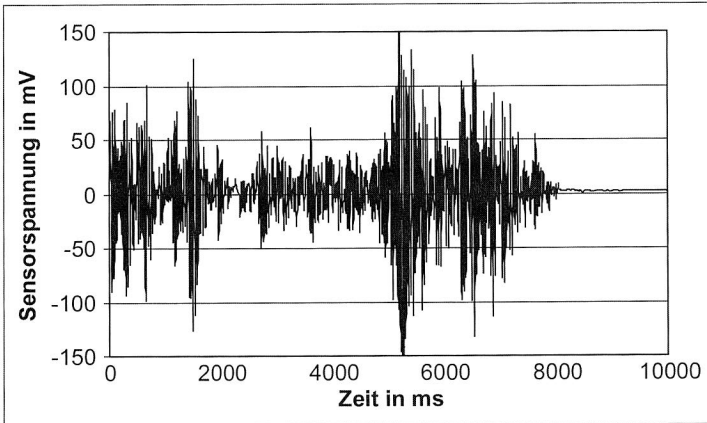


Bild 81 : Gemessene Sensorspannung bei einer Rechtsdrehung auf Rohbeton auf der Testbaustelle während einer Fahrt mit Kettengliedern aus UHMW-Polyethylen

Wie zu erwarten war, sind die Messwerte bei einer Drehbewegung deutlich schlechter als bei einer einfachen Fahrt geradeaus. Allerdings zeigen sowohl der optische Eindruck als auch der objektive Vergleich mit den alten Messungen auf den Betonfliesen, dass auch für diesen Fahrfall die neuen Kettenglieder eine deutliche Verbesserung gebracht haben. Bild 78 zeigt zum Vergleich die gemessene Sensorspannung bei einer Fahrt auf den Betonfliesen, wobei in diesem Versuch allerdings die Drehrichtung jeweils nach ca. zwei Sekunden immer wieder gewechselt wurde.

Diese Vergleiche verdeutlichen, dass die Optimierung der Ketten erfolgreich abgeschlossen werden konnte, weitere Verbesserungen im Fahrverhalten würden sich nur noch durch eine Erhöhung der Antriebsleistung (stärkere Motoren oder anderes Getriebe) realisieren lassen. Die Fahrzeugschwingungen konnten durch den Einsatz der neuen Kettenglieder deutlich reduziert werden, wie ein Vergleich der gemessenen Schwingungsamplituden zeigt. Dies ermöglichte sowohl den einfachen Transport an den Einsatzort als auch die zuverlässige Erfassung der Linie und der Haltepunkte. Einfachere Hindernisse konnte der Prototyp auf den weiteren Versuchsbaustellen trotzdem noch überwinden.

Ein weiterer Vorteil war das einfache Umsetzen zwischen verschiedenen Aufrissfluchten und die im Vergleich zu den alten Kettengliedern deutlich reduzierten Belastungen

des Untergrunds. Obwohl die Kettenglieder und die Zwischenstücke aus Kunststoff gefertigt sind, zeigten sie nur minimale Verschleißspuren.

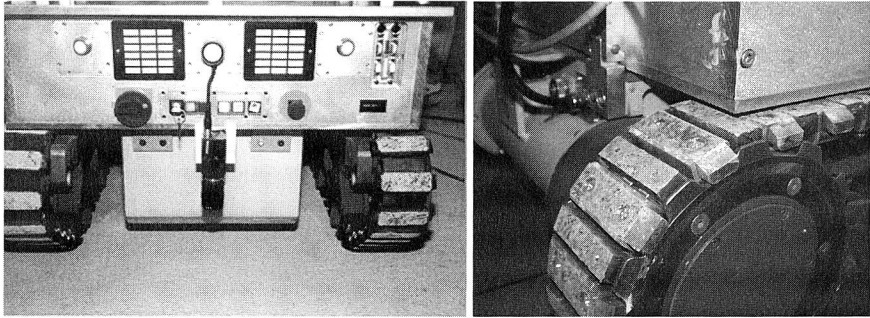


Bild 82: Vergleich der optimierten Kettenglieder mit den ursprünglichen Ketten nach einem Baustelleneinsatz

Als Gesamtfazit lässt sich nach Abschluss der Hardwareentwicklung festhalten, dass der Roboter baustellentauglich ist. Mit dem modifizierten Kettenantrieb kann er im gesamten Bauraum, d. h. sowohl im Außenbereich (z. B. bei der Anlieferung) als auch im Innenbereich hinreichend gut navigieren. Die Verfolgung der Aufrisslinie, die teilweise bereits verwischt oder unterbrochen war, funktionierte mithilfe des Bildverarbeitungssystems sehr gut und die Haltepunkte wurden zuverlässig erkannt. Die integrierte Neigungskorrektur ermöglichte eine exakte, lotrechte Projektion der Haltepunkte an die Decke, sämtliche Bohrungen wurden innerhalb des Toleranzbereiches von ± 3 mm gesetzt. Die Bedienung über das graphische Benutzerinterface ermöglichte den anwesenden Facharbeitern, auch ohne längere Schulung, eine schnelle Einarbeitung in die Bedienung des Gerätes.

7.2 Organisatorische Optimierungen im Bauablauf zur Erhöhung der Einsatzhäufigkeit des Roboters

Neben den Problemen der Antriebsketten, die auf die gezeigte Weise behoben werden konnten, haben sich vor allem organisatorische Probleme als Hemmnisse eines wirtschaftlichen Einsatzes des Roboters erwiesen. Diese Schwierigkeiten traten zutage, da alle Tests auf den Baustellen jeweils zu dem Zeitpunkt durchgeführt wurden, an dem die Tätigkeit „Montage der Befestigungselemente“ im normalen, manuellen Bauablauf eingeplant war, d. h. es erfolgte keine spezielle, „robotergerechte“ Planung des Bauablaufs.

7.2.1 Organisatorische Probleme bei der Einbindung des Roboters in den Bauablauf

Nach den Erfahrungen der Baustellentests muss davon ausgegangen werden, dass der Transport des Roboters zu seinem Einsatzort das schwierigste logistische Problem dar-

stellt. Gerade dieser Teilaspekt ist somit unter Kostengesichtspunkten ein wichtiges Element der Einsatzplanung, da eine Verringerung der Nebenzeiten des Roboters (Einrichten, Transport, ...) eine deutliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit erwarten lässt.

Folgende Kriterien sind für eine zügige Abwicklung des Transports des Roboters an seinen Einsatzort zu beachten:

- Ladezonen und Ladehilfen müssen für die Anlieferung des Gerätes angefordert und bereitgestellt werden.
- Transportmöglichkeiten in das Gebäude, wie zum Beispiel Aufzüge, müssen vorhanden sein. Lastkräne sind dafür nur bedingt geeignet, da normalerweise an der Außenwand Gerüste befestigt sind, welche einen Transport des Roboters in die entsprechende Etage verhindern.
- Hindernisse auf der Einsatzetage in Form von abgestellten Baumaterialien oder bereits montierte Zwischenwänden sind zu vermeiden. Installationsleitungen am Fußboden, offene Doppelbodenkanäle oder Treppenabsätze müssen beseitigt oder mit Hilfskonstruktionen vorab überbrückt werden.

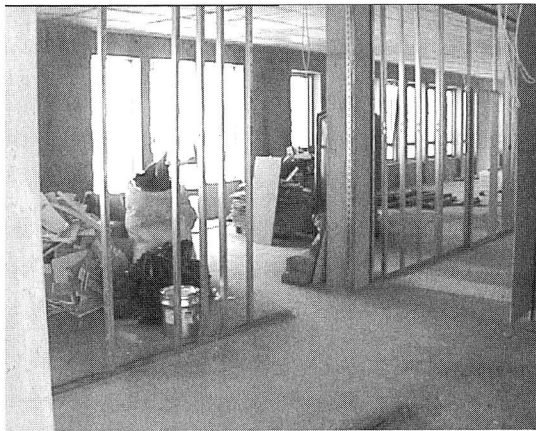


Bild 83: Abgestellte Baumaterialien und bereits installierte Wandkonstruktionen erschweren die Anlieferung des Roboters an den Einsatzort

Sobald der Roboter seinen Einsatzort erreicht hat, kann er nach einer kurzen Rüstzeit, die für das Booten der Steuerung und dem Teachin der Aufrisslinien und Haltepunkte erforderlich ist, sofort mit der Montagetätigkeit beginnen. Bei den Praxistests traten aber folgende weitere Probleme auf, die bei einer gründlichen Vorbereitung des Robotereinsatzes auf der Baustelle durch die betreffenden Bauunternehmen vermeidbar gewesen wären:

- Fehlende Aufrisslinien: Obwohl der Einsatz des Roboters angekündigt war, wurden die betreffenden Räume noch nicht vorbereitet, da andere Aufgaben des Tagesgeschäfts die Monteure gebunden haben. Die Aufrissarbeiten wurden erst mit Ankunft

des Roboters auf der betreffenden Etage begonnen, der Zeitaufwand für einen 30 x 20 m großen Raum beträgt dazu für zwei Monteure ca. 5 Stunden.

- Abweichungen der realen Baustelle mit dem Bauplan waren noch nicht abgestimmt. Diese Abweichungen treten meist erst bei der Durchführung der Aufrissarbeiten zu tage, die notwendigen Ausführungsänderungen müssen erst von der Bauleitung genehmigt werden.

Nach dem Abschluss aller Transport- und Vorbereitungsaufgaben kann der Roboter mit der Montagetätigkeit beginnen. Je nach Ablaufplanung auf der Baustelle haben zu diesem Zeitpunkt aber schon andere Gewerke an der Decke gearbeitet, d. h. es waren bereits zahlreiche Deckenhindernisse in Form von Lüftungskanälen oder Heizungsrohren, Elektro- oder Sanitärinstallationen vorhanden, die den Automaten in seiner Tätigkeit behinderten, da viele Dübelpositionen nicht mehr erreicht werden konnten. Allerdings würden solche eklatanten Planungsfehler auch die manuelle Montage behindern. Nachteilig beim Einsatz des Roboters war es auch, dass häufig parallel mit der Montage der Trennwände begonnen wurde, die dafür verlegten Profile am Boden bzw. bereits errichtete Trennwände behindern den Roboter und erhöhen den Rangieraufwand beträchtlich.

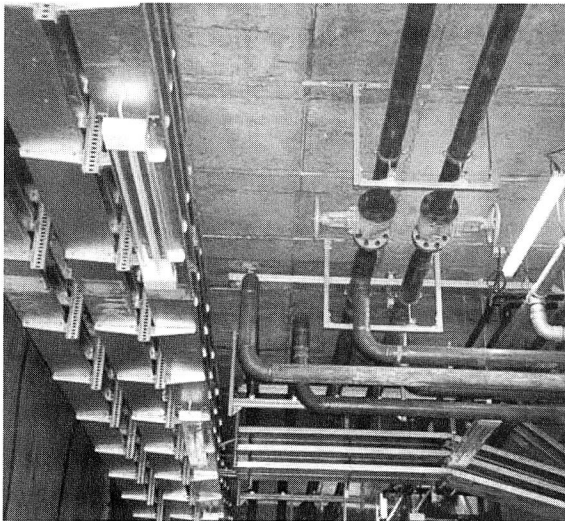


Bild 84: Deckenhindernisse erschweren die automatisierte Montage von Befestigungselementen durch den Roboter

Die oben geschilderten Probleme bei den ersten Testeinsätzen zeigen deutlich, dass der wirtschaftlich erfolgreiche Einsatz von Robotern oder Automaten technische und organisatorische Änderungen an bestehenden Fertigungsstrukturen erfordert. Eine Branche, welche diese Umstrukturierungen konsequent umsetzt, ist der Automobilbau. Daher soll im Folgenden kurz gezeigt werden, wie die Automobilindustrie den Weg von

der Handarbeit hin zu moderner Massenproduktion bewältigt hat. Anschließend werden die wesentlichen Anforderungen an eine automatisierungsgerechte Baustelle daraus abgeleitet.

7.2.2 Produktivitätssteigerung durch organisatorische und technische Innovationen

Seit der Einführung der Fließbandarbeit durch Ford im Jahr 1913 und den damals damit verbundenen Änderungen in der Produktion - Einsatz standardisierter Teile, keine oder nur geringe Variantenvielfalt: „Any colour – so long as it's black“ (Henry Ford) - unterliegt die Automobilproduktion einem steten Wandel und ist geprägt durch einen konstant ansteigenden Automatisierungsgrad bei gleichzeitig zunehmender Flexibilität im Produktangebot.

Grundsätzlich ist auffallend, dass jede Steigerung des Automatisierungsgrades im Automobilbau begleitet war von meistens parallel eingeführten technischen und organisatorischen Innovationen. So basierte das Produktionsmodell von Ford vor allem auf den Ideen Taylors, der eine „Steigerung der Produktivität der menschlichen Arbeit durch eine Teilung der Arbeit in kleinste Einheiten, zu deren Bewältigung keine oder nur ganz geringe Denkvorgänge zu leisten und die aufgrund des geringen Umfangs bzw. Arbeitsinhalts schnell und repetitiv zu wiederholen sind“ [73], vorgeschlagen hat. Ford verstand es als einer der Ersten, diesen Aspekt der Arbeitsorganisation durch die Neuerung des Fließbands technisch umzusetzen.

Nachdem sich die Fließbandarbeit im Rohbau und der Endmontage durchgesetzt hatte, blieb viele Jahre lang die Lackiererei die fehlende Verbindung einer durchgängigen Mechanisierung der Produktion. Dieses Defizit konnte erst um 1960 mit der Entwicklung neuer Lacke behoben werden. Die damit verbundene Reduzierung der Prozesszeit ermöglichte den mechanisierten Transport der Karosserie. Dies wiederum trug wesentlich zur Steigerung der Fertigungsqualität bei, da Beschädigungen durch die manuelle Handhabung vermieden werden konnten.

Steigende Nachfrage bei einem gleichzeitigen Mangel an Beschäftigten förderte in diesem Zeitraum den Einsatz erster Punktschweiß-Maschinen und der damit verbundenen Steuerungstechnik. Diese Automaten boten zunächst keinerlei Flexibilität hinsichtlich verschiedener Produktvarianten. Die Steigerung der Positioniergenauigkeit der Transporteinheiten ermöglichte in der Folgezeit einen höheren Mechanisierungsgrad der Handhabungsoperationen bei der Montage an den Karosserien. Ab Anfang 1970 wurden verstärkt freiprogrammierbare Handhabungsgeräte mit mikroelektronischen Steuerungen entwickelt. Diese Geräte stellten die Basis dar, um den Karosserierohbau ab ca. 1975 völlig zu mechanisieren. Der Einsatz dieser ersten Roboter verhalf in Verbindung mit neuen Spanntechniken zu einer Erhöhung der Variantenvielfalt in der Blechbearbeitung. Fiat führte in diesem Zeitraum den ersten beinahe vollautomatisierten und flexiblen Rohbau ein.

Zu Beginn der siebziger Jahre entstand ein verstärktes Bewusstsein zur ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen. Die Arbeitsorganisation nach Taylor gilt - bedingt durch

die monotonen Arbeitsinhalte und die Fremdbestimmung der Werker - als inhuman. Gravierende Probleme mit der Fertigungsqualität waren die Folge. Volvo versuchte daher 1974 in seinem neuen Werk in Kalmar die Endmontage neu zu organisieren. Die Montagevorgänge wurden von 20 Teams mit je ca. 15 – 20 Arbeitern durchgeführt, wobei die Taktzeiten dafür deutlich verlangsamt und größere Pufferbereiche vorgesehen werden mussten. Zugleich wurden die ersten fahrerlosen Transportsysteme eingeführt, auf denen die Karosserien zur Endmontage von Station zu Station bewegt wurden.

Im Zuge einer fortschreitenden Humanisierung der Arbeitsbedingungen wurden weitere Systeme, wie zum Beispiel das Rhönnrad, eingeführt. Dadurch konnten die Monteure unmittelbar von ungünstigen Arbeitshaltungen entlastet und weitere Steigerungen der Fertigungsqualität erzielt werden.

Durch technische Innovationen, wie etwa das kathodische Tauchlackieren, oder neue Verbindungstechnologien, wie zum Beispiel Kleben statt Verschrauben, wurden weitere Steigerungen der Fertigungsqualität erzielt und neue Automatisierungspotentiale erschlossen. So konnten durch die Klebstoffe die Gummidichtungen der Frontscheiben ersetzt und die Montage der Scheiben durch Roboter durchgeführt werden.

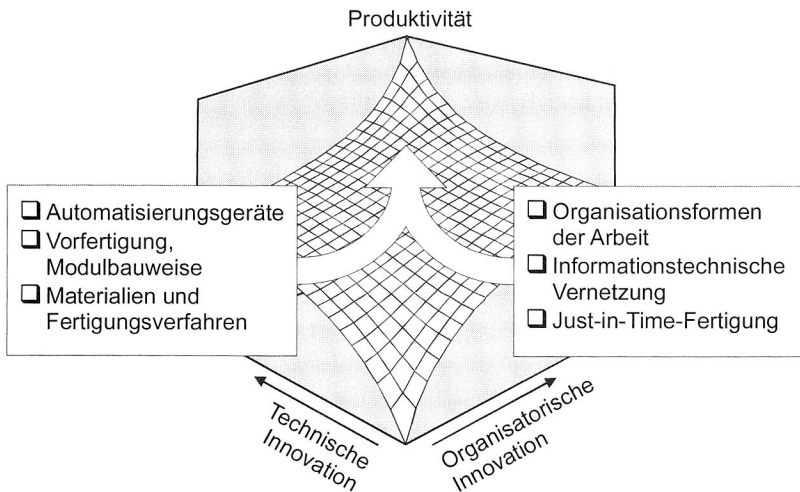


Bild 85: Einfluss von technischen und organisatorischen Innovationen auf die Zunahme der Produktivität [112]

Ab ca. 1985 wurde der modulare Aufbau der Cockpits eingeführt. Dies ermöglichte die Montage der Subsysteme getrennt von der eigentlichen Montagestraße. Auf diese Weise konnten die Fertigungslinien besser strukturiert und zuverlässiger gestaltet werden. Die Montage der Subsysteme erfolgte zum Teil auf fahrerlosen Transportsystemen, die den Monteuren einen ergonomischen Zugang zu allen Montagestellen ermöglichten. Die Einführung dieser Fertigungstechnologien erforderte eine starke informationstechnische Vernetzung der Nebenlinien mit der Hauptfertigungslinie. Diese Entwicklungen

fürten schließlich zum Konzept der Just-in-time-Fertigung (JIT). Auf diese Weise konnten die Produktionskosten weiter gesenkt werden, da die kostenintensive Vorhaltung von Fertigungsmaterialien auf das für die aktuell produzierten Komponenten notwendige Maß reduziert werden konnte.

Weitere Innovationen, wie die konsequente Einführung von Teamarbeit, diverse Optimierungen in den einzelnen Produktionsverfahren (zum Beispiel umweltverträgliche Lacke auf Wasserbasis) sowie die immer intensivere Vernetzung und Durchdringung der Produktion durch moderne Informationstechnologien, steigerten die Produktivität im Automobilbau weiter, gleichzeitig konnte auch eine wesentlich vergrößerte Produktflexibilität erzielt werden.

Dieser Überblick über die Chronologie verschiedener Innovationen im Automobilbau zeigt, dass das hohe Produktivitätsniveau der Automobilindustrie nur erreicht werden konnte, indem parallel zu den technischen Innovationen auch immer wieder organisatorische Innovationen eingeführt wurden. Die einzelnen, konkreten Innovationsschritte lassen sich nicht direkt auf das Bauwesen übertragen, aber die Forderung nach einem höheren Vorfertigungsgrad, nach neuen Werkstoffen und einem höheren Mechanisierungsgrad der manuellen Tätigkeiten tritt auch im Bereich des Bauwesens immer wieder auf. Während arbeitsorganisatorische Aspekte nach und nach den Erfordernissen des Bauwesens angepasst wurden, bestehen auf Seiten der organisatorischen Innovationen, wie zum Beispiel beim Einsatz der Informationstechnik im Bauwesen, noch große Defizite.

7.2.3 Anforderungen an eine automatisierungsgerechte Baustelle

Die Übertragung der Ergebnisse auf das Bauwesen zeigt, dass neue, ganzheitliche Betrachtungsweisen auch für die Bauindustrie erforderlich sind. Die aktuelle Denkweise

„Wie muss ein Roboter/Automat beschaffen sein, damit er in heutigen, unveränderten Baustellen wirtschaftlich eingesetzt werden kann?“

muss ersetzt werden durch die Fragestellung

„Wie ist ein für eine bestimmte Aufgabenstellung optimierter Roboter/Automat beschaffen und wie muss die Baustelle organisiert sein, damit dieses Gerät optimal verwendet werden kann?“

Die in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Schwierigkeiten beim Testeinsatz des Dübelroboters unterstreichen diese Forderung. Problematisch dabei ist, dass im Gegensatz zum Automobilbau die Baustelle ein Konglomerat von verschiedensten, selbständigen Unternehmen darstellt. Während im Automobilbau Entscheidungen der Unternehmensleitung für die Durchführung von Automatisierungsprojekten unmittelbar nur die eigene Fertigung betreffen bzw. die Marktmacht der Automobilkonzerne die Zulieferer zwingt, sich Neuerungen anzuschließen, sind bei einem einzelnen Bauprojekt oftmals 20 und mehr voneinander unabhängige Unternehmen betroffen. Erschwerend kommt hinzu, dass die meisten der Baufirmen kleine oder mittelständische Betriebe sind und kaum Investi-

onsmittel zur Durchführung der notwendigen Umstrukturierungen aufbringen können. Umso schwerer ist daher die Umsetzung von organisatorischen Veränderungen, zumal zusätzlich die Anzahl der Anbieter am Markt wesentlich höher ist als im Automobilbau. Im Folgenden sollen die in Bild 85 gezeigten, wesentlichen Elemente einer derartigen Umgestaltung für das Bauwesen kurz erläutert werden.

Auf der Seite der technischen Innovationen werden hauptsächlich geeignete Automatisierungsgeräte benötigt. Die technischen Voraussetzungen zur Entwicklung derartiger Geräte sind im Maschinenbau und der Automatisierungstechnik vorhanden. Allerdings muss sorgfältig abgewogen werden, welche Tätigkeiten diese Automaten oder Roboter übernehmen sollen. Wie schon in Kapitel 3 gezeigt, sind dies vor allem Arbeiten, die für den Menschen mit einer hohen körperlichen Belastung oder mit einer Gefahr für seine Gesundheit verbunden sind. Außerdem kommen Arbeiten in Frage, welche die Automaten wirtschaftlicher als die Menschen durchführen können.

Zusätzlich ist es notwendig, Materialien und Fertigungsverfahren zu entwickeln, die einen effizienteren Einsatz der Automatisierungsgeräte ermöglichen. So stellt zum Beispiel das Gewicht der zu verarbeitenden Bauteile einen limitierenden Faktor für den Einsatz von Automaten dar. Mit neuen Techniken und Materialien aus dem Leichtbau könnte dieses Problem reduziert werden. Für eine Erhöhung des Vorfertigungsgrades im Bauwesen sind neue Verbindungstechniken zu entwickeln, die eine schnelle und haltbare Montage der Bauteile auf der Baustelle erlauben.

Die weitgehend automatisierte Vorfertigung von Bauteilen ist wie im Automobilbau ein geeigneter Weg, den Automatisierungsgrad und die Produktivität zu steigern. So könnten zum Beispiel mit komplexen Bausystemen für den Innenausbau Module angeboten werden, die bereits einen Großteil der erforderlichen Installationen integriert haben und mit intelligenten, geeigneten Verbindungstechniken auf der Baustelle montiert werden könnten [15], [121].

Diese technischen Neuerungen können relativ einfach mit bestehenden Entwicklungsmethoden erarbeitet werden. Problematisch sind dagegen vor allem die organisatorischen Innovationen, die parallel dazu erforderlich sind.

Damit sich die vom Roboter erzeugten Kosten rascher amortisieren, sind Stillstandszeiten des Gerätes auf der Baustelle unbedingt zu vermeiden, bzw. möglichst kurz zu halten. Wie schon erwähnt, ist es zum einen wichtig, bereits die Anlieferung und „Inbetriebnahme“ des Roboters zu optimieren. Dazu muss den beteiligten Monteuren ein Kostenbewusstsein für den Robotereinsatz vermittelt werden, um die Motivation für rasches und zuverlässiges Bereitstellen der für den Roboter notwendigen Infrastruktur zu sorgen.

Zum anderen ist eine für den Robotereinsatz optimale Reihenfolge der Gewerke zu finden, so dass der Montageroboter ohne größere Hindernisse arbeiten kann. Diese gegenüber dem herkömmlichen Bauablauf veränderte Reihenfolge der Gewerke stellt die größte Schwierigkeit dar, die einem erfolgreichen Robotereinsatz im Wege steht. Der

Anbieter des Montageroboters ist normalerweise selbst nur einer von vielen Auftragnehmern eines Bauherrn und kann daher den Bauablauf kaum beeinflussen.

Dennoch soll im Folgenden kurz ein idealisierter, robotergerechter Bauablauf diskutiert werden, um ein Bewusstsein für die notwendigen Änderungen zu erzeugen.

Da sich jede Baustelle individuell anders gestaltet, ist es unmöglich, einen allgemeinen, für alle Bauwerke gleichen Ablaufplan der Gewerke zu erstellen. Für das Beispiel eines Büroneubaus in Stahlbetonskelettbauweise mit vorgehängter Fassade soll ein für den Robotereinsatz optimaler Ablaufplan der Gewerke beschrieben werden:

Bei diesem Bauverfahren wird zunächst Stockwerk für Stockwerk aus Stahlbeton gefertigt, wobei nur wenige Wände bzw. Stahlbetonsäulen die einzelnen Stockwerke tragen. Nach Fertigstellung des Rohbaus wird dann die Fassade mit thermisch getrennten Fensterelementen (meist aus Aluminium oder Stahl und Glas) geschlossen. Anschließend oder parallel dazu beginnt der Innenausbau.

Diese Bauart mit vorgehängter Glasfassade hat zur Folge, dass die Raumaufteilung des Gebäudes sich auch an das Raster der Fassade anpassen muss. So sind bereits sowohl der Standort möglicher Wände als auch das Raster der Decke festgelegt. Der günstigste und früheste Zeitpunkt für den Einsatz des Roboters im Ablaufplan der Bauausführung ist also beim Schließen der Fassade oder sofort danach. Je früher die Abhänger gesetzt werden, desto weniger Behinderungen durch Hindernisse sowohl am Boden als auch an der Decke treten auf. Der frühzeitige Einsatz hat zusätzlich den Vorteil, dass noch meist die nichttragenden Innenwände fehlen, da sie entweder erst gemauert oder in Trockenbauweise gebaut werden. Daher kann der Roboter lange Fluchten abarbeiten.



Bild 86: Ideale „Roboterbaustelle“: Stahlbetonskelettbauweise mit Fassadenverkleidung, keine Decken- oder Bodenhindernisse

Nachdem die Abhänger gesetzt sind, können die Installateure ihre Leitungen und Kanäle verlegen, wobei gemäß der Vorplanung die Anzahl der Konfliktpunkte hinsichtlich der Lage der Abhänger und der Führung der Installation minimiert sind. Der Innenausbau erfolgt dann weiterhin wie bisher durch Einziehen der Innenwände, Legen des Est-

richs, Einbauen von Heizung, Sanitäranlagen und Lüftung, Elektroinstallation bis hin zur Fertigstellung.

Kurz vor den abschließenden Malerarbeiten werden vom Deckenbauer schließlich die Unterkonstruktion bzw. die Bandraster an den vorbereiteten Deckenabhängern befestigt und exakt nivelliert. Dann werden die Deckenplatten eingehängt oder die Unterkonstruktionen mit Gipskartonplatten beplankt und verspachtelt.

Wichtigste Forderung dieser Überlegungen ist eine enge Abstimmung aller Beteiligten an einem Bauwerk, da im Falle der Montage von Befestigungselementen an der Decke auch die weiteren Installationen wie Kabelkanäle, Lüftungsschächte, Rohrleitungen, Sprinkleranlagen usw. geplant sein müssen, um eventuellen Konfliktpunkten mit den Deckenabhängern vorzubeugen. Sinnvollerweise könnte dies mit modernen Mitteln der Informationsverarbeitung erfolgen. Doch gerade die Vernetzung bereitet auf der Baustelle Schwierigkeiten. Das Haupthemmnis liegt darin, dass die Gesamtplanung des Bauwerks vor Beginn der Ausführung beendet sein muss. Obwohl diese Forderung theoretisch sofort umsetzbar wäre, scheitert es in der Praxis zum einen an der oftmals unklaren Verwendungssituation eines Gebäudes. Gerade im Verwaltungsbau kommt es häufig vor, dass der Rohbau abgeschlossen wird und frühestens mit Abschluss eines Mietvertrages für die Büroflächen die endgültige Ausbausituation geklärt ist und erst dann der Ausbau geplant werden kann, da die späteren Nutzer die Innenausstattung wesentlich prägen. Zum anderen erfordert eine abgeschlossene Gesamtplanung vor Ausführungsbeginn einen erheblichen Mehraufwand an Planungszeit vom Planer, die jedoch selten zur Verfügung steht. Bei größeren Bauprojekten arbeitet zudem nicht mehr ein einzelner Architekt an der Planung, sondern mehrere Spezialisten sind für die unterschiedlichen Gewerke verantwortlich, die darüber hinaus auch an unterschiedlichen Orten sein können. Dadurch wird die Koordination im gesamten Bauprojekt weiter erschwert.

Zur Gewährleistung einer engen Abstimmung müssen die aktuellen Planungsstände aller Gewerke in einem zentralen, digitalen Gebäudemodell verfügbar sein [16], [104]. Verfahren dafür sind bei fast allen größeren CAD-Anbietern [84], [83] auf dem Bausektor vorhanden, jedoch fehlt eine einheitliche Schnittstelle, welche den durchgängigen Datenaustausch ermöglicht. Zusätzlich sollten 3D-Modelle aller Bauteile, die bei der Errichtung des Rohbaus oder beim Ausbau verwendet werden, von den jeweiligen Herstellern - ähnlich den Konstruktionselementen im Maschinenbau - angeboten werden, die über definierte Schnittstellen in das digitale Gebäudemodell eingebunden werden können. Dieses stellt somit bereits das virtuelle Ebenbild des späteren Bauwerks dar [62].

Die Modellierung aller Bauelemente gewährleistet, dass Konfliktsituationen frühzeitig erkannt und behoben werden können. Idealerweise könnte sogar der Bauablauf auf der Basis dieser Daten vorab simuliert und der richtige Einsatzzeitpunkt für den Roboter gefunden werden. Je mehr Roboter oder Automaten eingesetzt werden sollen, um so wichtiger wird die Durchführung einer derartigen Gebäudeplanung.

Diese Wunschvorstellung einer modernen Baustelle wird häufig geäußert, doch erscheint ihre Umsetzung in die Praxis nur langfristig möglich, zumal erst Grundlagenforschung auf diesem Feld betrieben wird [5], [1]. Für einen kurz- und mittelfristig wirtschaftlichen Einsatz von Automaten und Roboter muss eine Gewerkfolge, wie sie oben beschrieben wurde, eine suboptimale, realisierbare Zwischenlösung darstellen. Trotzdem kann auf diese Weise weitere Erfahrung durch den Einsatz des Gerätes gewonnen werden.

8 Trends und Perspektiven der Automatisierung am Bau

Abschließend soll ein kurzer Blick auf die Perspektiven der Automatisierung am Bau geworfen werden. Aussagen zu deren künftigen Entwicklung gestalten sich als sehr schwierig, da zum einen langfristige Prognosen der Gesamtwirtschaft, von der das Bauwesen abhängt, schwierig sind und zum anderen nur sehr wenige Bauunternehmen neben der Bewältigung ihres Tagesgeschäftes überhaupt Kapazitäten darauf verwenden, sich mit derartigen Fragestellungen zu befassen.

Besonderes Gewicht für die Entwicklung künftiger Systeme der Bauautomatisierung sollte auf den Hochbau gelegt werden, da sein Anteil am gesamten Bauaufkommen in der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit fast 75 % beträgt, wobei knapp die Hälfte auf den Wohnungsbau entfällt. Berücksichtigt man diesen bedeutenden Anteil am Gesamtbauvolumen und den hohen Lohnkostenanteil, dann ruht hier ein beachtliches Rationalisierungspotential, da gleichzeitig der Maschineneinsatz in diesem Bereich nur zwischen 4 % und 8 % liegt. Jedoch erschwert die unstrukturierte Baustellenumgebung sowie der Unikatcharakter von Gebäuden den Einsatz automatisierter Systeme. Der Produktivitätsfortschritt in der Bauindustrie beträgt zur Zeit nur etwa 1 – 2 % jährlich, im Vergleich zu etwa 20 % in der Automobilbranche. Hier ist ein integraler Ansatz notwendig, um den Anforderungen gerecht zu werden [12].

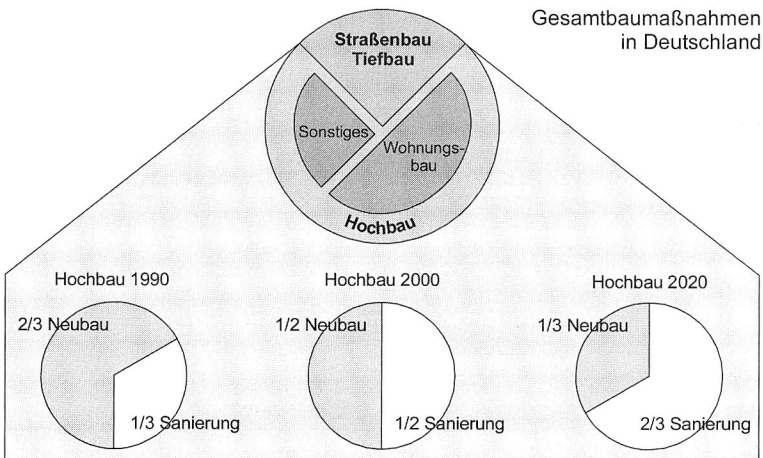


Bild 87: Verlagerung der Schwerpunkte im Hochbau vom Neubau zur Sanierung [17]

Bei der Betrachtung künftiger Einsatzfelder für die Bauautomatisierung muss beachtet werden, dass eine Schwerpunktverlagerung von Neubauten hin zu Sanierungen prognostiziert wird. Daraus lässt sich ableiten, dass die herkömmlichen und bewährten Bautechniken noch lange angewendet werden müssen, da sie im Moment am besten geeignet erscheinen, die Sanierungsaufgaben zu bewältigen. Daraus lässt sich aber auch ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf für recycling- und sanierungsge-

rechte Gebäudegestaltung ableiten, weil für die zur Zeit errichteten Gebäude eine Sanierung – möglicherweise sogar mit Automaten und Robotern - bereits mit eingeplant werden könnte.

8.1 Trend der Automatisierung im Bauwesen

In Kapitel 3 wurde bereits eine Studie vorgestellt, mit der Humanisierungs- und Rationalisierungspotentiale im Bauwesen ermittelt wurden. Im Rahmen dieser Umfrage wurde aber auch nach möglichen Trends der Automatisierung im Bauwesen gefragt. So wurden die Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität am Bau, die Ansichten über einen Einsatz von Automaten und Robotern auf der Baustelle, eine weitere Zunahme der Standardisierung von Baumaterialien und -prozessen und der Entwicklungsbedarf an technischen Hilfsmitteln analysiert. Die wichtigsten Ergebnisse daraus werden im Folgenden diskutiert.

8.1.1 Möglichkeiten für eine kurz-, mittel- und langfristige Steigerung der Produktivität am Bau

Für die nähere Zukunft erhofft sich die Mehrheit der Befragten eine Steigerung der Produktivität über organisatorische Verbesserungen. Speziell eine Erhöhung des Planungsanteils bzw. der weitgehende Abschluss der Ausführungsplanung vor Baubeginn werden häufig genannt. Dieses Ergebnis bestätigt zahlreiche Aussagen aus den vorhergehenden Kapiteln, worin ebenfalls die mangelhaften Organisationsstrukturen als Haupthemmnis einer höheren Produktivität identifiziert wurden.

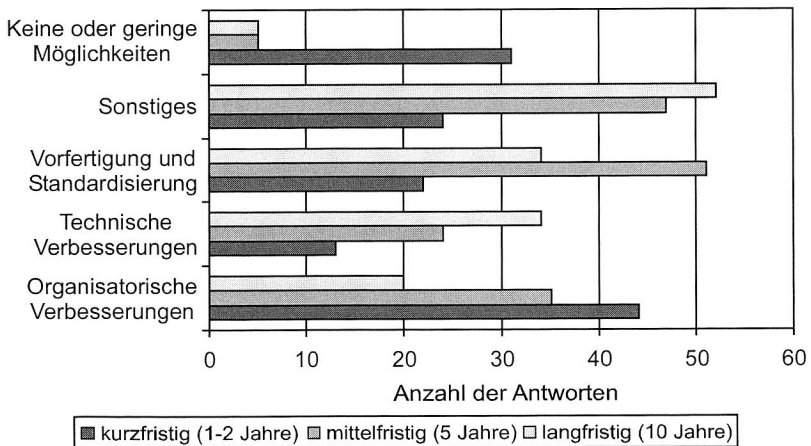


Bild 88: Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität am Bau (Mehrfachnennungen möglich)

Angeregt wird eine Integration ähnlicher Gewerke, um das Spektrum der verschiedenen Tätigkeiten zu konzentrieren, die Ansprechpartner zu bündeln und somit auch eine Re-

duktion der Haftenden im Falle einer Gewährleistung zu erzielen. Beispielsweise könnte der vorgestellte Roboter zur Montage von Deckenbefestigungselementen zusätzlich sämtliche Befestigungen anderer Gewerke (Elektro-, Heizungsinstallation, ...) übernehmen. Indirekt könnte dies Auswirkungen auf die Fertigungsqualität und somit eine Verminderung der Nachbesserungsarbeiten haben. Gewünscht wird eine Verbesserung der vorhandenen CAD-Programme auch im Hinblick auf das Baustellenmanagement und die Koordination und Überwachung der Bauausführung. Weiterhin wird auf eine Verbesserung und Verkürzung der Kommunikationswege aller am Bau Beteiligten gedrängt. Die technischen Verbesserungen und Neuentwicklungen bleiben kurzfristig eher im Hintergrund, da hierfür Entwicklungszeit fehlt. Allerdings besteht durchaus die Forderung nach einer Steigerung des Maschineneinsatzes, um die Gesundheit der Bauarbeiter zu schonen. Größere Chancen werden schon bald einer Zunahme des Vorfertigungsanteils von Bauelementen und -systemen eingeräumt, wodurch man sich eine Vereinfachung der Montage und somit eine Verkürzung der Bauzeit erhofft. Ansonsten werden in naher Zukunft die Chancen eher in der Ausbildung bzw. der Motivation der Mitarbeiter und in einer stärkeren Überwachung der Fertigungsqualität gesehen.

Mittelfristig dagegen erscheint die Erhöhung des Vorfertigungsanteils und der Standardisierung am erfolgsversprechendsten. Je größer der Zeithorizont ist, um so mehr Chancen werden einer zunehmenden technischen Weiter- oder Neuentwicklung von Baumaschinen und -geräten über bedienergeführte Automaten bis hin zu autonomen Robotern für eine Steigerung der Produktivität eingeräumt. Mit der Forderung nach mehr Vorfertigung, einer Entwicklung von Baukastensystemen und einer Erhöhung des Komplettierungsanteils von industriell vorgefertigten Bauelementen treten nun mehr und mehr Aspekte der Standardisierung in den Vordergrund. So werden zum Beispiel die Vereinheitlichung der Rastermaße und die Standardisierung von häufig vorkommenden Arbeitsprozessen gefordert, um den Einsatz von mehr automatisierten Geräten zu ermöglichen. Außerdem werden Rationalisierungspotentiale im Einsatz neuer Werkstoffe gesehen, die leichter zu montieren bzw. zu verarbeiten und wiederverwertbar sind. Ein denkbares langfristiges Szenario ist auch die Realisierung von Rationalisierungseffekten durch den Verkauf einer Komplettleistung, welche die Planung, Errichtung und den Betrieb des Gebäudes umfasst. Langfristig könnte sich der Zwang zu einer Rationalisierung durch eine mögliche Steigerung der Löhne in Osteuropa weiter verstärken.

Jedoch gibt es auch eher pessimistische Einschätzungen, die keine oder nur geringe Möglichkeiten für eine Produktivitätssteigerung sehen, überwiegend aber im kurzfristigen Bereich. Als Hauptgründe werden das knappe finanzielle Potential in den Betrieben, die Möglichkeit auf Arbeitskräfte aus Niedriglohnländern zugreifen zu können und die eher allgemeine träge Reaktion der Baubranche auf Innovationen genannt. Außerdem wird durchaus infrage gestellt, ob Automatisierung und Roboter einen Rationalisierungseffekt bewirken oder vor allem die Arbeiter physisch entlasten. Je länger dagegen der betrachtete Zeitraum gewählt wird, um so optimistischer werden die Möglichkeiten zur Produktivitätssteigerung gesehen.

8.1.2 Baustelle der Zukunft

Zur Klärung dieses Themenkomplexes wurden die Teilnehmer zuerst einmal nach dem Trend bei der Errichtung, der Renovierung und dem Rückbau von Gebäuden gefragt.

Obwohl in dieser Frage drei völlig verschiedene Bereiche des Bauens angesprochen werden, zeichnet sich wiederum eine klare Mehrheit für die Verwendung von Fertigteilen ab, wobei deren Verarbeitung durch bedienergeführte Automaten der Montage durch die Handwerker vorgezogen wird. Rein organisatorische Aspekte, wie die verbesserte Bauplanung bei eher gleichbleibender Ausführung, werden allerdings ebenfalls als sehr wahrscheinlicher Trend angesehen.

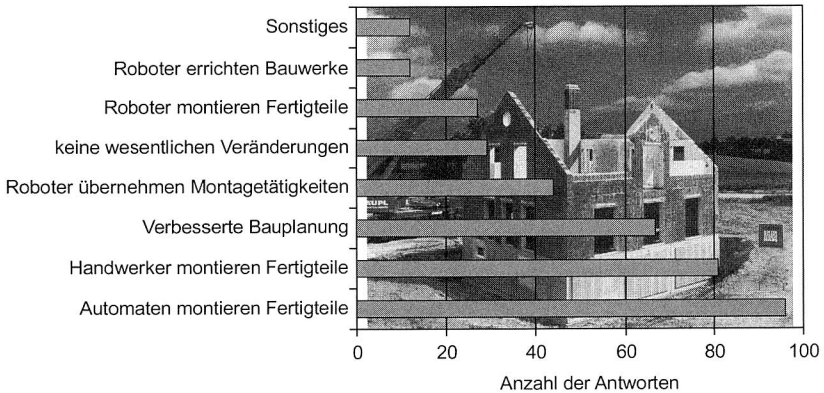


Bild 89: Trend bei der Errichtung, der Renovierung und dem Rückbau von Gebäuden (Mehrfachnennungen möglich)

Der Einsatz von autonomen Robotern, sei es für die Montage von Fertigteilen oder für die Ausführung einzelner Arbeitsprozesse, erscheint eher unwahrscheinlich. Ansätze aus Japan, wo Roboter bzw. Hochhausbaumaschinen bereits ganze Gebäude in Form einer Feldfabrik errichten, können sich die Befragten am wenigsten vorstellen. Da die Vielfalt der Aufgaben weiterhin die traditionelle Bauweise erforderlich machen wird, glauben viele der Befragten, dass keine oder nur sehr geringe Änderungen gegenüber den aktuellen Bauprozessen auftreten werden.

Das Schlagwort „Montage statt Bauen“ eignet sich am besten als Oberbegriff, der die Baustelle der Zukunft nach Meinung der Befragten kennzeichnet. Zum selben Ergebnis gelangt man auch bei Betrachtung von Bild 88 als Ergebnis der Frage nach Möglichkeiten zur Produktivitätssteigerung. Die Mehrzahl der Antworten zielt auf eine deutliche Zunahme des Vorfertigungsanteils ab, die Tätigkeiten auf der Baustelle werden im Wesentlichen Montageaufgaben sein. Der hohe Vorfertigungsanteil bedeutet eine Zunahme der Trockenbaumethoden auf der Baustelle, die Nassbaumethoden werden mehr und mehr auf die Fertigteilwerke verlagert werden.

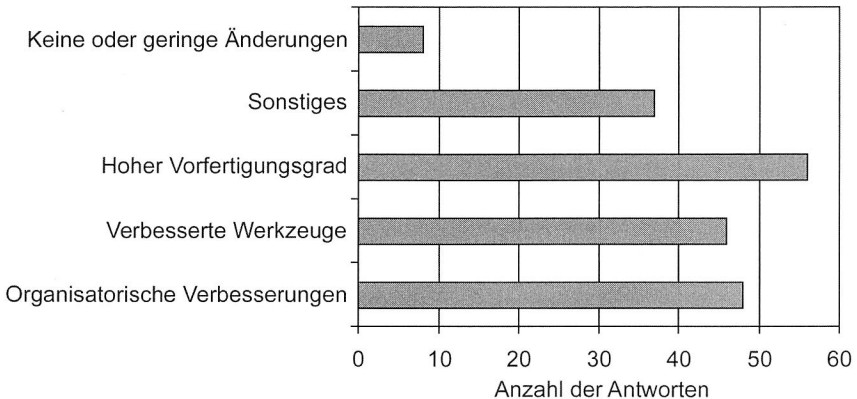


Bild 90: Stichworte zur Baustelle der Zukunft (Mehrfachnennungen möglich)

Die Montage auf der Baustelle wird zum Teil mit bedienergeführten Automaten (40 % Anteil an den verbesserten Werkzeugen), mit mobilen Robotern (28 % Anteil an den verbesserten Werkzeugen) und mit herkömmlichen, aber technisch weiter entwickelten Werkzeugen (17 % Anteil an den verbesserten Werkzeugen) erfolgen. Parallel mit einer Zunahme der Vorfertigung und dem gesteigerten Einsatz von verbesserten Werkzeugen, Automaten und Robotern wird eine verbesserte Planung bzw. eine Anpassung der Organisationsstrukturen und der Logistik (zum Beispiel optimierte Just-in-Time-Lieferung des Baumaterials) im Bauablauf als unbedingt notwendig angesehen.

Auffallend ist, dass keine homogene Meinung über die Qualifikation der beschäftigten Bauarbeiter gebildet werden kann. Zum einen könnte eine hochgenaue Vorfertigung den Einsatz von schlecht ausgebildeten Arbeitern aus Niedriglohnländern ermöglichen, zum anderen bedingt die Wartung und Bedienung der Automaten oder Roboter qualifiziertes Personal, das speziell ausgebildet und geschult wird. Insgesamt wird aber die Anzahl der am Bau Beschäftigten als rückläufig eingestuft.

8.1.3 Chancen und Voraussetzungen für einen verstärkten Einsatz bedienergeführter Automaten oder autonomer Roboter am Bau

Neben den grundsätzlichen Fragen zur Steigerung der Produktivität oder der Baustelle der Zukunft sollten die Teilnehmer der Studie speziell ihre Meinung zum Themenkreis der bedienergeführten Automaten bzw. der autonomen Roboter äußern. Diese Fragestellung wurde erneut in zwei Stufen analysiert. Zuerst sollten die Befragten ihre grundsätzliche Haltung zu den Chancen eines Einsatzes von bedienergeführten Automaten bzw. autonomen Robotern darlegen und diese begründen.

Die Hauptargumente für einen Einsatz von bedienergeführten Automaten oder auch autonomen Robotern sind nach Meinung der Befragten die Einsparung von Personalkosten, die Steigerung der Fertigungsqualität, eine Verbesserung des Arbeitsschutzes bzw. eine Erhöhung der Arbeitssicherheit.

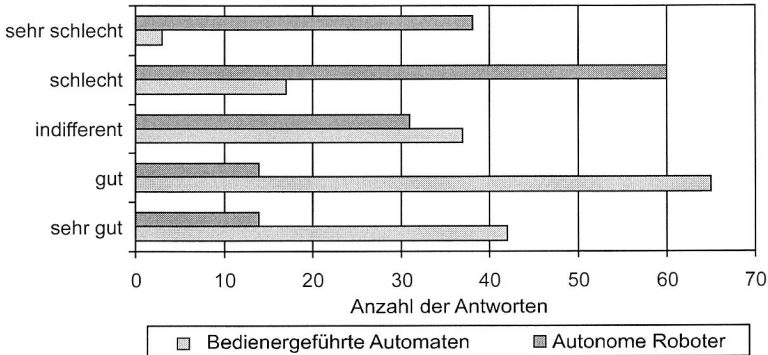


Bild 91: Chancen für den Einsatz bedienergeführter Automaten und autonomer Roboter

Eine klare Mehrheit der Befragten sieht die Chancen für einen verstärkten Einsatz vor allem bei den bedienergeführten Automaten. Damit ließe sich auch die Detailsausführung von Individualbauten realisieren, zugleich sind die Automaten vermutlich günstiger zu fertigen als autonome Roboter. Ein weiteres Argument für die bedienergeführten Automaten ist, dass am Bau häufig Probleme auftreten, die nur durch jahrelange Erfahrung gelöst werden können. Daher wird der Mensch nicht von der Baustelle wegzudenken sein, allerdings würden Arbeitserleichterungen für die Bauarbeiter durchaus begrüßt werden.

Gegen autonome Roboter spricht vor allem die unstrukturierte Baustelle und die sich pausenlos ändernden Rahmenbedingungen. Weitere Bedenken bestehen hinsichtlich der Betriebssicherheit und der generellen Flexibilität bzw. der möglicherweise zu häufig notwendigen Umprogrammierung der Geräte. Außerdem gibt es für die Bedienung solcher Geräte noch kein qualifiziertes Personal zur Verfügung. Einsatzmöglichkeiten von „echten“ Robotern werden eher im Bereich der Vorfertigung gesehen, da in einer Fabrikanlage die Umgebungsbedingungen geschaffen werden können, die für einen wirtschaftlichen Einsatz notwendig sind. Aber es fehlt nach Meinung der Befragten auch noch eine Standardisierung der Bautechniken, zum Beispiel der Befestigungstechnik für Installationen auf ein oder zwei genormte Systeme, um die Vielzahl an unterschiedlichen Halterungen und Führungssystemen zu reduzieren und so die Entwicklung und den Einsatz von Robotern zu erleichtern. Auf der anderen Seite würden gerade Roboter eine Reduktion des menschlichen Fehlverhaltens und somit eine Erhöhung der Fertigungsqualität ermöglichen. Einsatzfelder für autonome Roboter werden allenfalls im Straßen-, Tunnel- und Brückenbau oder bei der Telediagnose von Bauwerken oder Rohrleitungen gesehen.

Gegen einen Einsatz von bedienergeführten Automaten oder autonomen Robotern spricht nach Meinung der Befragten die Verfügbarkeit von Subunternehmern aus Niedriglohnländern und die Höhe der benötigten Investitionsmittel, die einen wirtschaftlichen

Einsatz dieser Geräte in Frage stellen und die momentan schlechte Auftragslage, welche die notwendige Investition unmöglich macht.

Diese Ergebnisse werden durch eine vom Fachverband Bau- und Baustoffmaschinen im VDMA durchgeführten Delphi-Studie bestätigt. Die dazu befragten Experten erwarten, dass Industrieroboter oder Automaten bis ca. 2010 wirtschaftlich auch auf Baustellen eingesetzt werden können, Industrieroboter allerdings nur für Wandaufbauten und Verputzaufgaben. Automaten dagegen könnten zusätzlich die Installation von Versorgungsleitungen übernehmen. Neben den geringen wirtschaftlichen Anreizen sehen die Experten vor allem Probleme mit der Arbeitssicherheit als Hürden für einen verbreiteten Robotereinsatz auf Baustellen an [24].

In der zweiten Stufe sollten dann auch Voraussetzungen genannt werden, die nach Meinung der Befragten für die Einführung dieser Geräte als notwendig erachtet werden.

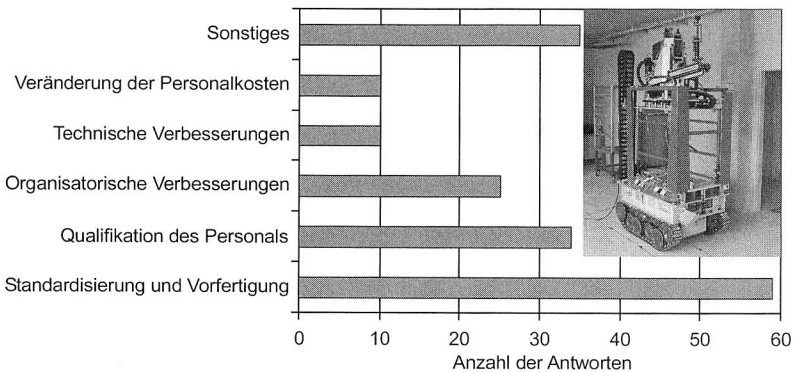


Bild 92: Voraussetzungen für die Einführung von Automaten und Robotern am Bau (Mehrfachnennungen möglich)

Für die Mehrheit der Befragten ist eine weitergehende Standardisierung bzw. ein erhöhter Vorfertigungsanteil die wichtigste Voraussetzung für die Einführung von bedienergeführten Automaten oder von Robotern. Mit deren Einsatz werden aber erhöhte Anforderungen an die Qualifikation des Personals erwartet, da die Automaten und Roboter verantwortungsbewusste Bediener und ein geschultes Servicepersonal benötigen werden. Zum Teil wird die Erwartung geäußert, dass eine zunehmende Automatisierung am Bau zu neuen Berufsbildern führen könnte.

Als weitere Hilfe sollten organisatorische Verbesserungen eingeführt werden, welche neben der bereits mehrfach angesprochenen optimierten Planung des gesamten Baugeschehens eine Ankopplung der Automatisierungsgeräte sowohl zu Steuerungszwecken als auch für Aufgaben der Qualitätssicherung ermöglichen.

Auffallend ist, dass einige der Befragten eine Anhebung des Lohnniveaus bzw. einen Ausschluss der Subunternehmer aus Niedriglohnländern als Voraussetzungen nennen. Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, dass bei der aktuell herrschenden Wettbe-

werbsituation und dem verbreiteten Einsatz von Arbeitern aus Niedriglohnländern der Einsatz von Automaten oder Robotern noch zu kostspielig wäre und damit keine wirtschaftliche Alternative darstellt. Als weitere Voraussetzungen werden die Bereitstellung von mehr Forschungsgeldern bzw. die Möglichkeit einer Anschubfinanzierung für die Anschaffung neuer Automatisierungslösungen genannt. Wichtig erscheint einigen Befragten auch das Einsetzen eines Stimmungsumschwungs zugunsten von mehr Rationalisierung und einem vermehrten Einsatz von Automatisierungslösungen. Dazu müssten aber positive Beispiele im Einsatz aufgezeigt werden.

Diese Aussagen werden erneut von der oben erwähnten Delphi-Studie bestätigt. Deren Experten sehen eine Verbesserung der Arbeitsvorbereitung und eine intensivere Koordination der Gewerke als Hauptforderungen für einen Robotereinsatz an. Darüber hinaus wird eine Erhöhung der Qualifikation der Bauausführenden als Einsatzvoraussetzungen für Roboter oder Automaten gesehen. Andererseits erwarten die Experten, dass durch eine Erhöhung des Vorfertigungsanteils sogar der Einsatz von Robotern oder Automaten auf der Baustelle erübrigt werden könnte [24].

8.1.4 Entwicklungsbedarf an technischen Hilfsmitteln

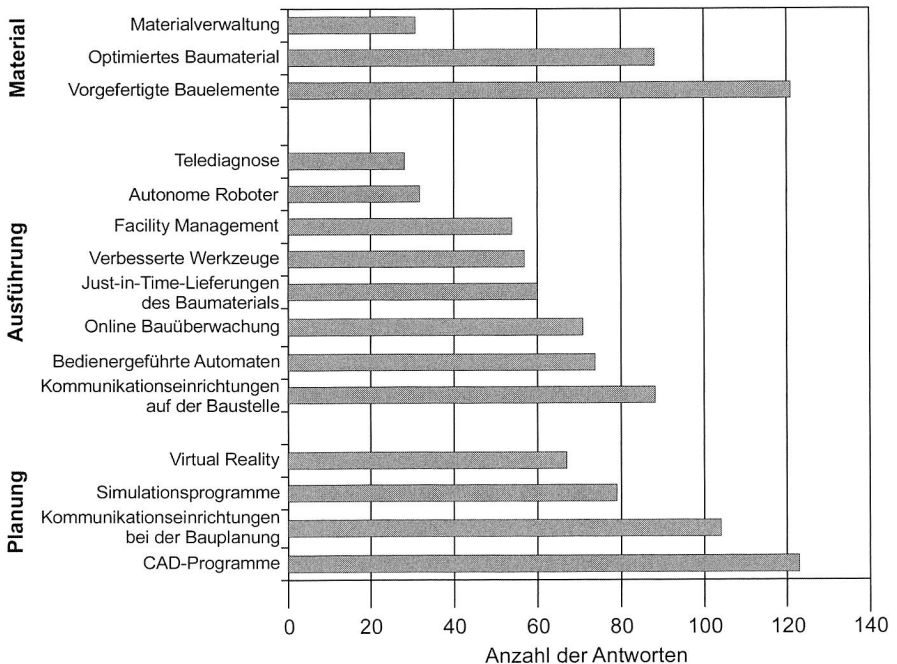


Bild 93: Entwicklungsbedarf für technische Hilfsmittel (Mehrfachnennungen möglich)

Die Antworten auf diese Frage bestätigen den grundsätzlichen Trend, der sich aus der gesamten Meinungsanalyse ableiten lässt, nämlich die Forderung nach besseren Pla-

nungsmöglichkeiten und einem zunehmenden Vorfertigungsgrad. Damit verbindet sich der Wunsch nach einer optimierten Abstimmung sowohl in der Planungsphase als auch während der Bauausführung. Dazu sind aber nach Meinung der Befragten erweiterte Kommunikationseinrichtungen (Internet, Videokonferenzen, ...) erforderlich. Grundsätzlich wären diese Techniken schon verfügbar, doch geht deren Einführung in das Bauwesen recht zögerlich voran. Zusätzliche Hilfsmittel für die Planungsphase, wie Simulationswerkzeuge oder Virtual Reality für die Visualisierung des Bauwerks, werden ebenfalls recht häufig genannt.

Neben einer Verbesserung der Kommunikation während der Bauausführung erscheint der Einsatz von bedienergeführten Automaten den Befragten ebenfalls als ein realistischer Entwicklungstrend. Eine Steigerung der Möglichkeiten, das Baugeschehen online zu überwachen, sollte zusätzlich noch verstärkt bereitgestellt werden.

8.2 Fazit und Bewertung

Insgesamt lassen sich zwei Kernaussagen aus der Meinungsumfrage ableiten, nämlich zum einen die Notwendigkeit für eine Erhöhung des Planungsaufwands vor Beginn der Bauausführung und zum anderen eine Zunahme des Vorfertigungsanteils. Im folgenden Kapitel sollen diese Aussagen noch einmal zusammengefasst und unter den Zielen der Studie bewertet werden.

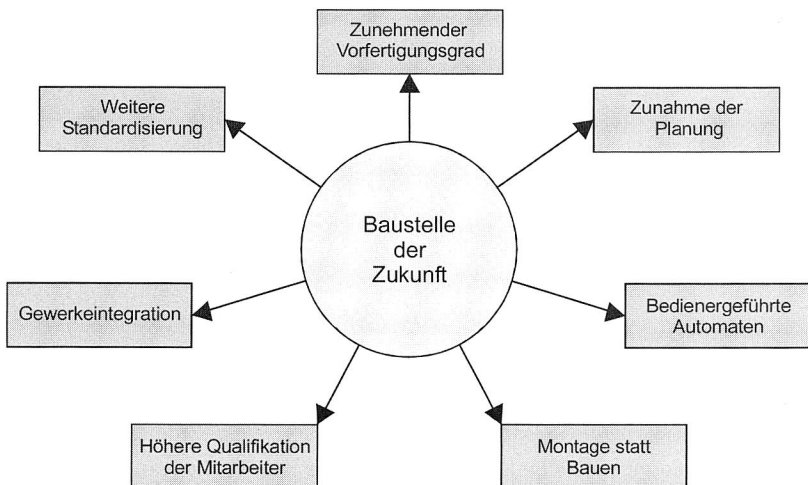


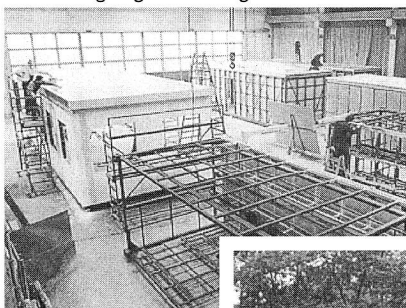
Bild 94: Wesentliche Merkmale der Baustelle der Zukunft [46]

8.2.1 Zunahme des Vorfertigungsanteils

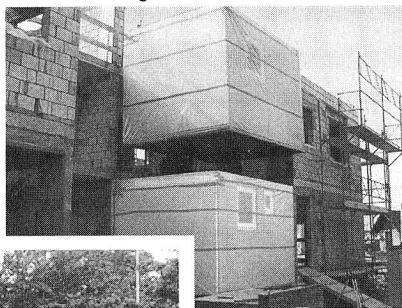
Die Erhöhung des Vorfertigungsgrades könnte neben einer Steigerung der Geschwindigkeit der Bauausführung eine Zunahme der Fertigungsqualität bewirken, da diese Arbeiten unabhängig von klimatischen Schwankungen und den schlechteren Arbeitsbe-

dingungen auf der Baustelle in einer definierten Fabrikumgebung durchgeführt werden können. Weiterhin ist eine Zunahme der Integrationsdichte der Fertigteile abzusehen. Es ist zu erwarten, dass viele der Installationen, wie Elektro-, Wasser- oder Heizungsinstallationen, bereits im Werk in die Bauelemente eingebracht werden und auf der Baustelle nur noch miteinander verbunden werden müssen. Die dabei auftretenden Probleme der Verbindungstechnik für diese Komponenten, die zum Teil unter Druck stehen bzw. absolut dicht sein müssen, sind heute noch nicht gelöst und bedürfen intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Erkennbar ist, dass einige Fertigteilwerke verstärkt den Bauherrn und nicht Baufirmen als Kunden sehen und neben der reinen Herstellung der Bauelemente auch Dienstleistungen zur Planung und Montage der Fertigteile anbieten. Gerade im Wohnungsbau wird sich diese Alternative mehr und mehr verbreiten.

Vorfertigung hochintegrierter Module



Montage auf der Baustelle



Anlieferung der Module

Bild 95: Eine Erhöhung des Vorfertigungsgrades führt zu einer Steigerung der gefertigten Qualität und zu einer Verkürzung der Bauzeit [Quelle: Cadolto]

Der hohe Vorfertigungsanteil bedeutet eine Zunahme der Trockenbaumethode auf der Baustelle unter Verwendung vielfältig kombinierbarer Fertigelemente, die Nassbaumethoden werden mehr und mehr auf die Fertigteilwerke verlagert werden. Auf der Baustelle der Zukunft werden also Montagetätigkeiten überwiegen, wobei ein Nebeneinander von Facharbeitern, ungelernten Arbeitern, bedienergeführten Automaten und sogar autonomen Roboter erwartet werden kann. Dies bedeutet, dass die bisherige Montagetechnik am Bau bestehen bleiben wird, ergänzt durch neue Maschinen und an die Fertigteile angepasste Montagetechniken.

8.2.2 Verbesserung der Planungsmethoden

Weiterhin wird sehr deutlich die unzureichende Planung bei der momentanen Bauausführung beklagt und in einer Verbesserung der Planung ein erhebliches Rationalisierungspotential gesehen.

Eine Zunahme der Vorfertigung wird fast zwangsläufig einen gesteigerten Planungsaufwand voraussetzen, falls teure „Ausschussproduktion“ verhindert werden soll. Eine Erhöhung der Vorausplanung wird aber nur dann zu realisieren sein, wenn das Bauen auch mit einer Bewusstseinsänderung der Bauherren einhergeht und die baubegleitende Planung, bedingt durch zahlreiche Änderungswünsche der Bauherren, auf ein Minimum reduziert werden kann. Dies lässt sich beispielsweise mit einer Visualisierung des künftigen Bauwerks in 3D und virtueller Realität erreichen, da den Bauherren somit eine sehr genaue Vorstellung ihres künftigen Gebäudes vermittelt werden kann [39].

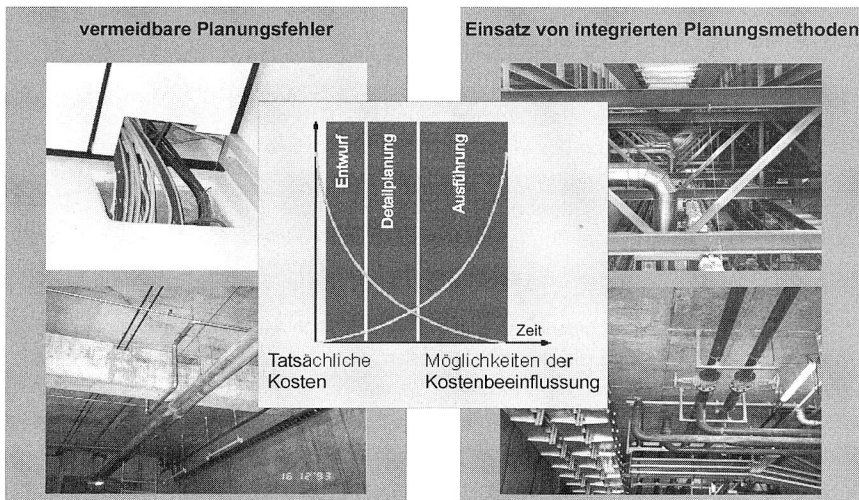


Bild 96: Gesteigerter Planungsaufwand zur Vermeidung von Ausführungsfehlern [17]

In Bild 96 sind jeweils zwei Fälle für vermeidbare Ausführungsfehler, bedingt durch eine schlechte Bauplanung, sowie für eine gelungene Ausführung am Beispiel der Installationstechnik dargestellt. Das zentrale Diagramm verdeutlicht den Zusammenhang zwischen den entstehenden Kosten und den Möglichkeiten zur Kostenbeeinflussung. Man erkennt, dass gerade am Beginn der Planungsphase die Möglichkeiten dazu besonders hoch sind. In dieser Phase, die mit relativ geringen eigenen Kosten verbunden ist, werden auch die resultierenden Baukosten festgelegt. Es sollte also möglich sein, durch eine Erhöhung des Planungsaufwands die Baukosten durch die damit verbundene Vermeidung von Ausführungsfehlern zu reduzieren. Dies sollte sich allein schon durch die Senkung der Kosten für Nachbesserungen erreichen lassen, die bei Industriebauten zur Zeit bei ca. 30 % liegen. Geeignet dazu sind integrierte Planungsmethoden, die eine

frühzeitige Zusammenarbeit aller am Bau Beteiligten anstreben. Dies umfasst sowohl die Fachplaner als auch die ausführenden Firmen [17].

Für den Bereich des Wohnungsbaus allerdings ist es wohl eher die produktorientierte, unternehmenseigene Planung, mit der Rationalisierungspotentiale erschlossen werden können. Darunter können das Angebot und die Fertigung von Wohngebäuden mit Festpreisen und nach Mustern, die durch Baukastensysteme variiert werden können, durch eine einzige Baufirma verstanden werden. Dieses Angebot eines Sortiments und die Beschränkung darauf ermöglicht eine gezielte Investition in entsprechende Maschinen und Bauverfahren. Von dieser Möglichkeit wird im Moment, außer durch einige Fertighausproduzenten, noch kein Gebrauch gemacht, obwohl sich gerade kleine und mittelständische Unternehmen in derartigen Nischen Marktanteile erobern könnten. Dies liegt daran, dass das ganze Bauwesen sehr extrem auf Improvisation eingestellt ist und somit die anzuwendende Technik von Projekt zu Projekt wechselt.

8.2.3 Zunahme der Standardisierung

Von vielen Teilnehmern der Studie wird die Meinung vertreten, eine Zunahme der Vorfertigung könne nur dann erreicht werden, wenn deutlich mehr standardisierte Bauteile als bisher verwendet werden. Es zeigt sich aber, dass dieses Thema sehr sensibel zu behandeln ist, da Standardisierung oft mit Uniformität gleichgesetzt wird. Als Beispiele werden immer wieder die Plattenbauten in der ehemaligen DDR angeführt. Dabei wird übersehen, dass in einer Zunahme standardisierter Bauteile neben einem erheblichen Rationalisierungspotential eine große kreative Herausforderung für die Planer enthalten ist. Weiterhin wird es sicher auch in Zukunft völlige Individualbauten – vor allem bei repräsentativen Gebäuden – geben, die vermutlich deutlich teurer sein werden, als Gebäude, welche mit standardisierten Fertigteilen errichtet werden. Gerade im kostengünstigen Wohnungsbau könnten durch die Verwendung standardisierter und industriell vorgefertigter Bauelemente die Quadratmeterpreise gesenkt und so neue Kunden gewonnen werden.

Ein völlig anderer Aspekt ist die Standardisierung von Montage- und Fertigungsprozessen. So erschwert zum Beispiel die Vielzahl der am Markt verfügbaren Befestigungssysteme für Installationen oder für abgehängte Decken in Industriebauten sowohl die Integration der Befestigungselemente in die Vorfertigung als auch die Entwicklung von Automaten oder Robotern für diese Techniken. Die Einführung von Standards für solche Prozesse ließe sich nur schwer mit den oben angesprochenen Argumenten ablehnen, da hier weniger ästhetische als vielmehr technische Gründe für den Einsatz bestimmter Montage- oder Fertigungsprozesse anzuführen sind.

Die Kombination von standardisierten Bauelementen mit den zugehörigen Montage- und Fertigungsprozessen würde die Entwicklung von Baukastensystemen ermöglichen, mit deren Hilfe die Bauwerke bei nahezu unbegrenzter Flexibilität im äußeren Erscheinungsbild dennoch rationell und zum Teil automatisiert errichtet werden könnten.

8.2.4 Erhöhung der Gewerkintegration

Die hohe Anzahl an Gewerken, die im Moment auf Baustellen beschäftigt sind, erschwert die zeitliche Abstimmung zwischen den einzelnen Arbeitsschritten, erfordert oftmals ähnliche Tätigkeiten von unterschiedlichen Gewerken und bewirkt Haftungsprobleme bei Ausführungsfehlern, deren Ursachen nicht eindeutig einem Gewerk zugeordnet werden können. Als typisches Beispiel kann eine Situation im Innenausbau eines Industriebaus angeführt werden: Die Heizungs- und Elektroinstallation, der Einbau der Klimatechnik und die Montage abgehängter Decken erfordern beispielsweise jeweils einen eigenen Aufriss, der oft nach dem Prinzip „wer zuerst kommt, malt zuerst“ angebracht wird. Meist wird der Klimatechniker beginnen seine Bauteile anzubringen, da er vermutlich den größten Platzbedarf aufweist. Die folgenden Gewerke müssen sich den restlichen Platz teilen und sind so sehr oft gezwungen, von ihrer ursprünglichen Planung abzuweichen oder können ihre Deckenbefestigungen nur noch sehr umständlich anbringen. In diesem Fall wäre es viel einfacher, vor Beginn der Arbeiten an der Decke sämtliche Befestigungsbohrungen und -elemente an der Decke zu montieren und erst dann mit der Montage der einzelnen Komponenten anzufangen. Dies hätte den Vorteil, dass nur noch ein Aufriss für die gesamten Befestigungen erfolgen müsste, durch die frei zugängliche Decke würde der Einsatz eines Bohr- oder Befestigungsautomaten ermöglicht. Dazu sind aber zum einen standardisierte Befestigungselemente, die auch automatisierungsgerecht sind, und zum anderen geeignete Abstimmungs- und Planungsmethoden aller daran Beteiligter notwendig. Somit wirkt sich dieser mögliche Trend auf die Aspekte „Planung“ und „Standardisierung“ aus bzw. wird von ihnen beeinflusst.

8.2.5 Bedienergeführte Automaten und verbesserte Kommunikationseinrichtungen

Es herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass bedienergeführte Automaten ein wirkungsvolles Werkzeug darstellen, die Produktivität am Bau zu erhöhen. Allerdings setzt ein wirtschaftlicher Einsatz derartiger Geräte eine darauf abgestimmte Planung und automatisierungsgerechte Bauteile und Bautechniken voraus. Die Komplexität der Automaten erfordert qualifizierte Bediener und geschultes Servicepersonal. Mit dem Einsatz von Automaten auf der Baustelle wird auch die erforderliche Informationsverarbeitung immer komplexer, aber dieses Problem sollte mit den Erfahrungen aus anderen Industriezweigen und einem gesteigerten Forschungsaufwand in den nächsten Jahren gelöst werden können. Gerade die CAD-Werkzeuge für Bauanwendungen wurden in den letzten Jahren beständig weiterentwickelt und können für komplexere Planungs-, Berechnungs- und Simulationsaufgaben eingesetzt werden. Außerdem ist durch die Verdoppelung der Rechenleistung alle 18 – 24 Monate eine weitere Zunahme der CAD-Möglichkeiten zu erwarten, so dass die Einsatzmöglichkeiten für Automaten auf Baustellen weiter besser werden sollten.

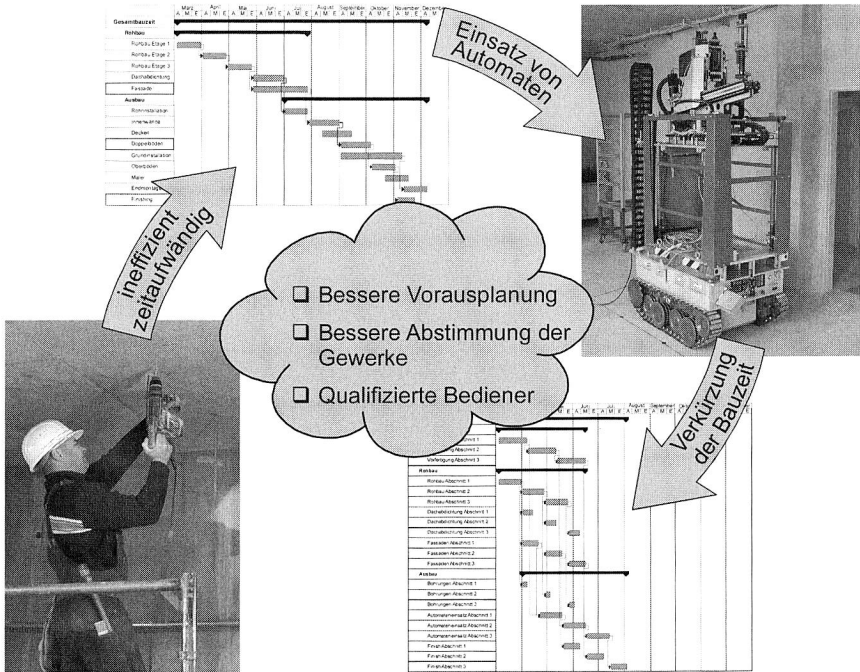


Bild 97: *Bedienergeführte Automaten tragen zur Produktivitätssteigerung am Bau bei, wenn verbesserte Planungswerkzeuge ihre Einsatzbedingungen optimieren*

Es fehlen allerdings noch geeignete Kommunikationswerkzeuge während der Planung und der Bauausführung. In der Planungsphase, die überwiegend in Büros durchgeführt wird, ist zu erwarten, dass sich das Internet wie in vielen anderen Bereichen des täglichen Lebens durchsetzen wird und eine wesentlich engere Vernetzung aller am Bau Beteiligten ermöglicht, von einfachen E-Mail-Diensten bis hin zu videounterstützten Online-Konferenzen. Auf der Baustelle fehlen Werkzeuge für diese Technik noch bzw. sind erst in einer Frühphase der Entwicklung, doch wäre es gerade auf Großbaustellen für die Bauleitung sehr wichtig, online über die wesentlichen Vorgänge auf der Baustelle informiert zu sein und eine intensive Vernetzung zwischen Planer und Bauleitung zur Verfügung zu haben.

9 Zusammenfassung

Das automatisierte Bauen unter besonderer Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Aspekte schließt den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes ein, von der Planung, der Herstellung, dem Betrieb bis zur Wiederverwertung. Zum integralen Bauprozess gehören die flexible, automatisierte Herstellung unterschiedlicher Gebäudeteile im Vorfertigungsbetrieb, die Montage der Komponenten auf der Baustelle mit bedienergeführten Automaten oder Robotern ebenso wie ein integriertes System zur Planung, zum Bau und zum Betrieb von Gebäuden.

Robotersysteme und Automaten können so zur Schlüsseltechnologie des Bauwesens werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnte diese Behauptung durch eine Analyse der Rationalisierungs- und Humanisierungspotentiale der Automatisierung am Bau bestätigt werden. Die Entwicklung eines Prototypen zum automatisierten Setzen von Dübeln und Deckenabhängern bei der Montage von abgehängten Decken brachte wichtige Erkenntnisse über Einsatzmöglichkeiten und -hemmnisse von Robotern im Innenausbau.

So kann zum Beispiel eine Erhöhung der Fertigungsqualität durch die Verlagerung der ermüdenden und daher fehlerträchtigen Arbeiten von den Monteuren hin zur Maschine und durch eine Überwachung durch die vorhandene Sensorik der Maschinen erwartet werden. Bauzeit und -kosten können durch optimierte Planungsmethoden, durch eine Zunahme des Vorfertigungsanteils und einen höheren Maschineneinsatz mit der damit verbundenen Senkung des hohen Lohnkostenanteils für die manuellen Tätigkeiten reduziert werden. Im Rahmen einer umfangreichen Studie konnte gezeigt werden, dass eine deutliche Humanisierung der Bauarbeit durch die Verlagerung der körperlich belastenden Arbeiten von den Monteuren hin zu den Maschinen zu erkennen ist.

Die verschiedenen Testeinsätze des Prototypen haben gezeigt, dass sich die Entwicklung eines Bauroboters nicht nur auf den zu automatisierenden Prozess auswirkt, sondern darüber hinaus das gesamte Arbeitsumfeld auf der Baustelle Änderungen unterworfen sein wird, wenn die Roboter wirtschaftlich eingesetzt werden sollen. So erfordert die Unikatfertigung im Bau zwar eine sehr hohe Flexibilität der Bauprozesse, jedoch könnte durch eine durchgängige Planung vor Baubeginn (statt der bisherigen baubegleitenden Planungsmethoden) die Basis für den Einsatz neuer Automatisierungslösungen geschaffen werden. Die Notwendigkeit dazu wird zwar in der Baubranche wahrgenommen, jedoch ist die Bereitschaft zur Durchführung dieser Änderungen im Moment noch sehr schwach ausgeprägt.

Die geringe Änderungsbereitschaft resultiert aber auch daraus, dass bisher erst wenige überzeugende und wirtschaftlich einsetzbare Automatisierungslösungen entwickelt wurden. Baustellenroboter müssen im Gegensatz zu Industrierobotern leicht, transportfähig, kompakt, robust, flexibel, mobil und autonom sein. Es müssen baustellentaugliche Automatisierungskomponenten und Sensorsysteme entwickelt werden, welche für die rauen Umgebungsbedingungen auf der Baustelle geeignet sind. Ein weiteres Problem der Prototypen ist in ihrer Bedienung zu sehen, da komplexe Geräte keinen Erfolg haben werden, falls hochqualifiziertes Personal benötigt wird.

Aber auch die Bauprozesse müssen einer kritischen Betrachtung unterzogen werden. Es hat sich bereits in anderen Industriezweigen gezeigt, dass ein Ersetzen handwerklicher Tätigkeiten durch Roboter nur bedingt Erfolg versprechend ist, wenn die herkömmlichen Baumethoden und -systeme nicht entsprechend modifiziert werden.

Bild 98 verdeutlicht, dass für eine erfolgreiche automatisierungsgerechte Gestaltung des Bauablaufs ein ganzheitlicher Ansatz gewählt werden muss, der die üblichen sequentiellen Abläufe der Bauproduktion durch parallele Abläufe ersetzt und bereits in den Planungs- und Konstruktionsphasen auf den späteren Roboterbetrieb hin ausrichtet. Dazu sind standardisierte und vor allem durchgängige Informations- und Kommunikationstechnologien erforderlich, die einen Datenfluss von der Planung über die Vorfertigung bis zur Baustelle oder sogar dem Betrieb des Gebäudes ermöglichen.

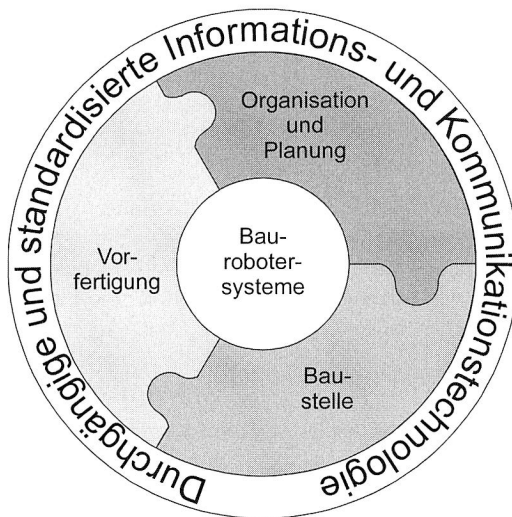


Bild 98: Automatisierungsgerechte Gestaltung des Bauablaufs

Neben den Nutzenpotentialen und den möglicherweise durchzuführenden Änderungen im Bauablauf war ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit die Charakterisierung der Baustelle der Zukunft. Mit den durchgeführten Meinungsanalysen konnten dazu grundsätzliche Aussagen getroffen werden, die bei der künftigen Entwicklung von Automatisierungsgeräten für das Bauwesen berücksichtigt werden können.

Die Umsetzung der Vision „Roboterbaustelle“ wird sicher noch einige Jahre bzw. Jahrzehnte dauern, aber auf lange Sicht wird sich auch das Bauwesen dem Automatisierungstrend nicht entziehen können. Wenn es gelingt, die aufgezeigten Problemstellen durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu lösen, dann kann durch den Einsatz neuer Automatisierungslösungen ein humaneres, billigeres, schnelleres und qualitativ besseres Bauen als heutzutage ermöglicht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Adeli, H.:
Emerging information and computing technologies for construction automation, Tagungsband des „17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. K29 – K32, Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00
- [2] Andres, J.:
Robotersysteme für den Wohnungsbau – Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerksbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen, Dissertation am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe, 1997
- [3] Andres, J.; Bock, Th.; u. a.:
First results of the development of the masonry robot system ROCCO – A fault tolerant assembly tool, Tagungsband des „11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 87 – 93, Brighton, England, 24.5.94 – 26.5.94
- [4] Arcin, Ronald, C.:
Behavior-Based Robotics, MIT Press, Cambridge, 1998
- [5] Balaguer, C.:
Open issues and future possibilities in the EU construction automation, Tagungsband des „17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. K21 – K27, Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00
- [6] Becker, K.; Pfau, J.; Tichelmann, K.:
Trockenbau-Atlas: Grundlagen, Einsatzbereiche, Konstruktionen, Details, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 1998
- [7] Beitz, W.; Küttner, K.-H. (Hrsg.):
Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1995
- [8] Betke, M.; Gurvits, L.:
Mobile robot localisation using landmarks, Tagungsband der „International Conference on Intelligent Robots and Systems“, S. 135 – 142, München, Deutschland, 12.9.94 – 16.9.94
- [9] Betourne, A.; Fournier A.:
Kinematics and control of conventional wheeled omnidirectional mobile robot, Tagungsband des „24th International Symposium on Industrial Robots“, S. 461 – 468, Tokyo, Japan, 4.11.93 – 6.11.93
- [10] Bock, Th.:
Robotik und computerintegriertes Bauen, BMT 4, S. 245 – 251, August 1992

- [11] Bock, Th.:
Robotik im Bauwesen (1) – Robotik und Automatisierung in der stationären Fertigung, DETAIL Nr. 5, 1998
- [12] Bock, Th.:
Robotik im Bauwesen (2) – Das Dach wird zuerst gebaut – Automatisierte und roboterisierte Bausysteme, DETAIL Nr. 6, 1998
- [13] Bock, Th.:
Robotik im Bauwesen (3) – Fassadenroboter, DETAIL Nr. 7, 1998
- [14] Bock, Th.; Weingartner, H.:
Innovationen auf Baustellen in Japan – voll- und teilautomatischer Hochbau, Bautechnik 71 (1994), Heft 2, S. 70 –76
- [15] Bock, Th.; Prochiner, F. O.:
Home 24 – 24 hours to build a house, Tagungsband des „17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 127 – 130, Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00
- [16] Bock, Th.; Kreupl, K.; Herbst, J.:
Planning aids for enhancing the implementation of a mobile robot on the construction site, Tagungsband des „17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 509 – 514, Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00
- [17] Bock, Th.:
Vorlesungsskript „Baurealisierung“ an der TU München, 1999
- [18] Bock, Th.; Weingartner, H.; Weisse, Th.:
Roboter und Telemanipulatoren für Reinigungs-, Inspektions- und Wartungsaufgaben an Fassaden und auf Dachbereichen, Bautechnik DAB 11/93, S. 1968-1971
- [19] Boes, M.; Leithold, D.; Hrachowy, F.:
Trockenbaumonteur – Technologie, Verlag Handwerk und Technik, Hamburg 1999
- [20] Borenstein, J.; Everett, H.R.; Feng, L.:
Where am I? – Sensors and methods for mobile robot positioning, The University of Michigan, Technical Report, April 1996
- [21] Buttelmann, M.; Kieren, M.; Lohmann, B.:
Trajektoriengenerierung und Bahnregelung für nichtholonome, autonome Fahrzeuge, in Tagungsband zum 15. Fachgespräch „Autonome Mobile Systeme 1999“, S. 303 – 312, Springer-Verlag, Berlin, 1999
- [22] Capek, K.:
R.U.R. (Rossum's Universal Robots), Oxford University Press, 1961

-
- [23] Cousineau, L.; Miura, N.:
Construction robots – The search for new building technology in Japan, Asce press, Reston, Virginia, 1998
- [24] Cuhls, K.:
Delphi'98–Umfrage, Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik – Zusammenfassung der Ergebnisse, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) im Auftrag des BMBF, Karlsruhe, 1998
- [25] Dalacker, M.:
Entwurf und Erprobung eines mobilen Roboters zur automatisierten Erstellung von Mauerwerk auf der Baustelle, Doktorarbeit an der Universität Karlsruhe, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1997
- [26] Dillner, H.:
Windows NT und Echtzeit-Aufgaben, Computer & Automation 3/99, S. 42 – 46
- [27] DIN 18202:
Toleranzen im Hochbau, Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [28] Dorigo, M.; Colombetti, M.:
Robot Shaping: An Experiment in Behavior Engineering“, MIT Press, Cambridge, 1998
- [29] Drunk, G.:
Sensor- und Steuerungssystem für die leitlinienlose Führung automatischer Flurförderzeuge, Doktorarbeit an der Universität Stuttgart, Springer-Verlag, Berlin, 1990
- [30] Dzeng, R.-J.; Lee, H.-Y.:
Automated schedule advisory system, Tagungsband des „17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 255 – 260, Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00
- [31] Everett, J.G.:
Ergonomics, health and safety in construction: Opportunities for automation and robotics, in Proceedings of the „11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 19 – 26, Brighton, England, 24.5.94 – 26.5.94
- [32] Everett, J.G.:
True costs of construction accidents: Hidden incentive for construction automation and robotics, in Proceedings of the „12th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 19 – 26, Warschau, Polen, 30.5.95 – 1.6.95
- [33] Gassmann, H.:
Theorie der Regelungstechnik – Eine Einführung, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1998

- [34] Gillmeister, F.:
Passive und aktive sekundäre Maßnahmen zur Reduzierung der Hand-Arm-Schwingungsbelastung, Doktorarbeit an der Universität Dortmund, Vulkan-Verlag, Essen, 1999
- [35] Görzing, S.; Gern, A.; Levi, P.:
Realzeitfähige Multiagentenarchitektur für autonome Fahrzeuge, in Tagungsband zum 15. Fachgespräch „Autonome Mobile Systeme 1999“, S. 44 – 55, Springer-Verlag, Berlin, 1999
- [36] Heller, J.:
Sensorgestützte Bewegungserzeugung leitlinienloser Transportfahrzeuge, Doktorarbeit an der Universität Stuttgart, Springer-Verlag, Berlin, 1995
- [37] Hesse, S.:
Industrieroboterpraxis – Automatisierte Handhabung in der Fertigung, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1998
- [38] Hofer, H. O.:
Die sogenannte leichte Arbeit: Beschwerden am Bewegungsapparat – mögliche Ursachen, Behandlung und Rehabilitation, in: Sorgatz, H.; Weißenstein, C.; Engel, M. (Hrsg.): Prävention von Bewegungsschmerzen bei der Bildschirmarbeit, Technische Hochschule Darmstadt, 1994
- [39] Howe, S. A.:
Designing for automated construction, Automation in Construction, Volume 9, Issue 3. S. 259 – 276, May 2000
- [40] Janetschke, M.:
Echtzeitbetriebssystem in der Automatisierung, SPS Magazin, 6+7/2000, S. 72 - 74
- [41] Jantzer, M.:
Bahnverhalten und Regelung fahrerloser Transportsysteme ohne Spurbindung, Doktorarbeit an der Universität Stuttgart, Springer-Verlag, Berlin, 1990
- [42] Kaden, R.; Schulze, K.-P.:
Automatisierung im Bauwesen – Entwicklungsstand und –tendenzen, Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Leipzig, Heft 4, Leipzig 1991
- [43] Kieseewetter L.; Petschmann E.; u. a.:
Automatisierung und Robotereinsatz im Bauwesen – Stand der Technik und Entwicklungsschwerpunkte; im Auftrag von zebra Zentrum für rationelles und anwendungsorientiertes Bauen GmbH; Cottbus 1994
- [44] Kloek, R. P. W.; Bos, J.; v.d. Marck, R. M. S.:
The development and testing of a mobile drilling robot, in Proceedings of the „11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 63 – 70, Brighton, England, 24.5.94 – 26.5.94

- [45] Koch, M.; Feldmann, K.:
Development of an open and modular control system for autonomous mobile building robots with flexible manipulators, in Proceedings zum „17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, Seite 477-482, Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00, (ausgezeichnet als „best paper“)
- [46] Koch, M.; Feldmann, K.:
Chances, obstacles and a possible trend of automation in construction from the point of view of the German construction industry, in Proceedings zum „17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, Seite 965-970, Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00
- [47] Koch, M.; Feldmann, K.:
Ein mobiler Roboter für Montageaufgaben im Innenausbau, in Tagungsband zur VDI-Konferenz Robotik 2000, VDI-Bericht 1552, Seite 197-202, Berlin, 29.6.00 – 30.6.00
- [48] Koch, M.; Feldmann, K.:
A mobile robot system for assembly operations at interior finishing, in Proceedings zum „15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, München, 31.März-1. April 1998, Seite 93-102
- [49] Koch, M.; Feldmann, K.:
Development of a modular and mobile robot system for assembly operations at interior work, in Proceedings zum „29th International Symposium on Robotics“, Birmingham, England. 27.4.98 – 1.5.98
- [50] Körner, B.:
Innovationen für die Bauwirtschaft; Bayerische Staatszeitung Nr. 6 vom 11.Februar 2000
- [51] Kohen, C.; Koss, F.:
A comprehensive study of three object triangulation, Proceedings of the 1993 SPIE Conference on Mobile Robots, S. 95 – 106, Boston, MA, 18.11.93 – 20.11.93
- [52] Kopf, I.:
Putzfräse – der Fassadenknabberspaß, Stuck–Putz–Trockenbau 10/97, S. 12 – 14
- [53] Krom, R. P.:
Providing a drilling robot with the right instructions, in Proceedings of the „11th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 71 – 78, Brighton, England, 24.5.94 – 26.5.94
- [54] Kuhn, G.:
Technische Mechanik, Teil 3: Kinematik und Kinetik, Lehrstuhl für technische Mechanik, Universität Erlangen-Nürnberg, 1993

- [55] Lemmer, J.; Mühlbauer, Georg:
Ziegelmontagebau – Ein Innovationsansatz für neue Wege in der Bauindustrie,
ZI 6/93, S. 385 ff.
- [56] Maeda, J.:
Development and application of the SMART System, in Tagungsband zu „Auto-
mation and Robotics in Construction XI“, S. 457 – 464, Brighton, England,
24.5.94 – 26.5.94
- [57] Maeda, J.:
Development and application of an automated high-rise building construction
system, Shimizu Technical Research Bulletin, No. 14, Shimizu Corporation, To-
kio, Japan, March 1995
- [58] Merklinger, A.:
Automatische Kalibrierung der koppelnden Ortung mobiler Plattformen, Doktor-
arbeit der Universität Stuttgart, Springer-Verlag, Berlin 1996
- [59] Miller, F.:
Himmlicher Putzroboter, Presseinformation 1 des Fraunhofer IFF, 2000
- [60] Mojaev, A.; Zell, A.:
Robuste reaktive Bahnregelung und Kollisionsvermeidung eines autonomen mo-
bilien Roboters, in Tagungsband zum 15. Fachgespräch „Autonome Mobile Sy-
steme 1999“, S. 284 – 292, Springer-Verlag, Berlin, 1999
- [61] Müller, H.:
Einsatz eines Mobilrobotersystems in der Endmontage des Schiffstahlkörper-
baus, Doktorarbeit an der Technischen Universität Berlin, Berlin, 1997
- [62] Murray, N.; Fernando, T.; Aouad, G.:
A virtual environment for building construction, Tagungsband des „17th Interna-
tional Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 1137 – 1142,
Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00
- [63] N.N.:
Analyse und Prognose – Bauwirtschaftlicher Bericht 1999/2000, Schriftenreihe
50 des Zentralverband Deutsches Baugewebe, Berlin, 2000
- [64] N.N.:
AP-L1A Ein-Mann Total Station, Produktbeschreibung Topcon Deutschland
GmbH, Willich 1996
- [65] N.N.:
Automatisches Stativlaserlot F200, Informationsschrift der Fa. Goecke GmbH &
Co.KG, 58332 Schwelm, 2001
- [66] N.N.:
Benutzerhandbuch RTKernel 4.0, On Time Informatik GmbH, 22085 Hamburg

- [67] N.N.:
Berufskrankheiten-Dokumentation (BK-DOK) – Gewerbliche BGen, BK-Verdacht bestätigt 1994 bis 1998, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 1999
- [68] N.N.:
Bestellung eines geeigneten Koordinators – Eine Hilfe für den Bauherrn, Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung
http://www.baua.de/prax/bau/bst_vo.htm (Stand 24.Juni 2001)
- [69] N.N.:
BK-Nr. 2108 und 2109. Dokumentation des Belastungsumfangs Trockenbaumonteur. ARGE der Bau-Berufsgenossenschaften, Stand 1/96
- [70] N.N.:
Cognex MVS-8000 Series: Vision For Industrie. OMI 2.2 Vision Tools Guide, USA, 1999
- [71] N.N.:
Die Geisterhand an der Wand - Serviceroboter für das Malerhandwerk, Der Maler- und Lackierermeister, Nr.1, S. 32-34, 1998
- [72] N.N.:
Die Genialität mit den Elementen, Presseinformation der Firma Winklmann
- [73] N.N.:
Gabler Wirtschaftslexikon, 14. Auflage, Wiesbaden 1997
- [74] N.N.:
Gefahrstoffe beim Bauen, Renovieren und Reinigen, Berufsgenossenschaften der Bauwirtschaft, 1995
- [75] N.N.:
Hilfexte zum Belastungs-Dokumentations-System,
<http://www.aser.uni-wuppertal.de/bds/bds.htm> (Stand 24.Juni 2001)
- [76] N.N.:
Informationsseiten der Bauberufsgenossenschaft Bayern und Sachsen,
<http://www.baubg.de/html/fakten.htm> (Stand 24.Juni 2001)
- [77] N.N.:
Low-cost $\pm 2g$ Dual Axis Accelerometer with Digital Output – ADXL202, Datenblatt der Firma Analog Devices, Rev. B 1999,
http://www.analog.comhttp://www.analog.com/pdf/ADXL202_10_b.pdf (Stand Juni 2001)
- [78] N.N.:
Omnidrive Carrier System, MIAG Fahrzeugbau GmbH, Braunschweig, 1997

- [79] N.N.:
Original Werkstoff S 8000®, Produktinformation der Firma Murtfeldt; 44291 Dortmund, 2000, www.murtfeldt.de (Stand Juni 2001)
- [80] N.N.:
Produktbeschreibung der Firma Laser-Trac, <http://www.laser-trac.de> (Stand November 2000)
- [81] N.N.:
Produktbeschreibung und technische Daten Laserscannersystem HG 434-B, Götting KG, Celler Straße 5, 31275 Lehrte, Stand 13.05.1997
- [82] N.N.:
Produkte und Anwendungen, Produktkatalog der Firma Hilti, FL-9494 Schaan, 2001
- [83] N.N.:
Produktinformation der Firma Bricsnet, Gent, Belgien, 2001, <http://www.bricsnet.com> (Stand Juni 2001)
- [84] N.N.:
Produktinformation der Firma Nemetschek AG, München 2001, <http://www.nemetschek.de> (Stand Juni 2001)
- [85] N.N.:
Produktinformation „Doppelboden“ der Firma Lindner AG; 94424 Arnstorf
- [86] N.N.:
Produktinformation „Laser Mess-System Callidus® zur 3D-Raumvermessung“, www.callidus.de (Stand 25.Juni 2001)
- [87] N.N.:
Produktkatalog der Firma Kurt Kunkel GmbH, 66115 Saarbrücken
- [88] N.N.:
Robots and Automated Machines in Construction, IAARC, Watford, England, 1998
- [89] N.N.:
www.cadolto.de (Stand 28.Mai 2001)
- [90] N.N.:
www.dahmit.de (Stand 28.Mai 2001)
- [91] N.N.:
<http://www.geodesy.matav.hu/index.htm> (Stand 27.Juni 2001)
- [92] N.N.:
<http://www.gia.rwth-aachen.de> (Stand 27.Juni2000)
- [93] N.N.:
<http://goetting.de> (Stand 19.06.2001)

- [94] N.N.:
<http://www.informatik.uni-bremen.de> (Stand 20.Juni 2000)
- [95] N.N.:
http://www.kuka-roboter.de/webc/rd_deut/index.html (Stand September 2001)
- [96] N.N.:
<http://www.laser-trac.com> (Stand 02.Oktober 2000)
- [97] N.N.:
http://www.uni-stuttgart.de/uni-kurier/uk79/wissen/a_s55.htm (Stand Oktober 2001)
- [98] N.N.:
Zukunft Bau: Strategien und Maßnahmen, Schriftenreihe 48 des Zentralverband Deutsches Baugewerbe, Berlin, 1998
- [99] Niesing, B.:
Intelligente Navigation von Baumaschinen, Fraunhofer-Gesellschaft, 1997,
<http://www.fhg.de/german/publications/df/df1997/497-16.htm> (Stand Oktober 2000)
- [100] Pfeil, J.:
Analyse der Gefährdungen und Belastungen im Trockenbau und Maßnahmen zu deren Reduzierung, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin, 1997
- [101] Pflugbeil, M.:
Vom Foto zur maßstabgerechten Zeichnung, Bautechnik 71, Heft 3, 1994, S. 155 – 160,
- [102] Pischeltstrieder, K.:
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion, Doktorarbeit an der Technischen Universität München, Springer-Verlag, Berlin, 1996
- [103] Pritschow, G.; Kurz, J.; u.a.:
Robotic on-site construction of masonry, in Tagungsband des „15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 55 – 64, München, 31.3.98 – 1.4.98
- [104] Putra, C. W. F. C. W.; Alshawi, M.:
Integrating design and construction: a new approach, in Tagungsband des „17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 223 – 228, Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00
- [105] Rau, S.:
Belastungen und Beanspruchungen bei Arbeiten in Überkopfhaltung, Inaugural-Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, 1999

- [106] Ripley B. D.:
Pattern recognition and neural networks, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
- [107] Rohmert, W.:
Physische Beanspruchung durch muskuläre Belastungen, in: Schmidtke, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Ergonomie, Hanser Verlag, München, 1981
- [108] Schmucker, U.; Elkmann, N.; u.a.:
Facade cleaning by service robots, in Tagungsband des „15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 103 – 109, München, 31.3.98 – 1.4.98
- [109] Schönball, R.:
Ein Blick über den Tellerrand, Wohnen & Bauen, Verlag Der Tagesspiegel, 23.5.1998
- [110] Schreyer, B.; Lederer, Ch.:
IQ-Haus: Produktionskonzept des Fertigteilwerks Fuchs in Linthe, Betonwerk+Fertigteil-Technik, BFT 8/98
- [111] Schulz, Th.; Manzke R. H.:
Surface preparation system BIBER (BEAVER), in Tagungsband des „15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. 121 – 126, München, 31.3.98 – 1.4.98
- [112] Shimokawa, K.; Jürgens, U.; Fujimoto, T.:
Transforming Automobile Assembly, Springer-Verlag, Berlin, 1997
- [113] Spath, I.M.; Andres, J.:
Rocco, ein Serviceroboter für die Baubranche – Systemlösung zur flexiblen Automation im Mauerwerksbau, in TR Transfer 13/1996, S. 18-22
- [114] Steinberg, U.; Windberg, H.-J.:
Leitfaden Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten : Empfehlungen für den Praktiker, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1997
- [115] Tischer, M.; Jennrich, B.:
PC intern 5, Systemprogrammierung, Data Becker Verlag, Düsseldorf, 1995
- [116] Treutler, W.:
Positions- und Bahnregelung mobiler Roboter, Doktorarbeit an der Technischen Universität München, München, 1994
- [117] VDI Richtlinie 2860:
Montage und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen, Symbole, Beuth Verlag, Berlin, 1990
- [118] Völz, H.:
Grundlagen der Information, Berlin, Akademie Verlag, 1991

- [119] Volz, H.:
Erste Brückenköpfe errichtet, Produktion, S. 18 ff., August 1998
- [120] Wallerang, E.:
IG-Bau-Steine-Erden setzt auf den Kollegen Roboter, VDI-Nachrichten 49/95, S.4
- [121] Wing, R.:
Factory Housing – making the connections, in Tagungsband des „17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, S. K33 – K38, Taipei, Taiwan, 18.9.00 – 20.9.00
- [122] Winklmann, F.; Schmidt, H.:
Ziegelmontagebau – Eine Chance für die Zukunft, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994
- [123] Wollert, J. F.:
Doping für den Betriebssystem-Kern, Echtzeit-Lösungen für Windows NT im Vergleich, Elektronik 20/1997, S. 46 - 59
- [124] Yberle, H.J.:
Application of climbing robot RoSy II in the business of building conservation, in Tagungsband des „15th International Symposium on Automation and Robotics in Construction“, Seite 111 – 120, München, 31.3.98 – 1.4.98
- [125] Zeitreihe 7520:
Arbeitsproduktivität je Erwerbstätigen, Statistisches Bundesamt, (Stand April 2001)
- [126] Zeitreihe 7611:
Bruttowertschöpfung nach zusammengefassten Wirtschaftsbereichen für Deutschland, Statistisches Bundesamt, (Stand April 2001)
- [127] Zeitreihe 7616:
Arbeitnehmer im Inland, Statistisches Bundesamt, (Stand April 2001)

Lebenslauf

Markus Johannes Koch

geboren am 26. April 1968 in Cham/Opf.

verheiratet mit Christiane Koch, geb. Neumeyer, 1 Kind

09/74 – 08/78	Grundschule Furth im Wald
08/78 – 08/87	Robert-Schuman-Gymnasium Cham/Opf. Abschluss: Abitur
10/87 – 09/89	Grundwehrdienst in Roding
10/89 – 10/95	Studium der Elektrotechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg Abschluss: Dipl.-Ing. Univ.
seit 11/95	Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg Leiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Sonderveröffentlichungen Meisenbach Verlag, Bamberg:

Frank Vollertsen

Laserstrahlumformen, lasergestützte Formgebung:

Verfahren, Mechanismen, Modellierung

252 Seiten, 110 Bilder, Tabellen und Sachregister.

1996. Hardcover

Euro 50,--

ISBN 3-87525-071-0

Ulf Engel

Beanspruchung und Beanspruchbarkeit

von Werkzeugen der Massivumformung

193 Seiten, 72 Bilder, Tabellen und Sachregister.

1996. Hardcover

Euro 50,--

ISBN 3-87525-072-9

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion
durch wissensbasierte Systeme
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen
durch den Einsatz der Simulationstechnik
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität
im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens
von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit
von Planungssystemen in der Produktion
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung
am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung
der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.

Band 13: Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.

Band 14: Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik
für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.

Band 15: Uwe Geißler
**Material- und Datenfluß
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.

Band 16: Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems
für automatisierte Montagezellen**
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.

Band 17: Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.

Band 18: Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen
für rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.

Band 20: Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern**
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.

Band 21: Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.

Band 22: Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.

Band 23: Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik
in der Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.

Band 24: Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.

Band 25: Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.

Band 26: Roland Müller
**CO₂-Laserstrahlschneiden
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

Band 28: Martin Hoffmann
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette
für die Herstellung von Blechbiegeteilen**
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.

Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozeführung und Systemtechnik in der 3D–Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.

Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs– und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.

Band 33: Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.

Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.

Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.

Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.

Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.

Band 38: Robert Schmidt–Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.

Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl–Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.

Band 40: Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.

Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.

Band 42: Armin Gropp
**Anlagen– und Prozeßdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG–Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel
**Optische 3D–Konturerfassung und on–line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt
**Modulares Planungssystem
zur Optimierung der Elektronikfertigung**
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion

195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile

126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen

156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen

144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)

196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter

190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen

200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengeneering in der Elektro- und Elektronikindustrie

180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.

ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.

ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.

ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern

188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.

ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung

162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.

ISBN 3-87525-079-6

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen

165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.

ISBN 3-87525-080-X

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell

198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.

ISBN 3-87525-081-8

Band 60: Jürgen Sturm
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand
**Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7

Band 62: Michael Kauf
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwässer
**Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2

Band 64: Georg Liedl
**Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3

Band 66: Wolfgang Blöchl
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen
zur Prozeß- und Programmoptimierung**
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung
zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke

**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meßner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schubert

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-106-7

Band 82: Armando Walter Colombo

**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-108-3

Band 84: Knuth Götz

**Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-112-1

Band 85: Ralf Luchs

**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-113-7

Band 86: Frank Pöhlau

**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

144 Seiten, 99 Bilder, 1999.

ISBN 3-87525-114-8

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes

128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-115-6

Band 88: Gerhard Luhn

**Implizites Wissen und technisches Handeln
am Beispiel der Elektronikproduktion.**

252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle, 1999.

ISBN 3-87525-116-4

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen

114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-117-2

Band 90: Hans-Jörg Pucher

**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**

158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-119-9

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung

128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-120-2

Band 92: Doris Schubart

**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung
beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**

133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-122-9

Band 93: Adrianus L. P. Coremans

**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahligesinterter Metallkörper**

184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-124-5

Band 94: Hans-Martin Biehler

**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**

194 Seiten, 105 Bilder, 1999.

ISBN 3-87525-126-1

Band 95: Wolfgang Becker

**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**

175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-127-x

Band 96: Philipp Hein

**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**

129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger

**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**

169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knobloch

**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**

155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen, 1999.

ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110
Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
**Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von Produktionssystemen**
176 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
**Qualitäts- und kosteneffiziente Integration
neuer Bauelementetechnologien
in die Flachbaugruppenfertigung**
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
**Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote
in der Oberflächenmontage (SMT)**
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114
Alexander Huber
**Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser
unter Einsatz von Aktoren**
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115
Sami Krimi
**Analyse und Optimierung von Montagesystemen
in der Elektronikproduktion**
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116
Marion Merklein
**Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen -
Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften**
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117
Thomas Collisi
**Ein informationslogistisches Architekturkonzept
zur Akquisition simulationsrelevanter Daten**
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118
Markus Koch
**Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau
durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik**
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2