

AUTOMATISIERUNG UND ROBOTIK IM BAUEN

THOMAS BOCK, WILLI VIKTOR LAUER,
THOMAS LINNEN und NORA EIBISCH

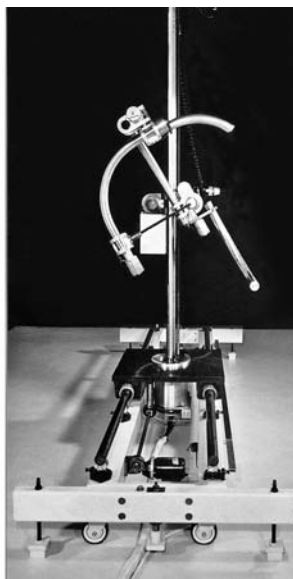
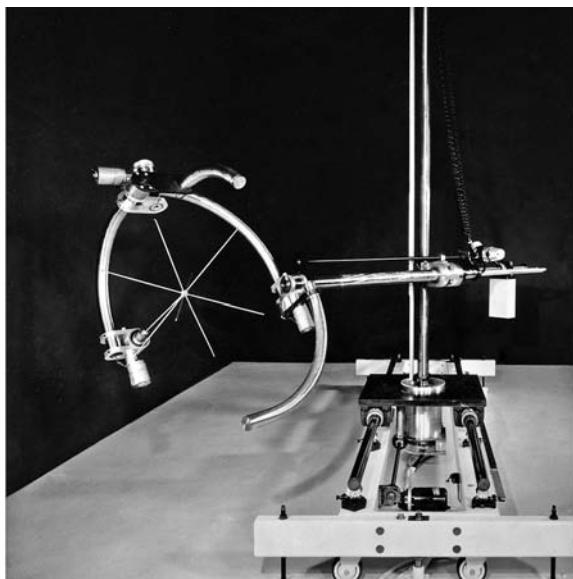
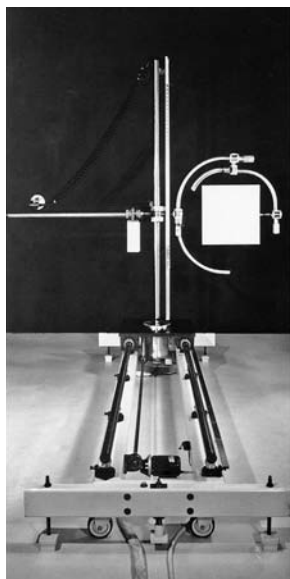
Der Architekturhistoriker Dieter Kimpel hat am Beispiel der gotischen Baubetriebe daran erinnert, dass Rationalisierungstendenzen in der Architektur eine lange Tradition besitzen: „In den 1170er Jahren scheint die erste industrielle Revolution auch auf das Bauwesen übergegriffen zu haben.“¹ Aus dieser Perspektive kann man die Entwicklung der Automatisierung und Robotisierung in der Vorfertigung und Baustellenfertigung seit Ende der 1970er Jahre als eine folgerichtige Fortsetzung der industriellen Revolution im Bauwesen ansehen. Heute ist die Rationalisierung der Baustelle im Tief-, Tunnel-, Erd-, Staudamm-, Brücken- und Straßenbau auf Grund von standardisierten Bauabläufen bereits weit fortgeschritten.² Ebenso sind die der Hochbaustelle vorgelagerten Prozesse wie Baustoffproduktion, Halbzeug- und Bauteilfertigung weitgehend rationalisiert.

Zwar hat die Moderne das Thema der Vorfertigung stets propagiert, jedoch mangelte es den Produkten bis in die fünfziger und sechziger Jahre an Qualität und Orientierung an den individuellen Bedürfnissen der Kunden. Erst die Einführung der großanlagentechnischen und vermarktungsorientierten Fertigungsverfahren, der Qualitätssteuerung und die Erkenntnis, dass die industrielle Produktion der Nachfrage entsprechende kundenindividuelle Produkte liefern muss, gewährleisteten seit den achtziger Jahren eine konstante und auf den Kunden zugeschnittene Produktqualität, und damit dessen Zufriedenheit. Zunächst wurden in den Betonfertigteilwerken in Frankreich, den Niederlanden, Skandinavien und Deutschland die Abbundanlagen automatisiert, gefolgt durch die Kundenindividualisierung der Fertigung (Mass Customization) durch die Robotisierung. Die Hochbaustelle wurde zunächst durch die schrittweise Automatisierung der konventionellen Baumaschinen rationalisiert. Die mangelnde Ausführungsqualität, niedrige Produktivität, schlechte Arbeitsbedingungen (was hohe Unfallzahlen und Berufskrankheiten zur Folge hatte), Überalterung der Bauarbeiter und Facharbeitskräftemangel veranlassten japanische, skandinavische und französische Bauunternehmen in Zusammenarbeit mit Anlagenbauern, Schiffswerften und Baumaschinenherstellern seit den achtziger Jahren neuartige Maschinenkonzepte in Form von Baurobotern zu entwickeln, seit den neunziger Jahren auch Verfahren für automatisierte Hochbaustellen. So haben in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts skandinavische Bauunternehmen durchgängige automatisierte Vorfertigungs- und Baustellenverfahren entwickelt. Auch wurden bereits der Einsatz von humanoiden Baurobotern und von Exoskeletten auf Baustellen getestet, vorwiegend in Japan und Korea. Daneben versuchte man sich an der Fusion von Gebäude und Robotik in Form des *Wabot*-Hauses, das zu einer stetig wandelbaren Maschine mutiert.³

ZUSE UND WACHSMANN: VORDENKER DES AUTOMATISIERTEN UND ROBOTISIERTEN BAUENS

Einer der Pioniere des automatisierten und robotisierten Bauens war der Architekt Konrad Wachsmann (1901–1980). Ein Beispiel dafür ist das von ihm entwickelte „General-Panel-System“, für das er auch die dazugehörige automatisierte Fabrik plante. Der 1969 von Wachsmann und seinen Doktoranden John Bollinger und Xavier Mendoza im Rahmen einer Studie des automatisierten Fügens für das Bauwesen entwickelte „Location Orientation Manipulator“ (LOM) kann durchaus als eine Vorstufe zu den späteren robotisierten Systemen gesehen werden.⁴ Mitte der 1970er Jahre begann der japanische Generalunternehmer Shimizu Corporation mit der Grundlagenermittlung zur Baurobotik die technologische Kette im realen Bauablauf zu schließen und 1983 wurden die ersten automatisierten und robotisierten Systeme vor Ort getestet. Mit dem Gedanken des automatisierten Bauens hatte sich auch der Erfinder der ersten im Binärsystem arbeitenden Rechenmaschine, Konrad Zuse (1910–1995), beschäftigt.

Schon 1957 sprach er in seiner Rede anlässlich der Verleihung des Dr. Ing. E. h. durch die TU Berlin von der Notwendigkeit der automatisierten Herstellung stark verschiedener Gegenstände. In seiner Rede nannte er beispielhaft das Bauwesen und nahm dabei sogar die Grundprinzipien der Mass Customization vorweg: „Nach dem heutigen Stand der Automationstechnik ist es am günstigsten, möglichst viele Häuser nach dem genau gleichen Schema zu bauen, da sich erst dann der Einsatz der technischen Mittel günstig auswirken kann. Wir sollten aber dahin kommen, daß gerade die individuell verschiedenen Bauwünsche in erhöhtem Maße berücksichtigt werden können.“ Mit seiner späteren Entwicklung des Helixturms nimmt Zuse dann sogar Grundprinzipien der



Location Orientation Manipulator (LOM) von Konrad Wachsmann

Abb.: Archiv der Akademie der Künste, Berlin.

automatisierten Hoch- und Rückbaustellen vorweg. Bereits in den 1950er Jahren arbeitete Zuse an dem Konzept „sich selbst reproduzierender Systeme“. Allerdings setzte er dabei voraus, dass als Grundbedingung für eine solche Technologie zuerst die vollautomatisierte Herstellung nahezu aller Produkte erreicht sein müsse.⁵ Erstmals wurde diese technologische Grenze Anfang der 1980er Jahre in Japan tangiert. Wie Zuse es etwa 20 Jahre vorher beschrieben hatte, wurden nun so genannte „Ghost Factories“ in Betrieb genommen, in denen zwei von drei Schichten ohne Beteiligung menschlicher Arbeitskräfte vollautomatisch abliefen. In den Werken Minokamo der Firma Yamazaki und Yamanashikomura der Firma Fanuc arbeiteten autonome, selbstfahrende Roboter und fahrerlose Transportsysteme, die flexible Fertigungszentren besetzten. Es wurden dort Spritzgussteile, Servomotoren und andere Bauteile für Werkzeugmaschinen, d. h. CNC-Maschinen, in den flexiblen Fertigungszentren hergestellt.⁶

AUTOMATISIERUNG UND ROBOTISIERUNG IN DER VORFERTIGUNG

Ein- und zweidimensionale Komponentenfertigung *Precut-Systeme und Abbauelemente:* In den 1980er Jahren wurden in Japan, Skandinavien und Deutschland schließlich zahlreiche sogenannte Precut-Systeme entwickelt. Diese hochentwickelte Technologie zur CNC-gesteuerten Holzbearbeitung wurde in Japan interessanterweise für den Bau konventioneller japanischer Häuser eingesetzt, die traditionell vom Daikusan (Zimmerer) errichtet wurden. Dadurch konnten die vom Kunden gewünschten traditionellen japanischen Holzverbindungen, die auf Grund der steigenden Lohnkosten und unkonstanten Qualität immer weniger eingesetzt wurden, nun kostengünstig von CNC-Maschinen hergestellt werden.⁷ Im Precut-Verfahren hergestellte Bauteile können entweder einzeln auf der Baustelle montiert werden oder beispielsweise zu Tafeln vorgefertigt werden. Precut-Systeme stellen damit Teilsysteme für die *Automatisierung in der Vorfertigung von Holzelementen* dar.⁸

Fertighaushersteller nutzen gerne Bauweisen mit vorgefertigten und vorinstallierten Holzpaneelen. Diese Art der Konstruktion macht die Investitionen in eine Vielzahl von Maschinen und automatisierten Systemen notwendig. Die Gesamtanlage setzt sich entsprechend aus einer Vielzahl von Fertigungsschritten und Produktionszellen zusammen, die entweder einzelne Holztafeln oder hochinstallierte Module herstellen. Um der recht hohen Beliebtheit des Mauerwerks Rechnung zu tragen, gibt es mittlerweile zahlreiche Ansätze zur *Automatisierung in der Mauerwerksfertigung*, mit dem Ziel der Rationalisierung der zeit-, kraft- und bewegungsaufwendigen Prozesse der Mauerwerkserstellung. Bei horizontaler oder vertikaler Vorfertigung werden ganze Wandelemente durch mehrere zusammenschaltete Produktionszellen hergestellt. Diese Wandelemente können dabei in begrenztem Maße auch mit Installationen und Wandverkleidungen versehen werden. Die Herstellung von *komplexen Betonfertigteilen* kann heute ebenso weitgehend automatisiert werden.

Vergleichsweise weit entwickelt ist das System der Mass Customization auch bei *Stahlrahmensystemen*. Sekisui House ist der derzeit größte japanische Hersteller entsprechender industriell vorgefertigter, individueller Wohnhäuser. Im Gegensatz zu den Systemen von Sekisui Heim und Toyota Home,

die mit dreidimensional bestückbaren „Units“ arbeiten, verwendet *Sekisui House* kompakte und schnell montierbare Stahlrahmen. Die Stahlrahmen werden aus standardisierten Stahlprofilen von Robotern zusammengesetzt. Sowohl die vorangehende Logistik und Materialzufuhr als auch der anschließende Schweißvorgang sind vollautomatisiert. Da eine begrenzte Anzahl unterschiedlicher Stahlrahmen genügt, um eine fast unendliche Variantenvielfalt zu erzeugen, werden insbesondere durch die Fertigung der Rahmen selbst enorme Skaleneffekte, also hohe Stückzahlen erzielt. Die Stahlrahmen können anschließend mit Ausbaukomponenten verschiedenster Hersteller und auch mit komplett individuell gestalteten Oberflächenelementen bestückt werden. An diesem Beispiel zeigt sich, dass die Voraussetzung für die durch Automatisierung erreichte hohe Effektivität in einem zu den angewendeten Herstellungsverfahren komplementären Produktdesign liegt. Durch Modularisierung wird ähnlich wie in der Automobilindustrie aus der Kopplung von Trägerstruktur (Stahlrahmen), Systemteilen (Ausbaukomponenten) und Hutteilen (Oberflächen) eine Verringerung der Komplexität erreicht, welche Variantenvielfalt und sogar Individualität in einem der Massenfertigung ähnlichen und kompatiblen System ermöglicht. Insgesamt gesehen war neben einem geeigneten Produktaufbau die Einführung der Robotik sowohl in der automatisierten Vorfertigung von Holzelementen, Mauerwerksmodulen und Betonfertigteilen als auch in der Fertigung von Stahlrahmensystemen ein entscheidender Faktor bei der Entwicklung kundenindividueller, industrialisierter Herstellungsverfahren.⁹

Automatisierte Fertigung dreidimensionaler Subsysteme

Die Erstellung von Nassräumen ist auf Baustellen bis heute oft ein organisatorisches Nadelöhr, da bis zu zehn Gewerke auf oft knappem Raum und engem Zeitfenster koordiniert werden müssen und gleichzeitig Präzisionsarbeit leisten sollen. Die Vorfertigung hingegen kann ohne Reibungsverluste parallel zum normalen Bauablauf stattfinden. Solche vorgefertigten Subsysteme kamen zunächst beim Bau von Hotels, Krankenhäusern, Alten- und Pflegeheimen zum Einsatz, also überall dort, wo ein möglicher kostspieliger Ausfall von Belegungszeiten eine hohe Effizienz bei der Bauerstellung fordert. Insbesondere in Japan wurden sie auch im Hochhausbau gerne in der sogenannten Turmlösung eingesetzt. Heute ist der Einsatz von vorgefertigten Subsystemen nicht mehr auf einen bestimmten Bereich beschränkt: modularisierte High-End-Baukästen verschiedenster Hersteller und



Portalroboter bei der Vorfertigung von Mauerwerkswandelementen



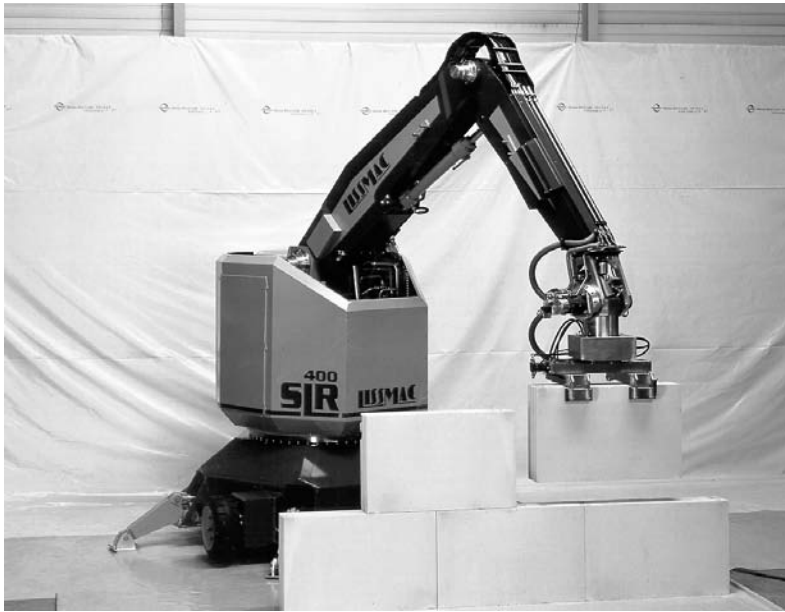
Fließfertigung von Badraumzellen (Subsystemen) auf Unterboden als Trägerstruktur, Firma: Inax, Nagoya



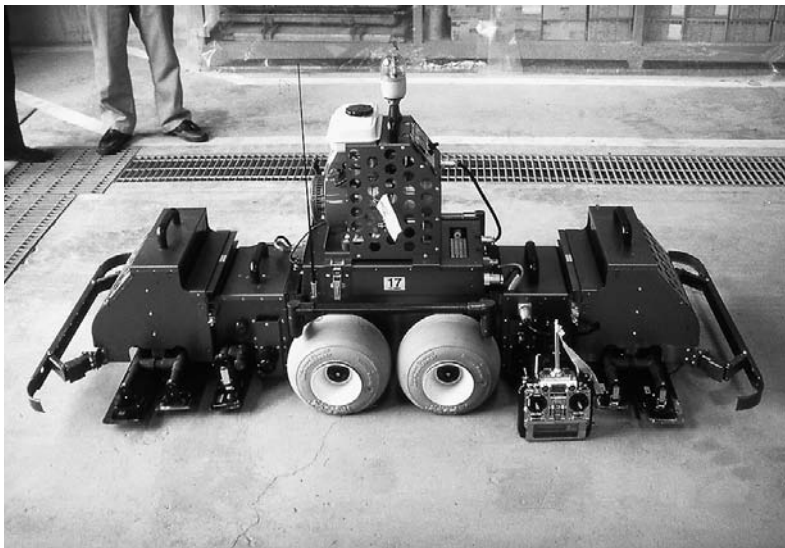
Fließfertigung von Wohnhäusern aus Raumzellen mittels dreidimensionaler Trägerstruktur, Sekisui Heim



Innenbau der Trägerstruktur inklusive Verkabelung etc., Toyota Home. Wenn nicht anders gekennzeichnet, alle Fotos © Thomas Bock.



Im Rahmen des EU-Projekts ESPRIT 1995 entwickelter mobiler Mauerwerksroboter



Der Betonglättröbter „Floor Travelling Robot MHE“ der Firma Hazama ist in sechs 20 kg-Module zerlegbar, die mittels der oben angebrachten Griffe leicht getragen werden können.

Ausstattungen sind nicht mehr von konventionell erstellten Bädern zu unterscheiden. Die Raumzellen der Firma Deba beispielsweise werden neben dem Gebäudebau auch im Schiffsbau als Subsysteme verwendet. Sie können als kompakte Moduleinheiten parallel zum Bauablauf gefertigt und schließlich „Just-in-Time, Just-in-Sequence“ geliefert werden. Diese relativ komplexen dreidimensionalen Subsysteme wurden häufig bereits im Verfahren der automatisierten Fließfertigung auf den individuellen Bedarfsfall hin gefertigt.¹⁰

Automatisierte Fließfertigung komplexer Raumzellen in Japan Seit fast einem halben Jahrhundert produzieren japanische Hersteller wie *Sekisui Heim*, *Toyota Home* oder *Misawa Homes* in der beschriebenen Fließfertigung Häuser aus Raumzellen unter Verwendung dreidimensionaler Subsysteme als Einbauten. Damit gehen sie einen Schritt weiter als die im Vergleich einfachere, zweidimensionale Fertigung von Komponenten, aus denen die Gebäude vor Ort weiterhin in zahlreichen Montageprozessen montiert werden. Diese Herstellungsweise hat viele Analogien zur Automobilherstellung und zeigt, dass eine Fließfertigung erst dadurch möglich wird, dass ein dreidimensionaler Stahlrahmen sozusagen als „Chassis“ benutzt wird. Diese Trägerstruktur wird auf einem ca. 400 m langen Fließband mit 1,4 m/min über 45 Stationen

durch die Fabrik geschickt und hierbei von allen Seiten subsequentiell mit Komponenten bestückt, die entweder „Just-in-Time“ angeliefert werden oder parallel auf anderen Ebenen (z.B. Wandpaneele) in der Fabrik erstellt wurden. Das Ziel von Sekisui, Toyota und Misawa ist es, die Komplexität des Erstellungsprozesses weitgehend in die Fabrik zu verlagern, um hier ein bereits möglichst „fertiges“ Produkt zu erzeugen und so die weniger kontrollierbaren Montageprozesse auf der Baustelle zu minimieren.¹¹

Sekisui Heim M1 – Design for Production: Das M1 vereint Qualitäten, die bis dahin noch nicht zusammengeführt worden waren. Zum einen war das erstmals auf „Units“ (Stahlrahmen) basierende System perfekt für die (subsequentielle) industrielle Herstellung mit einem hohen Vorfertigungsgrad geeignet. Zum anderen konnte durch die Modularisierung und hierarchische Staffellung der Bauteilwertigkeiten (Units-Infills-Oberflächen) trotz einer anfangs geringen Variantenanzahl eine hohe Effizienz erzeugt werden. In den 1970er Jahren erreichte das M1 eine Jahresproduktion von über 3.000 WE/Jahr. Diese hohe Stückzahl ermöglichte die Investition in teure Herstellungssysteme (Automatisierung, Robotik, Logistiksysteme), die heute die Besonderheit der japanischen kundenindividuellen Vorfertigung bilden. Insgesamt wurde beim System M1 jedoch noch eine hohe Anzahl standardisierter Raummodule verwendet. Zunächst waren die Wahlmöglichkeiten noch gering und die Integration des Kunden in den Erstellungsprozess wenig fortgeschritten. Dies sollte sich jedoch bald ändern. Mittlerweile fertigen die größeren Werke ca. 10.000 Häuser pro Jahr und zählen zu den weltweit größten und am weitesten automatisierten Fertigungswerken der Welt. Der großanlagentechnische Ansatz des Chemie-Mutterkonzerns Sekisui war also marktstrategisch gesehen ausgesprochen erfolgreich.¹²

Bei der Herstellung werden aus ca. 300.000 gelisteten Komponenten für ein Haus ca. 30.000 Teile ausgewählt und mit den etwa 70 verschiedenen „Unit“-Typen, den Zulieferern, den Arbeitsvorgängen auf verschiedenen Ebenen, der Taktung (ca. 1,3 m/min) sowie der Beschickung des ca. 400 m langen Fließbandes in optimierter Weise und „Just-in-Time, Just-in-Sequence“ synchronisiert.¹³

ROBOTISIERUNG AUF DER BAUSTELLE

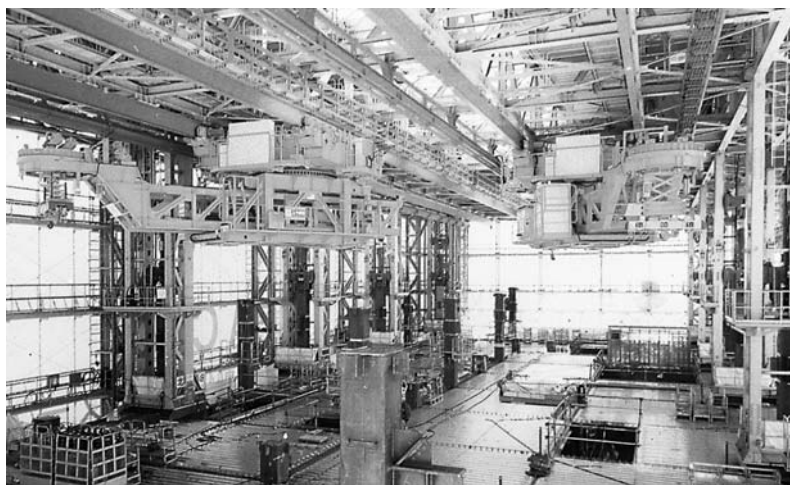
Der Generalunternehmer Shimizu richtete 1975 in Tokio eine Forschungsgruppe für Baurobter ein. Ziel war nicht mehr die bloße Verlagerung der komplexen Montage in eine Fabrik, sondern auch die Entwicklung von Systemen, welche vor Ort zur dreidimensionalen, gerichteten Erstellung von großen Bürokomplexen, öffentlichen Gebäuden und natürlich Hochhäusern aller Art eingesetzt werden können. Baurobter sind Bauproduktionssysteme, die zur Ersetzung einzelner, meist gewerkebezogener Prozesse auf der Baustelle dienen. Bis heute wurden über 100 verschiedene Prototypen entwickelt und im Baustelleneinsatz getestet. Gemeinsam ist allen, dass sie für bestimmte definierte Aufgaben unter Baustellenbedingungen zum Einsatz kommen sollten, dabei aber die Tätigkeit der Bauarbeiter nicht wesentlich beeinträchtigen durften. Interessanterweise beteiligten sich von Beginn an zahlreiche branchenfremde Unternehmen wie Hitachi, Mitsubishi, Ishikawajima, Kamiuchi, Komatsu und Kawasaki bei der Entwicklung der nachfolgend beschriebenen Hightech-Systeme zur Bauerstellung. Auch die südkoreanische Firma Samsung besitzt seit zehn Jahren eine eigene Entwicklungsabteilung, die sich mit automatisierten und robotisierten Systemen für die Baustelle beschäftigt. In der Weiterentwicklung und Integration dieser Systeme kann demnach auch gesamtwirtschaftlich betrachtet ein gewaltiges Potential gesehen werden. Nachfolgend werden einige der entwickelten Einzelsysteme und deren Einsatzbereiche beschrieben.¹⁴

Betonglättröbter: Die Betonglättarbeiten gehören seit jeher zu den ergonomisch bedenklichsten Bauarbeiten, bei der Arbeiter über mehrere Stunden Flügelglätter führen, in gebückter Haltung den Beton glattstreichen oder mit Latten den Beton abziehen müssen. Um sie von dieser Arbeit zu entlasten und gleichzeitig die Ausführungsqualität konstant zu halten, wurden von fünf verschiedenen Firmen jeweils eigene Konzepte für solche Systeme entwickelt: der *Flat-Kun* von Shimizu, der *Kote-King* von Kajima, der *Surf Robo* von Takenaka, der *Obayashi* von Obayashi und der *Floor Traveling Robot MHE* von Hazama. Jeder dieser fünf Betonglättröbter war bereits in der Lage, auf jeder Raumebene in beliebige Richtungen zu arbeiten. Die mobile Einheit war dabei entweder als separates Modul ange-dockt oder bei kompakteren Systemen in die Betonglätteinheit integriert, die in allen Fällen aus rotierenden Flügelglättern bestand.¹⁵ Der Grad der Autonomie



Big-Canopy-System der Firma Obayashi: Installation der Systemkomponenten, Osaka

Smart Price Houses



Automated Building Construction-System (ABCS) der Firma Obayashi

reichte von Systemen mit experimentellen Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Teleoperation hin zu Systemen, die ihren Fahrweg mit Hilfe einprogrammierter Fahrbahnen beziehungsweise Sensoren selbst generieren konnten. Besonders hervorzuheben ist hier das Konzept des *MHE*-Roboters, der nicht nur von allen Modellen das leichteste war, sondern auch noch in sechs tragbare 20-kg-Module zerlegt werden konnte. Das *Kote-King*-Projekt wurde 1995 von Kajima an die Firma Tokimec ausgelagert. Tokimec entwickelte daraus schließlich den sich bis heute im Einsatz befindlichen Robocon, dessen Eigengewicht im Vergleich zum *Kote-King* statt 141 nur 68 kg beträgt, mit 50 db um 20 db leiser ist, und statt 500 sogar 800 qm/Stunde im Teleoperationsmodus glätten kann. Auch die Kosten konnten von umgerechnet ca. 40.000 Euro auf etwa 20.000 Euro reduziert werden.

In ähnlicher Weise wurden zahlreiche *Roboter für den Fassadenanstrich* entwickelt, um speziell das Streichen oft schwer zugänglicher Außenfassaden, speziell bei besonders hohen Gebäuden, zu erleichtern und zugleich eine optimale Ausführung zu gewährleisten.¹⁶ Viele Fassaden von Stahlbetonhochhäusern sind mit Kacheln, Fliesen oder anderen Oberflächenpaneelen versehen. Diese müssen über den Lebenszyklus des Gebäudes regelmäßig inspiziert werden, um Bauschäden zu erkennen und sich lösende Fliesen bzw. Kacheln gegebenenfalls auszutauschen. Für diese Arbeiten wurden von mehreren Generalunternehmern *Gebäude-Servicesysteme* und entsprechende *Serviceroboter* entwickelt. Außerdem erarbeitete man *Hightech-Handhabungssysteme*, *Innenausbauroboter* (wie den *SOFFITO* vom CSTB und IRIAM in Frankreich zur Vermeidung gesundheitsschädigender Überkopfarbeiten) und *teilautonome Logistiksysteme*, die teils schon in der Lage waren, miteinander zu kommunizieren.¹⁷



AMURAD-System der Firma Kajima: Die Geschosse werden im Erdgeschoss automatisiert montiert und mittels computergesteuerter hydraulischer Pressen hochgedrückt.



Integrierte, automatisierte Hochbausysteme Fast alle großen japanischen, US-amerikanischen, französischen und skandinavischen Bauunternehmen arbeiten seit mehr als zwei Jahrzehnten an der Entwicklung automatisierter Hochbausysteme. Wie die Beispiele der schwedischen Konzerne NCC und Skanska zeigen, gibt es auch in Europa interessante, bereits realisierte Ansätze. Einige Unternehmen demonstrieren die Leistungsfähigkeit derartiger Systeme anhand von Experimentalbaustellen und Computersimulationen. Andere, wie die bereits genannten NCC und Skanska, aber auch Norpac von Bouygues, Bechtel, Dow, Obayashi, Shimizu, Kajima, Fujita, Taisei, Takenaka, Maeda und Hazama, haben bereits automatisiert errichtete (Hoch-)Häuser realisiert. Die meisten Systeme basieren auf einer Stahlskelettbau-Konstruktion. Der typische Bauablauf sieht vor, dass sich ein automatisiertes Arbeitsgeschoss als vertikal bewegende Fabrik gleichsam nach oben arbeitet. Die Ansätze von Skanska und Kajima operieren ebenfalls mit automatisierten Systemen, kehren den Prozess jedoch im Wesentlichen um und heben die ebenerdig fertiggestellten Geschosse mittels hydraulischer Vorrichtungen geschossweise in die Höhe.¹⁸

Die japanische Shimizu Corporation war eine der ersten Baufirmen, die damit begann, ihre langjährigen Erfahrungen in der Baustellenroboterentwicklung in das Konzept einer durchgängig automatisierten Hochbaustelle einzubringen. Nach fünf Jahren Entwicklung und einem finanziellen Aufwand von annähernd 12 Millionen USD wurden 1990 und 1991 zwei Prototypen des „SMART“-Systems (*Shimizu Manufacturing System by Advanced Robotics Technology*) für den Bau kleinerer Forschungsgebäude auf dem Forschungsgelände der Baufirma Shimizu getestet. Das System kam erstmals 1992 für den Bau der 88 m hohen und 20.000 qm großen Juroku Bank in Nagoya in den kommerziellen Einsatz. Ein computergestütztes Informationsmanagement steuerte mehrere Prozesse: das Hochpressen der Baustellenfabrik, die automatisierte Logistik in Form eines vertikalen und horizontalen Distributionssystems, ein Montagesystem für die Stahlkonstruktion von Stützen und Trägern und ein automatisiertes Schweißsystem. Jedes Bauteil war durch einen Barcode gekennzeichnet. Nachdem dieser eingelesen war, wurde zunächst der Bewegungsablauf vom Ort der Übernahme, an dem das Bauteil an den Logistikroboter angekoppelt wird, bis zum Einbauort generiert. Anschließend übernahm das Distributionssystem die vertikale und horizontale Positionierung der Teile im Raum. Die Feinpositionierung der Stützen wurde mit Hilfe eines audiovisuellen Signals, das von einem Rotationslaser erzeugt wurde, exakt bestimmt, bevor die Mitsubishi-Schweißroboter aktiv wurden. Die Stützenstöße und Trägerverbindungen waren entsprechend den Entwurfsrichtlinien des ROD (Robot Oriented Design) so konstruiert, dass die dreidimensionale Positionierung automatisiert durch eine gelenkige Verbindungsausbildung erfolgen konnte. Die automatisierten Teilprozesse vor Ort liefen bereits vollständig IT-gestützt ab, wodurch Materialfluss, Ausführungszeiten, Qualität und Bauprozessmanagement in Echtzeit überwacht und protokolliert werden konnten.

Beim AMURAD-System (Kajima) wächst das Gebäude buchstäblich geschossweise aus dem Boden, indem die Geschosse in umgekehrter Reihenfolge (d.h. zuerst das oberste, dann die nachfolgenden Geschosse) ebenerdig erstellt und mittels riesiger, computergesteuerter Hydraulikzylinder in die Höhe gehoben werden. Dieses Subsystem wird auch „Z-Up“ genannt. Nachdem ein Geschoss angehoben wurde, beginnen in diesem bereits die Installationsarbeiten, der Innenausbau und die Verkleidung der Fassaden mit Hilfe eines automatisierten Materialtransportsystems („Z-Carry“). Parallel dazu läuft mittels eines Tragwerks-transport- und Montagesystems („Z-Hand“) die automatisierte Konstruktion des nächsten Geschosses ebenerdig weiter. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis das Erdgeschoss zuletzt gebaut ist und die Lastabtragung übernehmen kann. Da bei dieser Bauweise ein Baukran nicht notwendig ist, eignet sie sich besonders für beengte Baulücken oder Situationen mit eingeschränkter Höhe.

Verbesserte Ressourceneffizienz durch automatisierten Rückbau

Im Jahre 2008 wurden innerhalb von zehn Monaten zwei Hochhäuser im Zentrum Tokios – mit je 17 und 20 Stockwerken – teilautomatisiert rückgebaut. Trotz der sehr belebten Gegend und eines während dieser Zeit registrierten Erdbebens der Stärke 5,6 erfolgten die Arbeiten sicher und fast unbemerkt von der Öffentlichkeit. Bis Ende Juli 2008 wurden die Gebäude mittels computergesteuerter hydraulischer Pressen mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/Sekunde beim Absenkvorgang etagenweise demontiert. Mit diesem Ansatz gelang es, das Arbeitsumfeld zu verbessern und die Arbeitsprozesse erheblich zu verbessern.

Gleichzeitig konnte der Recyclinganteil im Innenausbau auf 93 Prozent erhöht werden. Die schweren Abbrucharbeiten erfolgen bei diesem System immer im Erdgeschoss, wodurch die Einsturz- und Unfallgefahr reduziert wird. Darüber hinaus werden so weder Turmdrehkräne noch schweres Abbruchgerät benötigt. Dieses ebenfalls von der Firma Kajima entwickelte Verfahren stellt im Prinzip eine rückwärts ablaufende Version des AMURAD-Systems dar.¹⁹

ARCHITEKTUR ALS ROBOTER: „DIE STÄNDIGE TRANSFORMATION“

Die Automatisierung ist für die vergleichsweise komplexe Fertigung architektonischer Produkte noch nicht vollständig ausgereift. Jedoch zeigen die Beispiele, dass sich die Automatisierung von Subsystem zu Subsystem weiterentwickelt und so in absehbarer Zeit eine vollautomatische Gebäudeherstellung im ökonomisch relevanten Umfang in Reichweite rückt.²⁰ Das bedeutet, dass nach der gegenwärtigen Vollautomatisierung für Bausubsysteme hoher Komplexität demnächst das vollautomatisierte Erstellen und Steuern von Makrosystemen ansteht.

Derzeit wird an einer ganzen Reihe von Entwicklungen auf dem Gebiet der automatisierten Fertigung gearbeitet: darunter zahlreiche Projekte und Systeme für intelligente Gebäude (z.B. das *Toyota Dream House PAPI*), intelligente Steuerungssysteme und intelligente Bauteile (z.B. Experimente von Prof. Ken Sakamura, in Betonteile integrierte RFID und Wärmesensoren, Smart Concrete) sowie Ansätze zur Integration von kommunizierenden Robotern als Subsysteme (z.B. selbstorganisierende Schwarmroboter als Verschattungssysteme). Diese Ideen deuten bereits an, dass in einer der nächsten Stufen auch eine Fusion der bisher tendenziell gebäudeunabhängigen, intelligenten, automatisierten und robotisierten Systeme mit dem Gebäude selbst stattfinden könnte. Ein interessantes Beispiel hierfür ist das von der Tokioter Waseda-Universität kürzlich errichtete *Wabot-Haus* – ein Hightech-Laborgebäude, in dem Wände und Böden über integrierte mechatronische Systeme bewegt werden können, um so Raumkonfigurationen an verschiedenste Versuchsszenarien und Bedürfnisse anzupassen.²¹

- 1) Dieter Kimpel, Die Entfaltung der gotischen Baubetriebe, in: Friedrich Möbius, Ernst Schubert (Hg.), Architektur des Mittelalters, Weimar 1984, S. 266.
- 2) Wada Jun, Kensetsu Robot no Seko know how, Tokio 1995, S.14–51, 78–89, 153–242.
- 3) Japan Robot Association (Hg.), 11. Kensetsu Robot Symposium 2008, Japan 2008, S. 81–124.
- 4) Willi Viktor Lauer, Location Orientation Manipulator, unveröff. Dipl.-Arbeit, München 2009.
- 5) Nora Eibisch, Konrad Zuse. Helixturm, unveröff. Dipl.-Arbeit, München 2009.
- 6) Seiueemon Inaba, Robot Jidai o hiraku kiroi shiro kara no chosen, Kyoto 1982, S. 149–192.
- 7) Yositaka Utida, Kindai Kenchiku no tsukaueru gata, Tokio 2002, S. 17, 25, 27.
- 8) Yukio Hasegawa, Kensetsu Sagyo no robotika, Tokio 1999, S.131–149.
- 9) Utida (wie Anm. 7), S. 17, 25, 27, 29, 31.
- 10) Hasegawa (wie Anm. 8); Robot Kenkyusha kara no message, Japan, S. 111–117.
- 11) Utida (wie Anm. 7), S. 53, 55, 61, 63, 83, 91, 93, 103.
- 12) Utida (wie Anm. 7), S. 17, 25, 27, 29, 31.
- 13) Utida (wie Anm. 7), S. 53, 55, 61, 63.
- 14) Utida (wie Anm. 7), S. 17, 25, 27, 29, 31; Hasegawa (wie Anm. 8), S. 131–149.
- 15) Council for Construction Robot Research (Hg.), Construction Robot System Catalog in Japan, Tokio, Japan 1999, S. 224, 230, 246, 250, 252.
- 16) Council for Construction Robot Research (wie Anm. 15), S. 228, 248.

- 17) Council for Construction Robot Research (wie Anm. 15), S. 282–363. Zur Entwicklung in Frankreich siehe: Philippe Laurier, Les machines de construction, Paris 1996.
- 18) Council for Construction Robot Research (wie Anm. 15), S. 166, 174, 182, 186, 190, 200.
- 19) Toshio Kawakami u.a.: „Kajima KC+D Koho“, in: Nihon Kensetsu Kikai Kyokai, April 2009, Nummer 710, Tokio, S. 56–59, 82–87.
- 20) Thomas-Alexander Bock, A Study on Robot Oriented Building Construction Systems, National Library of Japan, Doctoral Dissertation Book ID no.000000225823, National Institute of Informatics, University of Tokyo report ID no.8066, Japan, 29.3.1989, S. 65–72.
- 21) Vic Callaghan u.a. (Hg.), Intelligent Environments 2009. Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Environments, Barcelona 20–21.7.2009, Amsterdam u.a. 2009, S. 362.

Thomas Bock ist Inhaber des Lehrstuhls für Baurealisierung und Baurobotik an der TU München. Willi Viktor Lauer, Thomas Linner sind Wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl.

Nora Eibisch ist Diplom-Restauratorin und derzeit Stipendiatin des Deutschen Museums in München.

Der Text basiert auf einem Beitrag für die Ausstellung „Wendepunkt(e) im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur“, 18.3.–13.06.2010, Pinakothek der Moderne, München. Siehe auch nachfolgenden Beitrag.



Automatisierter geschossweiser Rückbau in Umkehrung des AMURAD-Systems: Die Geschosse werden im Erdgeschoss zerlegt.

