



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. J. Hesselbach



Institut für Baukonstruktion und Holzbau

Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel

Ökologische Herstellung von Holzhäusern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse

Förderkennzeichen: 0330423

Teilvorhaben 2 im Verbundprojekt

**Innovativer Holzsystembau durch optimierte Fertigungs-
und integrierte Planungsmethoden**

Schlussbericht

nach Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98

Von Prof. Dr.-Ing. M. H. Kessel, Dr.-Ing. H.-W. Hoffmeister,
Dipl.-Math. S. Quast und Dipl.-Ing. C. Armbrecht

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik
Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19 B
D - 38106 Braunschweig
Telefon: (0531) 391 - 7601
Telefax: (0531) 391 - 5842

Institut für Baukonstruktion
und Holzbau
Technische Universität Braunschweig
Schleinitzstraße 21A
D - 38106 Braunschweig
Telefon: (0531) 391 - 7800
Telefax: (0531) 391 - 8193

I. Planung und Durchführung

1 Aufgabenstellung

Das Forschungsziel des Teilvorhabens 2 ist es, die fertigungstechnischen Voraussetzungen für die weitgehend automatische Produktion von Holzhäusern in Tafelbauweise zu schaffen. Dazu ist eine Flexibilisierung der Fertigung in Hinblick auf die Losgröße 1 erforderlich. Das übergeordnete Ziel ist die Kostensenkung bei der Vorfertigung und die Steigerung der Produktqualität zur Verbesserung der Kundenakzeptanz gegenüber dem Holzfertigbau.

Wie das Fallbeispiel Automobilindustrie zeigt, ist eine wesentliche Voraussetzung für die Umsetzung einer automatischen Produktfertigung das Vorhandensein einer entsprechenden Wissensbasis, die sowohl Werkstück-, Werkzeug- als auch Prozessdaten umfasst. Der Umfang der Daten ist direkt proportional zu der Komplexität des Produktes, was Geometrie, verwendete Werkstoffe und Anzahl der Einzelteile angeht. Aus diesem Grund ist zunächst eine Analyse der im heutigen Holzfertigbau eingesetzten Produktionsmittel, der Fertigungsabläufe sowie des Werkzeug- und Bauteilspektrums notwendig.

Die Forschungsarbeiten werden vom Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik und dem Institut für Baukonstruktion und Holzbau der TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern Meisterstück-Haus Baukmeier, KUKA Roboter und Weinmann Holzbausystemtechnik durchgeführt, die die notwendigen Produktionsdaten ermitteln und bereitstellen. Auf der Grundlage dieser Daten kann eine ganzheitliche Fertigungsstrategie entwickelt werden, die neben dem reinen Produktionsablauf auch den Planungsprozess umfasst. Das bedeutet, dass einerseits neue Handhabungsstrategien, Greifersysteme und Maschinenkomponenten entwickelt und miteinander verknüpft werden müssen. Auf der anderen Seite ist es notwendig, unter Einsatz entsprechender Simulationssoftware Materialflüsse, Durchlaufzeiten und Fertigungskosten zu ermitteln und zu optimieren.

Das Ergebnis ist ein Simulationsmodell einer Produktionsstraße zur Fertigung von Holzhäusern, das sowohl zur Optimierung bestehender Fabrikbetriebe als auch als Prototyp für Anlagenneuentwicklungen dienen kann. An diesem virtuellen Modell können die Funktionen einer realen Anlage bereits vorab getestet und bezüglich ihres Kosten-Nutzen-Verhältnisses im Vorfeld einer Investitionsentscheidung beurteilt werden.

Eine Randbedingung bei dieser Zielsetzung ist, dass insbesondere die kleinen und mittelständischen Unternehmen von den Forschungsergebnissen profitieren sollen. Die Wirtschaftlichkeit der zu entwickelnden Maschinen- bzw. Fertigungskonzepte muss daher auch für Betriebe mit nur geringen Stückzahlen gegeben sein. Investitionskosten müssen gering gehalten und der bestehende Platz im Fertigungsbetrieb nach Möglichkeit ohne Hallenneu- bzw. -ausbau genutzt werden. Neben minimierten Durchlaufzeiten muss auch die Auslastung der Anlagen eine hohe Priorität genießen.

2 Voraussetzungen

Die Produktion im Holzhausbau heute ist, wie bei Einzel- und Kleinserienfertigung üblich, eine Mischung aus teilautomatisierter und manueller Fertigung. Im Gegensatz zur bereits in hohem Maße automatisierten Möbelbranche variiert der Anteil von automatisierten und

manuellen Tätigkeiten in den einzelnen Holzbaubetrieben sehr stark. Da die meisten Holzfertighaushersteller zu den klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) zählen, ist hier der Automatisierungsgrad bei der Tafelproduktion eher gering. Arbeitsschritte wie das Zusammenführen der Rippen, das Aufbringen der Beplankung und die Einbringung von Dämmstoffen, Sanitärblöcken und Rohren werden größtenteils noch manuell durchgeführt. Geprägt durch diesen klein- und mittelständischen Aufbau der Betriebe leidet die Holzbaubranche an erheblichen Strukturmängeln und Wettbewerbsnachteilen, die durch den europäischen Markt noch erheblich verschärft werden.

3 Planung und Ablauf

Die Forschungsarbeiten des Teilvorhabens 2 wurden gemeinsam vom Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik und dem Institut für Baukonstruktion und Holzbau der TU Braunschweig durchgeführt. Der Projektablauf folgte dem beantragten Arbeitsplan:

Arbeitspaket	2003				2004			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1 Festlegung produktionstechnischer Randbedingungen	■							
2 Entwicklung einer ganzheitlichen Fertigungsstrategie	■	■						
3 Produktionsdatenentwicklung aus DtH-Geometriedatensatz		■	■					
4 Einzelbauteil- und Verbindungsanalyse			■	■				
5 Anlagendetailplanung			■	■				
6 Umsetzung neuer Handhabungsstrategien in den virtuellen Raum				■	■			
7 Planungs- und Steuerungsdaten					■	■		
8 Virtueller Aufbau modularer Fertigungszellen					■	■		
9 Aufbau der virtuellen Produktionsstraße						■	■	
10 Vergleich von Planungs- und Fertigungsprozess							■	■
11 Erprobung und Optimierung								■
12 Transferphase		1. MS			2. MS			3. MS

Der 1. Meilenstein wurde mit der Festlegung der Randbedingungen und der Analyse bestehender Produktionssysteme erreicht. Auf Basis der ermittelten Fertigungsdaten konnte in der 2. Projektphase mit der Entwicklung von Handhabungs- und Maschinensystemen begonnen werden. In der 3. Phase wurden diese Systeme zu Fertigungszellen und –straßen verknüpft. Dabei wurde zum einen der ursprüngliche Ansatz, 3D-Simulationswerkzeuge zur Auslegung der Anlagen zu verwenden, wie geplant verfolgt. Darüber hinaus aber wurde in einem weitaus größerem als zunächst vorgesehenem Umfang die Materialflusssimulation zu einem modularen und parametrisierten System weiterentwickelt, mit dessen Hilfe bestehende und neu konzipierte Fertigungsanlagen bewertet und optimiert werden können.

4 Stand der Technik

Auf den wissenschaftlichen und technischen Stand, an den das Teilvorhaben anknüpft, wird ausführlich im separat beigefügten Arbeitsbericht (Anlage A) in Kapitel 3 eingegangen.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Unterstützt wurde das Teilvorhaben 2 von den Industriepartnern aus den Bereichen Holzbau, Anlagen- und Maschinenbau sowie Industrieroboter/Handhabungssysteme:

Otto Baukmeier Fertigungsbau,
Holzbau GmbH & Co. KG
Otto-Körting-Str. 3
D – 31789 Hameln
Tel.: +49 (0) 51 51 / 95 38-0
Fax: +49 (0) 51 51 / 39 51
www.meisterstueck.de

Weinmann Holzbausystemtechnik GmbH
Forchenstrasse 50
D – 72813 St. Johann-Lonsingen
Tel.: +49 (0) 71 22 / 82 94-0
Fax: +49 (0) 71 22 / 82 94-66
www.weinmann-partner.de

KUKA Roboter GmbH
Hery-Park 3000
D - 86368 Gersthofen
Tel.: +49 (0) 8 21 / 45 33-0
Fax: +49 (0) 8 21 / 45 33-16 16
www.kuka-roboter.de

Im Rahmen des Verbundprojektes erfolgte die Kooperation mit dem Lehrstuhl für Baurealisierung und Bauinformatik der TU München (Teilvorhaben 1) sowie dem Lehrstuhl Statik und Dynamik der BTU Cottbus (Teilvorhaben 3). Koordiniert wurde diese Zusammenarbeit von der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. in München (Teilvorhaben 4).

II. Ergebnisdarstellung

1 Erzielte Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse des Vorhabens werden ausführlich im separat beigefügten Arbeitsbericht (Anlage A) dargestellt. Dieser Arbeitsbericht enthält die zur Veröffentlichung vorgesehenen Ergebnisse.

2 Fortschreibung des Verwertungsplans

2.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung sind noch keine Schutzrechtsanmeldungen erfolgt.

2.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Bei den deutschen Holzhausherstellern handelt es sich ausschließlich um mittelständische Unternehmen, deren finanzielle Mittel für Forschung und Entwicklung beschränkt sind. Die Möglichkeit, im Vorfeld der technischen Entwicklung eine Anlage zur automatisierten Herstellung von Holzhäusern virtuell zu testen, ist für die betreffenden Firmen insofern eine wertvolle Hilfe, als dass die Vorentwicklungskosten neuartiger Maschinen und Handhabungsautomaten deutlich reduziert werden können.

Insgesamt wird durch dieses Teilvorhaben die Risikoabschätzung des Entwicklungsaufwandes einer Produktionsstraße zur automatisierten Herstellung von Holzhäusern besser kalkulierbar. Die Entwicklungstätigkeit auf diesem Gebiet kann durch den vorliegenden Ansatz wesentlich beschleunigt werden. Das Konzept einer modularen, parametrisierten Simulationsumgebung zur Bewertung von Automatisierungsansätzen erlaubt eine erhebliche Zeit- und Kostenreduzierung bei der Anpassung an die unternehmensspezifischen Gegebenheiten.

2.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch das Werkzeug einer simulierten Produktionsstraße zur Herstellung von Holzhäusern wird es möglich sein, sowohl die Zeit als auch die Kosten für die Entwicklung einer automatisierten Holzhausproduktion deutlich zu reduzieren. Die aufwendige Entwicklung völlig neuartiger Handhabungskonzepte und Fertigungsmethoden kann in der virtuellen Welt preiswert vorerprobt und bis zu einem gewissen Maße auch optimiert werden.

2.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Auf Grundlage der im Rahmen dieses Teilvorhabens entwickelten virtuellen Produktionsstraße kann in einer sich anschließenden Entwicklungsphase eine reale Anlage aufgebaut werden. Durch die virtuelle Vorerprobung wird die Entwicklungszeit des realen Prototypen deutlich reduziert. In einer nächsten Phase ist die Erweiterung der Materialdatenbank der Simulation zu einem vollständigen Produktkatalog denkbar, ebenso wie die Integration der entwickelten Werkzeuge in ein Produktionsplanungs- und -steuerungssystem mit entsprechender Rückkopplung von der Fertigung in die Simulation.

3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Aktuelle Recherchen nach Nr. 2.1 BNBEST-BMBF 98 zeigen, dass im Verlauf der Projektbearbeitung keine neuen, das Gebiet des Vorhabens betreffenden Ergebnisse bei anderen Stellen veröffentlicht worden sind.

4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Eine erste Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgte im Rahmen der Messepräsentation des Verbundprojektes auf der BAU 2005, 17.-22. Januar 2005, München. Neben der Vorstellung der entwickelten Simulations- und Softwaretools wurden dem Fachpublikum am Beispiel der Montage der Schnellverbindertechnik des Teilvorhabens 1 Einsatzmöglichkeiten, Bewegungsfreiheiten und Arbeitsräume von Industrierobotern demonstriert. Der 6-Achs-Roboter

vom Typ KR3 wurde vom Forschungspartner KUKA Roboter kostenlos zur Verfügung gestellt. Weiterhin informierte eine Vortragsveranstaltung über die Projektergebnisse:

- Kessel, M.H., Hoffmeister, H.-W., Armbrecht, C.: Automatisierte und fertigungsoptimierte Produktionsprozesse, in: Rationalisierungspotential im Holzbau. Planung, Fertigung, Auf- und Ausbau, Vortragsveranstaltung BAU 2005, 19.01.2005, München
- Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (Hrsg.): Rationalisierungspotential im Holzbau. Planung, Fertigung, Auf- und Ausbau, Informationsbroschüre zum Verbundvorhaben „Innovativer Holzsystembau durch optimierte Fertigungs- und integrierte Planungsmethoden“, 2005

Eine weitere Messepräsentation des Projektes erfolgte auf der LIGNA+ in Hannover vom 02.-06. Mai 2005. Hierzu stand wieder der KUKA Roboter kostenlos zur Verfügung. Im Rahmen des LIGNA+ Holzbau-Forums am 03. Mai 2005 wurden die Forschungsergebnisse gemeinsam mit dem Projektpartner Baukmeier vorgetragen. Ein von der DGfH in elektronischer Form herausgebender Tagungsberichtsband informierte über die Ergebnisse des Verbundvorhabens und der Teilprojekte. Darüber hinaus wird eine Veröffentlichung dieser Kurzberichte in Druckform erfolgen:

- Baukmeier, S.: Praxisbericht zur Qualitätssteigerung durch automatisierte Produktionsprozesse im modernen Holzbau, in: LIGNA+ Holzbau-Forum, 03.05.2005, Hannover
- Armbrecht, C.: Automatisierte und fertigungsoptimierte Produktionsprozesse im Holztafelbau, in: LIGNA+ Holzbau-Forum, 03.05.2005, Hannover
- Kessel, M.H., Hoffmeister, H.-W., Quast, S., Armbrecht, C.: Automatisierte und fertigungsoptimierte Produktionsprozesse, Kurzbericht zum BMBF-Verbundvorhaben „Innovativer Holzsystembau“, FKZ 0330423 (noch nicht erschienen)

Des Weiteren sind Veröffentlichungen für folgende Fachzeitschriften/Konferenzen erfolgt bzw. in Vorbereitung:

- Fischer, M., Timmermans, J., Unser, R., Armbrecht, C., Richter, S., Simon, V.: Mit Schnellverbindern in die Zukunft, mikado – Unternehmermagazin für Holzbau und Ausbau (2005) 4, S. 44-49
- Kessel, M.H., Hoffmeister, H.-W., Quast, S., Armbrecht, C.: Simulationswerkzeuge zur Bewertung und Optimierung von Produktionsprozessen, HOB – Die Holzbearbeitung, 52 (2005) 7/8 (noch nicht erschienen)
- Hoffmeister, H.-W., Armbrecht, C.: Simulation-based Optimization of Manufacturing Processes in the Wood-working Industry, 17th International Wood Machining Seminar, 26.-28.09.2005, Rosenheim (in Vorbereitung)

Braunschweig, 29. Juli 2005



Dr.-Ing. H.-W. Hoffmeister

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik IWF

Anlagen:

- A: Arbeitsbericht
- B: Kurzfassung



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. J. Hesselbach



Institut für Baukonstruktion und Holzbau

Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel

Ökologische Herstellung von Holzhäusern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse

Förderkennzeichen: 0330423

Teilvorhaben 2 im Verbundprojekt

**Innovativer Holzsystembau durch optimierte Fertigungs-
und integrierte Planungsmethoden**

Schlussbericht

Anlage A: Arbeitsbericht

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik
Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19B
D - 38106 Braunschweig
Telefon: (0531) 391 - 7601
Telefax: (0531) 391 - 5842

Institut für Baukonstruktion
und Holzbau
Technische Universität Braunschweig
Schleinitzstraße 21A
D - 38106 Braunschweig
Telefon: (0531) 391 - 7800
Telefax: (0531) 391 - 8193

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis.....	10
1 Einleitung	11
2 Zielsetzung.....	12
2.1 Ziele des Teilvorhabens.....	12
2.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen.....	13
3 Stand der Forschung/Stand der Technik	15
3.1 Gebäude in Holztafelbauweise	15
3.2 Produktionstechnik bei der Vorfertigung im Werk.....	20
3.2.1 Produktionstechnik in kleinen und mittelständischen Unternehmen.....	22
3.2.2 Vollautomatische Fertigung bei der Fa. ExNorm, Steinheim	24
4 Lösungsweg.....	26
4.1 Analyse des Fertigungsablaufs.....	26
4.1.1 Abbundprozess.....	26
4.1.2 Außen- und Innenwandtafelherstellung.....	27
4.1.3 Dach- und Deckentafelherstellung	28
4.1.4 Finishbereich	29
4.1.5 Verladebereich.....	30
4.2 Produktionsdatenentwicklung, Einzelbauteil- und Verbindungsanalyse.....	31
4.3 Entwicklung einer ganzheitlichen Fertigungsstrategie.....	32
4.3.1 Randbedingungen	32
4.3.2 Automatisierungspotential-Analyse	33
4.4 Auslegung virtueller Fertigungsstraßen durch Kopplung von Simulationstechniken.....	39
5 Automatisierungskonzepte und deren Umsetzung in der 3D-Fertigungssimulation	42
5.1 Standardbauteile und deren Eigenschaften.....	42
5.2 Greiferkonzepte	44
5.2.1 Werkstückangepasste Greifertechnik.....	44
5.2.2 Automatisierte Einbringung von Dämmmaterialien.....	45
5.3 Multifunktions-Bearbeitungszentrum	49

5.3.1	Konzept.....	49
5.3.2	Variationen des Layouts der Fertigungszelle.....	51
5.4	Layoutvariationen des Fertigungsablaufs	53
5.4.1	Einsatz von 6-Achs-Robotern	54
5.4.2	Einsatz von Portalbearbeitungszentren	55
5.4.3	Kombination von 6-Achs-Roboter und Multifunktionsbrücke	55
5.4.4	Durchlauffertigung mit geradlinigem Materialfluss.....	56
5.4.5	Durchlauffertigung mit U-förmigem Materialfluss.....	57
5.5	Realisierung einer Durchlauffertigung in der 3D-Simulation.....	59
6	Modellierung und Optimierung des Fertigungsablaufs mittels Materialflusssimulation ...	63
6.1	Konzeption.....	63
6.2	Datentransfer/Planungs- und Steuerungsdaten	65
6.2.1	Methodik	65
6.2.2	Tabellenaufbau, Attribute.....	68
6.3	Aufbau und programmtechnische Realisierung.....	70
6.3.1	Gesamtmodell der Holztafelherstellung	71
6.3.2	Steuerung	73
6.3.3	Auftragsverwaltung.....	73
6.3.4	Materialbereitstellung.....	75
6.3.5	Fertigungseinrichtungen	76
6.3.6	Fertigungsabschnitte	87
6.3.7	Auswertung.....	89
6.3.8	Konfigurationssoftware für die Materialflusssimulation.....	90
6.4	Ermittlung der Datenbasis	91
7	Versuchsdurchführung, Ergebnisse	93
7.1	Gebäudemodelle und deren Eigenschaften	93
7.1.1	Gebäudemodell 1	93
7.1.2	Gebäudemodell 2	95
7.1.3	Gebäudemodell 3	96
7.2	Variation der Produktionslisten und der Auftragsreihenfolgen.....	98
7.2.1	Gebäudemodell 1 (Bauwerk).....	98
7.2.2	Gebäudemodell 2 (Bauwerk).....	103
7.2.3	Gebäudemodell 3 (TU München)	106
7.2.4	Kombinierte Fertigung von Gebäude 1 und 2.....	108

7.3	Untersuchung verschiedener Fertigungs- und Automatisierungskonzepte	110
7.3.1	Automatisierung des Fertigungsablaufs nach Baukmeier	110
7.3.2	Automatisierung der Durchlaufertigung	115
7.4	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse.....	117
8	Auswirkungen der Automatisierung auf die Qualitätssicherung.....	120
9	Zusammenfassung.....	121
10	Literatur	123

Abbildungsverzeichnis

Bild 3.1:	Holztafelbau und Holzmassivbau	16
Bild 3.2:	Aufbau einer Wandtafel – a) Riegelwerk b) Außenwand c) Innenwand	19
Bild 3.3:	Aufbau einer Deckentafel	19
Bild 3.4:	Aufbau einer Dachtafel	19
Bild 3.5:	Planung und Fertigung von Holzhäusern	21
Bild 3.6:	Automatische Abbundanlage vom Typ Hundegger K2 []	22
Bild 3.7:	Zimmermeistertisch (links) und Schmetterlingswender (rechts) []	23
Bild 3.8:	Multifunktionsbrücke vom Typ Weinmann WMS 150 [9]	23
Bild 3.9:	Produktionsanlage der Fa. ExNorm zur automatisierten Herstellung von Häusern in Tafelbauweise	25
Bild 4.1:	Übersicht des Fertigungsablaufs bei der Herstellung von Holzhäusern in Tafelbauweise.....	26
Bild 4.2:	Fertigungsablauf im Bereich des Abbunds	27
Bild 4.3:	Fertigungsablauf im Bereich der Wandtafelherstellung.....	28
Bild 4.4:	Fertigungsablauf im Bereich der Dach- und Deckentafelherstellung	29
Bild 4.5:	Fertigungsablauf im Finishbereich	30
Bild 4.6:	Einsatzgebiete der Materialfluss- und der 3D-Fertigungssimulation.....	40
Bild 4.7:	Wechselwirkung zwischen Materialfluss- und 3D-Fertigungssimulation.....	41
Bild 5.1:	Standardwandtafel.....	43
Bild 5.2:	Standarddeckentafel.....	43
Bild 5.3:	Standarddachtafel.....	44
Bild 5.4:	Vakuumgreifer zur Handhabung plattenförmiger Werkstücke	44
Bild 5.5:	Vakuumgreifer zur Handhabung stabförmiger (links) und plattenförmiger Werkstücke (rechts).....	45
Bild 5.6:	Greiferwerkzeug zur automatisierten Einbringung von Dämmmaterialien.....	47
Bild 5.7:	Arbeitsablauf bei Zuschneid und Einbringung des Dämmmaterials	48
Bild 5.8:	Multifunktions-Bearbeitungszentrum in Portalbauweise	50
Bild 5.9:	Fertigung einer Dachtafel	51
Bild 5.10:	Fertigung einer Deckentafel.....	51
Bild 5.11:	Einsatz zweier Roboter innerhalb des Portals	52
Bild 5.12:	Integration eines 6-Achs-Roboter in das Portalbearbeitungszentrum	53

Bild 5.13:	Legende zu den Layoutvariationen des Fertigungsablaufs	53
Bild 5.14:	Einsatz von 6-Achs-Robotern (KUKA).....	54
Bild 5.15:	Paralleler Einsatz von Portalbearbeitungszentren.....	55
Bild 5.16:	6-Achs-Roboter in Kombination mit Multifunktionsbrücken	56
Bild 5.17:	Durchlauffertigung, geradliniger Materialfluss	57
Bild 5.18:	Durchlauffertigung mit Portalbearbeitungszentrum, U-förmiger Materialfluss	58
Bild 5.19:	Durchlauffertigung mit 6-Achs-Roboter, U-förmiger Materialfluss	58
Bild 5.20:	Durchlauffertigung mit U-förmigen Materialfluss in der 3D-Simulation	59
Bild 5.21:	Fertigungsablauf bei der Wandtafelfertigung	62
Bild 6.1:	Schematischer Aufbau des Simulationsmodells	63
Bild 6.2:	Trennung von Simulationsmodell (links) und den zugehörigen Maschinen- und Prozessdaten (rechts).....	64
Bild 6.3:	Verknüpfung von Informations- und Materialfluss bei der Generierung von Fertigungsaufträgen.....	65
Bild 6.4:	Ausschnitt aus einer Excel-Tabelle zur Datenübergabe an die Materialflusssimulation	70
Bild 6.5:	Eingangs- und Ausgangssteuerung in eM-Plant-Bausteinen	71
Bild 6.6:	Schematischer Aufbau des Simulationsmodells.....	72
Bild 6.7:	Gesamtmodell innerhalb der Simulationsumgebung eM-Plant 7.0.....	72
Bild 6.8:	Ablaufschema bei der Generierung von Fertigungseinzelaufträgen.....	74
Bild 6.9:	Methodensteuerung im Modell der Abbundanlage	78
Bild 6.10:	Methodensteuerung im Modell der Plattensäge	80
Bild 6.11:	Methodensteuerung im Modell der Multifunktionsbrücke	83
Bild 6.12:	Berechnung der Bearbeitungszeiten der Multifunktionsbrücke	84
Bild 6.13:	Sägeoperationen der Multifunktionsbrücke	84
Bild 6.14:	Methodensteuerung im Modell des Schmetterlingswenders	86
Bild 6.15:	Modellierung der Tafelfertigung (Ausschnitt)	89
Bild 6.16:	Software zur Konfiguration der Materialflusssimulation	91
Bild 6.17:	Simulation einer Riegelwerksstation mittels „KUKA-Sim“	92
Bild 7.1:	Gebäudemodell 1 (Fa. Baukmeier).....	93
Bild 7.2:	Wandanschlüsse Beispielhaus 1 – a) und b) Außenecken, c) Innenecke d) T-Stoß.....	94
Bild 7.3:	Gebäudemodell 2 (Fa. Baukmeier).....	96
Bild 7.4:	Wandanschlüsse Beispielhaus 2 – a) Außenecke Turm, b) Innenecke Turm, c) Außenecke Wintergarten, d) Innenecke Wintergarten.....	96

Bild 7.5:	Gebäudemodell 3 (TU München, TV1).....	97
Bild 7.6:	Haus 1, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von AW/IW und DA/DE	100
Bild 7.7:	Haus 1, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von AW/IW und DA/DE	100
Bild 7.8:	Haus 1, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von AW/IW und DA/DE ..	101
Bild 7.9:	Haus 1, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von AW/IW und DA/DE ..	101
Bild 7.10:	Haus 1, Durchlauffertigung (manuell)	102
Bild 7.11:	Haus 1, Durchlauffertigung (manuell)	102
Bild 7.12:	Haus 2, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von AW/IW und DA/DE	103
Bild 7.13:	Haus 2, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von AW/IW und DA/DE	104
Bild 7.14:	Haus 2, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von AW/IW und DA/DE ..	104
Bild 7.15:	Haus 2, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von AW/IW und DA/DE ..	105
Bild 7.16:	Haus 2, Durchlauffertigung (manuell)	105
Bild 7.17:	Haus 2, Durchlauffertigung (manuell)	106
Bild 7.18:	Haus 3, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von Außen-/Innenwand.....	107
Bild 7.19:	Haus 3, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von Außen-/Innenwand ..	107
Bild 7.20:	Haus 3, Durchlauffertigung (manuell)	108
Bild 7.21:	Fertigungszeiten bei gleichzeitiger Produktion von Gebäude 1 und 2.....	109
Bild 7.22:	Fertigungskosten bei gleichzeitiger Produktion von Gebäude 1 und 2.....	109
Bild 7.23:	Gesamtfertigungszeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, Auftragstrennung).....	111
Bild 7.24:	Tafel-Durchlaufzeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, Auftragstrennung).....	111
Bild 7.25:	Fertigungskosten (absolut) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, Auftragstrennung).....	112
Bild 7.26:	Fertigungskosten (relativ) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, Auftragstrennung).....	112
Bild 7.27:	Gesamtfertigungszeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, keine Auftragstrennung)	113
Bild 7.28:	Tafel-Durchlaufzeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, keine Auftragstrennung)	113
Bild 7.29:	Fertigungskosten (absolut) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, keine Auftragstrennung)	114
Bild 7.30:	Fertigungskosten (relativ) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, keine Auftragstrennung)	114
Bild 7.31:	Gesamtfertigungszeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Durchlauffertigung)	115

Bild 7.32: Tafel-Durchlaufzeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Durchlauffertigung)	116
Bild 7.33: Fertigungskosten (absolut) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Durchlauffertigung)	116
Bild 7.34: Fertigungskosten (relativ) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Durchlauffertigung)	117
Bild 7.35: Vergleich der Gesamtfertigungszeit für unterschiedliche Fertigungsabläufe.....	118
Bild 7.36: Vergleich der Tafel-Durchlaufzeit für unterschiedliche Fertigungsabläufe	118
Bild 7.37: Vergleich der Fertigungskosten (absolut) für unterschiedliche Fertigungsabläufe	119
Bild 7.38: Vergleich der Fertigungskosten (relativ) für unterschiedliche Fertigungsabläufe	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Charakteristika der Automatisierungspotential-Analyse	36
Tabelle 4.2:	Zuordnung der Ausprägungen zu den einzelnen Prozessschritten	37
Tabelle 4.3:	Automatisierungseignungsgrad bei der Wandtafelfertigung	37
Tabelle 4.4:	Automatisierungseignungsgrad bei der Deckentafelfertigung	38
Tabelle 4.5:	Automatisierungseignungsgrad bei der Dachtafelfertigung	38
Tabelle 6.1:	Typisierung der Bauteile	66
Tabelle 6.2:	Attribute der Tabelle zur Datenübergabe an die Materialflusssimulation.....	69
Tabelle 6.3:	Beispiel für die Tabelle „Umlagerziele“	76
Tabelle 6.4:	Aufbau der Tabellen zur Maschinenspezifikation	77
Tabelle 6.5:	Beispieltabelle (Auszug)	77
Tabelle 6.6:	Maschinenparameter Abbundanlage.....	79
Tabelle 6.7:	Maschinenparameter Plattensäge	80
Tabelle 6.8:	Parameter Zimmermeistertisch.....	82
Tabelle 6.9:	Maschinenparameter Multifunktionsbrücke	85
Tabelle 6.10:	Maschinenparameter Schmetterlingswender.....	86
Tabelle 6.11:	Parameter Werker (Finishbereich).....	87
Tabelle 6.12:	Ergebnisausgabe des Simulationslaufs (Auszug).....	90
Tabelle 7.1:	Anzahl der Tafeln und Rippen der Beispielhäuser 1 und 2	97
Tabelle 7.2:	Varianten bei der Generierung der Auftragslisten, Einzelfertigung von Gebäude 1 und 2	98
Tabelle 7.3:	Varianten bei der Generierung der Auftragslisten, Gebäude 3.....	106
Tabelle 7.4:	Varianten bei der Generierung der Auftragslisten, kombinierte Fertigung von Gebäude 1 und 2	108
Tabelle 7.5:	Übersicht der Varianten des Fertigungsablaufs.....	117

1 Einleitung

Holz beansprucht unter allen Baustoffen den geringsten Energieverbrauch für Herstellung, Transport und Verarbeitung. Zudem weist Holz sehr gute wärmedämmende Eigenschaften auf und ist als naturnaher, ökologisch verträglicher Rohstoff ein idealer Baustoff. Holzhäuser weisen daher eine wesentlich bessere Ökobilanz als Häuser in Ziegelbauart auf [1].

Die Holztafelbauart ist die unter den Holzbausystemen am häufigsten verwendete Konstruktionsart. Der Holztafelbau zeichnet sich durch ein geringes Eigengewicht, eine gute Transportfähigkeit und eine rasche Fertigstellung aus. Gegenüber dem Ziegelbau ergibt sich eine um 10% höhere Wohnfläche bei gleicher Grundfläche [1]. Die Nachhaltigkeit der eingesetzten Baustoffe in Verbindung mit einer umweltverträglichen Produktion führt zu ökologisch hochwertigen Gebäuden. Ein enormer Vorteil gegenüber der konventionellen Ziegelbauart liegt in dem hohen Vorfertigungsgrad der Holztafelelemente, der eine Automatisierung der Produktionsabläufe im Werk ermöglicht. Qualität, Kostensicherheit durch Standardisierung sowie Wohngesundheit und –komfort sind weitere Merkmale, mit denen sich der Holzfertighausbau gegenüber dem konventionellen Ziegelbau Marktanteile sichern und weiter ausbauen kann. Mittlerweile wird nahezu jedes sechste Haus in Deutschland in Holzbauart errichtet. Durch den steigenden Marktanteil müssen immer mehr Häuser in immer kürzerer Zeit produziert werden. Hierbei sollen die Qualität steigen und die Kosten sinken.

Für den Kunden steht zuallererst der Anspruch an ein kostengünstiges, aber qualitativ hochwertiges Gebäude im Vordergrund. Da jeder Bauherr individuelle Vorstellungen und Wünsche zur Ausgestaltung seines Eigenheims hat, sind die Holzfertighaushersteller mit einer Einzelfertigung mit sehr hohem Planungs- und Produktionsaufwand konfrontiert. Kürzere Durchlaufzeiten, steigende Qualität und mehr Sicherheit bei Planung und Produktion können durch Automatisierungsmaßnahmen erreicht werden.

Die Produktion im Holzhausbau ist heute, wie bei Einzel- und Kleinserienfertigung üblich, eine Mischung aus teilautomatisierter und manueller Fertigung. Im Gegensatz zur bereits in hohem Maße automatisierten Möbelbranche variiert der Anteil von automatisierten und manuellen Tätigkeiten in den einzelnen Holzbaubetrieben sehr stark. Da die meisten Holzfertighaushersteller zu den klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) zählen, ist hier der Automatisierungsgrad bei der Tafelproduktion eher gering. Arbeitsschritte wie das Zusammenführen des Riegelwerks, das Aufbringen der Beplankung und die Einbringung von Dämmstoffen, Sanitärblöcken und Rohren werden größtenteils noch manuell durchgeführt. Geprägt durch diesen klein- und mittelständischen Aufbau der Betriebe leidet die Holzbaubranche an erheblichen Strukturmängeln und Wettbewerbsnachteilen, die durch den europäischen Markt noch erheblich verschärft werden.

2 Zielsetzung

Das Ziel des Gesamtvorhabens ist die Entwicklung neuer Technologien für den Holzsystembau und die zeitliche und kostenmäßige Rationalisierung dieser ökologischen Bauweise, so dass mittelfristig der Marktanteil steigt und sich auch Bauherren mit weniger hohem Einkommen ein modernes Haus in Holzbauweise leisten können, das alle Anforderungen an schnelle, fehlerfreie Erstellung, Wohnkomfort und Energieeffizienz erfüllt. Um das Potential des Holzbaus, das dieser durch seine Eignung für Standardisierung und Vorfertigung bietet, vollständig auszuschöpfen und eine nachhaltige Effektivitätssteigerung bei gleichzeitiger Verbesserung der erbrachten Leistungen zu erschließen, sind Maßnahmen basierend auf ganzheitlichen Ansätzen erforderlich.

Die Gesamtstrategie, die im Rahmen des Verbundprojektes interdisziplinär erarbeitet werden soll, umfasst die fertigungsgerechte Planung und Gewerkeintegration durch Entwicklung eines Modulbausystems (TU München), die Optimierung und Automatisierung der Vorfertigung im Werk (TU Braunschweig), die Durchgängigkeit des Datentransfers durch Entwicklung eines Produktmodells (BTU Cottbus) sowie die Zusammenführung der Ergebnisse und die Durchführung von Transfermaßnahmen (DGfH, München). Auf diese Weise soll die in den kommenden Jahren notwendige Umgestaltung der Holzbaubranche konzeptionell eingeleitet und die Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen gesichert werden.

2.1 Ziele des Teilvorhabens

Das Forschungsziel des Teilvorhabens 2 ist es, die fertigungstechnischen Voraussetzungen für eine in verstärktem Maße automatisierte Produktion von Holzhäusern in Tafelbauweise zu schaffen. Dazu ist eine Flexibilisierung der Fertigung in Hinblick auf die Losgröße 1 erforderlich. Das übergeordnete Ziel ist die Kostensenkung bei der Vorfertigung und die Steigerung der Produktqualität zur Verbesserung der Kundenakzeptanz gegenüber dem Holzfertigbau.

Wie das Fallbeispiel Automobilindustrie zeigt, ist eine wesentliche Voraussetzung für die Umsetzung einer automatischen Produktfertigung das Vorhandensein einer entsprechenden Wissensbasis, die sowohl Werkstück-, Werkzeug- als auch Prozessdaten umfasst. Der Umfang der Daten ist direkt proportional zu der Komplexität des Produktes, was Geometrie, verwendete Werkstoffe und Anzahl der Einzelteile angeht. Aus diesem Grund ist zunächst eine Analyse der im heutigen Holzfertighausbau eingesetzten Produktionsmittel, der Fertigungsabläufe sowie des Werkzeug- und Bauteilspektrums notwendig.

Die Forschungsarbeiten werden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Meisterstück-Haus Baukmeier, KUKA Roboter und Weinmann Holzbausystemtechnik durchgeführt, die die notwendigen Produktionsdaten ermitteln und bereitstellen. Auf der Grundlage dieser Daten kann eine ganzheitliche Fertigungsstrategie entwickelt werden, die neben dem reinen Produktionsablauf auch den Planungsprozess umfasst. Das bedeutet, dass einerseits neue Handhabungsstrategien, Greifersysteme und Maschinenkomponenten entwickelt und miteinander verknüpft werden müssen. Auf der anderen Seite ist es notwendig, unter Einsatz entsprechender Simulationssoftware Materialflüsse, Durchlaufzeiten und Fertigungskosten zu ermitteln und zu optimieren.

Das Ergebnis ist ein Simulationsmodell einer Produktionsstraße zur Fertigung von Holzhäusern, das sowohl zur Optimierung bestehender Fabrikbetriebe als auch als Prototyp für Anlagenneuentwicklungen dienen kann. An diesem virtuellen Modell können die Funktionen einer realen Anlage bereits vorab getestet und bezüglich ihres Kosten-Nutzen-Verhältnisses im Vorfeld einer Investitionsentscheidung beurteilt werden.

Eine Randbedingung bei dieser Zielsetzung ist, dass insbesondere die kleinen und mittelständischen Unternehmen von den Forschungsergebnissen profitieren sollen. Die Wirtschaftlichkeit der zu entwickelnden Maschinen- bzw. Fertigungskonzepte muss daher auch für Betriebe mit nur geringen Stückzahlen gegeben sein. Investitionskosten müssen gering gehalten und der bestehende Platz im Fertigungsbetrieb nach Möglichkeit ohne Hallen- bzw. –ausbau genutzt werden. Neben minimierten Durchlaufzeiten muss auch die Auslastung der Anlagen eine hohe Priorität genießen.

2.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Ökologische Forderungen, wie die eines geringen Energieeinsatzes über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes hinweg, können beim Bauen mit Holz nahezu optimal realisiert werden. Die Produktion des Holzes im Wald erfolgt mit Hilfe des Sonnenlichts und leistet durch die Umwandlung von CO₂ in Sauerstoff einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Umwelt. Dank geringen Gewichts, kurzer Transportwege und einfacher Verarbeitung bleibt der Energieeinsatz bei der Herstellung von Holzprodukten gering. Darüber hinaus entstehen keine Abfälle: Rinde, Späne und Restholz werden vollständig stofflich oder energetisch verwertet [2]. In der ökologischen Gesamtbetrachtung beträgt der Energieaufwand für den Bau einer Wohnung von 100 m² in Holztafelbauweise nur etwa zwei Drittel des Aufwandes bei konventioneller Bauweise [1].

Die Verwendung des nachwachsenden Rohstoffes Holz schont andere, endliche Materialressourcen. Mit der flexiblen, flächensparenden Holzbauweise wird knappes, auch schwieriges Bauland effektiv genutzt. Der Eingriff in die lokale Umwelt bleibt dabei begrenzt: das geringe Gewicht verringert den Fundamentierungsaufwand, die kurze Bauzeit mit weitgehend vorgefertigten Teilen und leichtem Gerät vermindert den Baustress für das Baugelände als Biotop und für die Nachbarschaft. Der für das Holzhaus typische, sehr hohe Wärmeschutz senkt drastisch den Verbrauch fossiler Brennstoffe und entlastet die Atmosphäre durch entsprechend verringerte Emissionen. Zukunftsweisende Haustechnik wie kontrollierte Be- und Entlüftung, solare Warmwasserbereitung oder Wasserrecycling lässt sich in die Holzbauweise einfach integrieren. Am Ende seiner Nutzungsdauer gliedert sich das Holzhaus durch stoffliches Recycling, energetische Verwertung oder schließlich biologischen Abbau in den Kreislaufprozess ein [3]. Der im heutigen Holzbau mögliche Verzicht auf chemische Holzschutzmittel stellt sicher, dass in dieser Hinsicht keine ökologischen Probleme entstehen. Auch die Begleitwerkstoffe des Holzes wie zum Beispiel die Gipswerkstoffe und die Dämmstoffe passen in das Ökopprofil. Sie werden aus gesicherten Rohstoffvorkommen, aus Recyclingprozessen oder erneuerbaren Quellen gewonnen, lassen sich einfach verarbeiten, ermöglichen eine hohe Energieeinsparung und lange Nutzungsdauer und lassen sich darüber hinaus problemlos recyceln.

Die Zielstellung, den Automatisierungsgrad bei der Fertigung von Holzhäusern zu erhöhen, stellt eine effektive Möglichkeit zur Umsetzung umweltschützender Maßnahmen dar. Die Optimierung bzw. Automatisierung der Fertigung führt zu einer wirkungsvollen, schlankeren

Organisationsstruktur und damit auch zur Schonung von Ressourcen. Grundprinzipien sowohl durchdachter Organisationsstrukturen als auch erfolgreicher Automatisierungsmaßnahmen sind die Einhaltung kurzer Wege, die Minimierung des Material- und Energieeinsatzes sowie die Archivierung und Verwendung nur der wesentlichen Informationen.

Für die Holzbauunternehmen bedeuten diese Maßnahmen eine Verkürzung der Produktionszeiten und –kosten bei gleichzeitiger Erhöhung des Qualitätsstandards. Die Unternehmen werden dadurch in der Lage sein, ihre Produkte bei verbesserter Qualität zu einem geringeren Preis anzubieten. Auf diese Weise wird die Attraktivität und Akzeptanz der Holztafelbauweise erhöht, so dass immer mehr zukünftige Hausbesitzer die Anschaffung eines Holzhauses als Alternative zu einem Haus klassischer Bauart mit in ihre Überlegungen einschließen werden. Dieser Trend schafft die Möglichkeit, die im Vergleich zur klassischen Bauart ohnehin bessere Ökobilanz von Holzhäusern weiter zu verbessern.

3 Stand der Forschung/Stand der Technik

3.1 Gebäude in Holztafelbauweise

Im Holzbau ist eine Vielzahl unterschiedlicher Konstruktionsweisen vom Fachwerkhaus über Blockhäuser bis hin zu anspruchsvollen Massivholzkonstruktionen möglich. Wesentliche Aspekte zur Beurteilung einer Bauweise sind dabei der Wärme-, Feuchte-, Holz-, Schall- und Brandschutz.

Holztafelbau

Kennzeichnend für diese Holzbauweise ist ein tragender Rahmen aus stumpf gestoßenen Hölzern und aussteifenden Beplankungen aus Holz- bzw. Gipswerkstoffplatten. Die Beplankung wird durch Nägel, Klammern oder Schrauben befestigt. Während die Stiele der vertikalen Lastabtragung dienen, steifen die eingesetzten Werkstoffplatten das Gebäude aus. Die verwendeten Hölzer sind im Vergleich zu alten Fachwerkbauten wesentlich kleiner, technisch getrocknet und damit maßhaltig. Das Konstruktionsraster ist von den Plattenwerkstoffen abhängig. Die vertikalen Hölzer werden im Raster von 625–1000 mm angeordnet. Die Gefache zwischen den Hölzern werden vollständig gedämmt. Die Fassadengestaltung kann frei gewählt werden. Putze auf Wärmedämmverbundsystemen, Mauerwerkvorsatzschalen oder Außenbekleidungen aus Holz sind nur einige Beispiele. Durch die durchgehenden Fassaden ist die tragende Konstruktion der Häuser vor der Witterung geschützt [4]. In Bild 3.2 bis Bild 3.4 sind mögliche Tafelaufbauten und im Weiteren verwendete Fachbegriffe dargestellt [5].

Der Unterschied zwischen Holzrahmen- und Holztafelbau besteht nur im Grad der Vorfertigung, das Konstruktionsprinzip ist identisch. Gebäude in Holztafelbauweise besitzen einen höheren Vorfertigungsgrad. Beide Bauweisen erlauben die regendichte Montage eines Ein- und Zweifamilienhauses in einem Arbeitstag. Heute üblich ist in Deutschland die „platformframe“ Bauweise, bei der die Wände stockwerkshoch ausgeführt werden. Deckenelemente liegen auf der darunter stehenden Wand auf, das nächste Geschosselement wird wiederum auf die Decke gestellt. Der Vorfertigungsgrad moderner Zimmereibetriebe umfasst die wind- und wasserdichte Hülle mit Fenstern und Fassade. Als alternative Konstruktion steht die so genannte „balloon-frame“ Bauweise zur Verfügung. In diesem Fall gehen die Wandelemente über die gesamte Gebäudehöhe durch und bilden eine vollständige Außenhülle (balloon).

Aus der Kombination beider Bauweisen hat sich das „quasi-ballon-framing“ entwickelt. Auch hier wird im Prinzip eine durchgehende Hülle erzeugt. Es erfolgt jedoch eine Trennung der Tafелеlemente oberhalb der Rohdecke. Vor allem Ein- und Zweifamilienhäuser werden in Holztafel-/Holzrahmenbauweise errichtet. Mit den neuen Landesbauordnungen sind heute dreigeschossige und zukünftig bis zu fünfgeschossige Wohn- und Bürobauten in Holzbauweise möglich. Breite Anwendung finden die Bauweisen zusätzlich bei Aufstockungen im Bestand. Der Holztafelbau wird im Volksmund als Fertigbauweise bezeichnet, da die Vorfertigung sehr groß ist und geschlossene Wandelemente inklusive Wärmedämmung und Fenstern in der Werkhalle erstellt werden. Die gesamten geschosshohen Tafeln werden dann auf die Baustelle transportiert und montiert.

Die hohe Vorfertigung kommt dem Holztafel-/Holzrahmenbau zugute, da die Elemente im Trockenen gefertigt und die Qualität gesichert werden kann. Die eigentliche Elementfertigung, bei der Wand-, Giebel-, Decken- und Dachtafeln auf Bearbeitungszentren, Abbundanlagen und Nagelbrücken gefertigt werden, findet teilautomatisch statt. Die Installation der Haustechnik und der Dämmmaterialien erfolgt teilweise manuell, wobei das Setzen von Wandanschlussbohrungen und Elektrodosen ebenfalls maschinell auf Nagelbrücken erfolgen kann. Auf der Baustelle erfolgt schließlich die Montage der einzelnen Wand- und Deckenelemente manuell unter Zuhilfenahme entsprechender Hebeeinrichtungen.

Holzmassivbau

Der Holzmassivbau verwendet als tragende und raumabschließende Bauteile Brettstapel- (genagelt), Brettlagen- oder Brettschichtholzelemente (geleimt). Sie werden als massive, flächige Decken- oder Wandelemente eingesetzt. Die häufig zum Raum hin sichtbaren Konstruktionen erzeugen durch ihre Masse und ihr Feuchtespeichervermögen ein sehr angenehmes Raumklima. Die sehr robusten Konstruktionen werden meist werksseitig vollautomatisch bearbeitet. Die Dämmung der Bauteile erfolgt im Normalfall auf der Außenseite durch vollflächige Dämmlagen oder durch Gefachdämmungen zwischen aufgeschraubten Trägerkonstruktionen. Innen- und Außenbekleidungen sind wie im Holztafel-/Holzrahmenbau frei wählbar.

Der Übergang zwischen den Bauweisen ist gleitend. Beispielsweise werden Holzrahmenbauten mit Brettstapeldecken kombiniert.



Bild 3.1: Holztafelbau und Holzmassivbau

Wärmeschutz

Die Bedeutung des Wärmeschutzes hat als Folge der Energiekrise in den siebziger Jahren deutlich zugenommen, vor der das Thema Energieeinsparung nur eine untergeordnete Rolle spielte. Seit 2002 gilt der Niedrigenergiestandard als baulicher Standard. Als Folge sind neben der direkten Energieeinsparung ein behagliches Innenraumklima und warme Innenflächen hervorzuheben. Erreicht wird die gewünschte Wärmedämmung durch konsequente, sorgfältig ausgeführte Volldämmung zwischen einzelnen Wandstielen und Sparren sowie weiteren Dämmelementen in den einzelnen Schichten des Wandaufbaus.

Feuchteschutz

Die Funktion einzelner Bauteile wird vermindert, sobald Feuchtigkeit in ein Gebäude eindringt. Dies kann sich in reduzierter Dämmwirkung, Abplatzungen durch Frosteinwirkungen oder auch durch Ansiedeln von Pilzen und Algen auswirken. Feuchteschutz umfasst Schutz vor Niederschlag und vor nutzungsbedingter Feuchte. In der Praxis wird das erzielt durch hinterlüftete Fassaden oder Putz auf Wärmedämmverbundsystemen. Dichte Anschlüsse zwischen Bauelementen müssen sorgfältig mechanisch, d.h. wartungsarm, ausgeführt werden.

Im Rauminnern werden speziell in Küchen und Feuchträumen Dichtungssysteme für Rohrdurchführungen und Wandbeplankungen vorgesehen. Um Tauwasser in den Wänden zu vermeiden, ist eine luftdichte Gebäudehülle notwendig. Der Einsatz von Dampfsperren ist rechnerisch nachweisbar und sinnvoll. Die Konstruktionen werden so diffusionsoffen wie möglich ausgeführt, das Rücktrocknungsvermögen muss so groß wie möglich sein. Hinterlüftete Fassaden erzeugen eine durchgängige zusätzliche Ebene vor der eigentlichen Wand. Ungewollt eindringende Feuchte wird durch eine zweite Wasser führende Schicht unmittelbar auf der Konstruktion sicher abgeleitet. Diese Schicht wird heute aus Polyethylenfliesen oder paraffinierten Holzwerkstoffen ausgebildet.

Neben dampfdichten Gebäuden etablieren sich speziell im Holztafelbau mehr und mehr diffusionsoffene Wandaufbauten. Die einzelnen Wandschichten besitzen ein hohes Austrocknungsvermögen nach Innen und Außen. Dies ist nur durch die Weiterentwicklung moderner Baustoffe möglich.

Holzschutz

Für die Werthaltigkeit und Nutzungsfähigkeit eines Gebäudes ist der Holzschutz ein wesentlicher Bestandteil. In DIN 68800 wird der konstruktive Holzschutz deutlich über den chemisch vorbeugenden Holzschutz gestellt. Wesentlich für diese Wertung ist die jahrhundertealte Erfahrung, dass eine kurzzeitige Befeuchtung von Holzteilen vollkommen unschädlich ist, sofern eine vollständige Austrocknung gewährleistet ist. Der gute Zustand zum Teil jahrhundertalter Gebäude beweist dies. Somit wird für Holztafelbauten die Verwendung von Baustoffen mit hohem Austrocknungsvermögen favorisiert. Dadurch gelten moderne Holzhäuser ohne vorbeugenden chemischen Holzschutz als Stand der Technik.

Schallschutz

Die bisher genannten Aspekte haben Einfluss auf die technische Nutzbarkeit des Gebäudes. Zusätzlich stellt aber auch der Nutzer noch weitere Anforderungen. Der Schutz vor Außenlärm und gegen innere Lärmquellen ist heute ein wesentlicher Aspekt zur Beurteilung der Wohnqualität. Viele Ausführungsbeispiele führten in den letzten Jahrzehnten zu guten Erfahrungen und damit zu Verbesserungen in der Ausführung [6]. Im Holzbau wird weniger mit Masse als mit intelligenten Kombinationen der Werkstoffe und Anschlüsse gearbeitet. Nach der Norm 4109 werden an Wohngebäuden nur für Außenwände Anforderungen an den Schallschutz gestellt. Für Innenwand- und Deckenaufbauten werden aber Empfehlungen in Beispielen angeboten. Durch richtige und sorgfältige Planung und Ausführung sind auch im Holztafelbau hohe Anforderungen an den Schallschutz gut zu erfüllen.

Die schalldämmende Qualität einer Außenwand wird erst durch das Zusammenwirken der einzelnen Flächenanteile von Öffnungen und Wandkörpern erreicht. Bei Decken kann der

Schallschutz durch geschickte Materialwahl und sorgfältige Montage sehr gute Werte erreichen. Durch entsprechende Materialkombinationen wird sowohl ein guter Tritt- als auch Luftschallschutz erreicht. Bei Innenwänden werden heute unterschiedliche Wandaufbauten eingesetzt, während vor einigen Jahren häufig einfache Wandaufbauten ohne Hohlraumdämmung mit nur einfacher Beplankung gefertigt wurden. Heute werden auch höhere Anforderungen bei Bedarf leicht erfüllt. In Feuchtbereichen wird häufig eine eigene Installationsebene gefertigt, die sich zusätzlich günstig auf den Schallschutz auswirkt.

Brandsschutz

Holz und Holzwerkstoffe in üblichen Abmessungen erfüllen uneingeschränkt die Forderung nach normalentflammbaren Baustoffen. Statistisch besehen verursachen Holzhäuser keine erhöhte Brandgefährdung als andere Bauweisen. Trennende Bauteile zwischen unterschiedlich genutzten Einheiten müssen in Gebäuden geringer Höhe feuerhemmend sein. Auch diese Forderung wird durch geschickte Baustoffwahl leicht erfüllt.

Ausführung und Werkstoffauswahl

Sämtliche Holzbaubetriebe, die geschlossene Wandtafeln fertigen, unterliegen einer Eigen- und Fremdüberwachung. Des Weiteren sind viele Hersteller freiwillig in Güte- und Qualitätsgemeinschaften zusammengeschlossen. Als Resultat gewinnt die Produktqualität durch eine erweiterte Qualitätskontrolle innerhalb der Satzungen dieser Vereinigungen. Die Überprüfungen führen meist universitätsnahe Materialforschungs- und -prüfanstalten durch. Den Bauherren geben diese Prüfungen die Sicherheit, eine garantiert zugesagte Qualität auch wirklich erhalten zu haben.

Einen wesentlichen Anteil an der Qualitätsverbesserung im Holzhausbau hat die sprunghafte Entwicklung der eingesetzten Werkstoffe. Die standardisierte Verwendung getrockneter Vollhölzer (Konstruktionsvollholz KVH) ist inzwischen in DIN 18 334 – VOB Teil C, Zimmerarbeiten, Ausgabe 2000 – mit zusätzlichen speziellen Regeln für den Holzhausbau verankert.

Brettschichtholz wird heute Dank maschineller Festigkeitssortierung der Brettlamellen mit bis zu 1,5 fachen Festigkeiten gegenüber früheren Produkten angeboten. Weiterentwickelte Holzwerkstoffe wie Oriented Strand Board (OSB) sind nicht nur wesentlich feuchteunempfindlicher als die früheren Spanplatten, sondern tragen als großformatige Platten auch zur Fugenminimierung bei. Eine Vielzahl weiterer, neuer Werkstoffe und Verbundbauteile machen den heutigen Holzbau zu einer High-Tech-Bauweise mit vielen gestalterischen und konstruktiven Möglichkeiten.

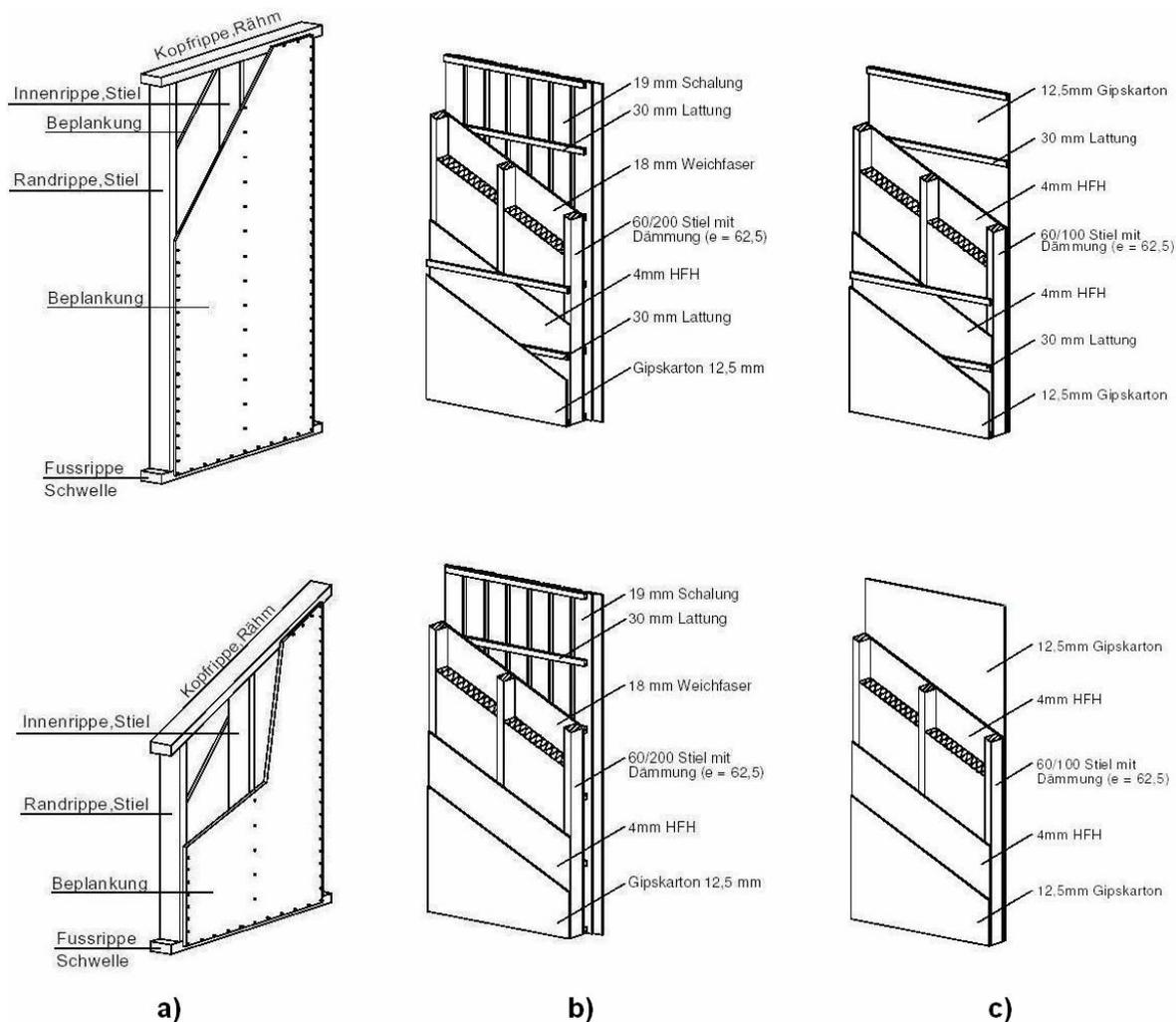


Bild 3.2: Aufbau einer Wandtafel – a) Bezeichnungen b) Außenwand c) Innenwand

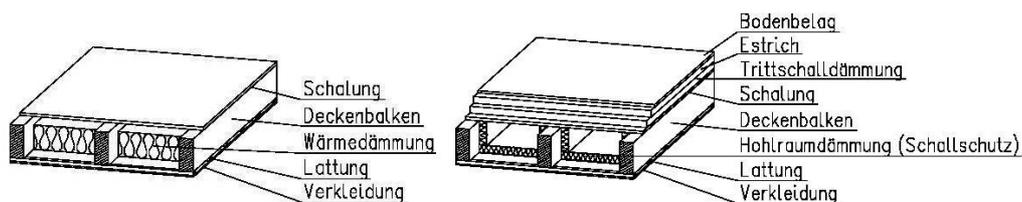


Bild 3.3: Aufbau einer Deckentafel

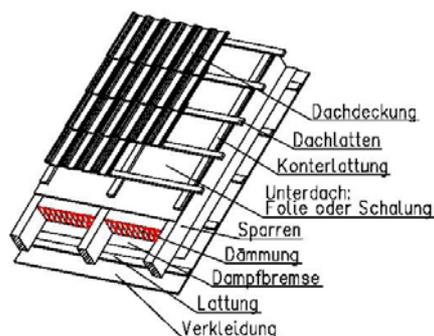


Bild 3.4: Aufbau einer Dachtafel

3.2 Produktionstechnik bei der Vorfertigung im Werk

Der Holztafelbau zeichnet sich durch einen hohen Grad der Vorfertigung aus. Der Vorteil der industriellen Werksfertigung ist, dass sämtliche Außen- und Innenwände, Decken und auch der Dachstuhl in geschlossenen und damit trockenen Werkshallen hergestellt werden. Dies bildet die Grundlage für das Erreichen hoher Produktivität und gleich bleibender, kontrollierter Qualität. Die Montage des Gebäudes auf dem vorbereiteten Grundstück kann auf diese Weise innerhalb von maximal 48 Stunden – oftmals sogar innerhalb eines Tages - abgeschlossen werden [7].

Die Holzfertigbaubranche ist geprägt von in der Regel kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU), deren Fertigung eine Vielzahl manueller Tätigkeiten aufweist. Unterstützend kommt gezielt Maschinenteknik zum Einsatz, die von Spezialmaschinenherstellern geliefert wird. Eine Ausnahme bildet die Produktionsanlage der Fa. ExNorm in Steinheim (heute zur Kampa AG gehörend), die auf einen nahezu vollautomatisierten Ablauf setzt.

Neben einer flexiblen Produktionstechnik erfordert die Werksfertigung eine effiziente Produktionsplanung und Arbeitsvorbereitung. Bild 3.5 stellt im Überblick den Gesamtablauf bei der Planung und Fertigung eines Holzhauses dar. Kernstück ist das virtuelle räumliche Gebäudemodell, das im 3D-CAD/CAM-System erstellt wird. Die Entwurfsdaten können vom Architekten mittels geeigneter Schnittstellen bzw. Produktmodelle zur Verfügung gestellt werden. Hierbei fehlt allerdings noch eine Durchgängigkeit der Schnittstellen über die einzelnen Planungsebenen hinweg. Bei der Durchkonstruktion des Gebäudeentwurfs wird auf eine breite Wissensbasis zurückgegriffen, die die Regeln der Technik (Statik, Bauphysik...), Standardaufbauten von Wänden, Decken, Dächern und Verbindungen sowie Details zur Einbindung der Haustechnik bereithält.

Durch die Abbildung des Gebäudes mit sämtlichen konstruktiven Details als virtuelles Modell im Rechner können nach dem heutigen Stand der Technik die Produktionsanlagen der Holzfertighaushersteller mit den notwendigen fertigungsrelevanten Informationen versorgt werden. Hierzu zählt die Anfertigung von Stücklisten zur Veranlassung der Materialbereitstellung, die Erstellung von Einzelstückzeichnungen für den Fall manueller Fertigung oder die Generierung von NC-Programmen für automatisierte Fertigungseinrichtungen. Montagepläne leiten die Montage der vorgefertigten Tafeln auf der Baustelle an.

Im Falle einer Automatisierung der Produktion ist darüber hinaus ein Produktionsplanungs- und -steuerungssystem (PPS) erforderlich, das unter Zugriff auf betriebswirtschaftliche Daten aus dem Gebäudemodell die entsprechenden Arbeitspläne und Fertigungsaufträge erstellt. Derartige Systeme werden bislang nur von den Herstellern von Spezialmaschinen für den Holzbau, zugeschnitten auf das eigene Maschinenspektrum, angeboten.

In diesem Zusammenhang ist eine virtuelle Produktionsumgebung denkbar, die Kennzahlen wie Durchlaufzeiten, Maschinenauslastungen und Produktionskosten ermittelt. Da die zu fertigenden Bauteile und zugehörige Geometrien im CAD-System vorliegen, würde es weiterhin möglich, im Vorfeld der realen Produktion in einer virtuellen Fertigungsumgebung im Rechner den Herstellungsprozess des Gebäudes zu simulieren. So könnten vorab NC-Programme getestet, eventuelle Kollisionen vermieden oder die Anordnung von Maschinen und Fertigungshilfsmitteln optimiert werden. Die Voraussetzung ist eine Wissensbasis, die die im Zusammenhang mit der Produktion stehenden Daten wie Material- und Maschinenkosten, Bearbeitungszeiten oder Förderwege zur Verfügung stellt.

Eine derartige virtuelle Produktionsumgebung, verknüpft mit einer Wissensbasis und dem 3D-Gebäudemodell, existiert im heutigen Holztafelbau noch nicht. Diese Lücke soll durch die im vorliegenden Arbeitsbericht beschriebenen Werkzeuge und Ergebnisse geschlossen werden.

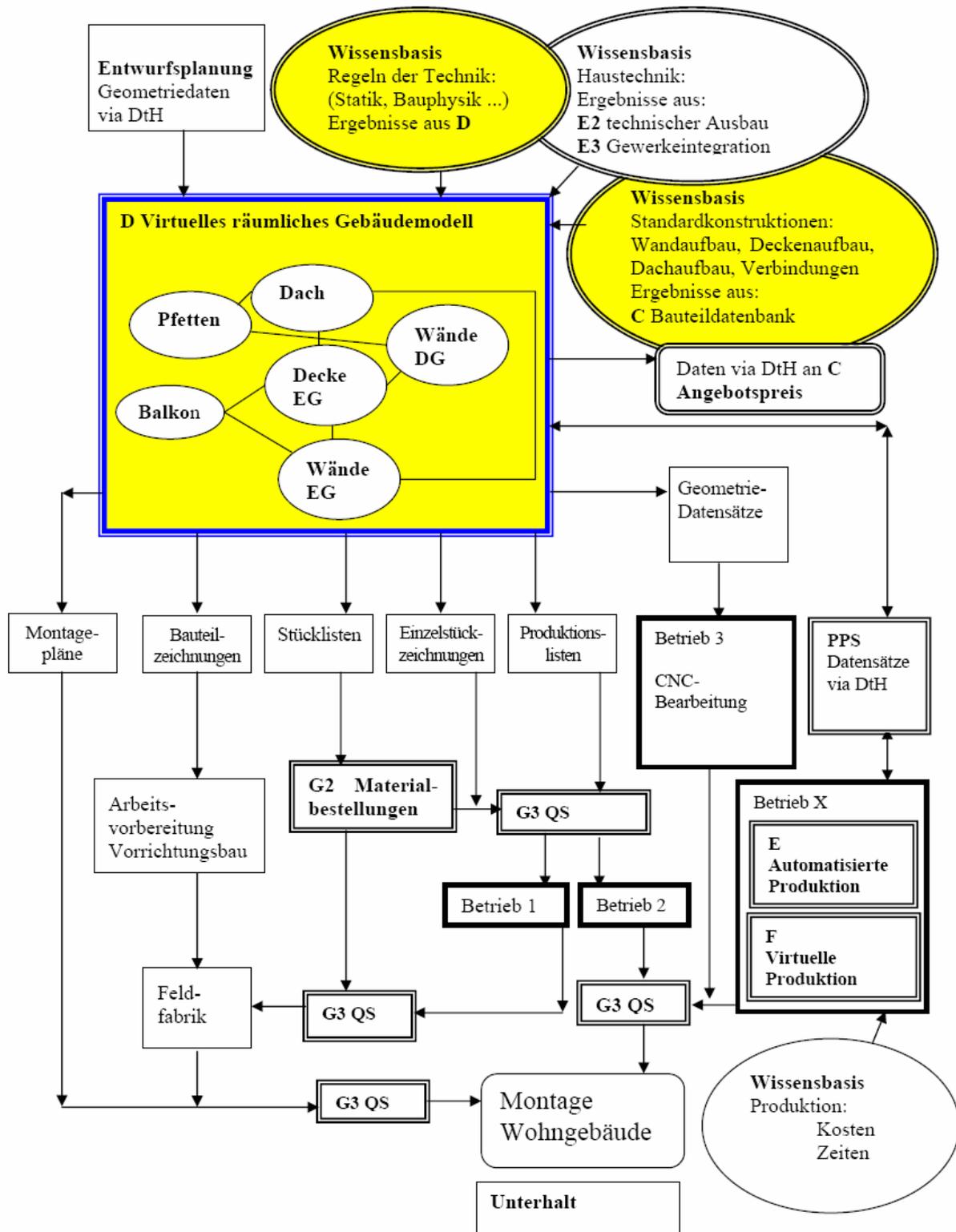


Bild 3.5: Planung und Fertigung von Holzhäusern

3.2.1 Produktionstechnik in kleinen und mittelständischen Unternehmen

Bauteilefertigung

Bei der Werksfertigung können verschiedene Abschnitte im Herstellungsablauf eines Fertighauses unterschieden werden [5]. Die einzelnen Bauteile eines Tafelements (Rippen, Platten, usw.) werden zunächst als Einzelteil hergestellt. Die Fertigung der Rippen kann entweder manuell oder mit Hilfe CNC-gesteuerter Werkzeugmaschinen durchgeführt werden. Dabei ermöglichen die automatischen Werkzeugmaschinen eine schnelle Bearbeitung bei gleich bleibender Qualität auch im Falle komplizierter Bauteilgeometrie.

Üblicherweise werden für die Balkenbearbeitung sog. Abbundanlagen eingesetzt, die die Balken zunächst auf Länge sägen und weiterhin Säge-, Fräs- und Bohroperationen durchführen (Bild 3.6). Abbundanlagen können für alle im Holz-, Blockhaus- und Fertighausbau anfallenden Bearbeitungsvorgänge eingesetzt werden. Die Maschinen sind in der Lage, Bretter (auch stapelweise), Balken, Rund- und Profilholzer zu bearbeiten. Die Abläufe in einer Abbundanlage sind vollständig automatisiert und erfolgen anhand von CAD-Daten, so dass die Balken nur eingelegt und nach der Bearbeitung wieder entnommen werden müssen, was zumeist manuell geschieht.

Die Vorbearbeitung der flächigen Bauteile wie Holzwerkstoffplatten und Gipskartonplatten beschränkt sich im Regelfall auf den Zuschnitt. Hierzu werden Standard-Zuschnittanlagen, bestehend aus einer Vertikal- oder Horizontalplattensäge mit zugehöriger Werkstückversorgung eingesetzt.



Bild 3.6: Automatische Abbundanlage vom Typ Hundegger K2 [8]

Tafelfertigung

Die Bauteile einer Tafel werden zusammengesetzt und zu einer Tafel verbunden. Weiterhin können noch Einbauteile eingesetzt (Elektrik, Sanitär, Dämmmaterialien usw.) und Bearbeitungen an der kompletten Tafel (Beplankung fixieren, Fenster-/Türöffnungen aussägen, Wandanschlüsse und Elektroboxen bohren) vorgenommen werden.

Die Tafelfertigung ist üblicherweise in mehrere Schritte aufgeteilt, die jeweils unterschiedliche Maschinen benötigen. Auf einem Zimmermeistertisch (Bild 3.7 links) werden zunächst

die Rippen des Rahmens zum so genannten Riegelwerk aufgelegt und ausgerichtet und dann durch die flächigen Bauteile (Platten, Folie, Schalung etc.) abgeschlossen. Das Auflegen der Bauteile erfolgt zumeist manuell, bei großen Bauteilen wie Kopf- und Fußrippen (Rähm/Schwelle) oder Dachsparren unter Zuhilfenahme eines Hallenkrans.

Da eine Tafel üblicherweise von zwei Seiten aus bearbeitet werden muss, bieten die Zimmermeistertische die zusätzliche Möglichkeit, die Arbeitsfläche senkrecht aufzustellen und die Tafel auf einen weiteren Tisch zu wenden. Werden zwei Zimmermeistertische mit Aufstell- und Verfahreinrichtungen so kombiniert, dass eine direkte Übergabe von einem Tisch auf den nächsten möglich ist, spricht man von einem "Schmetterlingswender" (Bild 3.7 rechts).

Der Zusammenhalt der Bauteile wird durch Schrauben, Nägel oder Klammern hergestellt, die durch eine so genannte Multifunktions- oder Nagelbrücke (Bild 3.8) automatisch gesetzt werden. Eine Multifunktionsbrücke wird immer in Kombination mit einem Tisch eingesetzt, der die Tafel aufnimmt, über dem die Brücke wie ein Portal verfahrbar angeordnet ist. Die Multifunktionsbrücke bietet weiterhin die Möglichkeit, zusätzliche Bearbeitungsaggregate aufzunehmen (zum Sägen, Fräsen, Kleben, Verputzen usw.), so dass damit ein Großteil der Arbeitsschritte vollautomatisch ausgeführt werden kann.



Bild 3.7: Zimmermeistertisch (links) und Schmetterlingswender (rechts) [9]



Bild 3.8: Multifunktionsbrücke vom Typ Weinmann WMS 150 [9]

Baugruppenfertigung

Bestimmte Bestandteile eines Hauses werden nicht in Tafelbauweise ausgeführt (Balkone, Erker, Wintergärten usw.) und müssen in der Baugruppenfertigung hergestellt werden. Hier können auch Fenster und Türen gefertigt werden, wenn diese nicht als Kaufteile bezogen werden.

Die Baugruppenfertigung ist normalerweise als Werkstatt- oder Inselfertigung aufgebaut, da hier eine hohe Flexibilität hinsichtlich der herzustellenden Teile notwendig ist. Außerdem machen die Teile aus der Baugruppenfertigung nur einen geringen Anteil an der Gesamtzahl der Teile eines Fertighauses aus.

Transportsysteme und Lager

Lager sind für Rohmaterial und Bauteile notwendig, um von hier aus die Teile den einzelnen Fertigungsbereichen zuzuführen. Da der Zusammenbau einer Tafel erst sinnvoll ist, wenn sämtliche Einzelteile dieser Tafel vorhanden sind bzw. hergestellt worden sind, müssen diese Teile so gelagert und erfasst werden, dass sie zum richtigen Zeitpunkt ausgelagert werden können.

Der Transport der Tafelelemente erfolgt aufgrund ihrer Abmessungen und des Gewichts üblicherweise mit Kränen oder Rollenbahnen. Rollenbahnen kommen dann verstärkt zum Einsatz, wenn die Fertigung eine Linienform aufweist und die Tafeln immer eine feste Reihenfolge haben, in der sie die Stationen durchlaufen. Im Idealfall können Tafeln direkt von einem Zimmermeistertisch auf den nächsten übergeben werden, allerdings setzt dies verfahrbare Tische mit Aufstellfunktion voraus.

Die Einzelteile (Rippen, Platten, etc.) können ebenfalls über Kräne, Gabelstapler oder Rollenbahnen transportiert werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die möglichen Transportwege deutlich flexibler ausgelegt werden müssen, da z.B. die Rippen aus der Abbundanlage normalerweise nicht ausschließlich zu einem bestimmten Zimmermeistertisch umgelagert werden, sondern je nach vorliegendem Auftrag unterschiedliche Zielorte erhalten können. Daher kommen auch andere Lösungen für den Transport (Fahrerloses Transportsystem, Hängebahnen) in Frage, die diese Anforderungen erfüllen.

3.2.2 Vollautomatische Fertigung bei der Fa. ExNorm, Steinheim

Im Gegensatz zur noch stark handwerklich geprägten Fertigung der kleinen und mittelständischen Holzfertigungsbauunternehmen setzt die Fa. ExNorm auf einen vollständig CNC-gesteuerten und automatisierten Produktionsablauf. Lediglich die Anordnung und die Fixierung von Bauteilen für die Giebel oder die Fertigung individueller Sonderteile wie Balkone erfolgt manuell [10].

Die Tafelfertigung wird auf zwei parallel angeordneten Produktionslinien durchgeführt (Bild 3.9 a)). Sämtliche stabförmigen und flächigen Bauteile werden vorab zugeschnitten und im Falle der Beplankung (Holzwerkstoff- und Gipskartonplatten) in automatisierten, mehrstöckigen Lagereinrichtungen bereitgestellt. Nach dem automatischen Auflegen des Riegelwerks (b)) erfolgt die Fixierung der Rippen und die Vernagelung der Beplankung durch Multifunktionsbrücken der Fa. Weinmann. Zum Wenden der Tafelelemente kommen Schmetterlingswender zum Einsatz. Diese automatischen Schwenkvorrichtungen dienen der Übergabe

bzw. Entnahme der Tafeln sowie zum Positionieren und Transportieren in der Fertigungslinie (c)).

Das Isoliermaterial besteht aus Dämmfasern. Die Versorgung der einzelnen Bearbeitungsstationen mit Dämm- und Folienmaterial erfolgt über ein System von Deckenkränen, das auf ein Hochlager zugreift (d)). Die benötigten Rollen werden beim Transport mittels Zangen fixiert und über Schächte an die jeweilige Station geleitet. Die Auflage der Dampfsperre (Folie) wird manuell durchgeführt, während die Vernagelung wieder automatisiert mit Hilfe einer Nagelbrücke erfolgt. Der Einsatz von Fenstern und Türen geschieht ebenfalls manuell durch den Werker, die benötigten Bauteile werden über ein separates Hochlager bereitgestellt.

Zur Realisierung dieser Anlage war der Neubau einer 17.000 m² großen Fertigungshalle notwendig. Der Betrieb wurde für eine Stückzahl von 1000 Häusern pro Jahr projektiert. Diese Auslastung konnte jedoch bislang nicht erreicht werden, der insolvente Betrieb wurde von der Kampa AG übernommen. Zur Einsparung von Personal- und Maschinenkosten wird nur ein Teil der Anlage tatsächlich zur Fertigung eingesetzt, das System zur Bereitstellung von Dämmstoffen bleibt beispielsweise ungenutzt. Es wird deutlich, dass Automatisierungslösungen nur bis zu einem gewissen Grad – insbesondere unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten – sinnvoll sind. Für kleinere Unternehmen, die nur mittlere Stückzahlen im Bereich von maximal 100 Häusern pro Jahr erreichen, müssen daher Hallenneubauten und umfangreiche Neuinvestitionen vermieden und der Auslastung der Anlage höchste Priorität verliehen werden.

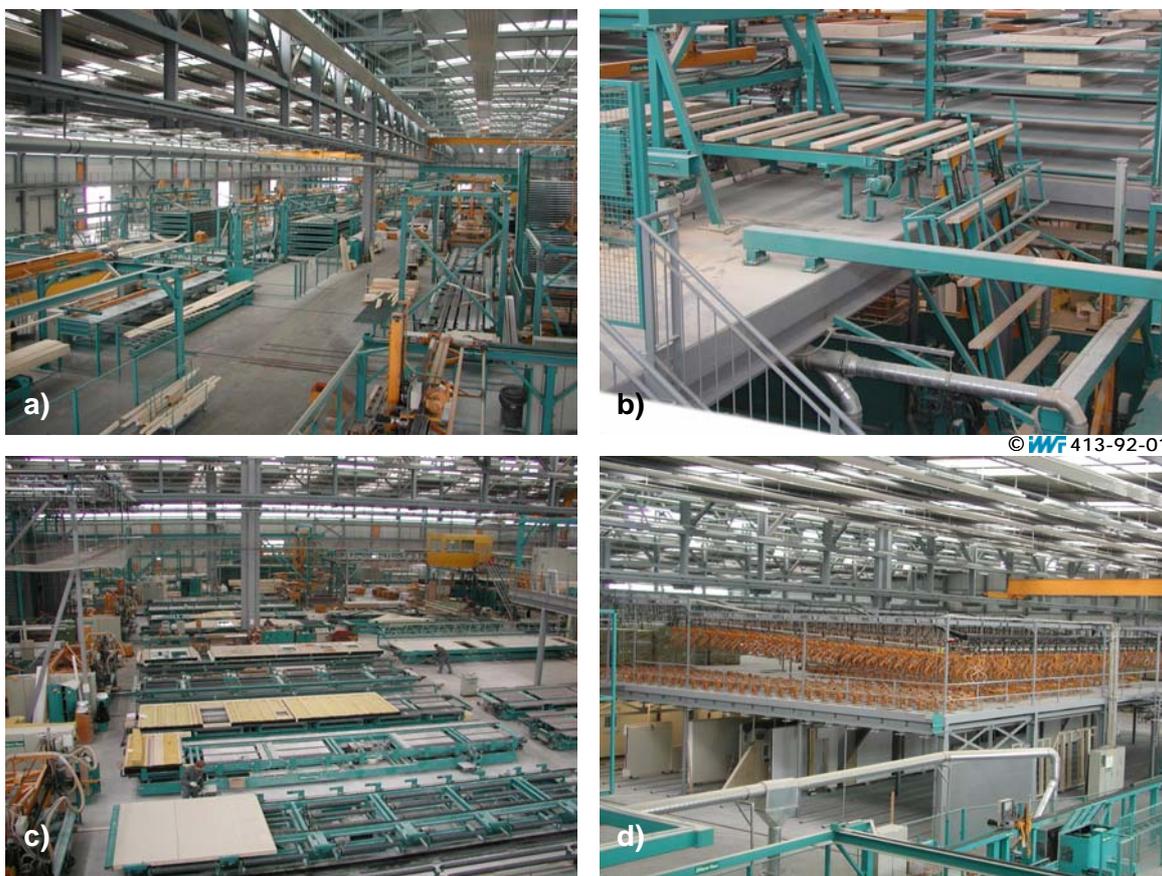


Bild 3.9: Produktionsanlage der Fa. ExNorm zur automatisierten Herstellung von Häusern in Tafelbauweise

4 Lösungsweg

4.1 Analyse des Fertigungsablaufs

In Zusammenarbeit mit der Fa. Baukmeier, Hameln, wurde die Übersicht einer Produktionsanlage für Holzhäuser in Holztafelbauart nach dem Stand der Technik hinsichtlich des Automatisierungsgrades erstellt. Die dabei analysierten Montage- und Bearbeitungsschritte sind allgemeingültig und sowohl auf die Produktion als auch die Produkte beliebiger Holzfer-tighaushersteller übertragbar. So unterliegt auch der Fertigungsablauf der Fa. Exnorm denselben Montage- und Bearbeitungsreihenfolgen.

Bild 4.1 stellt im Überblick den Ablauf bei der Herstellung von Gebäuden in Holztafelbauweise dar. Die Abbundanlage dient der Fertigung der Rippen (stabförmige Bauteile) als Grundbestandteil jedes Tafелеlementes. Die Rippen werden vom Abbund zu den Fertigungsbereichen für Wand-, Dach- und Deckentafeln (flächige Bauteile) transportiert. Die Wandtafelfertigung wird unterteilt nach Innen- und Außenwandtafeln. Während Innenwände genau wie die fertigen Dach- und Deckentafeln direkt in den Versand-/Verladebereich gefördert werden, durchlaufen die Außenwände zusätzlich die Finishlinie, so dass sie baustellenfertig mit bereits montierten Fenstern, Türen oder Rollläden das Werk verlassen.

Die beschriebene Aufteilung ergibt sich infolge der unterschiedlichen Anforderungen an das Multifunktionsbauteil Tafel, das statisch und bauphysikalisch bei Decken- bzw. Außenwandtafeln sehr unterschiedliche Aufgaben zu übernehmen hat.

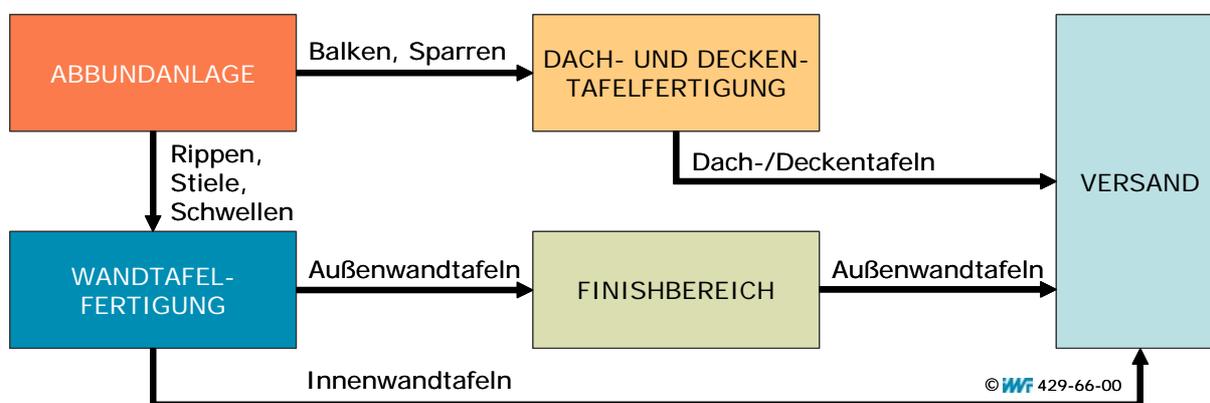


Bild 4.1: Übersicht des Fertigungsablaufs bei der Herstellung von Holzhäusern in Tafelbauweise

4.1.1 Abbundprozess

Die Herstellung der stabförmigen Bauteile erfolgt im Falle der Fa. Baukmeier auf einer Abbundanlage „K2“ des Maschinenherstellers Hundegger.

Ein Mitarbeiter holt die benötigten Rohbalken mit einem Gabelstapler direkt aus dem Holzlager und fährt sie auf die Maschine. Die nötigen CNC-Daten über Längen, Ausfräsungen für Elektrik und Wasser oder die Bearbeitung der Kopfenden erhält die Maschine über ein firmeninternes Netzwerk direkt aus der Arbeitsvorbereitung. Die Anlage fertigt nun

automatisch die Stiele, Riegel, Pfetten und Balken. Bleiben die Hölzer nach dem Einbau sichtbar, so werden sie auch noch auf der Anlage gehobelt und geschliffen. Abschließend werden sie von dem Mitarbeiter mit einem umweltfreundlichen Anstrich versehen. Die Bauteile werden zudem nummeriert und beschriftet.

Die fertigen Bauteile werden nun nach Einsatzort sortiert. Der Hallenaufbau erlaubt einen Abtransport per Kran. So werden die Hölzer für die Dach- und Deckenproduktion direkt auf den benachbarten Fertigungstisch abgelegt und dort gleich weiterverarbeitet. Die Rippen, Stiele und Schwellen werden je nach Einsatzort per Hallenkran und Gabelstapler an die jeweilige Produktionsstation geliefert, wo sie dann von den zuständigen Mitarbeitern zum Riegelwerk zusammengefügt werden.

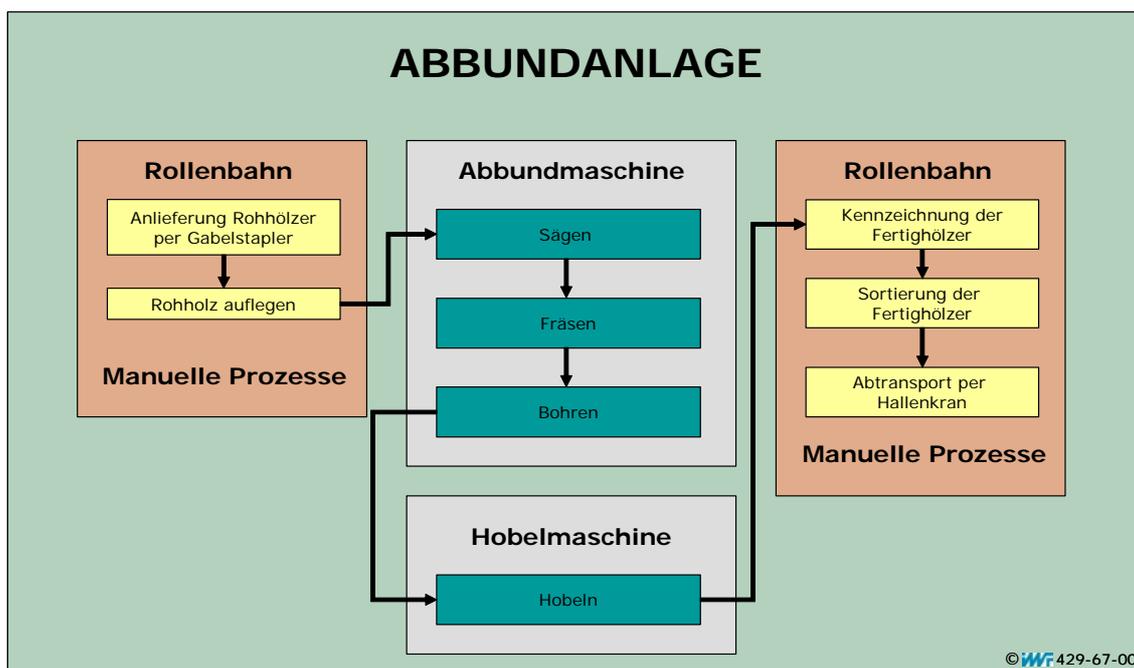


Bild 4.2: Fertigungsablauf im Bereich des Abbunds

4.1.2 Außen- und Innenwandtafelfertigung

Die Station, an der die Wandelemente gefertigt werden, besteht aus zwei Tischen. Auf dem ersten Tisch werden die Rippen von einem Arbeiter zusammengelegt und fixiert. Für den späteren Transport werden am Riegelwerk Gurtschlaufen angebracht. Bei Außenwänden wird nun die Dampfsperre in Form einer PE-Folie auf den Rahmen gelegt. Der Mitarbeiter transportiert die Fermacellplatte mit einem Schwenkkran mit Vakuumgreifvorrichtung vom Plattenstapel zur Rahmenkonstruktion und legt sie auf. Nachdem er sie manuell fixiert hat, kommt die Multifunktionsbrücke der Firma Weinmann zu Einsatz. Sie ist mit einem Werkzeugmagazin ausgestattet und kann über die ganze Länge des Tisches verfahren werden. Über ein Schienensystem fährt die Multifunktionsbrücke heran und führt alle ausstehenden Tätigkeiten aus. Hierzu zählen das Festnageln der Platte, das Ausschneiden von Fenstern und Türen, das Absägen der Plattenüberstände und das Setzen der Bohrungen für Steckdosen und Wandverbindungen.

Sind diese Arbeitsschritte beendet, wird das Element durch einen Schmetterlingswender auf den zweiten Maschinentisch gewendet. Die Tische klappen gegeneinander hoch, wie zwei Schmetterlingsflügel. Die Halbtafel wird dann an den zweiten Tisch übergeben und auf der

bereits fertig gestellten Seite abgelegt, um nun von der noch offenen Seite Dämmstoffe und Installationsmaterialien einbringen zu können.

Manuell werden, wenn benötigt, Sanitärblöcke, Entlüftungs- und Abwasserrohre eingebracht und mit PE-Schaum im Riegelwerk fixiert. Ebenfalls werden Zugschnüre zur Verlegung von Elektroleitungen eingelegt. Nun füllt ein Mitarbeiter die Hohlräume mit der „Rockwool“-Faserdämmung und legt obenauf weitere Zugschnüre, um den Elektroanschluss an der Außenseite zu ermöglichen. Mit dem Schwenkkran legt der Mitarbeiter die abschließende Fermacellplatte auf und fixiert sie.

Beendet wird die Tafelfertigung durch die Multifunktionsbrücke, die über das Schienensystem herangefahren wird. Sie vernagelt die Fermacellplatte, sägt Plattenüberstände ab, schneidet Fenster- und Türöffnungen aus und setzt Bohrungen für Steckdosen und Wandverbindungen.

Die Tafeln werden nun nach Außen- oder Innenwand getrennt. Die einbaufertigen Innenwände werden direkt mit dem Hallenkran zur Verladestation befördert, die Außenwände werden aufgerichtet und senkrecht zur Endmontage in die Finishlinie transportiert.

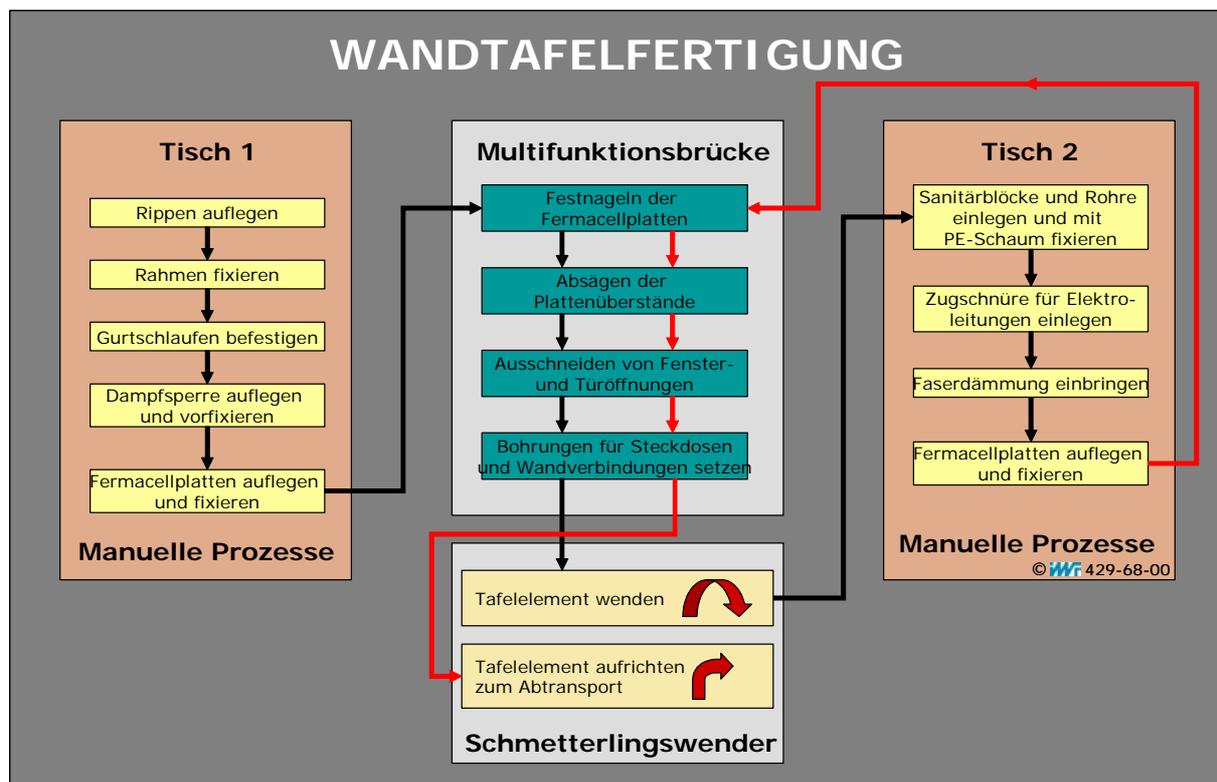


Bild 4.3: Fertigungsablauf im Bereich der Wandtafelherstellung

4.1.3 Dach- und Deckentafelfertigung

Die Dach- und Deckenproduktion wird ebenfalls auf zwei Arbeitstischen durchgeführt, zwischen denen ein Schmetterlingswender zum Wenden der Bauteile auf die fertig bearbeitete Unter- bzw. Innenseite bereitsteht.

Wie bei der Wandtafelherstellung werden auch hier erst die Balken bzw. Sparren ausgelegt und gegebenenfalls eine Dampfbremse in Form der PE-Folie aufgebracht. Im Gegensatz zur Wandproduktion werden vor der Beplankung die Latten aufgebracht und befestigt. All das

geschieht manuell, ebenso das Auflegen der Fermacellplatte und die anschließende Fixierung. Nun wird die Beplankung von der Weinmann-Brücke vernagelt und bündig gesägt.

Nach dem Wenden durch den Schmetterlingswender werden ähnlich wie bei der Wandproduktion manuell Abzugsrohre und eventuell Stahlträger eingelegt und die Hohlräume mit Wärme- oder Schalldämmstoffen ausgefüllt. Deckenelemente werden durch eine 18mm dicke Sperrholzplatte geschlossen, und durch die Weinmann-Brücke endbearbeitet.

Bei den Dachtafeln wird auf die Dämmschicht von einem Mitarbeiter das Unterdach, in diesem Fall die diffusionsoffene Folie, aufgebracht und fixiert. Darauf wird die Konterlattung befestigt. Das Festschießen und Kürzen der Lattung übernimmt die Multifunktionsbrücke. Ebenso werden die manuell aufgelegten und fixierten Dachlatten maschinell vernagelt und gekürzt.

Abschließend werden an Dach- und Deckentafeln die Tragegurte montiert, an denen die Bauteile per Hallenkran zur Verladestation befördert werden.

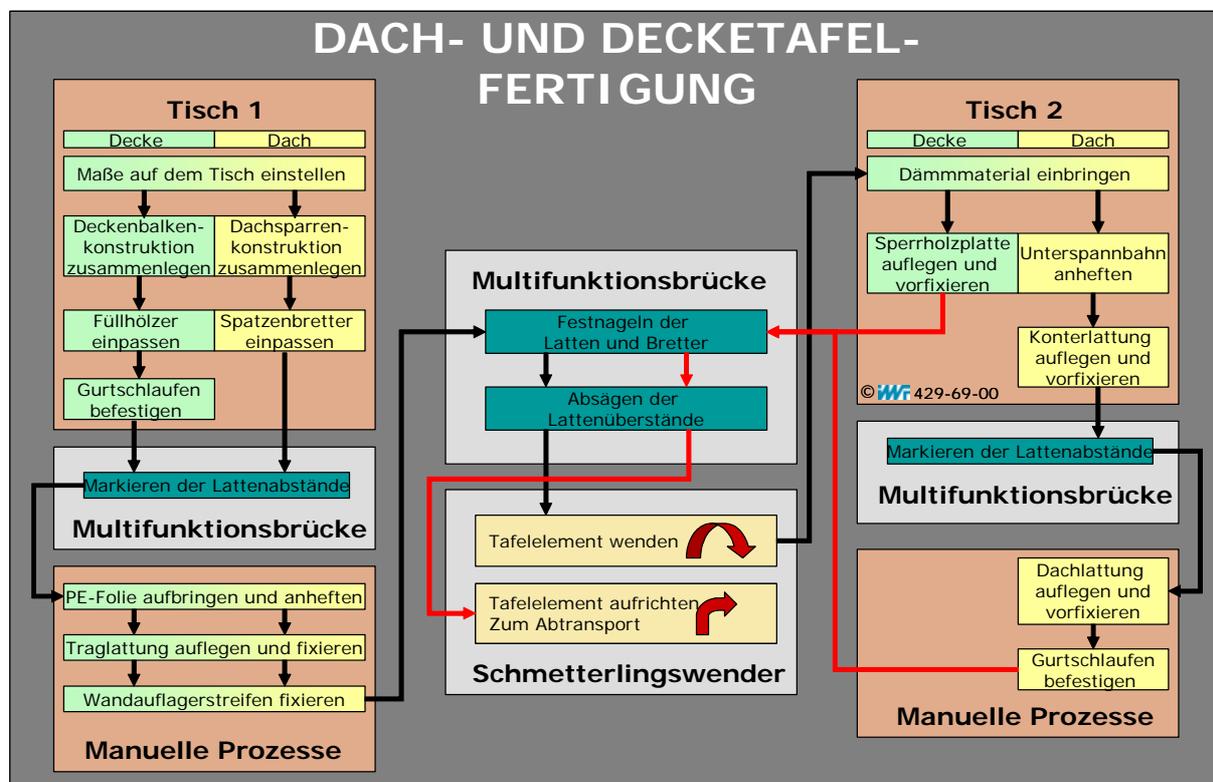


Bild 4.4: Fertigungsablauf im Bereich der Dach- und Deckentafelfertigung

4.1.4 Finishbereich

In der Finishlinie werden die Außenwände für die Montage auf der Baustelle fertig gestellt (Bild 4.5). Die Anlieferung der Tafелеlemente erfolgt per Hallenkran. Als erstes werden alle Wände mit einem Wärmeverbundsystem beklebt, dass von den Arbeitern per Hand zugeschnitten wird. Bei Erdgeschosswänden kommt zusätzlich ein Aluminiumabschlussprofil hinzu. Fenster, Haus-, Balkon- und Terrassentüren werden komplett mit Abdichtung und Putzschiene auf der Außenseite montiert. Die Fensterleibungen werden eingeklebt und verspachtelt, außerdem erfolgt die komplette Montage der Rolladenkästen.

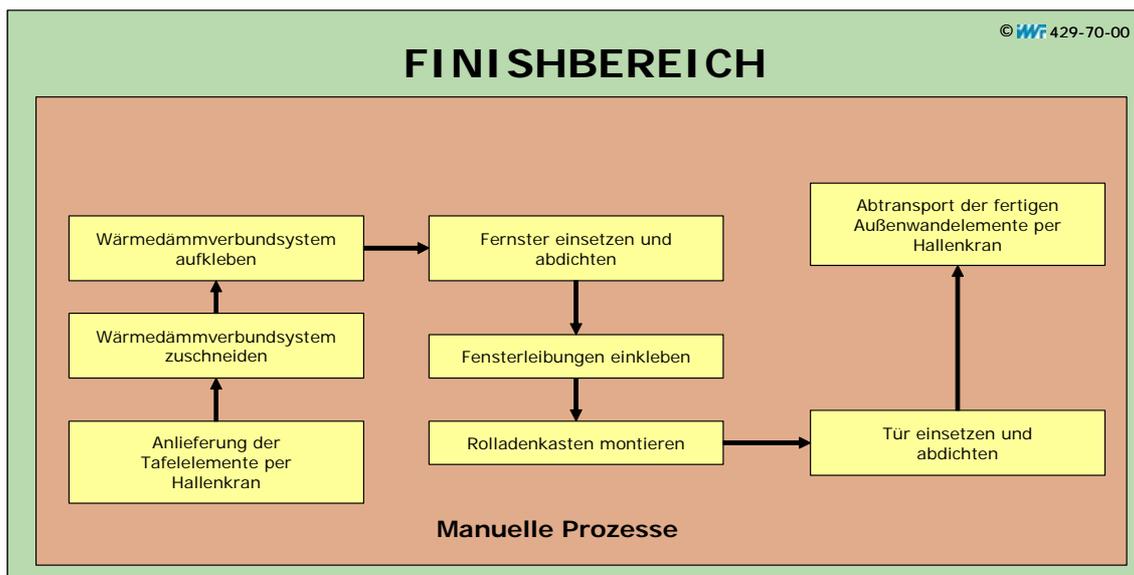


Bild 4.5: Fertigungsablauf im Finishbereich

4.1.5 Verladebereich

In der Verladestation werden alle Wand-, Dach- und Deckentafeln auf Transportpritschen verladen, um sie zur Baustelle transportieren zu können. Dazu werden die Tafeln an eingebauten Gurtschlaufen mittels Hallenkran auf die Pritschen gehoben, wo sie verschraubt oder mit Distanzhölzern fest verbunden werden, um sie gegen Verrutschen zu sichern. Dach- und Deckentafeln werden liegend befördert und aufgeladen, Wandtafeln dagegen aufrecht stehend.

4.2 Produktionsdatenentwicklung, Einzelbauteil- und Verbindungsanalyse

Ausgangspunkt der Entwicklung in diesem Teilvorhaben ist ein Datenmodell, das vom Lehrstuhl für Statik und Dynamik der TU Cottbus im Rahmen des Teilvorhabens 3 weiterentwickelt wurde. Dieser Datensatz enthält die vollständige dreidimensionale Geometriebeschreibung der Teile eines Gebäudes in Holztafelbauart, die im virtuellen Fertigungsprozess bearbeitet und dann zu Wand-, Decken- oder Dachtafeln zusammengefügt werden sollen. An den Datensatz werden sonst keine besonderen Anforderungen gestellt, damit er von jedem handelsüblichen CAD-Programm erzeugt werden kann, das sich für die Konstruktion von Gebäuden in Holztafelbauart eignet.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich Konstruktion und Fertigung wechselseitig beeinflussen. Die gewählte Konstruktion erfordert in Abhängigkeit des Grades der Vorfertigung bestimmte Fertigungseinrichtungen ebenso wie die Fertigungseinrichtungen nur bestimmte Konstruktionen zulassen. Da der technologische Stand der verfügbaren Fertigungseinrichtungen in den klein- und mittelständischen Betrieben sehr unterschiedlich ist - er reicht von handwerklichen bis hin zu halbautomatischen Produktionseinrichtungen (von Betrieb zu Betrieb und auch innerhalb eines Betriebes) - ist bei der Ergänzung der fertigungsrelevanten Daten darauf zu achten, dass ein möglichst breites Spektrum der Einsatzfähigkeit des Datensatzes gewährleistet wird. Zur Ergänzung des Geometriedatensatzes gehören alle Informationen über die mechanischen Verbindungen der Einzelbauteile zu Tafeln und der Tafeln zum Gebäude. Sie sind Ergebnis der statischen Berechnung, die für jedes Gebäude als Unikat erstellt und in der Regel bei der CAD-Bearbeitung nicht berücksichtigt werden. Daher wird hier eine Strategie entwickelt, wie diese Informationen mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nachträglich hinzugefügt werden können.

Ein wesentliches Merkmal einer praxisgerechten Schnittstelle ist die Flexibilität und Erweiterbarkeit des Modells, ohne dabei die Forderungen nach Konsistenz und Redundanzfreiheit zu vernachlässigen. Die Anforderungen an den Ingenieurholzbau sowie die Möglichkeiten der Produktion unterliegen einem stetigen Wandel und erfordern daher auch kurzfristige Anpassungen in einem Produktmodell, das hier die Verbindung zwischen Konstruktion und Produktion herstellen soll. Zusammen mit der Fa. Weinmann Holzbausystemtechnik und dem Teilvorhaben 3 wurden die Anforderungen an das Produktmodell aus Sicht der diskreten Simulation des Materialflusses definiert. Die Fa. Weinmann Holzbausystemtechnik hat dabei das Know-how und die Erfahrungen mit ihrer eigenen Schnittstelle für Fertighauselemente [14], die u.a. zur Ansteuerung der Weinmann-Plattenbearbeitungsmaschinen im Einsatz ist, zur Verfügung gestellt. Mit Teilvorhaben 3 fand ein Informationsaustausch bzgl. der Umsetzbarkeit der formulierten Anforderungen und der Integration in die Erweiterungen der IfC-Schnittstelle (Industry Foundation Classes) statt. Recherchen haben ergeben, dass keine Schnittstelle die geforderten Anforderungen in vollem Umfang erfüllt. Die DtH-Schnittstelle [11], die im Rahmen des Teilvorhabens 3 in die IfC-Schnittstelle integriert werden soll, ist zwar nahezu vollständig im Bereich der Einzelbauteilbeschreibung, für die Beschreibung einer Tafel und deren Fertigung fehlen hier jedoch wesentliche Informationen. Eine Weiterentwicklung ist daher erforderlich. Diese Arbeit wurde im Teilvorhaben 3 geleistet, so dass über die IfC-Schnittstelle unabhängig von einem Konstruktionsprogramm eine Produktionsdatenentwicklung möglich ist.

4.3 Entwicklung einer ganzheitlichen Fertigungsstrategie

4.3.1 Randbedingungen

Die Entwicklung der ganzheitlichen Fertigungsstrategie erfolgte auf der Grundlage des analysierten Produktionsablaufs. Unabhängig vom Automatisierungsgrad des Holzfertighausherstellers ist dieser Ablauf zunächst identisch, was die Montagereihenfolge der Bauteile sowie die Bearbeitungsvorgänge (Nageln, Sägen, Bohren etc.) betrifft. Abweichungen im Detail können infolge der von Hersteller zu Hersteller verschiedenen konstruktiven Ausführungen des Gebäudes auftreten, wobei der Grundaufbau der Tafel beibehalten wird. Eine wesentliche Anforderung an die zu entwickelnde Fertigungsstrategie war daher die Allgemeingültigkeit für den Holztafelbau, so dass die Fertigung unabhängig von bestimmten Herstellern oder Produkten ist. Gleichzeitig muss die Anlage aber derartig flexibel ausgelegt sein, dass - entsprechende Planungsdaten vorausgesetzt - die Gebäude beliebiger Fertighaushersteller kundenindividuell produziert werden können.

Flexibilität heißt in diesem Zusammenhang, dass die Anlage eine Vielfalt von Bearbeitungssequenzen ermöglicht, mit denen sich die notwendigen Fertigungsabläufe realisieren lassen und mit denen das gesamte Bauteilspektrum der hochindividuellen Tafelherstellung abgedeckt wird. Dies bedeutet einerseits, dass die Achsen der Bearbeitungs- und Montageeinrichtungen die erforderlichen Freiheitsgrade und Reichweiten aufweisen müssen, um alle in Frage kommenden Orte (sowohl die Position als auch die Orientierung im Raum) auf einer Tafel anfahren zu können. Zum anderen ist es erforderlich, dass die Maschinensteuerung mit den jeweiligen individuellen Teileprogrammen angesprochen wird und keine fixen, einmalig festgelegten Programme ablaufen lässt. Weiterhin muss ein schneller Austausch der Werkzeuge und Greifersysteme gewährleistet sein, der automatisch ohne Eingriff von außen durch den Maschinenbediener erfolgt. Wichtig ist die freie Wählbarkeit der Werkzeuge, um den jeweils vorliegenden Fertigungsauftrag ausführen zu können. Werkzeuge müssen mit einem Minimum an Aufwand hinzugefügt oder entfernt werden können. Maschinenintegrierte Handhabungssysteme minimieren die Zahl der Eingriffe durch den Werker und erlauben ein autonomes Arbeiten.

Neben der Maschinenteknik gilt es auch, die Fördervorgänge und damit den Materialfluss zu optimieren. Um einen effektiven Materialfluss zu erreichen, müssen weitere Anforderungen an den Fertigungsablauf gestellt werden: Die Bauteile sollen geradlinig und strömungsgünstig die Fertigung durchlaufen. Jede komplizierte Führung des Materialstroms bedeutet Raumverlust und Kostenerhöhung. Aufeinander folgende Arbeitsbereiche sollen dicht zusammen liegen, Fördervorgänge sind generell zu vermeiden. Transporteinheiten und Förderhilfsmittel müssen an die Bauteile angepasst werden. Des Weiteren ist es erforderlich die Reststoffe mit einzubeziehen: ausgeschnittene Teile müssen entfernt, Späne abtransportiert und nicht mehr benötigte Fertigungshilfsmittel/Vorrichtungen rückgeführt werden.

Für den Fall einer Einbindung von Industrierobotern, wie etwa der 6-Achs-Roboter des Forschungspartners KUKA Roboter, wurden weitere Randbedingungen an die Fertigungsstrategie formuliert: Bereitstellereinrichtungen und Bearbeitungsmaschinen müssen so ausgelegt werden, dass der Roboter Werkstücke geometrieunabhängig immer an denselben Positionen aufnehmen kann. Dies wird durch zelleneigene, flexible Spannsysteme und Fördereinrichtungen erreicht, ebenso wie durch die Teilebereitstellung an einer definierten Position und Lage. In den Roboter integrierte Sensorik wie Kamerasysteme oder Kraftmess-

einrichtungen können die Aufnahme bzw. Bearbeitung der Bauteile unterstützen. Eine Werkstückidentifizierung, beispielsweise über Barcode, stellt sicher, dass tatsächlich das zum jeweiligen Zeitpunkt benötigte Bauteil vorliegt. Diese Maßnahmen erhöhen die Sicherheit des Produktionsablaufs und garantieren eine gleich bleibende Fertigungsqualität.

Das Ziel dieser Maßnahmen ist die Auslastungssteigerung der Anlage und die Verringerung der Haupt-, Rüst- und Nebenzeiten. Neben der gezielten Aufrüstung bestehender Fertigungsanlagen wurden zwei Automatisierungsstrategien entwickelt, die in Kapitel 5 detailliert erläutert werden: eine multifunktionale Kompaktanlage in Form eines Portalbearbeitungszentrums sowie eine Durchlaufanlage mit verketteten, hintereinander geschalteten Einzelbearbeitungsstationen.

4.3.2 Automatisierungspotential-Analyse

Vorgehensweise bei der Bewertung von Automatisierungslösungen

Automatisierungsentscheidungen müssen nicht immer sinnvoll sein. Aus diesem Grund wurde in Anlehnung an [12] eine Methode angewandt, die es ermöglicht, anhand von technischen und wirtschaftlichen Kriterien eine Klassifizierung der verschiedenen Prozesse einer Montage hinsichtlich deren Potential zur Automatisierung vorzunehmen. Mit Hilfe dieser Analyse wurde eine Datengrundlage geschaffen, auf der sinnvoll Automatisierungsentscheidungen gefällt werden können. Zusammen mit den oben definierten Randbedingungen konnten so gezielte Fertigungsstrategien für die Holztafelherstellung entwickelt und im weiteren Projektverlauf ausgearbeitet werden.

Bei der Automatisierungspotential-Analyse werden drei Phasen durchlaufen:

1. Charakterisieren und Bewerten der manuellen Prozesse zur technischen Klassifizierung,
2. Wirtschaftliche Bewertung der Arbeitsschritte mit Automatisierungspotential und
3. Ranking der Automatisierungspotentiale anhand der technischen und wirtschaftlichen Faktoren.

Die Beurteilung, inwieweit eine Automatisierung wirtschaftlich ist, muss durch eine Zusammenstellung der Einsparungspotentiale und der Investitionskosten bewertet werden. Diese beiden Faktoren bestimmen die Amortisationszeit des Automatisierungskonzeptes und sind je nach Unternehmensgröße und individueller Kostenstruktur unterschiedlich. Im Rahmen der Entwicklung der Fertigungsstrategie wurde zunächst nur die erste Phase der Automatisierungspotential-Analyse durchlaufen. Der dabei ermittelte Automatisierungseignungsgrad gibt Auskunft über die technische Machbarkeit einer Automatisierung der untersuchten Prozessschritte. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgte im weiteren Verlauf der Arbeiten mit Hilfe eines speziell entwickelten Simulationswerkzeugs (siehe Kapitel 6).

Um aussagekräftige Kennzahlen zu erhalten, durch die eine technische Klassifizierung ermöglicht wird, werden sechs Schritte durchgeführt:

Als erstes werden Charakteristika zusammengestellt, die die Potentiale automatischer Anlagen aber auch das Können der Mitarbeiter berücksichtigen. Sie umfassen Werkstückmerkmale, Prozessmerkmale und Merkmale der Materialbereitstellung. Die Werkstücksteifigkeit oder die Zugänglichkeit des Fügeortes sind Beispiele für die Werkstückmerkmale. Sie

beziehen sich auf die verwendeten Füge- und Basisteile. Die Einbringung von biegeschlaffen Werkstücken, wie z.B. Zugschnüren oder weichen Dämmmaterialien lässt sich ohne besondere Greifertechniken und Vorrichtungen nicht automatisieren. Zu den Prozessmerkmalen zählen unter anderem die Fügetoleranzen oder die Notwendigkeit der Fixierung eines Werkstücks während des Fügevorgangs. Sie beschreiben also die Eigenschaften der Füge- und Handhabungsprozesse. Enormen Einfluss auf die Umsetzbarkeit von Automatisierungskonzepten hat aber auch die Materialbereitstellung. Durch die oben genannten Charakteristika wird bewertet, ob die vorhandene Materialbereitstellung dem Automatisierungsvorhaben genügt, oder ob neue Bereitstellungsstrategien gefunden werden müssen.

Der zweite Schritt umfasst die Gewichtung der Charakteristika. Auf die Automatisierbarkeit eines Prozesses haben die verschiedenen Merkmale unterschiedlich starken Einfluss. Damit die einflussreicheren Charakteristika entsprechend stark bewertet werden, werden sie höher gewichtet und dadurch bei der Berechnung stärker berücksichtigt. Es existieren drei Gewichtungsklassen, wobei Klasse 3 die Merkmale beinhaltet, die sehr großen Einfluss auf die Automatisierungsentscheidung haben, Klasse 1 dagegen beinhaltet Merkmale, die zwar Einfluss auf die Entscheidung haben, jedoch nur in geringem Maße.

Schritt drei umfasst das Benennen der Ausprägungen der Charakteristika. Das Werkstückmerkmal „Werkstücksteifigkeit“ hat beispielsweise die Ausprägungen „biegeschlaff“, „elastisch“ und „starr“. Somit haben sie auch unterschiedlichen Einfluss auf die Automatisierbarkeit des Prozesses.

Aus diesem Grund werden im vierten Schritt die zwei Alternativen Mensch und Automat hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Die so genannten Zuteilungsfaktoren liegen zwischen 1 und 3, wobei eins für „ungeeignet“ und drei für „sehr gut geeignet“ vergeben wird.

Die Anwendung auf einen konkreten Fertigungsablauf erfolgt nun in Schritt fünf. Bei der Analyse eines Montageprozesses werden die entsprechenden Ausprägungen ausgewählt und zugeordnet und die entsprechenden Werte für Mensch und Automat festgehalten.

Anhand folgender Berechnungsvorschrift wird nun im letzten Schritt der Automatisierungseignungsgrad (AEG) ermittelt:

$$AEG = \frac{\sum_{j=1}^m \left[K_j \cdot \left(\sum_{i=1}^n Z_{Mji} \right) \right]}{\sum_{j=1}^m \left[K_j \cdot \left(\sum_{i=1}^n Z_{Aji} \right) \right]} \quad [12]$$

wobei gilt:	K_j	Gewichtungsfaktor
	Z_{Mji}	Zuteilungsfaktor Mensch
	Z_{Aji}	Zuteilungsfaktor Automat
	$m = 1, 2, 3$	Gewichtungsklasse
	$n = 1 \dots 5$	Charakteristik

und K_j folgende Werte annehmen kann:

$$K_1 = 1,1$$

$$K_2 = 1,2$$

$$K_3 = 1,3$$

Der so berechnete Zahlenwert macht eine Aussage über die Machbarkeit der Automatisierung für den speziellen Prozess. Der Quotient stellt einen Vergleich zwischen Mensch und Automat bei der Durchführung des jeweiligen Arbeitsvorgangs dar. Je größer z.B. der Nenner wird, umso besser ist der Automat geeignet, den Montageprozess durchzuführen. Der AEG = 1 sagt demnach aus, dass beide, Mensch und Automat, gleich gut geeignet sind. Nimmt der Automatisierungsseignungsgrad „AEG“ einen Wert größer als 0,95 an, so ist eine Automatisierung des Montageprozesses technisch nicht gut umsetzbar. Liegt der Wert jedoch unter diesem Grenzwert, so hat man hier einen Montageprozess mit hohem Automatisierungspotential ausgemacht.

Anwendung der Analysemethode

Im Folgenden wird die konkrete Durchführung der sechs Schritte der Automatisierungspotential-Analyse zur Bewertung der Vorfertigung von Holztafelelementen erläutert. In den Schritten 1 bis 4 werden zunächst die Charakteristika, d.h. die Werkstückmerkmale, die Prozessmerkmale und die Merkmale der Materialbereitstellung, die bei der Herstellung von Wand-, Decken- und Dachtafeln eine Rolle spielen, aufgestellt. Anschließend erfolgt die Benennung der Ausprägungen dieser Charakteristika und deren Gewichtung sowie die Vergabe der Zuteilungsfaktoren für Mensch und Automat. Tabelle 4.1 fasst die vier Schritte zusammen. Die Gewichtung der Charakteristika und die Zuteilungsfaktoren für Mensch und Automat ergeben sich aus Machbarkeitsstudien und Erfahrungswerten aus dem Bereich der Tafelfertigung bzw. der Handhabungstechnik.

Ein definiertes Charakteristikum ist beispielsweise die Werkstücksteifigkeit. Die zugehörigen Ausprägungen sind „biegeschlaff“, „elastisch“ und „starr“. Da die Werkstücksteifigkeit einen großen Einfluss auf die Automatisierbarkeit hat, erhält sie den höchsten Gewichtungsfaktor „3“. Während der Mensch in der Lage ist, sowohl starre als auch elastische/biegeschlaffe Werkstücke gut zu handhaben, erhalten die drei Ausprägungen den Eignungsfaktor „3“. Der Automat hingegen kann starre Bauteile am besten handhaben (Faktor 3), die Positionierung biegeschlaffer bzw. elastischer Werkstücke erfordert dagegen einen erhöhten Steuerungs- und Greiferaufwand und wird entsprechend mit niedrigeren Faktoren bewertet.

Umgekehrt fällt die Zuteilung bei der Anzahl der Bauteile aus. Das Zulegen der Rippen bei der Wandfertigung stellt für den Automaten kein Problem dar, hier ist die Reihenfolge genau festgelegt und programmiert. Der Mensch jedoch muss die ca. 22 Bauteile anhand einer Fertigungszeichnung zusammenlegen, wobei es durch die Ähnlichkeit der Bauteile zu Verwechslungen oder gar zum Vergessen einzelner Rippen kommen kann. Hier erhält der Automat den Faktor 3, der Mensch nur die 1.

Schwere Bauteile stellen für den Automaten kein Problem dar, er wird dementsprechend ausgelegt. Der Mensch hingegen benötigt in diesem Fall einen Kran oder ähnliche Hilfsmittel. Daher wird für den Automaten der Faktor 3 und der Faktor 1 für den Menschen vergeben.

Ob der Arbeitsplatz ergonomisch gestaltet ist oder nicht, spielt für den Automaten natürlich keine Rolle, daher für beide Ausprägungen Faktor 3. Der Mensch hingegen ist für die körperlich belastenden Tätigkeiten nicht geeignet – somit erhält er hier nur den Faktor 1.

Nach der Definition der Charakteristika wird nun ermittelt, welche Ausprägungen auf die einzelnen Prozessschritte der Montagevorgänge der Wand-, Decken- und Dachtafelproduktion zutreffen. Tabelle 4.2 zeigt exemplarisch für drei Prozessschritte der Außenwandtafelherstellung die Zuordnung der Ausprägungen zu den jeweiligen Schritten. Analoge Zuordnungen erfolgten für sämtliche in Kapitel 4.1 analysierten Fertigungsabläufe bei der Tafelfertigung unter Berücksichtigung aller Charakteristika nach Tabelle 4.1. Basierend auf diesen Zuordnungen konnte im Anschluss für jeden Prozessschritt der zugehörige Automatisierungsgrad (AEG) berechnet werden. Die Ergebnisse fassen die Tabellen 4.3 bis 4.5 zusammen.

Charakteristik	Ausprägungen	Gewichtung	Faktor Mensch	Faktor Automat
Empfindlichkeit des Materials	Material unempfindlich	3	3	3
	Material empfindlich	3	3	1
Werkstücksteifigkeit	biegeschlaff	3	3	1
	elastisch	3	3	2
	starr	3	3	3
Möglichkeit des Verhakens	Nicht gegeben	3	3	3
	Bedingt möglich, aber unwahrscheinlich	3	3	2
	leicht möglich	3	3	1
Bereitstellung Basisteil/ Fügeteil	einfach automatisierbar	3	3	3
	automatisierbar mit Aufwand	3	3	2
	nicht automatisierbar	3	3	1
Anzahl der Bauteile	1 – 3 Teile	3	3	3
	4 – 8 Teile	3	2	3
	9 oder mehr Teile	3	1	3
Werkstückgewicht	Bis 1 kg	2	3	3
	1 kg bis 6 kg	2	2	3
	Mehr als 6 kg	2	1	3
Lage der Bauteile	Bauteile in eindeutiger stabiler Lage fixiert	2	3	3
	Lage der Bauteile nicht eindeutig	2	1	3
Lagestabilität	große, ebene Auflagefläche	2	3	3
	keine günstige Standflächen	2	2	1
Zugänglichkeit des Fügeortes	Sichtkontrolle und Werkzeugfreiräume gegeben	2	3	3
	Werkzeugfreiräume gegeben, keine Sichtkontrolle	2	1	3
Ergonomie des Arbeitsplatzes	körperlich unbelastende Tätigkeit	2	3	3
	körperlich belastende Tätigkeit	2	1	3
Mehrstellenkontakt Basisteil / Fügeteil	1 - 3 Kontaktstellen	1	3	3
	4 – 9 Kontaktstellen	1	2	3
	10 oder mehr Kontaktstellen	1	1	3
Greifmöglichkeit des Werkstücks	gute Greifmöglichkeiten	1	3	3
	schlechte Greifmöglichkeiten	1	3	2
Greifflächen	maßlich definierte Greifflächen	1	3	3
	unregelmäßige Greifflächen	1	3	1
Fügetoleranzen	Haftsitz	1	2	3
	Schiebesitz	1	3	3
	großes Spiel	1	3	3
Werkstoff gesundheitsschädlich	schädlich	1	1	3
	unschädlich	1	3	3

Tabelle 4.1: Charakteristika der Automatisierungspotential-Analyse

Prozessschritt	Prozesse	Empfindlichkeit des Materials		Werkstücksteifigkeit			Möglichkeit des Verhakens		Bereitstellung Basisteil / Fügeteil			Anzahl der Bauteile			
		Material unempf.	Material empfindlich	Biegeschlaff	Elastisch	Starr	Nicht gegeben	Bedingt möglich	Leicht möglich	Einfach automatisierbar	Automatisierbar mit Aufwand	Nicht automatisierbar	1-3 Teile	4-8 Teile	9 oder mehr Teile
1	Rippenkonstruktion zusammenlegen	x				x	x			x					x
4	Auflegen der Dampfsperre		x	x			x			x			x		
6	Auflegen der Fermacellplatte	x				x	x			x			x		

Tabelle 4.2: Zuordnung der Ausprägungen zu den einzelnen Prozessschritten

Prozessschritt	Prozess	AEG
Außenwand Außenseite		
1	Riegelwerk zusammenlegen	0,89
2	Fixieren der Rippen	0,84
3	Gurtschlaufen anbringen	1,11
4	Auflegen der Dampfsperren	1,09
5	Festtackern der Dampfsperre	0,89
6	Auflegen der Fermacellplatte	0,91
7	Festnageln der Fermacellplatte	0,85
Außenwand Innenseite		
1	Einbringen von Sanitärblöcken	0,91
2	Einbringung von Rohren	0,86
3	Fixierung mit PE-Schaum	0,86
4	Einlegen von Zugschnüren	1,14
5	Faserdämmung einbringen	0,98
6	Auflegen der Fermacellplatte	0,91
7	Festnageln der Fermacellplatte	0,85

Tabelle 4.3: Automatisierungseignungsgrad bei der Wandtafelfertigung

Prozessschritt	Prozess	AEG
Decke Außenseite		
1	Balkenkonstruktion zusammenlegen	0,89
2	Fixieren der Balken	0,84
3	Auflegen der Latten	0,80
4	Festnageln der Latten	0,85
5	Auflegen der Fermacellplatte	0,91
6	Festnageln der Fermacellplatte	0,85
Decke Innenseite		
1	Einlegen von Abzugsrohren	0,91
2	Einlegen der Eisenträger	0,94
3	Faserdämmung einbringen	0,98
4	Auflegen der Dampfsperre	1,09
5	Festtackern der Dampfsperre	0,89
6	Auflegen der Fermacellplatte	0,91
7	Festnageln der Fermacellplatte	0,85

Tabelle 4.4: Automatisierungseignungsgrad bei der Deckentafelfertigung

Prozessschritt	Prozess	AEG
Dach Außenseite		
1	Sparrenkonstruktion zusammenlegen	0,89
2	Fixieren der Sparren	0,84
3	Auflegen der Dampfsperre	1,09
4	Festtackern der Dampfsperre	0,91
5	Auflegen der Latten	0,80
6	Festnageln der Latten	0,85
7	Auflegen der Fermacellplatte	0,91
8	Festnageln der Fermacellplatte	0,85
Dach Innenseite		
1	Faserdämmung einbringen	0,98
2	Spannen der diffusionsoffenen Folie	1,09
3	Auflegen der Konterlattung	0,80
4	Festnageln der Konterlattung	0,85
5	Auflegen der Dachlatten	0,80
6	Festnageln der Dachlatten	0,85

Tabelle 4.5: Automatisierungseignungsgrad bei der Dachtafelfertigung

Auswertung der Ergebnisse

Die Resultate zeigen, dass ein Großteil der Prozessschritte in der Vorfertigung von Holzfer-tighäusern ein unter technischen Gesichtspunkten hohes Automatisierungspotential aufweist. Nur 17% aller Montageschritte wurde ein AEG größer 0,95 zugeordnet und erweisen sich somit als schlecht automatisierbar. Es handelt sich dabei um die Prozessschritte

- Gurtschlaufen anbringen,
- Auflegen der Dampfsperre,
- Einlegen von Zugschnüren,
- Faserdämmung einbringen und
- Spannen der diffusionsoffenen Folie.

In diesen Prozessschritten werden biegeschlaaffe Bauteile gefügt. Diese Bauteile sind in der Handhabung für den Automaten schwierig und stellen außerdem für die Materialbereitstellung Probleme dar. Zudem sind die Folien empfindlich und dürfen nicht reißen. Für eine Automatisierung dieser Vorgänge wird die Entwicklung spezieller Greifersysteme notwendig.

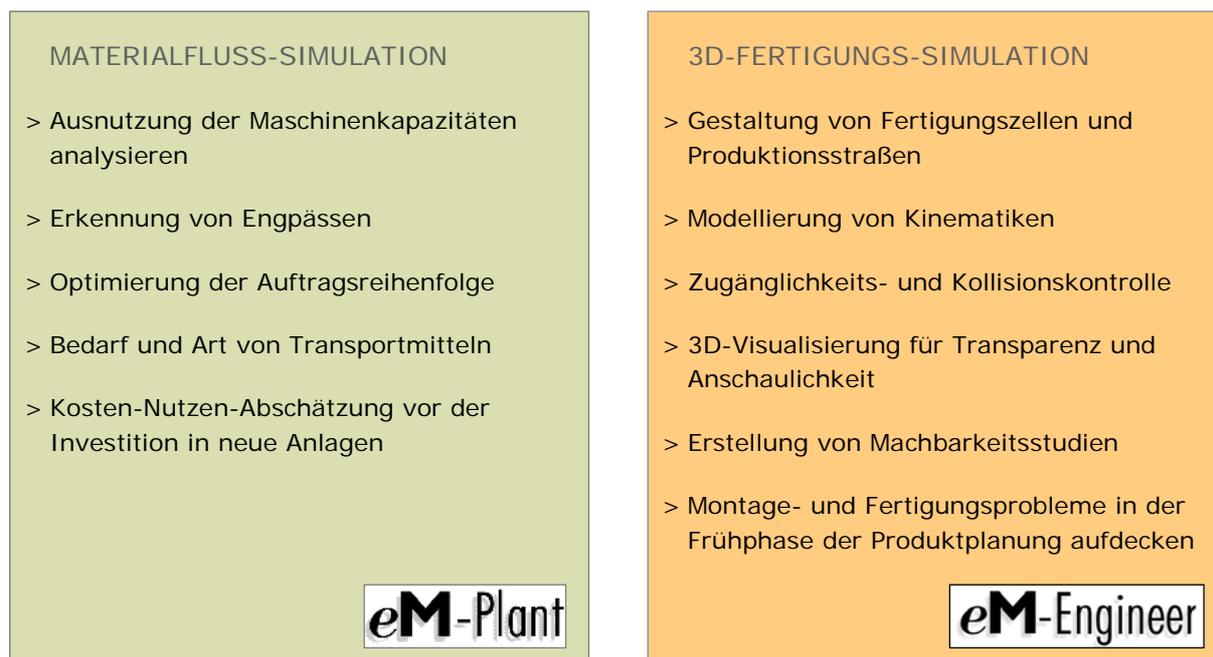
Die gut automatisierbaren Prozesse bestehen zumeist aus dem Fügen starrer Bauteile mit einfacher Handhabung für Automaten. Hier ist mit geringem Aufwand unter Anwendung konventioneller Greifersysteme eine Automatisierung realisierbar.

4.4 Auslegung virtueller Fertigungsstraßen durch Kopplung von Simulationstechniken

Zur Auslegung und Optimierung der Fertigungsstrategien wurden spezielle Softwaretools der Fabrik- und Anlagenplanung eingesetzt. Der gewählte Ansatz sah die Simulation eines Fabrikbetriebs zur Vorfertigung von Häusern in Tafelbauweise auf zwei unterschiedlichen Ebenen vor: Zum einen auf der einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation, die Abläufe anhand ihrer Bearbeitungszeiten und gegenseitigen Abhängigkeiten charakterisiert. Zum anderen in Form von 3D-Fertigungssimulationen, die Anlagenkomponenten anhand ihrer Geometrien und Kinematiken in einer virtuellen Umgebung abbilden (Bild 4.6).

Die Materialflusssimulation bietet den Vorteil großer Flexibilität und Anpassbarkeit an unterschiedlichste Fertigungskonzepte, Maschinensysteme und Produkte. Die Elemente des Fabrikbetriebs werden anhand ihrer technischen und betriebswirtschaftlichen Eigenschaften abstrahiert dargestellt. Die realen Geometrien eines Bauteils oder einer Maschine sind zunächst nicht von Bedeutung. Mit Hilfe des Simulationsmodells lassen sich beispielsweise Mengenflüsse aufeinander abstimmen, indem die Auslastung von Maschinen- und Lagerkapazitäten analysiert wird. Ebenso lassen sich Engpässe in der Fertigung identifizieren und Durchlaufzeiten ermitteln. Bei der Auslegung von Fertigungslinien können auf diese Weise z.B. Bedarf und Art von Transportmitteln ermittelt werden. Ein weiterer Nutzen liegt in der Durchführung von Planspielen, in denen die Auswirkung von Automatisierungslösungen auf die Fertigung bestimmt wird. Die Anpassbarkeit der Materialflusssimulation ermöglicht in diesem Zusammenhang die Durchführung von Kosten-Nutzen-Analysen für individuelle Fertigungsbetriebe im Vorfeld von geplanten Investitionen.

Die 3D-Simulation bietet im Vergleich eine geringere Flexibilität, was die einmal erstellten Modelle betrifft. Maschinen und Bauteile werden mit ihren realen Geometrien modelliert. In virtuellen Fertigungszellen und –straßen erfolgt dann die Simulation sämtlicher Bewegungsabläufe der Anlagenkomponenten, um die jeweiligen Bearbeitungs-, Montage- und Transportvorgänge darzustellen. Roboter und Bearbeitungsstationen stehen einerseits als Objektbibliotheken zur Verfügung, können aber auch individuell mit den zugehörigen Kinematiken modelliert werden. Der Vorteil ist die hohe Anschaulichkeit und Transparenz aufgrund der 3D-Darstellung und der Möglichkeit, den Fertigungsverlauf aus beliebigen Blickwinkeln zu verfolgen. Die simulierten Produktionsstraßen erlauben Zugänglichkeits- und Kollisionskontrollen sowie Machbarkeitsstudien im Falle neuartiger Maschinen- und Anlagenkonzepte. Montage- und Fertigungsprobleme können so schon in der Frühphase der Planung eines Produktes oder der zugehörigen Fertigung aufgedeckt werden.



© Wf 424-33-00

Bild 4.6: Einsatzgebiete der Materialfluss- und der 3D-Fertigungssimulation

Zur Optimierung der Holztafelfertigung wurden parallel die 3D- und die Materialflusssimulation eingesetzt. Dabei bestand eine Wechselwirkung zwischen den beiden Simulationssystemen, d.h. der Einsatz erfolgte nicht unabhängig voneinander, sondern in einer gegenseitigen Kopplung von Materialfluss- und 3D-Simulation (Bild 4.7). Den Ausgangspunkt stellte der Produktionsablauf der Fa. Baukmeier Holzbau dar. Die dort analysierten Bearbeitungs- und Montagevorgänge, Maschinenanordnungen, Fertigungszeiten und Bauprojekte bildeten die Grundlage für die Modellierung, ergänzt um die Zuarbeiten der Projektpartner Weinmann Holzbausystemtechnik und KUKA Roboter.

Die Wechselwirkung zwischen den Simulationsumgebungen ergab sich als Konsequenz aus den jeweiligen Einschränkungen der Einzelsysteme. So wurde zunächst die Fertigung der Fa. Baukmeier als Materialflusssimulation nachgebildet und auf Engpässe und Schwachstellen analysiert. Einen Ansatz zur Optimierung stellte beispielsweise die Automatisierung der Zulage der Rippen (Riegelwerksstation) dar. Daher wurde dieser Fertigungsbereich innerhalb der 3D-Umgebung unter Verwendung realer Bauteildaten modelliert. Auf diese Weise konnten geeignete Robotertypen und deren Taktzeiten, der Platzbedarf und notwendige

Förderhilfsmittel ausgelegt werden. Diese Ergebnisse fließen zurück in die Materialflusssimulation, mit deren Hilfe daraufhin die Auswirkungen der Automatisierungslösungen auf Durchlaufzeiten und Kosten bestimmt werden konnten. Diese Strategie ermöglichte die Auslegung und Optimierung von Produktionsanlagen, die als virtuelle Prototypen für zukünftige Entwicklungen dienen können.

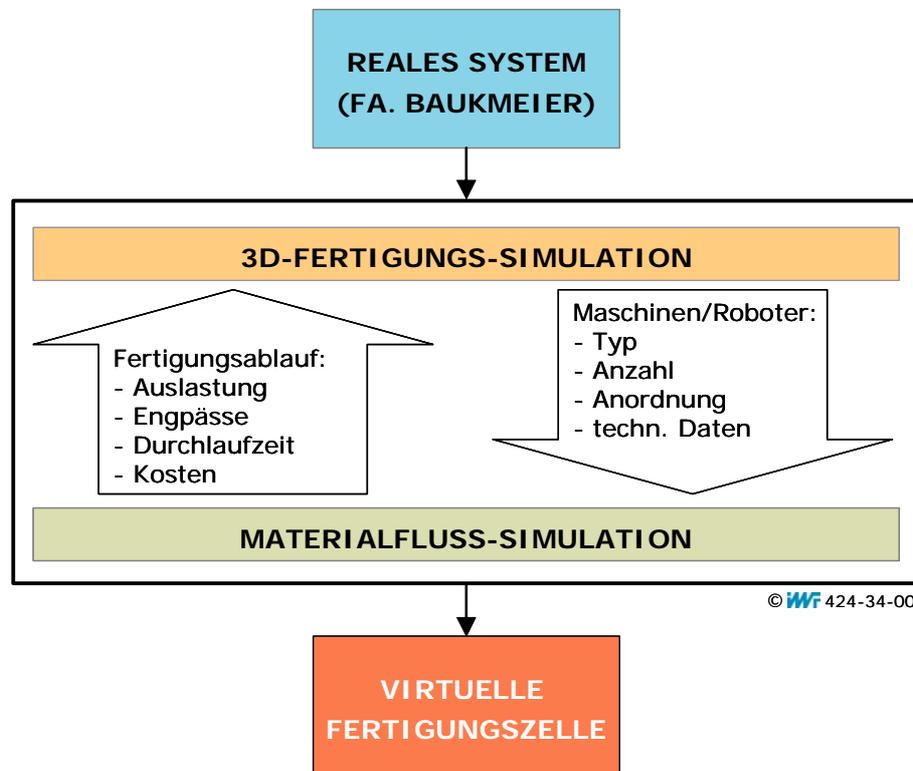


Bild 4.7: Wechselwirkung zwischen Materialfluss- und 3D-Fertigungssimulation

5 Automatisierungskonzepte und deren Umsetzung in der 3D-Fertigungssimulation

5.1 Standardbauteile und deren Eigenschaften

Die ausführliche Beschreibung des Multifunktionsbauteils Tafel als Bestandteil des Gebäudes in Holztafelbauart schafft die grundsätzlichen Randbedingungen für eine optimale Fertigung von Tafeln. Daher wurde besonderer Wert auf die Vielschichtigkeit des Bauteils und den daraus resultierenden Anforderungen im Produktionsprozess gelegt. Dies ist neben statischen Erfordernissen im Wesentlichen aus bauphysikalischen Gesichtspunkten sinnvoll und notwendig. Die Randbedingungen wurden dabei so allgemein wie möglich festgelegt, damit es während des Visualisierungs- und Simulationsprozesses keine Einschränkungen auf einige wenige Konstruktionsformen, bestimmte Hersteller oder Produkte gibt. Die im Teilvorhaben 1 entwickelte Schnellverbindertechnik kann zum Beispiel ebenso verwendet werden wie andere zukünftige Entwicklungen. Die im Folgenden aufgeführten Anforderungen müssen im Produktionsprozess berücksichtigt werden.

Der Tafelaufbau bestehend aus Verschalung, Lattung, Platten, Riegelwerk mit Dämmung, Platten und Beplankung erfordert das Zuführen von Bauteilen unterschiedlicher Materialien und Abmessungen und das Wenden der Tafel während des Produktionsablaufes.

Wand- und Deckentafeln unterscheiden sich im Aufbau von Dachtafeln durch mögliche zusätzliche Installationsebenen. Das Riegelwerk in Wandtafeln besteht hauptsächlich aus Querstielen (Stiele), das Riegelwerk in Dachtafeln im Wesentlichen aus Längsstielen (Sparren).

Für bauteilübergreifende Bearbeitungen wie Nagelreihen auf den Tafeln müssen Sperrzonen berücksichtigt werden. Dabei können Deckentafeln bedingt durch Installationen auch diagonale Sperrzonen erfordern.

Die Rippen von Dachtafeln (Sparren) haben einen höheren Bearbeitungsgrad als diejenigen von Wand- und Deckentafeln. Die Bearbeitungszentren, auf denen die Rippen gefertigt werden, können sich also unterscheiden. Rippen in Dachtafeln können auch nicht senkrecht zur Bearbeitungsebene liegen (Wechsel, Stellbretter) und daher eine abweichende Bearbeitungsstrategie erfordern.

Anhand dieser Randbedingungen erfolgte die Definition von Standard- oder Mustertafeln (Bild 5.1 bis Bild 5.3). Diese Wand-, Decken- und Dachtafeln besitzen die jeweiligen fertigungstechnischen Besonderheiten und kommen als Referenzbauteile in der 3D-Fertigungssimulation zum Einsatz.

Merkmale der Standardwandtafel

Der Tafelaufbau besteht aus Fermacellplatten, einem Riegelwerk mit Dämmung und wiederum Fermacellplatten. Die Tafel besitzt Installationsebenen und Sperrzonen für die Nageloperationen an der Tafel. Die Bearbeitungsoperationen an den Rippen sind Sägeoperationen, im Wesentlichen das Ablängen der Rippen, sowie einige Fräsungen und Bohrungen. Die Bearbeitungen an der Tafel sind Nageloperationen, Sägeoperationen und Bohrungen.

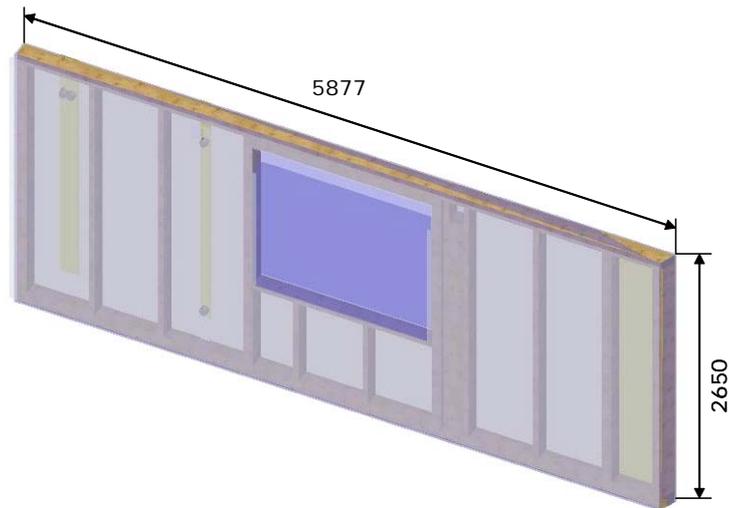


Bild 5.1: Standardwandtafel

Merkmale der Standarddeckentafel

Der Tafelaufbau besteht aus Latten, einem Riegelwerk mit Dämmung und Sperrholzplatten. Es gibt diagonale Rippen (Balken) in dem Riegelwerk. Bei den Bearbeitungsoperationen an den Rippen handelt es sich um Sägeoperationen, im Wesentlichen das Ablängen der Rippen, sowie einige Fräsungen und Bohrungen. An der Tafel werden Nagel-, Säge- sowie einige Bohroperationen vorgenommen.

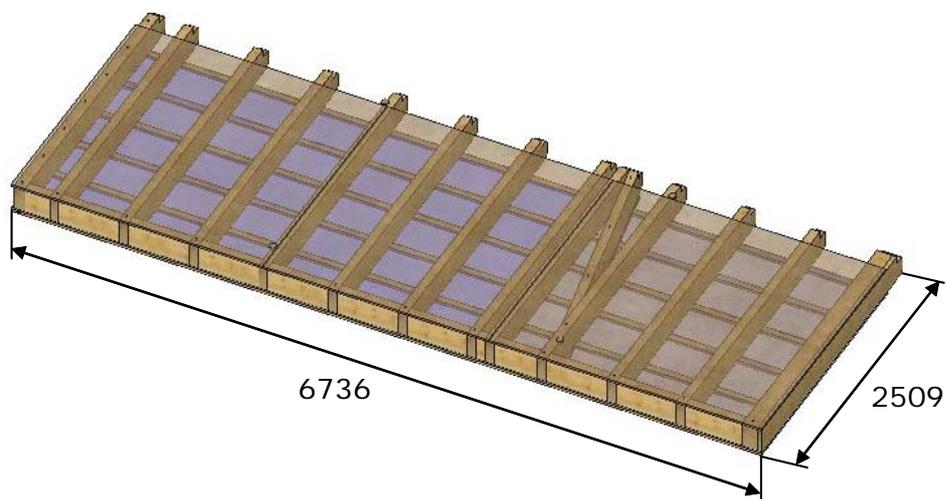


Bild 5.2: Standarddeckentafel

Merkmale der Standarddachtafel

Der Tafelaufbau besteht aus Latten, einem Riegelwerk mit Dämmung, einer Verschalung im Randbereich der Tafel, einer Konterlattung und der Dachlattung. Es können diagonale Rippen im Riegelwerk auftreten. Die Bearbeitungsoperationen an den Rippen (Sparren) sind Sägeoperationen, Fräsungen und einige Bohrungen. Bei den Bearbeitungen an der Tafel handelt es sich um das Nageln, Sägen und Bohren.

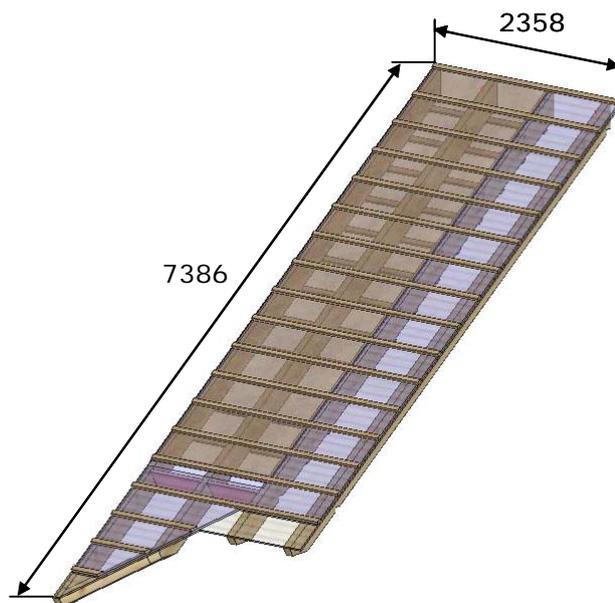
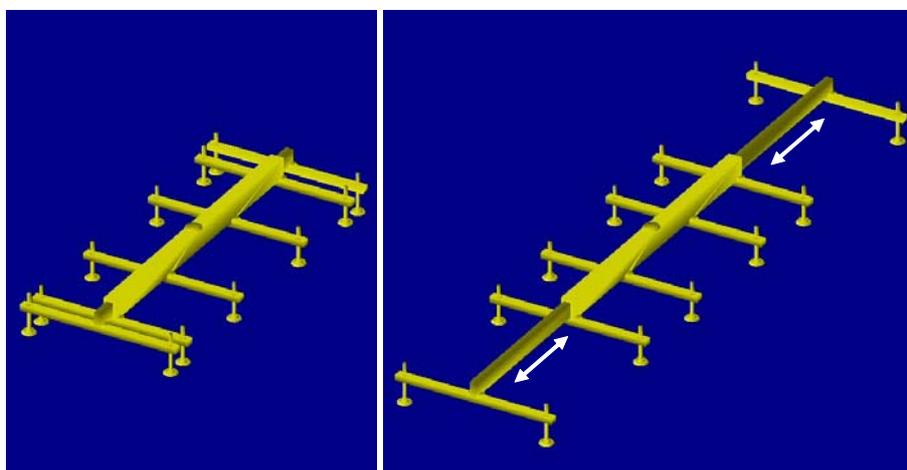


Bild 5.3: Standarddachtafel

5.2 Greiferkonzepte

5.2.1 Werkstückangepasste Greifertechnik

Die Automatisierung von Handhabungsvorgängen erfordert eine an das Werkstückspektrum angepasste Greifertechnik. Im Falle der verschiedenen Plattenwerkstoffe und Rippen/Stiele bietet sich der Einsatz konventioneller Sauggreifer an. Dabei können Liniengreifer zur Handhabung der stabförmigen Bauteile und Flächengreifer für die plattenförmigen Werkstücke zum Einsatz kommen. Da die Größe der zu positionierenden Platten je nach Tafeltyp und -position in der Gebäudekonstruktion sehr stark variieren kann, wurde ein verstellbarer Vakuumgreifer entworfen, der zwei Längsachsen zur Vergrößerung seines Arbeitsraumes besitzt (Bild 5.4). Damit können auch große Platten aufgenommen werden. Bei kleineren Plattenmaßen wird der Arbeitsraum des Greifers zugunsten geringerer Massenträgheiten und besserer Zugänglichkeit bzw. verringerter Kollisionsgefahr entsprechend minimiert.



© IWF 424-31-00

Bild 5.4: Vakuumgreifer zur Handhabung plattenförmiger Werkstücke

Die Verwendung getrennter Greifer zur Handhabung platten- und stabförmiger Bauteile führt zu häufigem Wechsel des Greifwerkzeugs. Dies erhöht die Nebenzeiten und den Platzbedarf innerhalb der Fertigungszelle. Als Alternative ist der Einsatz von zwei Handhabungseinrichtungen denkbar, die jeweils mit einem festen Greifwerkzeug ausgestattet sind. Die Konsequenzen sind die Erhöhung der Investitionskosten und des Programmieraufwands infolge des zweiten Roboters. Aus diesem Grund wurde ein universeller Vakuumbreifer konzipiert, der sowohl stab- als auch plattenförmige Werkstücke aufnehmen kann (Bild 5.5). Das System besitzt eine Scherenkinematik zur Umschaltung zwischen Linien- und Flächengreifer. Im geschlossenen Zustand können Rippen, Stiele und auch schmale Platten aufgenommen und positioniert werden. Auseinandergedfahren ist die Handhabung auch großflächiger Plattenwerkstoffe möglich. Der Vorteil dieses Konzeptes ist die Verringerung der Zahl der Greiferwechsel, wodurch die Produktivität des Roboters erhöht wird. Des Weiteren reduziert sich der Platzbedarf innerhalb der Fertigungszelle, da der Greifer in der Form des Liniengreifers abgelegt werden kann.

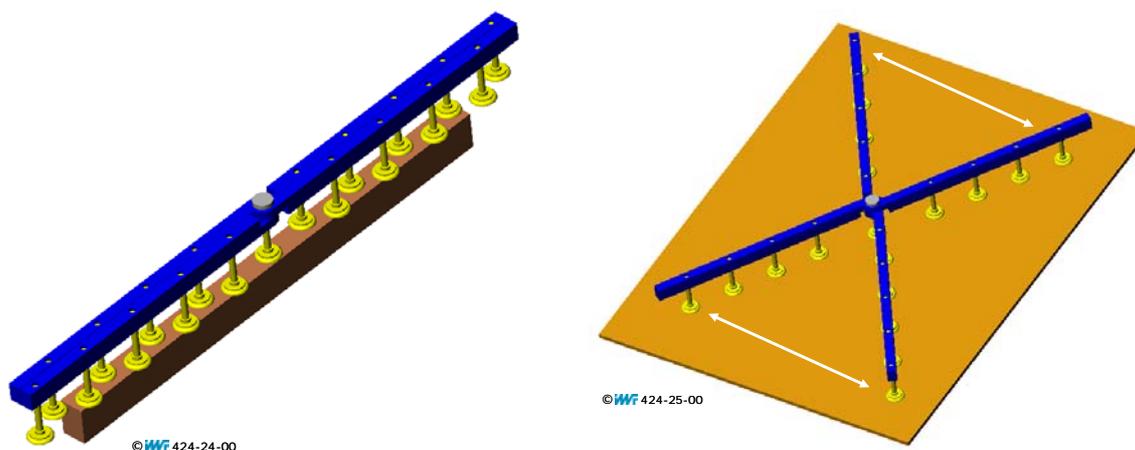


Bild 5.5: Vakuumbreifer zur Handhabung stabförmiger (links) und plattenförmiger Werkstücke (rechts)

5.2.2 Automatisierte Einbringung von Dämmmaterialien

Einen gesonderten Status nimmt die Einbringung des Dämmmaterials ein. Dieser in der Praxis bislang noch nicht automatisierte Prozess ist aufgrund der Faserstruktur des Materials (Mineralwolle oder auch ökologische Dämmstoffe wie Hanf oder Flachs) nicht mit konventioneller Vakuumtechnik realisierbar. Aus diesem Grund wurde ein spezielles Greifersystem konstruiert, das in Verbindung mit einem 6-Achs- oder Portalroboter den Zuschnitt und die Einbringung der Dämmung ermöglicht.

Randbedingungen, Anforderungen

Zunächst wurden allgemeine Randbedingungen und die Anforderungen an das Greifersystem definiert: Die Wandtafeln sind in der Regel geschosshoch und gebäudelang/-breit mit einer Höhe bis zu 2,60 m und einer Länge bis zu 15 m. Das Rastermaß im Großtafelbau beträgt standardmäßig 62,5 cm, es kann jedoch auch variieren. Die Einbringung des Dämmmaterials erfolgt in horizontaler Position, die Wandelemente werden mit der Breitseite nach vorne transportiert. Das Material liegt in Plattenform vor, die maximale Gewichtskraft der Platten beträgt ca. 300 N. Je nach Breite und Länge muss das Material ggf. in beiden Richtungen abgeschnitten werden können; der Zuschnitt des Materials erfolgt auf den

Bereitstellungsflächen. Um einen präzisen Zuschnitt zu ermöglichen, sollte der Greifer in der Lage sein, das Material sowohl in Längs- als auch in Querrichtung rutschfest zu greifen und an einer stationären Säge entlang zu schieben.

Die verwendeten Materialien können je nach Rohdichte unterschiedliche Biegesteifigkeiten aufweisen, auch sehr steife Materialien müssen problemlos zwischen die Stiele gedrückt werden können. Bei der Verarbeitung der Dämmstoffe kann es zu Staubentwicklung kommen, die jedoch keinen Einfluss auf das Greifersystem haben darf, so dass eine entsprechende Abdichtung von Lagern und Führungen vorzusehen ist. Um eine ideale Passung zwischen Dämmmaterial und Holzrahmen zu ermöglichen, wird das Material in der Regel mit Übermaß geschnitten; zum Einbringen der Platten in die Gefache ist demnach eine gewisse Anpresskraft erforderlich, die von dem Greifer aufgebracht werden muss. Darüber hinaus müssen die Greiforgane so konstruiert sein, dass ein Herunterdrücken des Dämmmaterials entlang der Stiele möglich ist.

Der Greifer soll von einer Brücke bzw. einem Portal oder einem 6-Achsroboter geführt werden. Da die Einbringung der Wärmedämmung möglichst schnell erfolgen soll, sind relativ hohe Beschleunigungen zu fordern. Sämtliche beweglichen Komponenten des Greifers müssen daher geringe Massen und somit geringe Trägheitsmomente aufweisen. Darüber hinaus erfordern die auftretenden Geschwindigkeiten eine möglichst kompakte Bauweise des Gesamtsystems. Der eigentliche Greifer des Systems, also das Objekt, das in unmittelbarem Kontakt mit den zu handhabenden Materialien steht, sie ergreift, bei der Bewegung sicher hält sowie wieder abgibt, muss so ausgelegt sein, dass er der Gestalt, Masse und den physikalischen Eigenschaften der zu handhabenden Objekte, aber auch den Parametern der Handhabeoperationen entspricht [13]. Im Fall des Dämmmaterials muss der Greifer nicht nur in der Lage sein, die Dämmplatten sicher zu erfassen, sondern auch, sie in die Gefache der Wandelemente zu drücken.

Kinematische Struktur

Das Greifersystem wurde in Form eines doppelarmigen Greifers konstruiert, wobei jeder Arm aus Oberarm, Unterarm und dem eigentlichen Greifelement besteht. Alle Glieder sind mit einwertigen Drehgelenken miteinander verbunden. Die Greiforgane sind an den Unterarmen ebenfalls mittels eines Drehgelenks angebracht (Bild 5.6). Es handelt sich um ein ebenes Getriebe, dessen Freiheitsgrad sich nach der folgenden Form der Grübler-Regel bestimmen lässt:

$$F = (n - 1) \cdot 3 - g_1 \cdot 2 - g_2 \cdot 1$$

In der Formel steht n für die Anzahl der Getriebeglieder, g_1 für die Anzahl der einwertigen Gelenke und g_2 für die Anzahl der zweiwertigen Gelenke. Die kinematische Kette besteht aus 7 Getriebegliedern und 6 einwertigen Drehgelenken. Damit errechnet sich ein Freiheitsgrad von 6. Die Greiferarme sollten Abstände zwischen 400 mm und 1100 mm einnehmen können. Die Gesamtreichweite des Greifers sollte mindestens 2,5 m betragen. Mit Hilfe dieser Angaben wurde die erforderliche Länge der Greiferoberarme zu 700 mm und die der Unterarme zu 400 mm berechnet.

Das Greifelement selbst ist als Zangengreifer mit zwei Klauen ausgelegt. Für die sichere Erfassung der Dämmplatten ist es erforderlich, dass sich die beiden Greiforgane während des Öffnens und Schließens parallel zueinander bewegen. Darüber hinaus muss es möglich

sein, die Greiforgane zum Absetzen der Dämmplatten sowie zum Hineindrücken in die Gefache zu drehen. Pro Klaue wurden zu diesem Zweck zwei zusätzliche, rotatorische Antriebe eingesetzt.

Bei der Auslegung der Antriebe waren vorwiegend die Gewichtskräfte, die durch das Eigengewicht der einzelnen Getriebeglieder zustande kommen, zu berücksichtigen, da die Dämmplatten mit einer maximalen Gewichtskraft von 300 N im Vergleich zum Eigengewicht des Greifers eine relativ kleine Belastung darstellen. Die Konstruktion sieht vor, dass sämtliche Antriebe sehr einfach montiert und demontiert werden können, so dass sie sich ggf. einfach und schnell austauschen lassen.

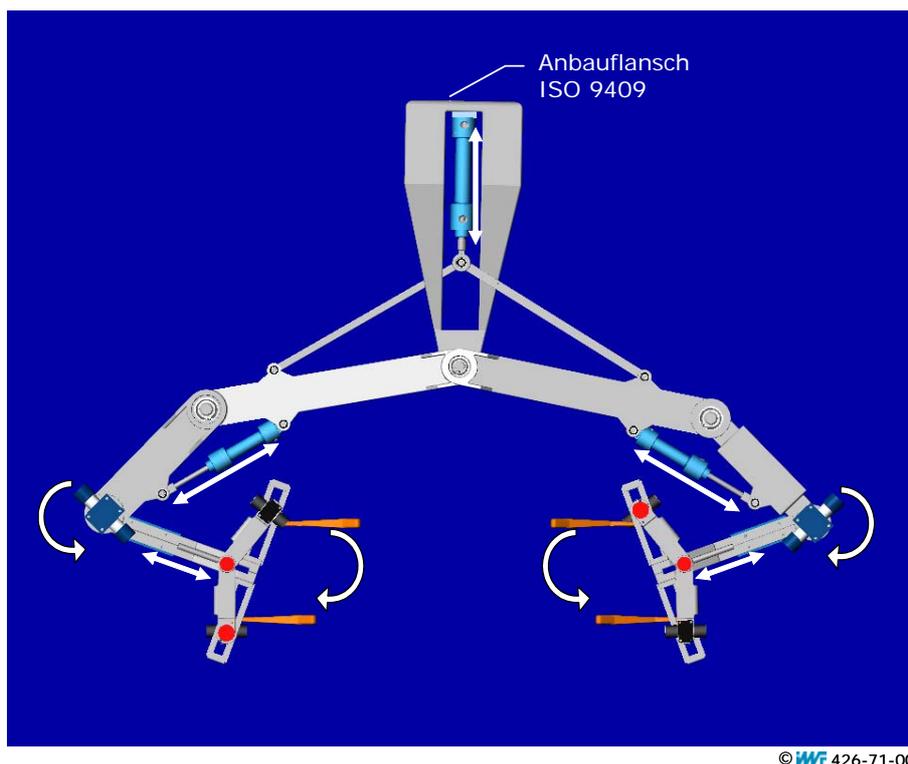


Bild 5.6: Greiferwerkzeug zur automatisierten Einbringung von Dämmmaterialien

Einsatz des Greifersystems

Der ggf. erforderliche Zuschnitt des Dämmmaterials mit Hilfe einer in den Arbeitsbereich des Roboters integrierten Sägeeinrichtung. Dabei kann es sich beispielsweise um eine konventionelle Kreis- oder Stichsäge handeln. Das entstandene Greifersystem ist damit in der Lage, Dämmplatten unterschiedlicher Länge, Breite und Dicke zunächst zuzuschneiden und anschließend in die Gefache eines Wandelements zu drücken. Der entsprechende Arbeitsablauf ist in Bild 5.7 exemplarisch dargestellt.

Zunächst wird die Dämmplatte mit Hilfe der beiden Greifzangen an den Schmalseiten erfasst (a)). Anschließend fahren die Arme des Greifers zusammen, die Dämmstoffmatte wird zur Zuschnitteinheit transportiert (b)). Dort wird das Material auf das erforderliche Maß zugesägt, in gezeigten Fall mittels einer Bandsäge (c)). Dann erfolgt der Transport zur vorgesehenen Position innerhalb der Wandtafel (d)). Die Greiferarme fahren enger zusammen, um den Dämmstoff in das Gefach einpressen zu können (e), f)). Zum Einpressen kommen die unteren Zangen der beiden Greiferseiten zum Einsatz (g)). Nach erfolgter Einbringung fährt

der Greifer die Bereitstellungsfläche des Dämmmaterials wieder an, der Zyklus beginnt erneut (h)).

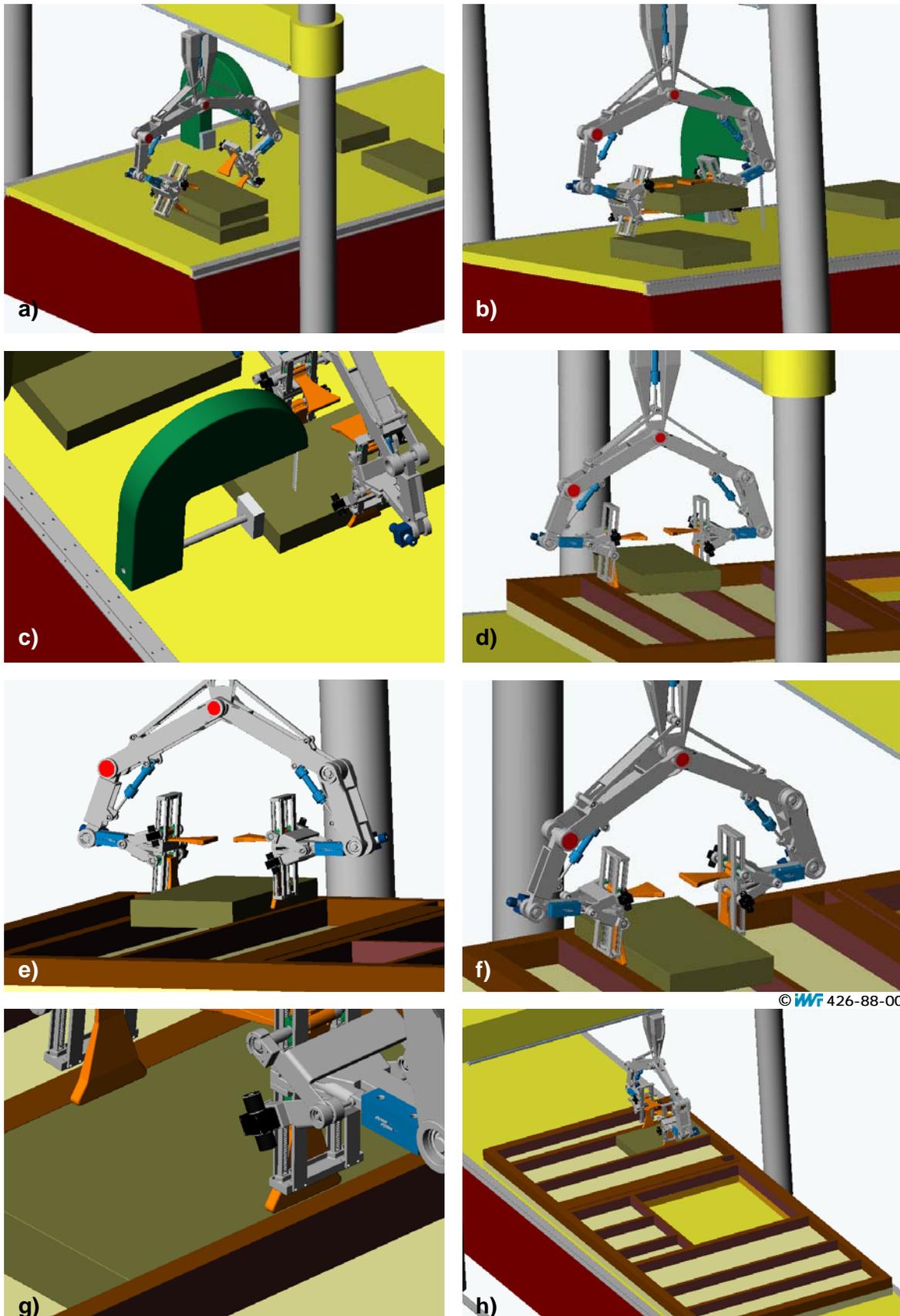


Bild 5.7: Arbeitsablauf bei Zuschnitt und Einbringung des Dämmmaterials

5.3 Multifunktions-Bearbeitungszentrum

5.3.1 Konzept

Kleine und mittelständische Unternehmen erreichen in der Regel Stückzahlen von maximal einigen 100 Häusern pro Jahr. Mit dem Ziel einer möglichst hohen Wirtschaftlichkeit wurde zunächst eine kompakte, multifunktionale Anlage entworfen, bei der nicht zwangsläufig geringe Durchlaufzeiten im Vordergrund stehen. Stattdessen soll auf einer Anlage bei relativ geringen Investitionskosten auch bei kleineren Stückzahlen wirtschaftlich gefertigt werden. Da auf der Anlage komplette Wand-, Dach- und Deckenelemente hergestellt werden, ist für eine dauerhafte Auslastung gesorgt. Stillstandszeiten werden vermieden. Ausgangspunkt der Fertigung ist eine konventionelle Abbundanlage, auf der die benötigten Rippen und Stiele auf Länge gesägt und ggf. Ausfräsungen und Bohrungen hinzugefügt werden.

Das Anlagenkonzept sieht eine Kombination aus Portalroboter, 5-Achs-Bearbeitungszentrum und Nagelbrücke vor (Bild 5.8). Die Modellierung dieser multifunktionalen Fertigungseinrichtung erfolgte mit Hilfe der 3D-Simulationssoftware „eM-Engineer“ der Fa. Tecnomatix. Ergänzende Objekte wurden als 3D-CAD-Objekte unter Solid Works erstellt. Die Anlage ist durch zelleneigene Einrichtungen in der Lage, Werkstücke, d.h. Rippen/Stiele, Platten und Dämmmaterial, selbst zu handhaben und auf dem Arbeitstisch zu positionieren. Die Materialbereitstellung kann automatisiert über Förderbänder oder aber auch in Form lokaler Puffer erfolgen. Im gezeigten Beispiel werden die Platten etwa per Gabelstapler gefördert und in der Zelle gepuffert. Die Rippen werden über ein Förderband von der Abbundanlage aus zugeführt. Voraussetzung ist, dass die Bauteile vom Abbund in der benötigten Reihenfolge produziert werden. Die Steuerung muss über das Produktionsplanungs- und Steuerungssystem erfolgen.

Die Transporteinrichtungen sind in den Arbeitsraum des Multifunktionsportals integriert, es kommen die in 5.2 entwickelten Greifersysteme zum Einsatz. Für einen autonomen Betrieb ist es notwendig, dass die Anlage die einzelnen Werkstücke identifiziert, um sicherzustellen, dass das korrekte Bauteil bereitgestellt wurde bzw. um die zugehörige Einbauposition zu bestimmen. Die Werkstückidentifizierung kann beispielsweise über Barcode oder Funktransponder (RFID) erfolgen. Bei der Teilebereitstellung muss über Anschläge eine definierte Lage des Werkstücks erzeugt werden, um das sichere Greifen durch den Roboter zu ermöglichen. Alternativ wird über Kamerasysteme oder Lichtschranken die Bauteillage automatisch ermittelt und an die Robotersteuerung übergeben.

Darüber hinaus ist das Portal in der Lage, alle tafelahängigen Bearbeitungsschritte (Bohren, Fräsen, Sägen, Nageln) selbständig durchzuführen. Die Arbeitsspindel besitzt ein Werkzeugwechselsystem, die zugehörigen Werkzeuge werden in einem Werkzeugmagazin innerhalb der Zelle bereitgehalten. Das Magazin ist modular aufgebaut und beliebig erweiterbar. Das 5-Achskonzept sorgt für die notwendige Flexibilität bei der Bearbeitung. So können Sägeschnitte beliebiger Orientierung oder horizontale Bohrungen vorgenommen werden. Je nach eingesetztem Spindeltyp sind unterschiedliche, tafelangepasste Drehzahlen und Leistungen realisierbar.

Das automatische Wenden der Tafeln erfolgt mit Hilfe eines Schmetterlingswenders. Aufgrund der Integration zweier Arbeitstische in die Fertigungszelle, verknüpft durch den Schmetterlingswender, können beide Tafelseiten auf derselben Anlage bearbeitet werden. Die Verifizierung des Konzepts erfolgte anhand der definierten Standard- oder Mustertafeln

(aus den Funktionsgruppen Dach, Decke und Wand), welche die unterschiedlichen in Frage kommenden Handhabungs- und Bearbeitungsaufgaben in sich vereinen. Je nach Größe des Betriebes könnten mehrere dieser Anlagen kombiniert werden, beispielsweise jeweils eine für die Wand-, Dach- und Deckenelementproduktion.

Das Portal besitzt einen Arbeitsraum von 20 x 7,5 x 3 m. Die maximalen Vorschubgeschwindigkeiten wurden zu 50 m/min in x-, 30 m/min in y- und 15 m/min in z-Richtung abgeschätzt. Bild 5.8 zeigt die Fertigung einer Wandtafel; dieser Tafeltyp weist das größte Spektrum an Bauteilen und Bearbeitungssequenzen auf.

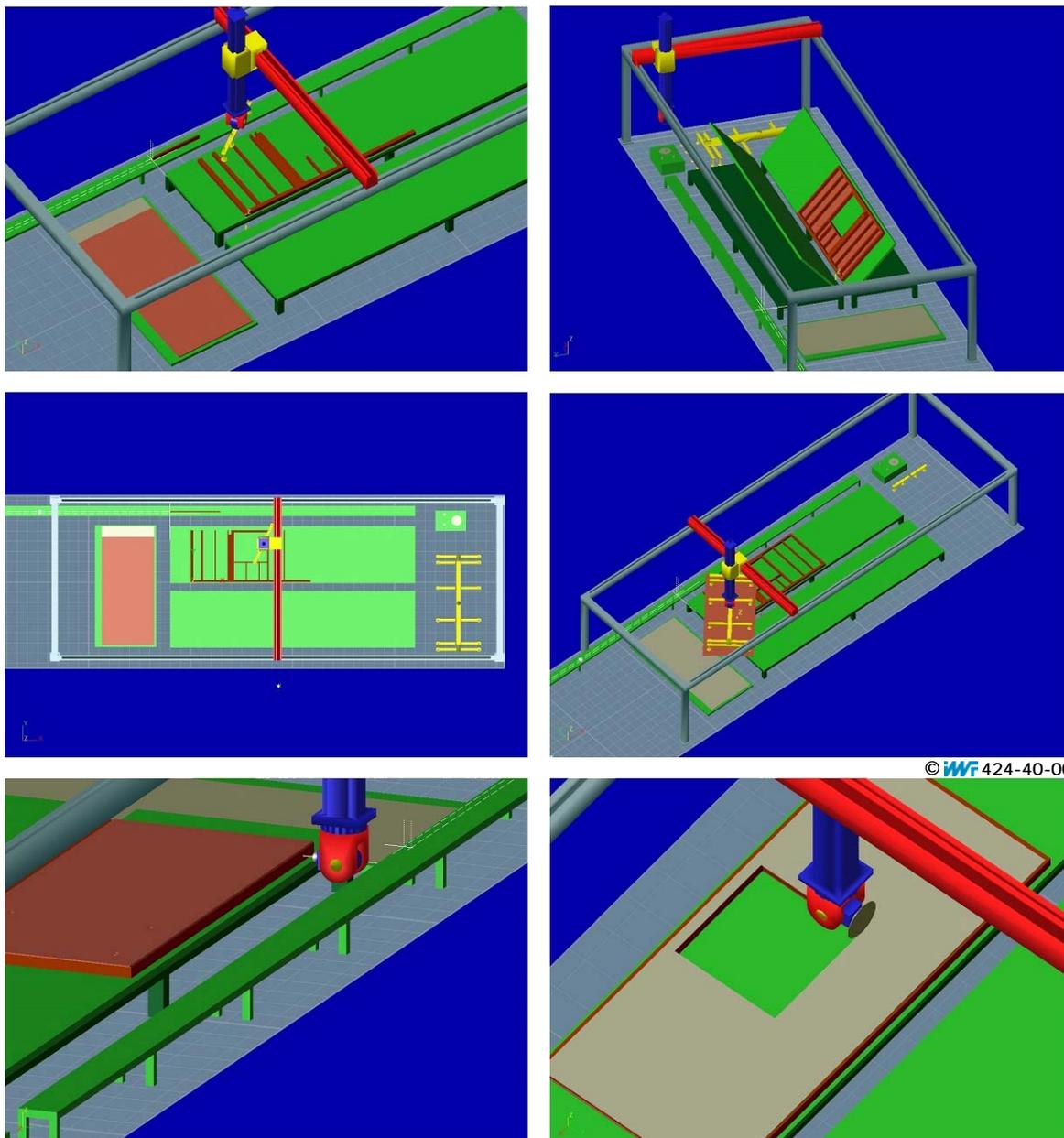
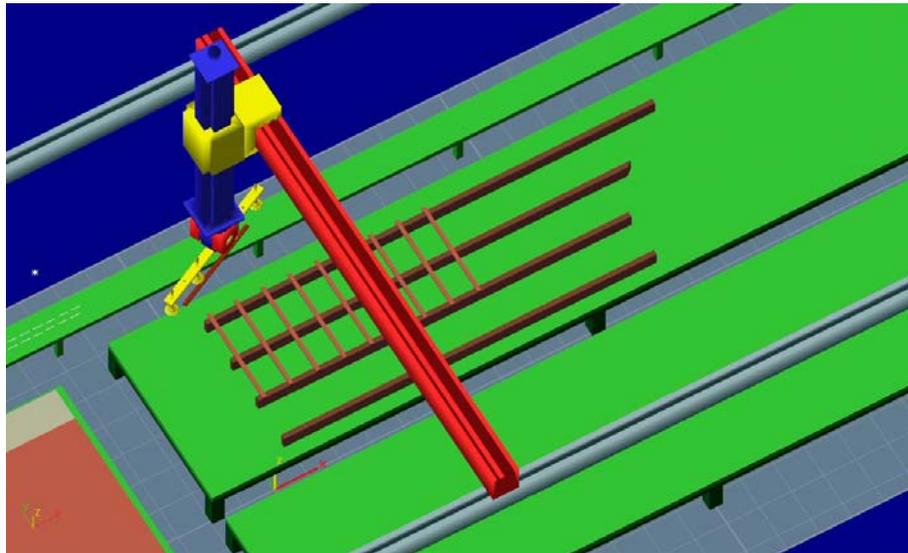


Bild 5.8: Multifunktions-Bearbeitungszentrum in Portalbauweise

Bei der Herstellung von Dachtafeln konzentriert sich die mechanische Bearbeitung auf die vorgeschaltete Abbundanlage. Dabei handelt es sich primär um Säge- und Fräsoperationen an den den Dachstuhl bildenden Rippen. Das Portalbearbeitungszentrum übernimmt vor allem Aufgaben der Teilehandhabung und -positionierung. Zusätzlich fallen Nagel-

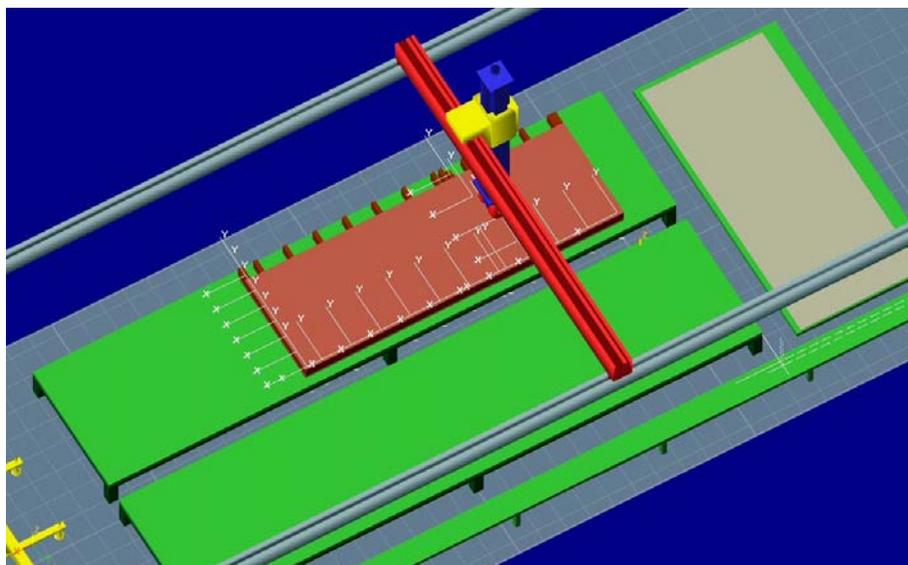
/Klammervorgänge sowie der Zuschnitt von Platten und der Lattung/Konterlattung an. Bild 5.9 zeigt die Fertigung einer Dachtafel mit Hilfe des Multifunktionsportals.



© IWF 424-28-00

Bild 5.9: Fertigung einer Dachtafel

Der Fertigungsablauf bei den Deckentafeln weist Parallelen zur Wandtafelfertigung auf. Der Roboter ist für die Positionierung von Rippen und Platten zuständig. Der Hauptbearbeitungsprozess ist neben dem Nageln/Klammern das Setzen von Bohrungen. Diese Aufgaben werden ebenfalls vom Portalroboter übernommen. Die Fertigung einer Deckentafel ist in Bild 5.10 dargestellt. Die Koordinatensysteme („Frames“) auf der Tafel kennzeichnen diejenigen Positionen, an denen Bohrungen durch den Roboter gesetzt werden müssen.



© IWF 424-29-02

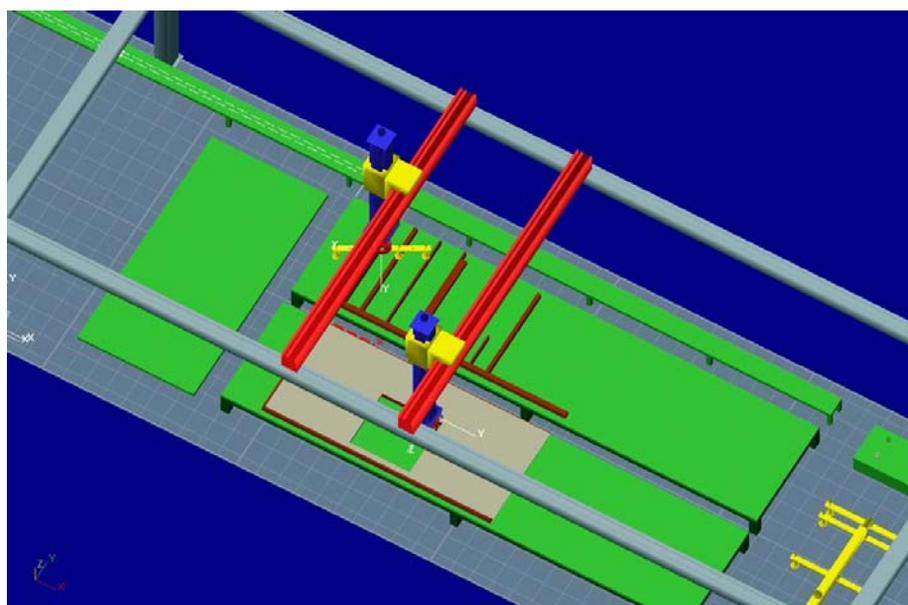
Bild 5.10: Fertigung einer Deckentafel

5.3.2 Variationen des Layouts der Fertigungszelle

Ausgehend von dem Basiskonzept der Fertigungszelle wurden Studien zur Variation des Multifunktionsportals durchgeführt. So ist beispielsweise der Einsatz von zwei Robotern auf

einem Portal möglich (Bild 5.11). Diese Roboter können zum einen identisch und gleichberechtigt bezüglich ihrer Aufgaben ausgelegt sein. Der Einsatz erfolgt in diesem Fall arbeitsteilig, so dass beide Roboter jeweils Werkstücke handhaben und bearbeiten können. Auf der anderen Seite ist eine Spezialisierung der beiden Roboter denkbar. Das eine System ist als Schwerlastroboter ausgelegt, der für die Positionierung der benötigten Werkstücke zuständig ist. Das andere ist ein Roboter niedriger Traglast, der die Bearbeitungsprozesse durchführt. Auf diese Weise ist kein Wechsel zwischen Greifer und Werkzeug (Säge, Bohrer, Fräser...) mehr notwendig. Während der Handhabungsroboter entsprechend des Werkstückspektrums für hohe Lasten (großflächige Platten, Ober und Untergurte) ausgelegt ist, kann der Bearbeitungsroboter mit weitaus geringerer Masse konstruiert werden, um hohe Beschleunigungen und Verfahrgeschwindigkeiten zu erzielen.

Beiden Konzepten ist das Problem der Kollisionsgefahr gemein. Zudem zeigt sich, dass sich die Roboter gegenseitig behindern, so dass die Produktivität der Zelle sinkt. Beim arbeitsteiligen Einsatz mit zwei gleichberechtigten Robotern besteht eine Konkurrenz um die Greifer und Werkzeuge. Es ist möglich, dass ein Roboter stillsteht, da er auf ein gerade vom zweiten System verwendetes Werkzeug wartet. Als Lösung können Greif- und Bearbeitungswerkzeuge in doppelter Ausführung vorgesehen werden. Dies erhöht allerdings den Platzbedarf und die Kosten der Zelle.



© IWF 424-30-01

Bild 5.11: Einsatz zweier Roboter innerhalb des Portals

Einen weiteren Ansatz stellt die Integration eines 6-Achs-Roboters (KUKA) in die Fertigungszelle dar (Bild 5.12). Portal und KUKA-Roboter ergänzen sich gegenseitig in ihren Aufgabebereichen. Während etwa das Portal weiterhin für die Werkstückpositionierung sowie Bearbeitungsprozesse wie Sägen, Fräsen und Bohren zuständig ist, führt der 6-Achs-Roboter Nagel- und Klammerprozesse durch. Darüber hinaus ist die Handhabung von Installationsmaterial oder der Schnellverbinder des TV1 möglich.

Auch bei diesem Konzept ist die Gefahr von Kollisionen vorhanden. Allerdings behindern sich die beiden Roboter nicht in dem Maße wie beim Einsatz von zwei Portalrobotern. Um Kollisionen zu vermeiden, ist eine sorgfältige Planung der Roboterbewegungen notwendig. In diesem Punkt unterstützt die 3D-Simulation die Roboterprogrammierung.

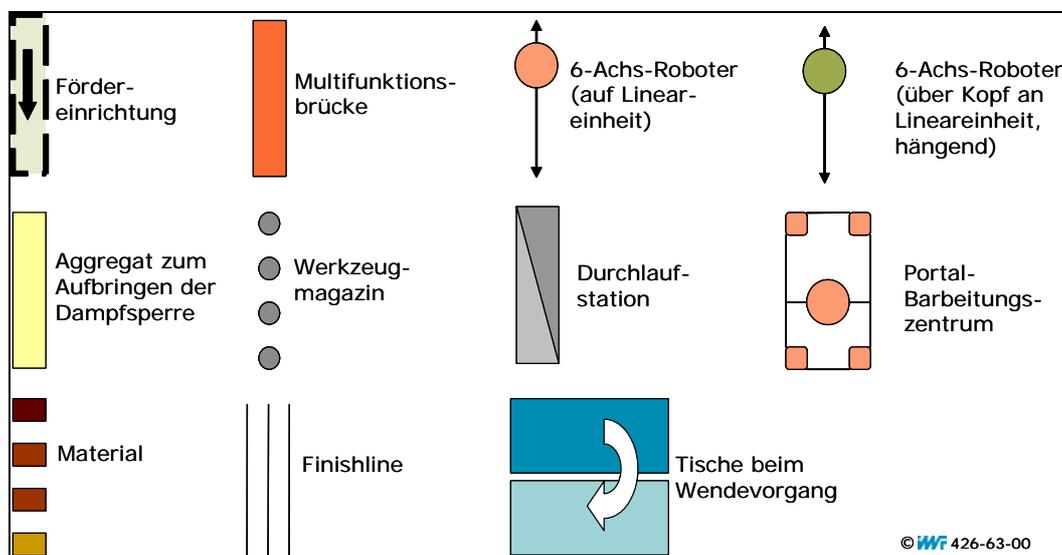


© IWF 424-30-03

Bild 5.12: Integration eines 6-Achs-Roboters in das Portalbearbeitungszentrum

5.4 Layoutvariationen des Fertigungsablaufs

Nachdem mit dem multifunktionalen Bearbeitungszentrum eine Kompaktanlage zur Montage und Bearbeitung der Wand-, Dach- und Deckentafeln konzipiert wurde, erfolgten im weiteren Verlauf der Arbeiten Variationen des Gesamtablaufs der Fertigung. Dabei wurde das Ziel der Erhöhung des Automatisierungsgrades verfolgt, indem Förder- und Handhabungseinrichtungen, Wendeeinrichtungen und Multifunktionsbrücken miteinander kombiniert wurden. Als Handhabungsgeräte kamen sowohl 6-Achs-Roboter als auch Portalroboter bzw. Portalbearbeitungszentren zum Einsatz. Ausgangspunkt des Fertigungsablaufs bildete stets die Abbandanlage, die über Förderbänder oder Roboter mit den weiteren Bearbeitungsstationen verknüpft wurde. Bild 5.13 zeigt die Legende der verwendeten Symbole, mit deren Hilfe die einzelnen Layoutvariationen im Folgenden dargestellt werden.



© IWF 426-63-00

Bild 5.13: Legende zu den Layoutvariationen des Fertigungsablaufs

5.4.1 Einsatz von 6-Achs-Robotern

Die zugeschnittenen Rippen und Stiele werden über ein Förderband von der Abbundanlage zugeführt (Bild 5.14). Ein auf einer Lineareinheit sitzender 6-Achs-Roboter (KUKA) übernimmt die Balken und legt sie auf dem Tisch zu, zur Ausrichtung wird auf dem Tisch ein Anschlag benötigt. Ein zweiter, ebenfalls auf einer Lineareinheit gelagerter Roboter fixiert sie mit Nagelplatten oder Klammern. Die Roboter wechseln nun die Werkzeuge am unteren Ende des Tisches. Roboter 2 übernimmt die Auflage von Platten, die nach Typ sortiert als Stapel hinter ihm bereitgestellt werden. Roboter 1 vernagelt sie auf dem Gefach, wechselt das Werkzeug, trennt Fenster- und Türöffnungen heraus und setzt Bohrungen. Roboter 1 übernimmt den Abtransport des abgetrennten Materials. Beide Roboter wechseln nun auf Greifwerkzeuge, die die Halbtafel jeweils an den Breitseiten aufnehmen. Eine Vertiefung im Tisch ist hierbei notwendig, um den entsprechenden Handlungsraum zu gewährleisten. Die Roboter heben die Tafel an, wenden es um die Längsachse und legen es auf dem Tisch wieder ab. Roboter 2 legt Baugruppen in das gewendete Bauteil ein. Die Aufbringung der nicht biegesteifen und daher schwer zu handhabenden Dampfsperre erfolgt nicht mit Hilfe der beiden 6-Achs-Roboter, sondern durch eine Brücke, die in Längsrichtung des Tisches verfährt, die Folie von einer Rolle abrollt und am Tafelende abschneidet. Die Befestigung mittels Klammern wird von den Robotern vorgenommen. Platten der zweiten Tafelseite werden durch den Roboter 2 aufgelegt, Roboter 1 befestigt diese per Nagelaggregat. Die fertig montierte Tafel wird von einem Kran zur Finishlinie abtransportiert. Der spiegelsymmetrische Aufbau nach Bild 5.14 ermöglicht die Versorgung von zwei Einrichtungen zur Tafelfertigung durch eine Abbundanlage. Während die eine Seite für die Wandtafelherstellung zuständig ist, erfolgt auf der anderen die Produktion von Dach- und Deckentafeln.

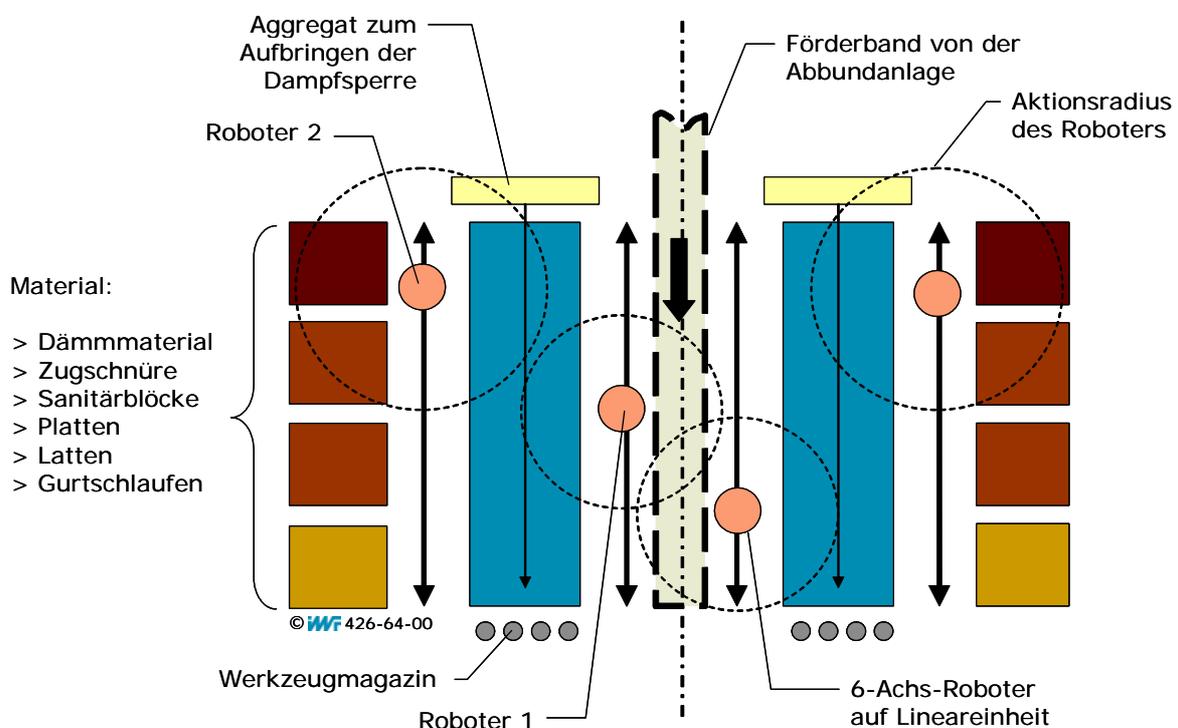


Bild 5.14: Einsatz von 6-Achs-Robotern (KUKA)

5.4.2 Einsatz von Portalbearbeitungszentren

In dieser Variante überspannt je ein Portal-Bearbeitungszentrum zwei Tische inklusive Materialstapel, Werkzeugmagazin und vom Abbund kommendes Förderband (Bild 5.15). Dabei können die in 5.3 entwickelten Multifunktionsportale zum Einsatz kommen. Das Portal legt die Balken vom Förderband aus auf dem ersten Tisch, übernimmt die Auflage von Platten, die nach Typ sortiert als Materialstapel bereitgestellt werden, und deren Zuschnitt. Die Tafeln werden unter dem Portal auf den zweiten Tisch per Schmetterlingsverfahren gewendet. Das Portal legt Baugruppen ein. Der zweite Tisch verfährt aus dem Arbeitsbereich des Portals heraus, um mit Hilfe eines gesonderten Aggregats die Dampfsperre auszulegen und zu vernageln oder zu verleimen. Die Endposition des Tisches liegt auf Höhe einer Brücke, die Platten auflegt vernagelt und zuschneidet bzw. Bohrungen etc. fertigt. Ist die Tafel komplett, verfährt der Tisch zur Finishlinie und stellt sie auf. Der symmetrische Aufbau erlaubt die Trennung zwischen Wand- und Dach-/Deckentafeln.

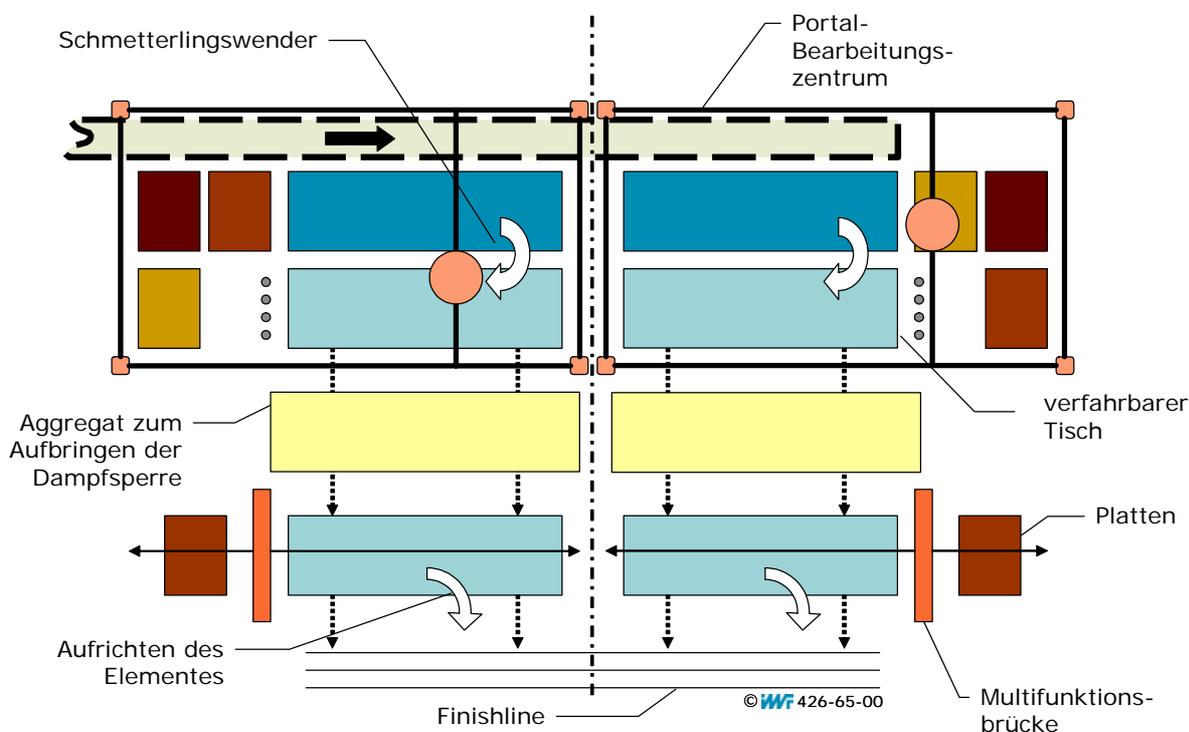


Bild 5.15: Paralleler Einsatz von Portalbearbeitungszentren

5.4.3 Kombination von 6-Achs-Roboter und Multifunktionsbrücke

In dieser Lösung werden die über ein Förderband vom Abbund zugeführten Balken von einem 6-Achs-Roboter auf einem Tisch zugelegt (Bild 5.16). Derselbe Roboter belegt das Rippenwerk mit Platten vom Materialstapel (analog der Variante nach 5.4.1), und befestigt diese mit einem Nagelkopf aus dem Werkzeugmagazin neben dem Tisch. Die Halbtafel wird nach dem Schmetterlingsprinzip auf einen zweiten Tisch gewendet. Dieser verfährt bis auf die Höhe zweier Brücken. Die erste ist eine Multifunktionsbrücke, welche Baugruppen einlegt und somit die Aufgaben übernimmt, die in Lösung 5.4.2 vom Portal durchgeführt werden. Da aber nur die Fläche eines Tisches versorgt werden muss, sind die Nutzung und der Aufbau weniger aufwendig. Die zweite Brücke legt die Dampfsperre auf, klammert sie fest und

schneidet sie ab. Diese Brücke ist in der Lage, beide Produktionslinien zu versorgen, d.h. sowohl die Wand- als auch die Dach- und Deckenmontage. Die Multifunktionsbrücke übernimmt die Auflage und Befestigung der Außenplatten. Der Tisch verfährt bis zur Finishlinie und richtet die Wand zur Übergabe auf.

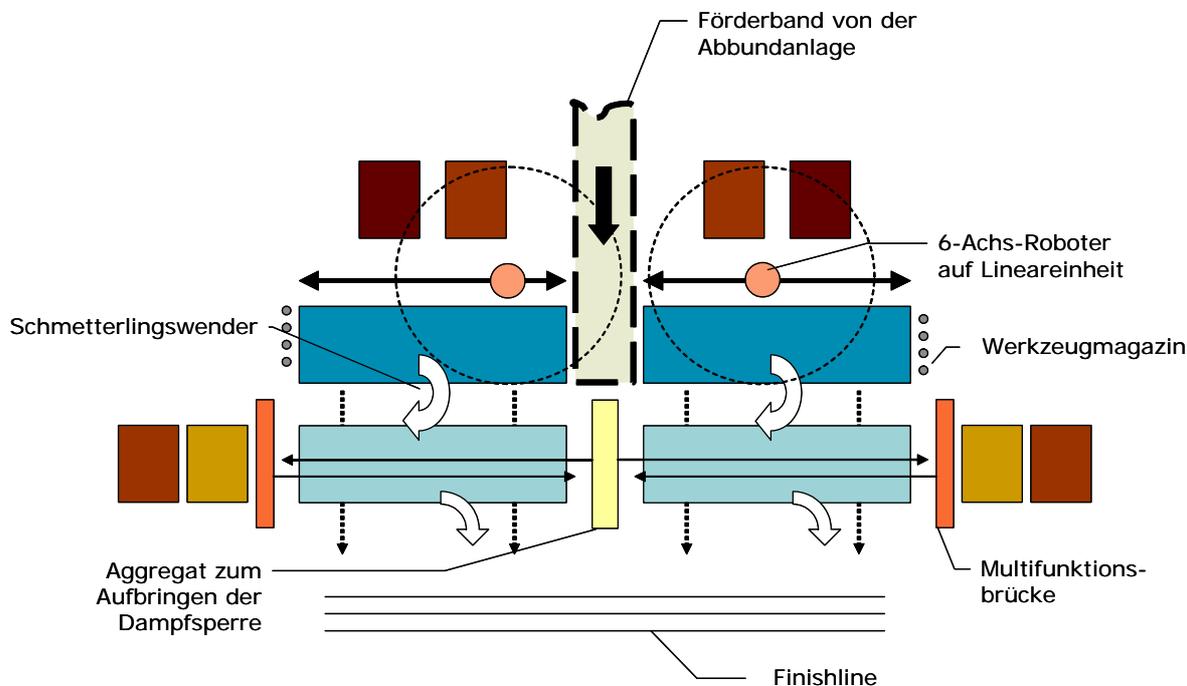


Bild 5.16: 6-Achs-Roboter in Kombination mit Multifunktionsbrücken

5.4.4 Durchlaufzeit mit geradlinigem Materialfluss

Diese Variante stellt einen kontinuierlichen Materialfluss dar (Bild 5.17). Die vom Abbund kommenden Balken werden von einem 6-Achs-Roboter (auf Linearereinheit) auf einem Tisch zugelegt und nach einem Werkzeugwechsel vernagelt. Ein Förderband transportiert das Riegelwerk unter einer Plattenauflegestation und einer Nagelstation hindurch auf einen Tisch, an dem ein weiterer Roboter die spanende Bearbeitung übernimmt. Von diesem Tisch aus wird das Element per Schmetterlingsverfahren auf einen zweiten Tisch gewendet, an dem ein über Kopf hängender 6-Achs-Roboter Baugruppen einlegt. Ein Förderband transportiert das Bauteil unter eine Station, die fertig zugeschnittene Dampfsperrenfolien aus einem Magazin auflegt, die dann an einer folgenden Station festgeklammert wird. Es folgt eine weitere Plattenauflegestation und eine Nagelstation zur Befestigung der Platten. Die Bearbeitung der zweiten Tafelseite wird wiederum von einem 6-Achs-Roboter an einem Tisch vorgenommen. Dieser Tisch richtet das Bauteil auf und übergibt es an die Finishlinie.

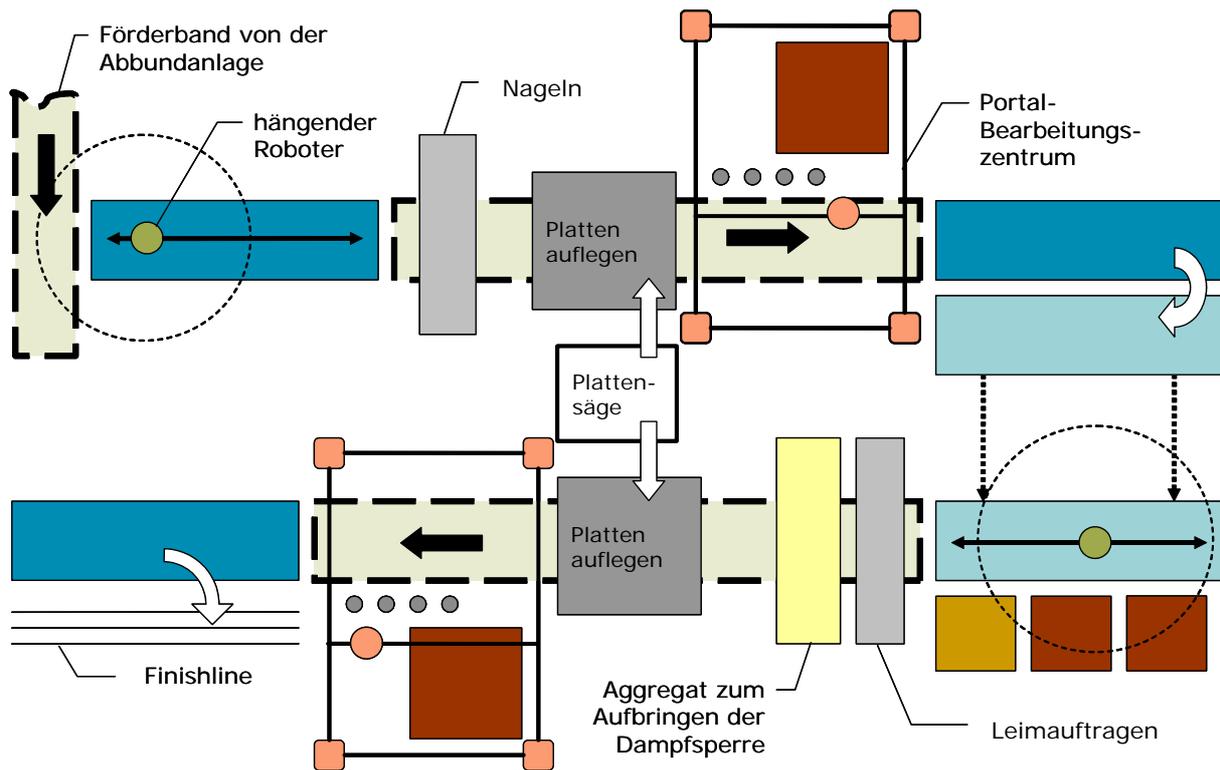


Bild 5.18: Durchlauffertigung mit Portalbearbeitungszentrum, U-förmiger Materialfluss

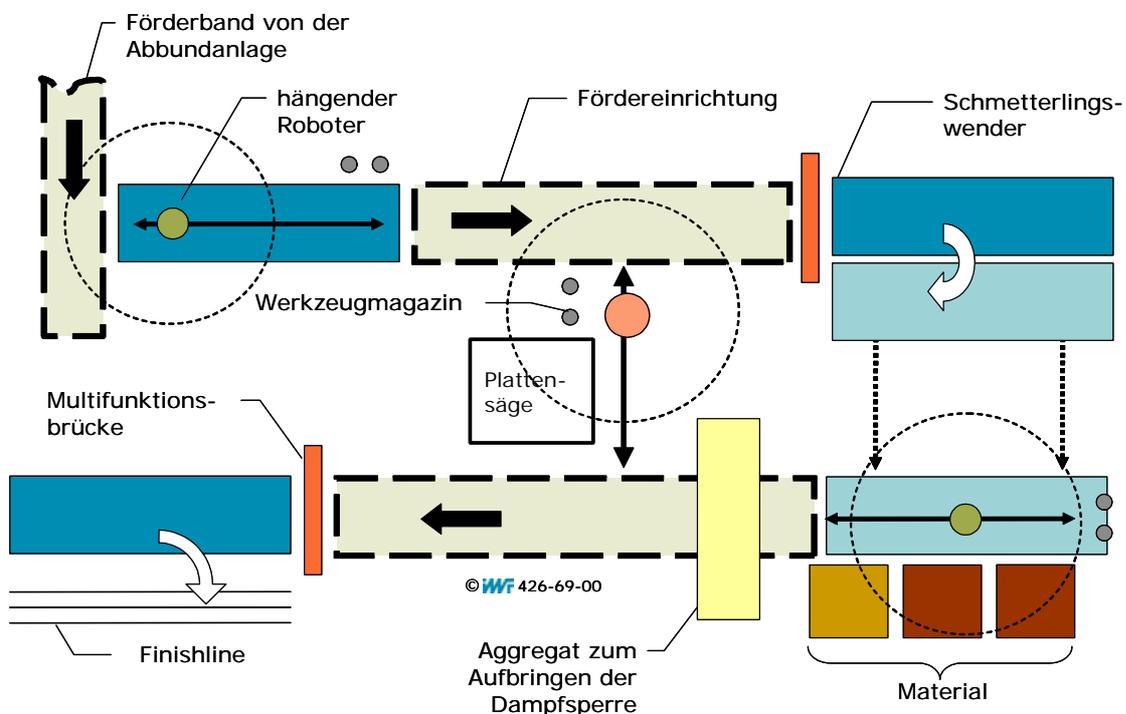
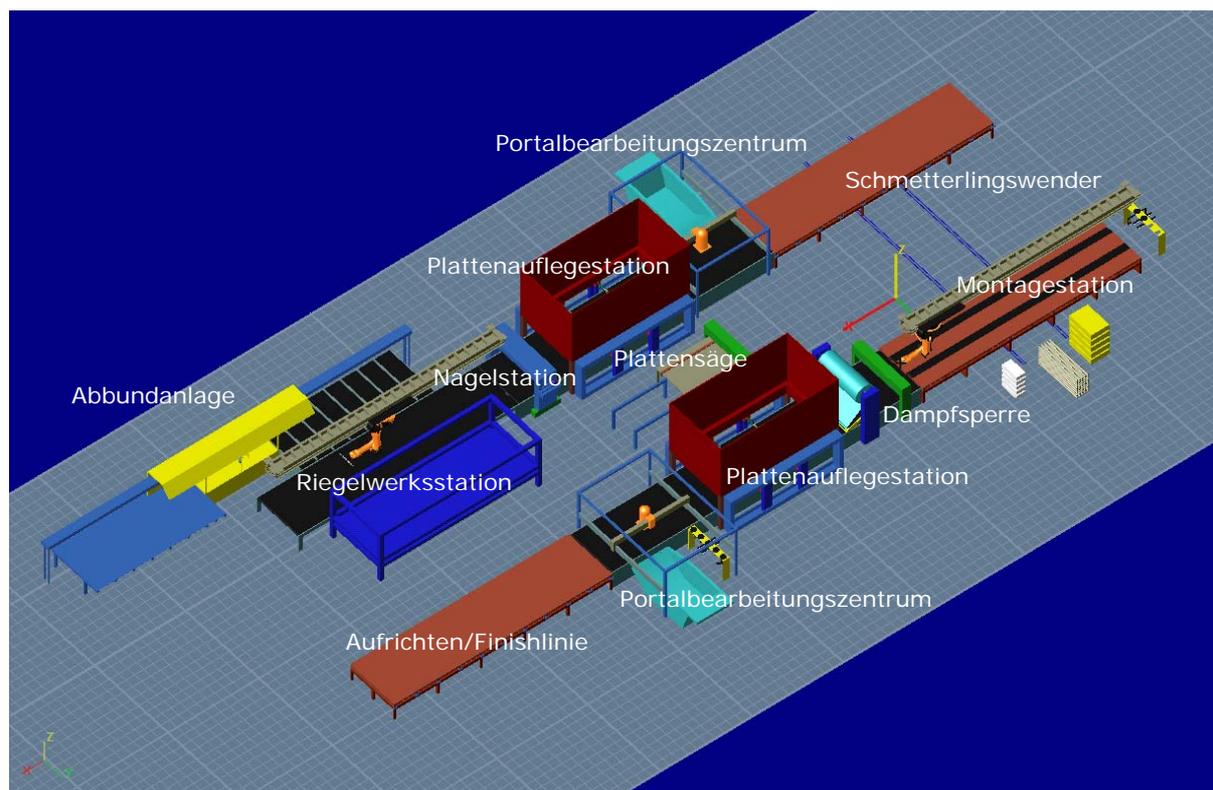


Bild 5.19: Durchlauffertigung mit 6-Achs-Roboter, U-förmiger Materialfluss

5.5 Realisierung einer Durchlaufzeitfertigung in der 3D-Simulation

Aus den im vorangehenden Kapitel durchgeführten Variationen des Fertigungsablaufs wurde die kontinuierliche Lösung nach Bild 5.18 für eine Umsetzung in der 3D-Fertigungssimulation ausgewählt. Die Linienfertigung bietet den Vorteil einer hohen Auslastung, da das Tafелеlement von Bearbeitungsstation zu Bearbeitungsstation durchgereicht wird. Da die Bearbeitung per Multifunktionsbrücke oder der Wendeprozess nicht an derselben Station wie die Montagevorgänge von Riegelwerk, Beplankung oder Dämmstoffen erfolgen und somit die Montagestation nicht blockiert wird, kann bereits an der Folgetafel gearbeitet werden. Die Durchführung der Montageoperationen kann sowohl manuell als auch vollautomatisiert erfolgen, auf den grundsätzlichen Fertigungsablauf hat dies keinen Einfluss. Unterschiede werden sich aber hinsichtlich Fertigungszeiten und –kosten ergeben. Diese Zusammenhänge werden in Kapitel 7 mit Hilfe der Materialflusssimulation ermittelt. Für die Umsetzung in der 3D-Simulation wurde zunächst die vollautomatische Variante gewählt.

Bild 5.20 stellt die unter eM-Engineer realisierte Anlage im Überblick dar. Der durch das Raster angedeutete Hallenboden stellt die Grundfläche des Werks der Fa. Baukmeier in Hameln dar. Die Anlage wurde so konzipiert, dass sie in den vorhandenen Bauraum integriert werden kann. Der Forderung nach Nutzung bestehender Hallenflächen wird damit Rechnung getragen.



© IWF 426-73-00

Bild 5.20: Durchlaufzeitfertigung mit U-förmigen Materialfluss in der 3D-Simulation

Bild 5.21 stellt den Fertigungsablauf am Beispiel der Standardwandtafel stationsweise dar. Die Abbundanlage entspricht dem Modell K2 der Firma Hundegger. Die Zufuhr der Rohbalken zum Abbundvorgang erfolgt über einen Tisch, der mit einem Kettenförderer ausgestattet ist. An Schlitzen montierte Greifer nehmen die Werkstücke auf und führen sie entlang der einzelnen Bearbeitungsaggregate für Bohr-, Fräse- und Sägeoperationen zur Entnahmezo-

ne. Dort werden die gefertigten Rippen quer in Richtung Riegelwerksstation gefördert. Anschläge stellen eine definierte Teilezufuhr sicher, um die korrekte Aufnahme durch den Roboter zu gewährleisten.

Der 6-Achs-Roboter der Riegelwerksstation wurde von der Fa. KUKA Roboter mittels eines speziellen Simulationswerkzeugs anhand der definierten Standardtafeln ausgelegt. Es handelt sich um das Modell KR 360/1, der über Kopf an einer Lineareinheit KL 1500/2 montiert ist, um die Reichweite in Längsrichtung des Tisches zu vergrößern. Es handelt sich um einen Schwerlastroboter mit einer maximalen Traglast von 360 kg, der aufgrund der hohen Werkstückmassen und der resultierenden Massenträgheiten ausgewählt wurde. Der Roboter ist mit einem Vakuumgreifer in Linienkonfiguration ausgestattet, um die stabförmigen Rippen sicher zum Riegelwerk zusammensetzen zu können (Bild 5.21 a)).

Von der Riegelwerksstation wird das Fachwerk mit Hilfe eines Förderbands den sich anschließenden Bearbeitungsstationen zugeführt. Zunächst wird eine Nagelstation durchlaufen, die das Riegelwerk mit Klammern fixiert. Der Nagelkopf dieser Brücke verfährt entlang einer Achse, deren Winkel so angelegt ist, dass auf dem sich bewegenden Rahmen eine gerade Linie beim Vernageln gefahren wird. An der Seite der Brücke befindet sich eine Vorrichtung zur Verstellung des Winkels, um somit den Nagelvorgang an die Bandgeschwindigkeit anzupassen (b)).

Auf das fertig vernagelte Riegelwerk wird die Beplankung aufgelegt. Diese Platten weisen tafelabhängig individuelle Abmessungen auf. Sie werden daher an einer Plattensäge, die das zentrale Element des U-förmigen Fertigungsablaufs bildet, entsprechend der Reihenfolge der Fertigungsaufträge vorbereitet und über der Plattenauflegestation in ein Magazin gegeben. Die Station selbst besitzt horizontal und vertikal bewegliche Greifer, die die Handhabung unterschiedlichster Plattengrößen ermöglichen. Da die Greifer unabhängig voneinander bewegt werden können, ist auch die Auflage asymmetrischer Platten möglich (c)).

Das beplankte Riegelwerk verlässt die Plattenauflegestation und durchläuft ein Portalbearbeitungszentrum, das zunächst mittels Nagelaggregat die Platten auf dem Riegelwerk fixiert. Das Bearbeitungszentrum ist mit einem Werkzeugwechsler ausgestattet, der neben den Aggregaten zum Nageln, Sägen, Fräsen und Bohren auch einen Vakuumgreifer bereithält. Diese maschinenintegrierte Handhabungsfunktion ermöglicht das Entfernen großflächig ausgesägter Plattenreste von Fenster- und Türöffnungen. Da der Arbeitsbereich des Portals über die Tafelbreite hinausreicht, können die Reststücke in einem Container entsorgt werden (d)).

Dem Portal schließt sich ein Wendetisch an, der die Halbtafel um 90° aufrichtet. Der Tisch, der die Tafel übernimmt, wird auf einer am Boden befestigten Schiene an den ersten Tisch herangefahren und ebenfalls aufgestellt. Durch das Verfahren der beiden Tische in Analogie zu einem Schmetterlingswender wird die Distanz zwischen den beiden Fertigungssträngen der U-förmigen Anlage überbrückt (e)).

Über der Endposition des zweiten Tisches ist ein 6-Achs-Roboter vom Typ KUKA KR 180 an einer Lineareinheit KL 1500/2 über Kopf montiert. Dieser Roboter übernimmt die Montagevorgänge an der noch offenen zweiten Tafelseite wie die Einbringung von Dämmmaterialien oder die Befestigung von Schnellverbindern. Aufgrund der geringeren Werkstückgewichte ist hier ein Modell mit der maximalen Traglast von 180 kg ausreichend (f)).

Nach erfolgtem Einbau wird die Tafel in entgegen gesetzter Richtung zur nächsten Station gefördert. Hier erfolgen die Auflage und die Fixierung der Dampfsperre. Aufgrund der Schwierigkeit, eine bereits zugeschnittene Folie maschinell zu handhaben, wird die PE-Folie von einer Rolle abgewickelt und bei Erreichen des Tafelendes von einem quer zur Förderrichtung laufenden Messer abgeschnitten. Die Fixierung der Dampfsperre erfolgt entweder durch Verleimung oder Klammern. Im Falle der Verleimung wird durch ein vorgeschaltetes Aggregat Leim aufgetragen und die Folie beim Abrollen durch eine Walze auf das Riegelwerk gepresst (g)).

Die folgende Plattenauflegestation entspricht im Aufbau der Station zur Beplankung der ersten Tafelseite. Das Magazin wird ebenfalls durch die zentral angeordnete Plattensäge mit zugeschnittenen Werkstücken versorgt. Das sich anschließende Portalbearbeitungszentrum fixiert die Beplankung und führt Säge-, Fräs- und Bohroperationen durch. Die benötigten Werkzeuge und Greifer stehen in einem Werkzeugmagazin bereit.

Das Förderband transportiert die fertig montierte Tafel bis auf einen Tisch, der sie um 90° aufstellt und im Falle einer Außenwand an die Finishlinie übergibt. Über ein Schienensystem wird die Tafel in eine freie Linie des Finishbereichs gefahren, um dort die Montage von Fenster, Türen, Rollläden und Wärmeverbundsystem vorzunehmen. Aufgrund der Komplexität der Bauteile und Arbeitsvorgänge werden diese Prozessschritte manuell durchgeführt (h)).

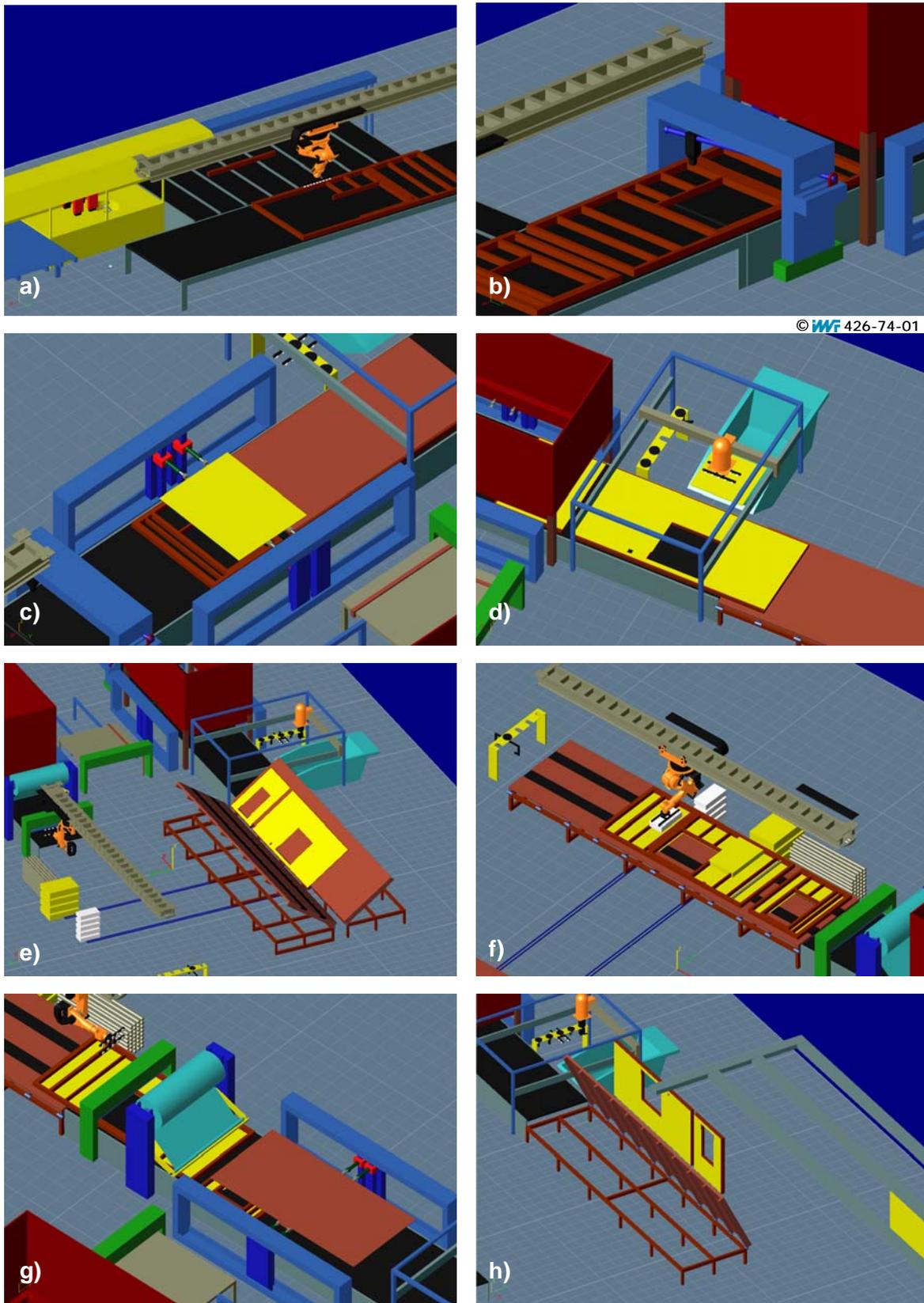


Bild 5.21: Fertigungsablauf bei der Wandtafelherstellung

6 Modellierung und Optimierung des Fertigungsablaufs mittels Materialflusssimulation

6.1 Konzeption

Das Ziel bei der Erstellung der Materialflusssimulation war die Schaffung eines universellen Modells der Abläufe bei der Vorfertigung von Elementen des Holztafelbaus. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Nachbildung beliebiger Produktionsabläufe ohne Beschränkung auf ein bestimmtes Fertigungskonzept oder Maschinenspektrum. Typ, Anzahl und Eigenschaften der eingesetzten Maschinen, Roboter, Fördereinrichtungen und Werker sollen beliebig variiert und miteinander kombiniert werden können. Darüber hinaus soll die Durchführung dieser Variationen bei minimalem Eingriff in das eigentliche Simulationsmodell erfolgen können.

Zu diesem Zweck wurde die Materialflusssimulation mit einer hierarchischen, modularen Struktur versehen (Bild 6.1). Die Gesamtfertigung setzt sich aus einzelnen Fertigungsabschnitten wie Abbund, Wandtafelherstellung oder Versand zusammen. Diese Fertigungsbereiche greifen wiederum auf einen Maschinenpool zurück, der beispielsweise aus Abbundanlagen, Multifunktionsbrücken oder Transport-/Fördereinrichtungen besteht. Es handelt sich dabei um eine Art „Baukastensystem“, das beliebig erweiter- und untereinander kombinierbar ist. Die Funktionalität der einzelnen Maschinen bzw. Bearbeitungsstationen wird mit Hilfe des Simulationssystems nachgebildet. Hierzu zählen die jeweiligen von der Station ausführbaren Bearbeitungs-, Montage- und Transportvorgänge, also etwa Fräs- und Sägeoperationen, Zusammenbau des Riegelwerks oder internes Teilehandling. Um eine möglichst große Flexibilität des Simulationsmodells zu erzielen, liegt der Maschinenpool in parametrisierter Form vor. So wird beispielsweise die Vorschubgeschwindigkeit beim Sägen oder die Zeit für das Auflegen einer Dachlatte im Modell durch Variablen repräsentiert.

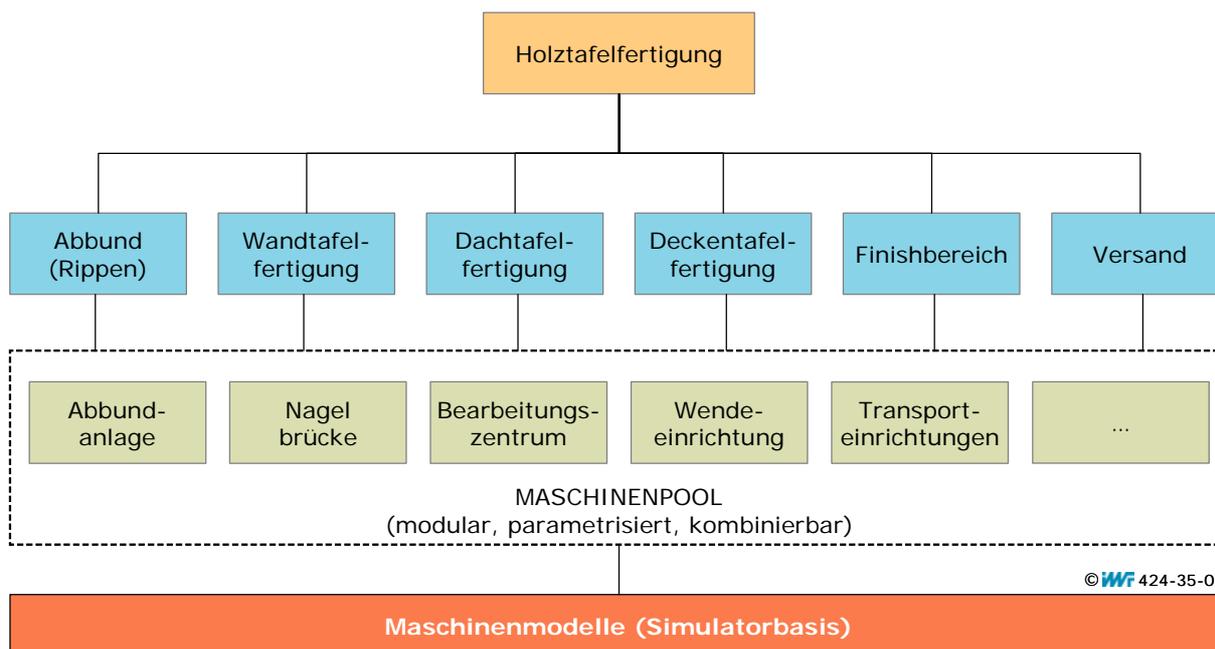


Bild 6.1: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells

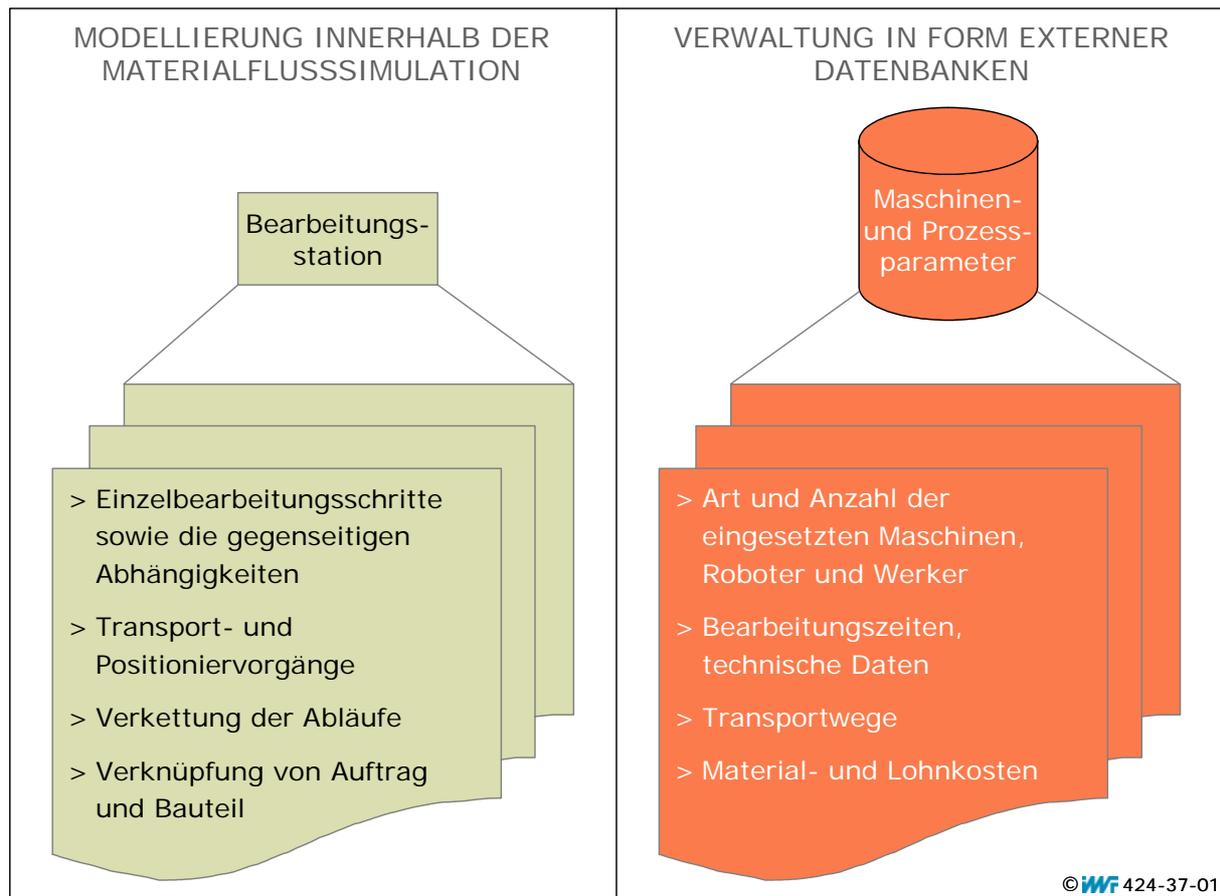


Bild 6.2: Trennung von Simulationsmodell (links) und den zugehörigen Maschinen- und Prozessdaten (rechts)

Die zugehörigen Maschinen- und Prozessdaten werden in externen Datenbanken verwaltet und erst bei Beginn eines Simulationslaufs eingelesen (Bild 6.2). Die Simulation kann somit durch Änderungen an der Datenbasis auf einfache Weise variiert werden. Neben den Maschinenparametern liegen auch die Fertigungsaufträge als externe Daten vor. Die Generierung dieser Auftragslisten erfolgt anhand von Produktionslisten und Fertigungsinformationen direkt aus einem 3D-CAD/CAM-System (siehe Kapitel 6.2). Neben den Bauteildaten wie Typ, Anzahl und Werkstoff berücksichtigen die Listen sämtliche zugehörigen Bearbeitungs- und Montagevorgänge. Das Simulationsmodell ist somit nicht starr und an ein festes Teilespektrum gebunden, sondern ermöglicht die dynamische Fertigung beliebiger Wand-, Dach- und Deckentafeln basierend auf realen Konstruktionsdaten.

Das Konzept externer Datenbanken erlaubt zwei unterschiedliche Strategien zur Optimierung von Abläufen mit Hilfe der Materialflusssimulation: zum einen können für konstante Auftragsdaten Variationen an den Maschinenparametern vorgenommen werden, um beispielsweise den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit beim Sägen auf Durchlaufzeit und Produktionskosten zu ermitteln. Auf der anderen Seite kann für einen festen Fertigungsablauf die Auftragssteuerung (Auftragsreihenfolge, Bildung von Multitafeln...) optimiert werden.

Den schematischen Ablauf bei der Erzeugung von Fertigungseinzelaufträgen in der Materialflusssimulation anhand der externen Auftragsdaten zeigt Bild 6.3. Informations- und Materialfluss sind voneinander getrennt. Bei Simulationsstart werden zunächst aus der in Tabellenform vorliegenden Datenbank die Fertigungsinformationen für sämtliche herzustellenden Einzelteile und Baugruppen ausgelesen. Daraus entstehen dann Einzelaufträge für die

verschiedenen Fertigungsabschnitte, die zunächst in einem Auftragspuffer gesammelt werden und nach bestimmten, definierbaren Kriterien an einzelne Stationen weitergeleitet werden. Auf diese Weise ist es problemlos möglich, weitere Fertigungsabschnitte in das Simulationsmodell zu integrieren oder bestimmte Fertigungsstrategien anzuwenden (z.B. kürzeste Durchlaufzeit durch parallele Fertigung auf allen verfügbaren Stationen oder Reservierung einer Station für Teile mit besonderen Qualitätsanforderungen).

Erst an den Bearbeitungsstationen erfolgt die Verknüpfung von Bauteil und Auftragsdaten. Die Station führt die im Auftrag festgelegten Bearbeitungs- und Montageprozesse aus und greift dazu auf die in der externen Datenbank hinterlegten Maschinen- und Prozessdaten zurück. Nach erfolgter Bearbeitung wird das Bauteil an die nächste Station weitergereicht. Da die Auftragsdaten mit dem Bauteil verknüpft bleiben, ist jederzeit eine eindeutige Identifikation innerhalb der Simulation möglich. Dieses ist insbesondere von Bedeutung, um die Übereinstimmung von Planungs- und Fertigungsdaten nach erfolgtem Simulationslauf nachweisen zu können. Die Auftragsverteilung an die Einzelstationen orientiert sich an der sog. Umlaufsteuerung der Fa. Weinmann Holzbausystemtechnik, die auf diese Weise ihre Fertigungsanlagen ansteuert.

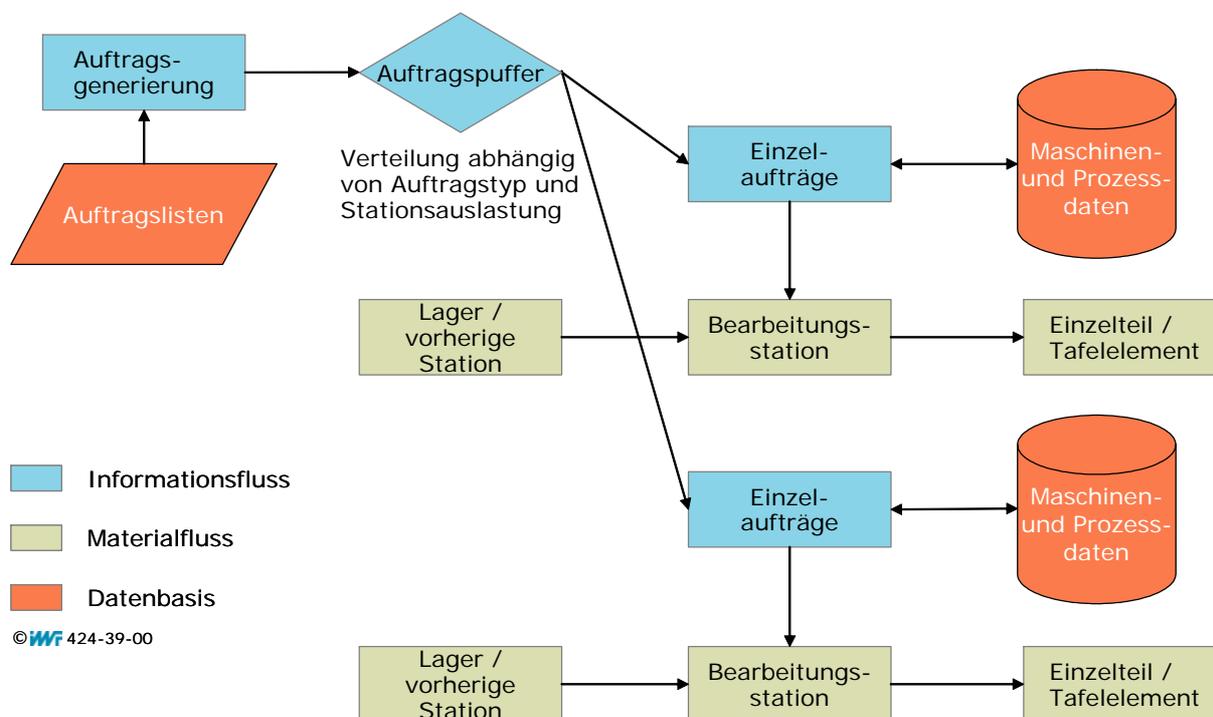


Bild 6.3: Verknüpfung von Informations- und Materialfluss bei der Generierung von Fertigungsaufträgen

6.2 Datentransfer/Planungs- und Steuerungsdaten

6.2.1 Methodik

Für die Materialflusssimulation werden neben Geometrie- und Technologiemerkmale zusätzlich betriebswirtschaftliche Kenngrößen wie Zeiten und Kosten benötigt. Die Anforderungen an die Schnittstelle zur Materialflusssimulation können in vier Bereiche aufgeteilt werden:

1. Typisierung der Bauteile: Mit Hilfe einer eindeutigen Typisierung aller Bauteile innerhalb einer Tafel erfolgt die Zuweisung zu Quelle und Ziel in der Materialflusssimulation. Aus dem Typ lassen sich die Bauteile den einzelnen Bearbeitungsstationen zuordnen. Außerdem gibt der Typ Auskunft über die Position der Bauteile innerhalb einer Tafel.
2. Identifizierung der Bauteile: Eine eindeutige Identifizierung der Bauteile dient dem Erstellen und Benennen der einzelnen Aufträge innerhalb der Materialflusssimulation. Von der Konstruktion über die Materialbeschaffung und die Fertigung bis zur Montage muss eine eindeutige Identifizierung aller Bauteile, die in einer Materialflusssimulation betrachtet werden, möglich sein. Zu Berücksichtigen ist dabei, dass in der Materialflusssimulation mehrere Gebäude gleichzeitig verarbeitet werden können.
3. Kosten gemäß Stückliste: Mit Hilfe der Stücklisteninformationen und Materialkenndaten werden Materialkosten berechnet und die Materialverwaltung organisiert.
4. Kosten gemäß Produktionsliste: Hier werden der Zeitaufwand und die Kosten während der Fertigung ermittelt. Diese Informationen werden zur Auslastungsoptimierung der Produktionsanlage verwendet.

Typisierung und Identifizierung der Bauteile

Der Typ kann ein Einzelbauteil innerhalb einer Tafel (Stiel, Balken, Sparren, Latte, Platte, Schalung usw.) oder die Tafel selbst beschreiben. Die verwendeten Typbezeichnungen sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Sie entsprechen zum Teil den Bezeichnungen aus der Weinmann Schnittstelle für Fertighauselemente [14].

Typ	Erläuterung
PLA1..PLA9	Platten an der Außenseite der Tafel in der Schicht 1 bis 9 ab Riegelwerk
PLI1..PLI9	Platten an der Innenseite der Tafel in der Schicht 1 bis 9 ab Riegelwerk
BT4	Bauteil aus dem Riegelwerk
UG	Untergurt (z.B. eine Schwelle, Fußrippe)
OG	Obergurt (z.B. ein Rähm, Kopfrippe)
LS	Längsstiel (z.B. ein Riegel, Sparren)
QS	Querstiel (z.B. ein Stiel, Innenrippe, Randrippe, Wechsel)
HUELLE_AUSSENWAND	Wandtafel einer Außenwand des Gebäudes
HUELLE_WAND	Wandtafel einer Innenwand des Gebäudes
HUELLE_DECKE	Deckentafel
HUELLE_DACH	Dachtafel

Tabelle 6.1: Typisierung der Bauteile

Einbauteile wie Fenster, Türen, Dämmung, Installationseinheiten, usw. werden als Attribut einer Tafel zugeordnet.

Die Identifizierung der Bauteile erfolgt über den Namen oder die Nummer des Projektes, da mehrere Gebäude gleichzeitig in der Materialflusssimulation verarbeitet werden können. Der Name der Baugruppe identifiziert die Fertigungseinheit Tafel innerhalb eines Projektes. Alle Bauteile einer Tafel und die Tafel selbst haben den gleichen Baugruppennamen, der innerhalb eines Gebäudes eindeutig sein muss. Mit Hilfe der beiden Attribute Projektname und Baugruppenname kann das Endprodukt Tafel eindeutig identifiziert werden und in der weiterführenden Prozesskette z.B. bei der Montage den einzelnen Bauabschnitten zugeordnet werden.

Die Produktionsnummer wird zur Identifizierung während des Produktionsablaufes verwendet. Bauteile identischer Geometrie mit identischen Fertigungsinformationen erhalten die gleiche Produktionsnummer. Die Produktionsnummer wird innerhalb einer Baugruppe eindeutig vergeben. Alle Bauteile, die separat auf einem Bearbeitungszentrum bearbeitet werden, erhalten eine eigene Produktionsnummer.

Die Stücklistennummer dient der Identifizierung während der Materialverwaltung. Bauteile identischer Rohmaße und identischen Materials erhalten die gleiche Stücklistennummer. Die Stücklistennummer wird innerhalb eines Projektes eindeutig vergeben, kann hier jedoch mehrfach vorkommen, da für jedes produzierte Bauteil einer Baugruppe ein Auftrag innerhalb der Materialflusssimulation generiert wird, Bauteile unterschiedlicher Geometrie jedoch die gleichen Rohmasse und Materialien besitzen können. Alle Rippen erhalten sowohl eine Produktions- als auch eine Stücklistennummer. Platten erhalten jedoch nur eine Stücklistennummer.

Kostenermittlung

Die Rohmaße Breite, Höhe und Länge eines Bauteils werden zur Berechnung der Materialkosten verwendet. Sie können jedoch auch der Zuweisung zu einzelnen Bearbeitungsstationen dienen.

Der Werkstoff eines Bauteils wird mit Hilfe einer Materialkennung identifiziert, die eine eindeutige Zuweisung zu Materialkennwerten und damit die Berechnung der Materialkosten ermöglicht. Aus den Rohmaßen und den Materialkennwerten wird das Gewicht eines Bauteils berechnet, das neben den Rohmaßen auch für die Kosten durch Transportwege relevant ist.

Jedem Auftrag ist eine Stückzahl zugeordnet. Diese kann entweder aus der Produktionsliste oder aus der Stückliste resultieren.

Die Qualität eines Bauteils, wie z.B. Sichtbarkeit kann höhere Kosten bei der Fertigung verursachen und wird über einen Qualitätsindex beschrieben.

Die Fertigungsinformationen der Rippen und Tafeln werden über Summengrößen erfasst, damit der Informationsumfang eines Auftrages nicht zu unübersichtlich wird. Entscheidend bei der Zusammenfassung der Bearbeitungen ist, dass der Zeit- und Kostenaufwand realistisch abgeschätzt werden kann. Es werden dabei im Wesentlichen die Kosten durch Verfahrswege und Werkzeugwechsel mittels Anzahl und Maßangaben zur Quantifizierung der unterschiedlichen Bearbeitungen berücksichtigt (s. Kapitel 6.3.5).

Bohrungen werden durch die Attribute Anzahl der Bohrungen - hier geht die Zeit für das Bohren eines Loches in die Kostenermittlung ein - und Anzahl unterschiedlicher Bohrdurch-

messer - hier ist die Zeit für einen Werkzeugwechsel für die Kostenermittlung relevant - erfasst.

Säge- und Fräsoperationen werden jeweils in kurze und lange Bearbeitungen aufgeteilt. Kurze Bearbeitungen können nur bei Rippen auftreten und gehen über den Querschnitt der Bauteile. Hier wird die Anzahl der Bearbeitungen gezählt. Lange Bearbeitungen sind alle Bearbeitungen an den Tafeln und Bearbeitungen in Längsrichtung des Bauteils bei den Rippen. Hier wird die Säge- bzw. Frässtrecke aller langen Bearbeitungen an einem Bauteil aufsummiert.

Kurze Sägeoperationen sind z.B. Abschnitte, Sägeschnitte oder Schlitze, kurze Fräsoperationen sind Blätter, Kerven oder Zapfenverbindungen. Lange Sägeoperationen sind z.B. Abgratungen oder Längsschnitte, lange Fräsoperationen sind Nuten, Fälze, Fasen oder Traufschalungen.

Für Nageloperationen an den Tafeln werden die Anzahl der Nägel, die Anzahl der Nagelreihen und die Gesamtnagelstrecke summiert. Die Anzahl der Nägel wirkt sich auf die Materialverwaltung aus und berücksichtigt die Magazinwechsel. Die Anzahl der Nagelreihen berücksichtigt die Neupositionierung des Aggregates, die Länge der Nagelstrecke die Bearbeitungszeit einer Nageloperation. Schraub- und Klammeroperationen werden in ähnlicher Weise quantifiziert.

Die Attribute der Bohrungen, Säge- und Fräsoperationen sowie der Nagel-, Schraub- und Klammervorgänge werden bei Tafeln doppelt benötigt. Der erste Datensatz summiert alle Bearbeitungen vor dem Wenden der Tafel, der zweite Datensatz summiert die Bearbeitungen nach dem Wenden der Tafel.

Weitere berücksichtigte Attribute für Bearbeitungen sind die Anzahl von Markierungen, Klebestrecken und Putzflächen.

Die Einbauteile in den Tafeln wurden in einem ersten Schritt zunächst über ihre Anzahl berücksichtigt. Dabei wird unterschieden zwischen Elektro- und Sanitärinstallationen, mechanischen Schnellverbindern, Türen, Fenstern und Rolläden.

Zur Generierung der Auftragslisten wurde die CAD-Software cadwork 3D der Fa. cadwork informatik Software GmbH verwendet. Diese Software ermöglicht u.a. die vollständige Konstruktion von Gebäudemodellen und verwaltet sämtliche hier beschriebene Sachdaten. Für die Zusammenstellung der Listen und Berechnung der Summengrößen wurde die Software im Rahmen dieses Forschungsvorhabens um einen Auftragslistengenerator erweitert. Da die geforderten Sachdaten auch in der im Teilvorhaben 3 entwickelten IfC-Schnittstelle enthalten sind, ist alternativ auch die Implementierung einer Standalone-Version dieses Auftragslistengenerators mit einer IfC-Schnittstelle als Import und Auftragslisten der Materialflusssimulation als Export möglich. Auf diese Weise kann jede Software, die die erweiterte IfC-Schnittstelle verwendet, die Materialflusssimulation ansteuern.

6.2.2 Tabellenaufbau, Attribute

Die zur Materialflusssimulation verwendete Software ist in der Lage, Auftragslisten in Form von MS Excel-Tabellen zu verarbeiten. In den Spalten sind die unter 6.2.1 beschriebenen Attribute abgelegt (Tabelle 6.2). Jede Zeile der Tabelle entspricht einem Fertigungsauftrag in der Materialflusssimulation (Bild 6.4).

Spalte	Attribut	Einheit	Erläuterung
1	Typ	[-]	Typisierung der Bauteile (Tabelle 6.1)
2	Projekt	[-]	Name oder Nummer des Projektes (Gebäudebezeichnung)
3	Baugruppe	[-]	Name oder Nummer der Fertigungseinheit Tafel
4	Material	[-]	Materialkennung
5	ProdNr	[-]	Nummer aus der Produktionsliste
6	StückNr	[-]	Nummer aus der Stückliste
7	Stück	[-]	Stückzahl eines Auftrages
8	B	[mm]	Rohbreite des Bauteils
9	H	[mm]	Rohhöhe des Bauteils
10	L	[mm]	Rohlänge des Bauteils
11	Gewicht	[kg]	Bauteilgewicht
12	Qualität	[-]	Qualitätsindex
13	Bohrungen	[-]	Anzahl der Bohrungen
14	Bohrwerkzeuge	[-]	Anzahl unterschiedlicher Bohraggregate
15	Sägeschnitte	[-]	Anzahl kurzer Sägeschnitte
16	Sägestrecke	[mm]	Gesamtlänge der langen Sägeschnitte
17	Fräsungen	[-]	Anzahl kurzer Ausfräsungen
18	Frässtrecke	[mm]	Gesamtlänge der langen Ausfräsungen
19	Schraubenanzahl	[-]	Anzahl der Schrauben
20	Schraubenstrecke	[mm]	Gesamtlänge der Schraubenreihen
21	Nagelreihen	[-]	Anzahl der Nagelreihen
22	Nagelanzahl	[-]	Gesamtanzahl der Nägel
23	Nagelstrecke	[mm]	Gesamtlänge der Nagelreihen
24	Klammeranzahl	[-]	Anzahl der Klammern
25	Klammerstrecke	[mm]	Gesamtlänge der Klammerstrecke
26	Klebestrecke	[-]	Gesamtlänge der Klebestrecke
27-40	Bohrungen2,...		Analog Spalte 13 bis 26 nach dem Wenden der Tafel
41	Markierungen	[-]	Anzahl der Markierungen
42	Putzfläche	[mm ²]	verputzte Fläche
43	Elektro	[-]	Anzahl der Elektroinstallationseinheiten bzw. der Schnellverbinder für Elektrik (EnerCon)
44	Sanitär	[-]	Anzahl der Sanitärinstallationseinheiten bzw. der Schnellverbinder für Wasser (AquaCon)
45	Schnellverbinder	[-]	Anzahl der mechanischen Schnellverbinder (PowerCon)
46	Tür	[-]	Anzahl der Türen
47	Fenster	[-]	Anzahl der Fenster
48	Rolläden	[-]	Anzahl der Rolläden

Tabelle 6.2: Attribute der Tabelle zur Datenübergabe an die Materialflusssimulation

1	Typ	Projekt	Baugruppe	Material	ProdNr	StückNr	Stück B	H	L	Gewicht	Qualität	Bohrungen	Bohrwerkzeuge	Sägeschnitte	Sägestrecke	Fra
2	LS	EG25000502	IE2	NHII	110	3	1	140	240	1980	40	0	2	2	2	0
3	LS	EG25000502	IE2	NHII	111	14	3	30	80	340	0	0	0	0	2	0
4	LS	EG25000502	IE2	NHII	117	57	1	80	40	1750	3	0	0	0	2	0
5	QS	EG25000502	IE2	NHII	121	64	4	90	30	2270	4	0	0	0	2	0
6	LS	EG25000502	IE2	NHII	123	14	1	30	80	340	0	0	0	0	2	0
7	LS	EG25000502	IE2	NHII	125	99	2	30	80	890	1	0	0	0	2	0
8	LS	EG25000502	IE2	NHII	126	100	4	30	140	340	1	0	0	0	2	0
9	UG	EG25000502	IE2	NHII	132	107	1	140	120	4240	42	0	0	0	2	0
10	QS	EG25000502	IE2	NHII	133	110	1	90	140	2390	18	0	0	0	2	0
11	QS	EG25000502	IE2	NHII	134	111	3	90	140	2390	18	0	0	0	2	0
12	QS	EG25000502	IE2	NHII	158	234	1	50	140	2390	10	0	0	0	2	0
13	QS	EG25000502	IE2	NHII	163	238	1	90	140	2150	16	0	0	0	2	0
14	QS	EG25000502	IE2	NHII	164	239	1	140	140	2150	25	0	8	2	2	0
15	OG	EG25000502	IE2	NHII	165	240	1	140	140	4240	49	0	0	0	2	0
16	PLI1	EG25000502	IE2	FMC	0	106	1	4205	15	2570	13	0	0	0	0	0
17	PLA1	EG25000502	IE2	FMC	0	108	1	708	15	2570	3	0	0	0	0	0
18	PLA1	EG25000502	IE2	FMC	0	233	1	3543	15	2570	8	0	0	0	0	0
19	HUELLE_WAND	EG25000502	IE2	unbestimmt	0	25	1	2650	170	4255	304	0	8	2	8	17760
20	QS	EG25000502	AF10	NHII	??	6	5	50	140	2440	10	0	0	0	2	0

Bild 6.4: Ausschnitt aus einer Excel-Tabelle zur Datenübergabe an die Materialflusssimulation

6.3 Aufbau und programmtechnische Realisierung

Die Erstellung des Simulationsmodells erfolgte mit der Software "eM-Plant 7.0" der Fa. Tecnomatix. Die Software bietet Bausteine zur Modellierung, Steuerung und Auswertung des Materialflusses, die in einer objektorientierten Bibliothek hinterlegt sind. Auf diese Weise können von vorhandenen Elementen untergeordnete Bausteine oder Modelle abgeleitet werden, die die Eigenschaften der übergeordneten Elemente erben.

Materialien werden in eM-Plant als bewegliche Elemente (BE) bezeichnet, die erstellten Modelle bzw. Teilmodelle als so genannte "Netzwerke". Bei der Modellierung der Holztafel-fertigung werden die Fertigungseinrichtungen als universelle Prototypen angelegt. Diese Maschinen können dann in den Netzwerken der Fertigungsabschnitte eingesetzt und um zusätzliche Funktionen erweitert werden. Auch die Modelle der Fertigungsabschnitte werden so allgemein gehalten, dass beliebige Fabrikstrukturen dargestellt werden können. Die Modellierung eines konkreten Fertigungsablaufs erfolgt dann erst in dem Netzwerk der höchsten Hierarchiestufe, in der die Prototypen eingesetzt und individuell angepasst werden.

Im Rahmen der Modellierung der Fertigungseinrichtungen mit eM-Plant werden die folgenden Bezeichnungen definiert:

BE: bewegliches Element, stellt das Material (oder die Information) dar, das bewegt wird. Ein BE wandert immer von einem Baustein zum nächsten. BEs können unter Umständen auch andere BEs aufnehmen (Transporthilfsmittel).

Quelle: Die Quelle erzeugt BEs. Sie kann verschiedenen Arten von Teilen herstellen, entweder eines nach dem anderen, oder in gemischter Reihenfolge. Sowohl ein Verfahren zur Bestimmung der Erzeugungszeitpunkte als auch eines zur Bestimmung der zu erzeugenden BE-Typen kann angegeben werden.

Senke: Die Senke entfernt das BE, nachdem sie dieses bearbeitet hat, aus der Simulation, anstatt es an ein Nachfolgerobjekt im Materialfluss umzulagern. Sie sammelt Statistikdaten über das BE.

- Kante:** Die Kante stellt eine Verbindung zwischen zwei Bausteinen her. Ein BE folgt beim Übergang von einem Baustein zum nächsten einer vorhandenen Kante. Wenn mehrere Kanten existieren, lassen sich auf den Bausteinen Regeln festlegen, nach denen die zu nutzende Kante ausgewählt werden soll. Die Kante selbst nimmt kein BE auf, das heißt sie weist nur den Weg, während das BE immer direkt von Baustein zu Baustein wechselt.
- Attribut:** Attribute sind Variablen, die zu einem BE oder einem Baustein gehören und denen ein Wert zugewiesen werden kann. Es lassen sich auch eigene Variablen als "benutzerdefinierte Attribute" anlegen.
- Methode:** Die Methode ist ein Baustein, der Quelltext in der Skriptsprache "Simple-Talk" enthält. Eine Methode ist vergleichbar mit einer Funktion in der herkömmlichen Programmierung. Die Methode wird durch andere Bausteine bei bestimmten Ereignissen aufgerufen und daraufhin abgearbeitet.
- Umlagerung:** Mit Umlagerung wird der Vorgang bezeichnet, wenn ein BE von einem Baustein auf einen anderen übergeben wird. Mit dem Schlüsselwort "umlagern" kann durch eine Methode gezielt diese Übergabe veranlasst werden.

Das grundlegende Konzept von eM-Plant ist die ereignisorientierte Simulationstechnik. Dies bedeutet, dass nur dann das Simulationsmodell aktualisiert werden muss, wenn eine Veränderung des Systemzustands eintritt. Eine Konsequenz aus dem ereignisorientierten Aufbau ist, dass beispielsweise Methodenaufrufe gezielt mit Zustandsänderungen verknüpft werden müssen, da sie nur so ausgelöst werden können. Daher existiert eine Eingangs- und Ausgangssteuerung, über die Methoden dann aufgerufen werden, wenn ein BE in den Baustein eintritt bzw. wieder aus ihm austritt (Bild 6.5).

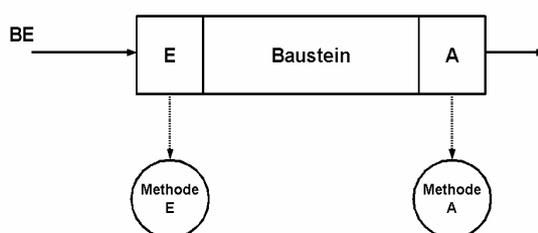


Bild 6.5: Eingangs- und Ausgangssteuerung in eM-Plant-Bausteinen

Wird ein BE von einem Baustein aufgenommen, passiert es einen Programmschalter, der dann die Ausführung einer Methode auslöst, sofern ein entsprechender Verweis auf eine Methode existiert. Ebenso kann ein Methodenaufruf am Ausgang des Bausteins stattfinden, der aktiviert wird, wenn die Bearbeitungszeit des Bausteins beendet ist.

6.3.1 Gesamtmodell der Holztafelherstellung

Das Simulationsmodell unterteilt sich in die Funktionsbereiche „Steuerung“, „Auftragsverwaltung“, „Materialbereitstellung“, „Fertigung“ und „Auswertung“ (Bild 6.6), die in den folgenden Kapiteln erläutert werden. Den Hauptteil nimmt hierbei der Bereich „Fertigung“ ein, in dem die einzelnen Fertigungseinrichtungen gemäß der Struktur aus Bild 6.1 abgebildet werden.

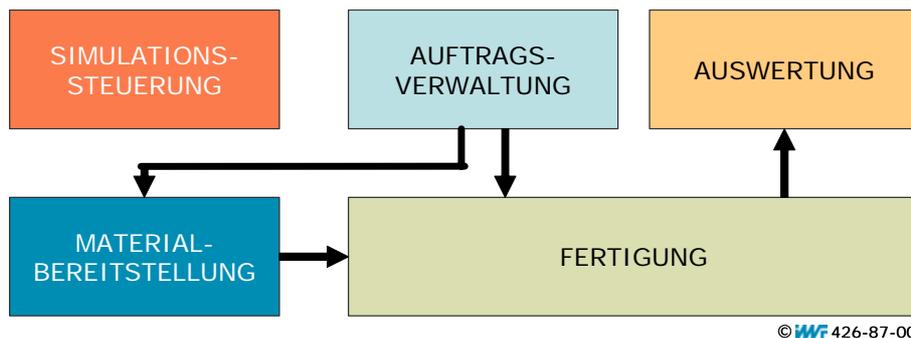


Bild 6.6: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells

In Bild 6.7 ist die Umsetzung dieses Schemas mit Hilfe von eM-Plant 7.0 gezeigt. Dargestellt ist das Gesamtmodell, d.h. die oberste Hierarchiestufe der Holztafelherstellung. Im Bereich „Fertigung“ wird im vorliegenden Fall der Produktionsablauf der Fa. Baukmeier wiedergegeben, der die Grundlage für die Simulationserstellung bildete. Aufgrund des modularen Aufbaus der Fertigungseinrichtungen können hier aber beliebige Abläufe simuliert werden, das Modell ist nicht auf die Nachbildung eines konkreten Betriebs beschränkt.

Die Visualisierung des Simulationsablaufs erfolgt über Zustandsgrafiken, die den aktuellen Status der einzelnen Fertigungsabschnitte symbolisieren. Diese erhöhen die Anschaulichkeit und erleichtern die Verifizierung des ordnungsgemäßen Ablaufs, was aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten und Bedingungen (z.B. Sperrung einer Station für den Werker, solange die Multifunktionsbrücke arbeitet) notwendig wird.

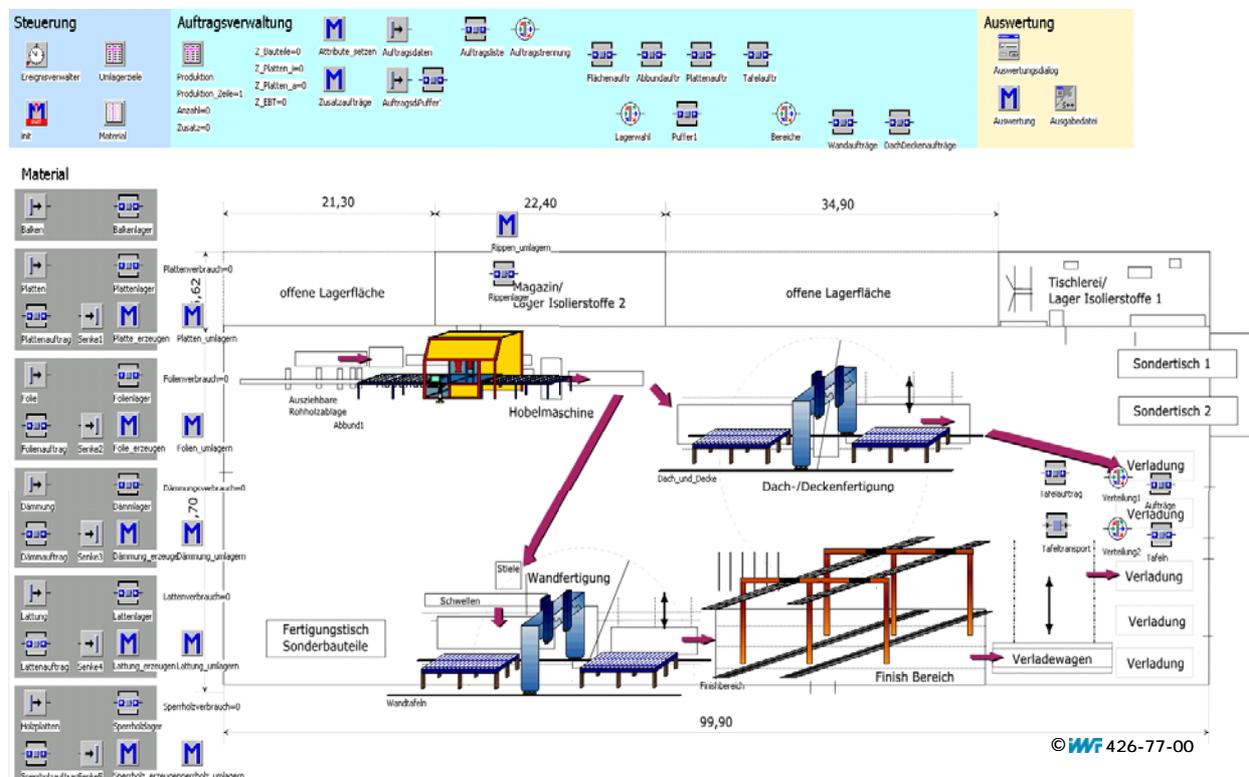


Bild 6.7: Gesamtmodell innerhalb der Simulationsumgebung eM-Plant 7.0

6.3.2 Steuerung

Im Steuerungsbereich befinden sich die Komponenten, die für die Steuerung des zeitlichen Ablaufs im Modell zuständig sind. Weiterhin erfolgt hier das Einlesen der Maschinen-, Material- und Auftragsdaten, auf die aus unterschiedlichen Modellbereichen heraus zugegriffen wird. Diese Daten liegen simulationsintern als Tabellen vor.

Der Steuerungsbereich enthält den so genannten "Ereignisverwalter", einen Baustein, über den die Simulation gestartet und angehalten werden kann, und der Methoden zur Initialisierung des Modells auslöst. Diese Methoden setzen die Basiswerte des Modells zurück und löschen die BEs aus vorhergehenden Simulationsläufen. Außerdem werden über den Ereignisverwalter Zeitraffer- und Einzelschrittfunktionen aktiviert.

Zusätzlich ist ein Schichtkalender in das Modell integriert, der einen Schichtbetrieb inklusive Pausenzeiten simuliert. Die Funktion ermöglicht die Abbildung beliebiger Schichtsysteme für die unterschiedlichen Fertigungsbereiche und –stationen. Für jeden Arbeitsplatz werden separat die Wochenarbeitstage, die tägliche Arbeitszeit sowie die Pausenzeiten definiert. Beispielsweise kann für den Abbundbereich ein 2-Schichtsystem realisiert werden, während in der Tafelfertigung im 1-Schichtbetrieb gearbeitet wird. Ebenso ist es möglich, gesetzliche Feiertage oder Betriebsferien zu berücksichtigen. Die virtuelle Produktion kann somit an den realen Zeitablauf eines Geschäftsjahres anpassen werden, wodurch sich weitere Einsatzmöglichkeiten des Modells zur Auftrags- und Produktionsplanung erschließen.

6.3.3 Auftragsverwaltung

Die Umwandlung der Einträge aus den Auftragslisten in konkrete Einzelaufträge erfolgt im Bereich „Auftragsverwaltung“. Grundlage der Aufträge ist die simulationsinterne Tabelle „Produktion“, deren Werte bei der Initialisierung der Simulation aus den Auftragslisten, vorliegend als MS Excel-Tabelle, importiert werden.

Eine Quelle erzeugt im Abstand von Null Sekunden jeweils ein bewegliches Element vom Typ „Auftrag“, so dass die gesamte Auftragsgenerierung ohne Zeitverlust zum Zeitpunkt $t=0$ s im Simulationsdurchlauf erfolgt. Ein Auftrags-BE enthält benutzerdefinierte Variablen, die den Spalten der Auftragsliste entsprechen und die jeweiligen Werte aufnehmen können. Immer, wenn ein Auftrags-BE den Eingang der Quelle passiert, wird eine entsprechend Bild 6.8 arbeitende Methode aufgerufen. Zunächst werden die Auftragsdaten auf das BE übertragen. Zählervariablen erfassen die Anzahl der Aufträge für die Bauteiltypen Platten (getrennt nach Innen- und Außenseite) und Rippen, die zu einer Tafel gehören. Somit können die Zählerstände an den Auftrag für die Tafelbaugruppe („HUELLE...“) übergeben werden und signalisieren, wie viele Bauteile eines Typs zu der Tafel gehören. Das Attribut "Baugruppenzuordnung" eines Auftrags wird aus den Informationen "Projekt", "Baugruppe" und „Stücklistennummer“ zusammengesetzt, was stets die eindeutige Identifizierung einer Tafelbaugruppe und deren Einzelbauteile ermöglicht, wie das folgende Beispiel verdeutlicht:

Baugruppenzuordnung = EG25000502_IE2_S64

Das zu fertigende Bauteil ist dem Erdgeschoss (EG) des Bauprojektes „25000502“ zugeordnet, ist Bestandteil der Innenwand Nr. 2 und hat die Stücklistennummer 64.

Nach Erzeugung des Auftrags für eine Tafelbaugruppe werden die Zähler wieder auf Null gesetzt, ein weiterer Zähler „Zusatz“ wird mit einem Zahlenwert versehen. Dieser Zahlenwert ist abhängig vom Tafeltyp (Außenwand, Innenwand, Dach, Decke). Er gibt die Anzahl

zusätzlich auszulösender Fertigungsaufträge an, die nicht explizit über die Auftragslisten veranlasst werden. Hierzu zählen beispielsweise Dämmmaterial oder diffusionsoffene Folie, die in Abhängigkeit von der Fläche der gesamten Tafel erzeugt werden. Nachdem die Auftrags-BEs durch entsprechende Methoden erzeugt worden sind, treten diese in einen Puffer "Auftragsliste" ein, der sämtliche Aufträge sammelt. Dem Puffer ist ein Flusssteuerungs-Baustein nachgeschaltet, der die Aufträge anhand von Bauteiltyp und Stationsauslastung in nachfolgende Puffer einsortiert. Dadurch stehen beispielsweise sämtliche Aufträge für den Abbundbereich in einem separaten Puffer bereit und können immer dann sofort umgelagert werden, wenn in diesem Fertigungsbereich ein neuer Auftrag bearbeitet werden kann.

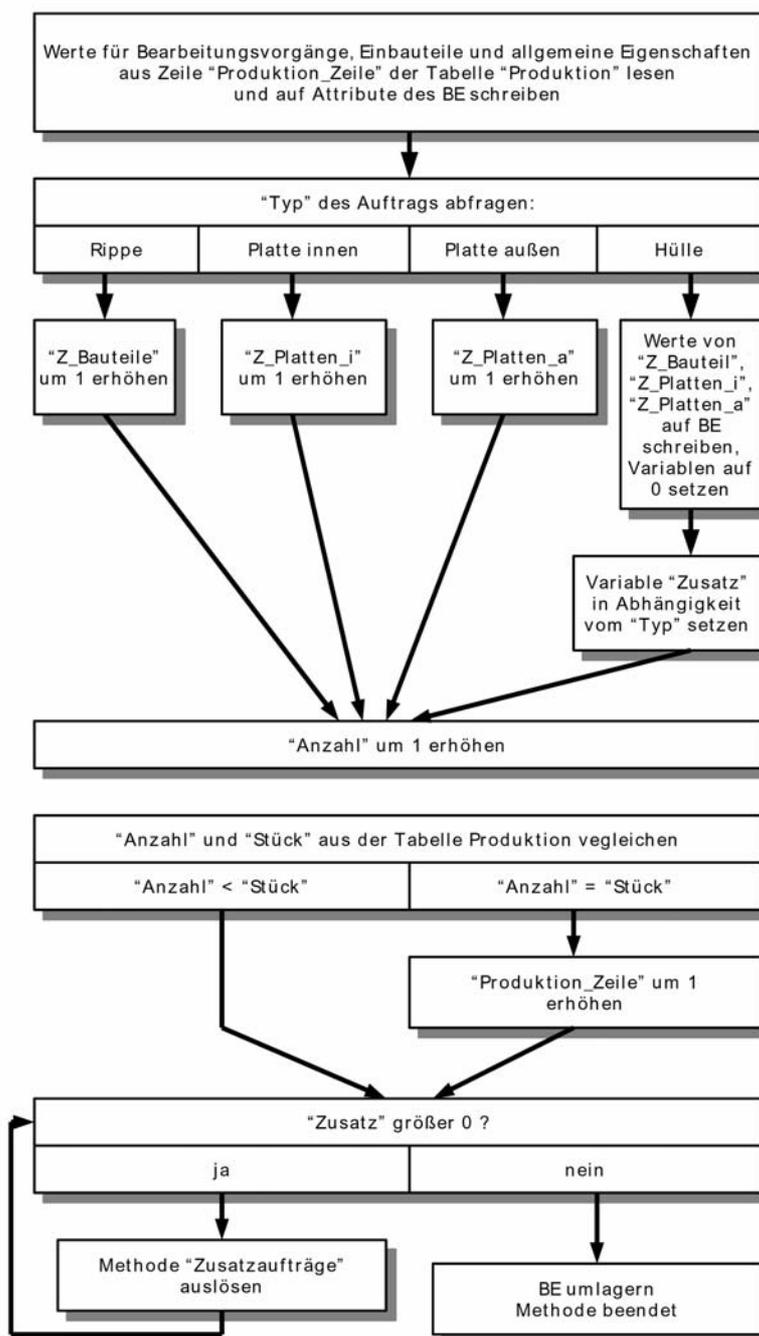


Bild 6.8: Ablaufschema bei der Generierung von Fertigungseinzelaufträgen

6.3.4 Materialbereitstellung

Die Aufträge für die bereitzustellenden Rohmaterialien und Zukaufteile werden von der Auftragsverwaltung direkt zu den einzelnen Lagern geleitet. Hier muss einerseits ein BE erzeugt werden, das das angeforderte Bauteil repräsentiert und andererseits der Materialverbrauch registriert werden. Im Simulationsmodell sind Lager für sämtliche Bauteile vorgesehen, die bei der Tafelherstellung verwendet werden können. Hierzu zählen:

- (Roh-)balken
- Platten (OSB, Gipskarton...)
- Folien (Dampfsperre, diffusionsoffene Folie)
- Lattung
- Schalung
- Sanitär, Elektro
- Stahlträger
- Fenster, Rollläden, Türen, Isolation
- Schnellverbinder

Wenn ein Bauteil durch einen Fertigungsbereich bearbeitet werden muss, bevor es für eine Tafelbaugruppe eingesetzt werden kann, genügt es, eine Quelle für die BEs des Rohmaterials und einen Puffer als Lager vorzusehen. Dieser Fall trifft bei den Rippen zu, die zuerst durch die Abbundanlage laufen müssen, die ihnen ihre spezifischen Eigenschaften gibt (Länge, Ausfräsungen, Bohrungen usw.), bevor sie zum Zusammenbau der Tafel gelangen. Andere Bauteile können direkt aus dem Lager entnommen und zum Zimmermeistertisch gebracht werden. Dennoch haben auch diese Bauteile spezifische Eigenschaften wie Preis und Gewicht, die ihnen erst zugewiesen werden müssen, was bei der Auslagerung geschieht. Für die Berechnung der Materialkosten greift eine Methode auf die Materialdatenbank zurück, die sich im Steuerungsbereich befindet. In dieser Tabelle sind die Werte für Gewicht und Kosten der verschiedenen Bauteiltypen eingetragen. Gewicht und Kosten sind bei den flächenhaften Bauteilen auf 1 m² und bei stabförmigen Bauteilen auf 1 m Länge bezogen. Bei Rippen und Platten wird das Bauteilgewicht bereits vom CAD-System berechnet und in die Auftragslisten geschrieben. Daher findet bei diesen Bauteilen nur ein Übertrag des Attributs „Gewicht“ auf das jeweils erzeugte BE statt.

Art und Anzahl der Fördermittel und Handhabungsgeräte, die zum Zweck der Materialbereitstellung eingesetzt werden, lassen sich beliebig in das Simulationsmodell integrieren. Das Gesamtmodell ist so konzipiert, dass es für die Funktionalität keine Rolle spielt, ob ein Bauteil per Gabelstapler, Förderband oder Roboter bereitgestellt wird. Auf der höchsten Modellebene befinden sich zu diesem Zweck Methoden, die die Umlagerung der Material-BEs auf die einzelnen Fertigungsbereiche steuern. Die Anforderung der Bauteile erfolgt durch die Fertigungsbereiche selbst. In einer Tabelle „Umlagerziele“ werden Bauteilauftrag, Zielort und die Definition, für welche Materialien das jeweilige Umlagerziel gilt, miteinander verknüpft (Tabelle 6.3).

Auftrag	Ziel	Tisch	Rippen	Platten	Folie	Dämmung	Lattung	Schalung
Wandtafeln.Tisch1.Auftrag_Tisch	Wandtafeln.Tisch1	1	1	1	1	0	1	1
Wandtafeln.Tisch2.Auftrag_Tisch	Wandtafeln.Tisch2	2	0	1	1	1	1	1
Dach_und_Decke.Tisch1.Auftrag_Tisch	Dach_und_Decke.Tisch1	1	1	1	1	0	1	1
Dach_und_Decke.Tisch2.Auftrag_Tisch	Dach_und_Decke.Tisch2	2	0	1	1	1	1	1
Sondertafeln.Tisch1	Förderband1	0	1	0	0	0	0	0
END								

Tabelle 6.3: Beispiel für die Tabelle „Umlagerziele“

Diese Definition wird notwendig, um die Bearbeitungsstationen der Holztafelfertigung als universelle Prototypen einsetzen zu können. Dies trifft insbesondere auf den Prototyp „Zimmermeistertisch“ zu (vgl. Kapitel 6.3.5). Die von dieser Station ausführbaren Montagevorgänge können genau festgelegt bzw. eingegrenzt werden, um beispielsweise eine Linienfertigung durch Reihenschaltung mehrerer dieser Zimmermeistertische zu realisieren. Entsprechend muss das Material auch an der korrekten Einzelstation innerhalb der Linie bereitgestellt werden. Ob eine Station das betreffende Material verarbeiten kann, wird durch den Eintrag „0“ oder „1“ in der Tabelle bestimmt.

Durch die Einführung der Spalte "Tisch" kann die mehrfache Definition gleicher Auftragsstandorte entfallen. Ein Wert „1“ bedeutet, dass es sich um einen Tisch handelt, auf dem die erste Seite einer Tafel gefertigt wird. Alle Methoden, die Teile der ersten Seite umlagern, werten jetzt diese Zeile aus und überprüfen den Auftrag, der sich an dem Standort befindet, der in der Spalte "Auftrag" eingetragen ist. Wenn eine Umlagerung stattfinden soll, wird durch die Methode selbst der Name der Bearbeitungsstation, an die das Teil übergeben werden soll, an den Eintrag in der Spalte Ziel angehängt. Da die Methoden zur Umlagerung immer nur einen bestimmten Materialtyp umlagern, kann in ihnen der anzuhängende Name der Station fest eingetragen werden. Außerdem kann sich der Name der Montagestationen nicht ändern, solange für Zimmermeistertische immer die vordefinierten Prototypen verwendet werden. Beim Wert „2“ in der Spalte Tisch wird die Zeile von allem Methoden ausgewertet, die Bestandteile der zweiten Tafelseite umlagern.

6.3.5 Fertigungseinrichtungen

Da die Modellierung der Fertigungseinrichtungen in Form universeller Prototypen erfolgen soll, werden spezifische Maschinenparameter und –eigenschaften aus externen Datenquellen gelesen. Dies ermöglicht eine schnelle Anpassung der Simulation ohne direkte Eingriffe in die Prototypen der Modellbibliothek. Die zugehörigen Zahlenwerte wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Baukmeier, Weinmann und KUKA ermittelt. Als Quellen dienen dabei Zeitaufnahmen im realen Produktionsbetrieb, technische Daten und Spezifikationen sowie Taktzeitanalysen mittels spezieller Simulationssoftware.

Die Modelle der einzelnen Fertigungseinrichtungen enthalten immer die drei Elemente

- Methode "init"
- Tabelle "Zeiten"
- Variable "Maschinentyp"

Die Methode „init“ liest die zum Modell gehörigen Maschinenparameter aus der externen Datenbank und überträgt sie in die simulationsinterne Tabelle „Zeiten“. Der Datenbankzugriff wird dabei über die Variable „Maschinentyp“ gesteuert. Der Aufbau der Tabellen folgt stets dem in Tabelle 6.4 gezeigten Schema. Die Unterscheidung des Bauteiltyps wird notwendig, da dieser Einfluss auf die Maschinenparameter haben kann. Beispielsweise kann das

Auflegen einer Rippe für Dachtafeln eine längere Zeit benötigen als die einer Wandtafel (siehe Beispiel in Tabelle 6.5).

(Bauteil-) Typ	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	...	Parameter n
Bezeichnung 1					
Bezeichnung 2					
Bezeichnung 3					
...					
Bezeichnung m					

Tabelle 6.4: Aufbau der Tabellen zur Maschinenspezifikation

(Bauteil-) Typ	Rippen auflegen	Fixieren	Schlaufen	Folie
HUELLE_WAND	30	31	180	25
HUELLE_AUSSENWAND	30	31	180	25
HUELLE_DECKE	90	4	480	35
HUELLE_DACH	90	4	480	40

Tabelle 6.5: Beispieltabelle (Auszug)

Abundanlage

Das Modell „Abundanlage“ besteht aus den zwei Bearbeitungsbereichen „Abbund“ und „Hobeln“, die durch Rollenbahnen verbunden sind und zu denen parallel jeweils eine Station existiert, die den auszuführenden Auftrag aufnimmt. Das Rohmaterial wird über den Einlegebereich aufgenommen und über eine Rollenbahn zur Station „Abundbearbeitung“ transportiert. Dort findet die spanende Bearbeitung am Werkstück statt, nach Abschluss dieser Bearbeitung erfolgt der Weitertransport des Balkens über eine zweite Rollenbahn zur Station „Hobeln“, in der die Werkstückoberfläche zusätzlich bearbeitet werden kann (Hobeln, Schleifen). Danach gelangt der Balken über eine weitere Rollenbahn in die Entnahmezone, von wo er wieder aus der Maschine entnommen werden kann. Entfällt die Hobelbearbeitung, weil diese für das aktuelle Werkstück nicht vorgesehen ist (oder eine derartige Anlage im abgebildeten Fabrikbetrieb überhaupt nicht vorhanden ist), erfolgt die Entnahme des Werkstücks bereits nach der zweiten Rollenbahn.

Die Freigabe der Bearbeitungsstationen erfolgt immer nur dann, wenn auch ein Auftrag vorliegt und die Bearbeitungszeit für diesen Auftrag berechnet sowie der Bearbeitungsstation zugewiesen wurde. Somit ergibt sich eine Wechselwirkung zwischen Auftrags- und Materialflusses, wie in Bild 6.9 veranschaulicht.

Der Puffer "Holzablage" nimmt solange Rohbalken auf, bis seine Kapazität erreicht ist. Da der Eingang der anschließenden Rollenbahn zunächst gesperrt ist, können die BEs aus der Holzablage nur dann weitergeleitet werden, wenn der Eingang der Rollenbahn geöffnet wird. Diese Freigabe des Eingangs erfolgt über eine Methode, die bei Eintreffen eines Fertigungsauftrags ausgelöst wird. Die Methode berechnet zunächst die Bearbeitungszeiten der einzelnen Operationen, indem die Anzahl der Bohr-, Säge- und Fräsvorgänge, die in dem

vorliegenden Auftrag eingetragen sind, mit den Basiswerten aus der Maschinendatenbank multipliziert werden. Zusätzlich werden noch die Werkzeugwechsel bei der Verwendung mehrerer Bohrwerkzeuge und Vorschubgeschwindigkeiten bei Bearbeitungen in Balkenlängsrichtung berücksichtigt. Die Summe dieser Werte ergibt die gesamte Bearbeitungszeit für den Abbundvorgang, die der Station "Abbundbearbeitung" zugewiesen wird. Nachdem die Bearbeitungszeit ermittelt und gesetzt worden ist, kann die Abbundbearbeitung erfolgen, wozu der Eingang der Rollenbahn 1 geöffnet werden muss.

Nach erfolgtem Abbund werden Bauteil und zugehöriger Fertigungsauftrag an den Hobelautomaten weitergeleitet. Über eine Methode erfolgt wiederum die Berechnung der Bearbeitungszeiten und das Setzen der Gesamtzeit an der Station "Hobeln", bevor deren Eingang freigegeben wird. Am Ausgang der Hobelbearbeitung werden allgemeine Bauteildaten (Baugruppenzuordnung, Abmessungen, Gewicht, usw.) auf das Werkstück übertragen. Zusätzlich werden auf Basis der Sätze für Personal- und Maschinenstunden die anfallenden Kosten für die Herstellung des jeweiligen Bauteils errechnet und dem Bauteil als Attribut aufgeprägt.

Die Abbundanlage berücksichtigt beim Zuschnitt die Länge der Rohbalken und führt anhand der Fertigungsaufträge eine Schnittoptimierung durch. Auf diese Weise wird die bestmögliche Ausnutzung des Rohmaterials sichergestellt und die Ermittlung des Materialbedarfs für das jeweilige Bauprojekt ermöglicht.

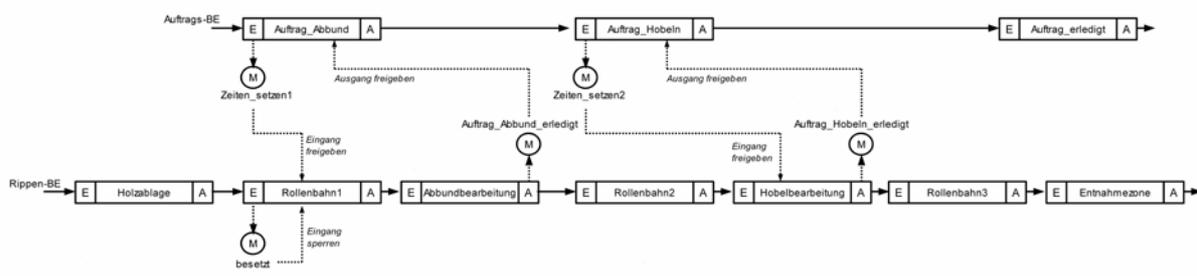


Bild 6.9: Methodensteuerung im Modell der Abbundanlage

Die zur Berechnung der Fertigungszeiten benötigten maschinenspezifischen Parameter sind in Tabelle 6.6 zusammengefasst. Die Säge- und Fräsoperationen können entweder längs oder quer zur Balkenrichtung erfolgen. Bei einer Bearbeitung mit Vorschub quer zum Balken kann für die Bearbeitungszeit ein konstanter Wert angesetzt werden, da das Säge-/ Fräsgregat bei jedem Vorgang annähernd um die gleiche Strecke bewegt wird. Im Gegensatz dazu muss bei einer Bearbeitung in Längsrichtung zum Balken der Vorschubweg (als Schnittlänge bzw. Fräslänge bezeichnet) mit der Vorschubgeschwindigkeit multipliziert werden, um die Bearbeitungszeit zu erhalten. Für die Herstellung einer Bohrung wird mit einem konstanten Durchschnittswert gerechnet, um die Bearbeitungszeit zu erhalten. Weiterhin müssen noch mögliche Werkzeugwechsel einbezogen werden, wenn Bohrungen verschiedener Durchmesser benötigt werden. Die zusätzlichen nachgeschalteten Bearbeitungen Hobeln, Schleifen und Anstreichen (Schutzanstrich) hängen in ihrer Bearbeitungszeit von der Balkenlänge ab, da dazu der gesamte Balken in Längsrichtung entlang der Aggregate bewegt werden muss. Zusätzlich muss bei der Berechnung der Bearbeitungszeit noch beachtet werden, wie viele Seiten in einem Durchgang gehobelt/geschliffen werden können. Je nach Anzahl der Aggregate sind 1 bis 4 Durchläufe notwendig, um das Bauteil vollständig von allen erforderlichen Seiten zu bearbeiten.

Parameter	Erläuterung
Typ	Typbezeichnung der Rippe entsprechend Weinmann-Schnittstelle [14] (OG, UG, LS, QS, BT4, BT6)
Sägeschnitte	Zeit in Sekunden für eine Sägeoperation quer zum Balken (inkl. Anfahrzeit)
Sägestrecke	Kehrwert der Vorschubgeschwindigkeit in s/m beim Sägen in Balkenlängsrichtung
Bohrungen	Durchschnittswert in s für eine Bohrung
Bohrwerkzeuge	Zeit in s zum Wechseln eines Bohrwerkzeugs
Fräsungen	Zeit in Sekunden für eine Fräsoperation quer zum Balken (inkl. Anfahrzeit)
Frässtrecke	Kehrwert der Vorschubgeschwindigkeit in s/m beim Fräsen in Balkenlängsrichtung
Hobeln	Kehrwert der Vorschubgeschwindigkeit des Balkens in s/m beim Hobeln
Schleifen	Kehrwert der Vorschubgeschwindigkeit des Balkens in s/m beim Schleifen
Streichen	Kehrwert der Vorschubgeschwindigkeit des Balkens in s/m beim Streichen
Maschinenstunde	Maschinenstundensatz in €/h
Arbeitsstunde	Personalkosten in €/h multipliziert mit der Anzahl der Arbeiter

Tabelle 6.6: Maschinenparameter Abbundanlage

Plattensäge

Mit der „Plattensäge“ wird das parametrisierte Simulationsmodell (der sog. „Prototyp“) einer Maschine zur Verfügung gestellt, mit deren Hilfe die verschiedenen Plattensorten (Holzwerkstoff, Gipskarton etc.) zugeschnitten werden können. In vielen Holzbaubetrieben erfolgt der Zuschnitt direkt auf der Multifunktionsbrücke. Sollen die Platten aber bereits mit dem richtigen Maßen versehen montiert werden, beispielsweise im Rahmen einer automatisierten Fertigung, ist eine vorgeschaltete Bearbeitungsstation notwendig.

Die Verknüpfung von Material- und Informationsfluss an der Plattensäge ist in Bild 6.10 dargestellt. Bei Eingang eines Fertigungsauftrags wird eine Methode zum Setzen der Bearbeitungszeiten ausgelöst und im Anschluss die Säge für das Plattenrohmaterial freigegeben. Nach dem der Sägevorgang beendet ist, werden die Auftragsdaten auf das fertige Bauteil übertragen. Sowohl Auftrag als auch Bauteil werden von der Station freigegeben und weitergeleitet, so dass die Säge für einen neuen Auftrag bereit steht.

Tabelle 6.7 zeigt die Parameter der Plattensäge. Um ein Werkstück mit definierter Länge und Breite zuzuschneiden, müssen normalerweise zwei Sägeschnitte vorgenommen werden. Nachdem zunächst das eine Maß eingestellt und abgesägt wurde, wird die Platte um 90° gedreht und das zweite Maß abgesägt. Das Handhaben und Drehen ist unabhängig von den Maßen der Platte und wird mit einer konstanten Zeit angenommen. Erfolgt der Zuschnitt automatisch, so dass kein Drehen der Platte notwendig ist, wird dieser Parameter zu Null gesetzt.

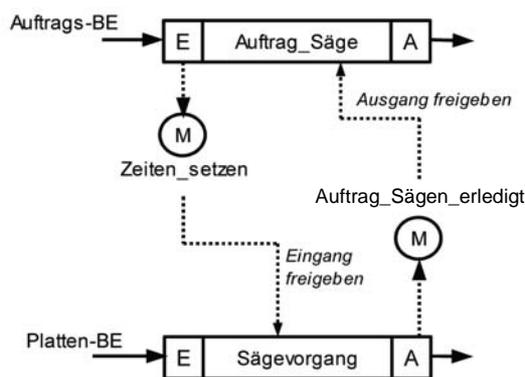


Bild 6.10: Methodensteuerung im Modell der Plattensäge

Parameter	Erläuterung
Typ	Typbezeichnung der Platte entsprechend Weinmann-Schnittstelle [14] (PLI1...PLI9, PLA1...PLA9)
Sägen	Kehrwert der Vorschubgeschwindigkeit in s/m beim Sägen einer Platte
Drehen	Zeit in s, die zum Drehen der Platte um 90° benötigt wird
Maschinenstunde	Maschinenstundensatz in €/h
Arbeitsstunde	Personalkosten in €/h multipliziert mit der Anzahl der Arbeiter

Tabelle 6.7: Maschinenparameter Plattensäge

Zimmermeistertisch

Als „Zimmermeistertisch“ wird der Prototyp für eine Station bezeichnet, an der die Montage der Tafeln erfolgt. Es kann sich dabei um einen Zimmermeistertisch im herkömmlichen Sinn mit primär manuellen Tätigkeiten handeln. Genau so können aber auch automatisierte Montagevorgänge in einer Durchlaufanlage mit Hilfe des Prototypen realisiert werden. Im Falle einer solchen Fertigung in Linienstruktur, bei der an den einzelnen Stationen nur bestimmte Arbeitsschritte durchgeführt werden – sei es automatisch oder manuell – können mehrere der Prototypen des Zimmermeistertisches in Reihe geschaltet werden. Hierfür sorgen modellinterne Schalter, die die an der jeweiligen Station durchführbaren Aktionen kennzeichnen.

Der Zimmermeistertisch wird als Prototyp universell aufgebaut, das heißt es werden sämtliche möglichen Vorgänge berücksichtigt, die bei der Herstellung von Wand-, Außenwand-, Dach- oder Deckentafeln auftreten können, ohne dass schon eine Festlegung geschieht, welcher Tafeltyp gefertigt werden soll. Das Modell kann für die Bearbeitung beider Tafelseiten eingesetzt werden.

Die Modellierung folgt dem in Kapitel 4.1 analysiertem Fertigungsablauf. Für jedes mögliche zu verbauende Einzelteil existiert eine Bearbeitungsstation mit zugehöriger Methodensteuerung, die den Montagevorgang abbildet. Die zu fertigende Tafel wird durch ein Förderhilfsmittel-BE dargestellt, das alle Einzelteile aufnimmt. Die Verwendung eines Förderhilfsmittels ist gewählt worden, da eine Tafel aus vielen einzelnen Bauteilen zusammengesetzt wird

(Rippen, Platten, Dämmung, etc.), die in der Realität letztendlich eine zusammenhängende Baugruppe bilden und die Tafel somit als ein einziges zu handhabendes Teil betrachtet werden kann. Da in der Simulation aber für jedes Einzelteil zunächst ein BE existiert und jedes BE auch individuelle Informationen trägt, können die BEs nicht einfach zusammengefasst werden. Würde man die BEs beim dem Vorgang des Zusammenbaus vernichten und als Ausgangsprodukt nur ein neues BE "Tafel" weiterleiten, bestünde das Problem, dass die Informationen über die Einzelteile entweder verloren gingen oder alle auf das neue Tafel-BE übertragen werden müssten. Daher werden die BEs der Einzelteile auf das Förderhilfsmittel umgelagert, das zwar noch alle BEs enthält, aber von außen wie ein einziges Teil gehandhabt werden kann. Demnach stellt das Förderhilfsmittel kein real existierendes Teil dar, sondern nur den 'virtuellen Umriss' der Tafel, in dem sich alle Einzelteile befinden. Ein zusätzlicher Nutzen des Förderhilfsmittels ist, dass hier Informationen in den Attributen gespeichert werden können, die Auskunft über die Bearbeitung der zusammengebauten Tafel geben (Zeiten, Kosten, etc.) und nicht mehr auf ein Einzelteil bezogen sind.

Die Auslösung des Bearbeitungsvorgangs erfolgt wieder durch einen entsprechenden Methodenaufruf bei Eintreffen eines Fertigungsauftrags. Zählervariablen stellen sicher, dass die exakte Zahl der im Auftrag angegebenen Einzelteile auch verbaut wird. Anhand der individuell aufgeprägten Attribute der Bauteile überprüft das System, dass es sich dabei auch tatsächlich um die benötigten Teile handelt. Hierdurch werden Maßnahmen zur Qualitätskontrolle simuliert, bei denen vor dem Verbauen eine Teileidentifikation (beispielsweise mittels Barcode) und ein Abgleich mit den Auftragsdaten erfolgt.

Wenn alle Bauteile für eine Tafelseite vorhanden sind, werden die Attribute sämtlicher Bauteile hinsichtlich Fertigungszeiten und Kosten ausgewertet und gemeinsam mit den Auftragsdaten des Tafелеlements auf das Förderhilfsmittel „Tafel“ übertragen. Anschließend werden die Zähler zurückgesetzt und die Tafel umgelagert, so dass die Station für einen neuen Auftrag bereitsteht.

Das Auflegen der Rippen wird mit einer Durchschnittszeit abgebildet, die notwendig ist, um jeweils eine Rippe aufzulegen und auszurichten. Aus der Multiplikation mit der Anzahl der zugehörigen Bauteile zum aktuellen Auftrag ergibt sich die gesamte Bearbeitungszeit für das Rippenauflegen. Auf die gleiche Art wird auch die Zeit berechnet, die notwendig ist, um die Platten aufzulegen, die zu einer Tafel gehören. Das Fixieren der Rippen mit Wellenklammern lässt sich nicht anhand der Anzahl der vorhandenen Bauteile berechnen, da es hierbei auf die Verbindungsstellen im Balkenwerk ankommt, an denen jeweils eine Klammer gesetzt wird. Aus diesem Grund wird für das Fixieren des Rahmens mit einem konstanten Durchschnittswert gerechnet, der mit der Fläche des Tafелеlements multipliziert wird und so die Bearbeitungszeit ergibt. Für die Gurtschlaufen spielt die Geometrie der Tafel keine Rolle, da für den Krantransport in jedem Fall zwei Gurtschlaufen für die Tragketten an dem Rahmen angebracht werden müssen. Bei der Dampfsperre muss zunächst eine PE-Folie über die gesamte Rahmenkonstruktion gezogen werden, die dann festgeheftet wird, um sie an ihrer Position zu fixieren. Die Bearbeitungszeit für diesen Vorgang ist hauptsächlich von der Größe des Tafелеlements abhängig, so dass hier wieder die Tafelfläche als Bezugsgröße herangezogen wird. Für Einbauteile (Zugschnüre, Sanitärmodule, Abzugsrohre, Stahlträger) wird, wie auch bei den Rippen und Platten, jeweils eine Durchschnittszeit angesetzt, die für den Einbau eines Teils anfällt, woraus sich multipliziert mit der Gesamtzahl der zugehörigen Teile die Bearbeitungszeit ergibt. Tabelle 6.8 fasst die Parameter des Zimmermeisterisches zusammen.

Parameter	Erläuterung
Typ	Typbezeichnung der Tafel (HUELLE_WAND, HUELLE_DACH, ...)
Rippenauflegen	Durchschnittswert in s, um eine Rippe aufzulegen
Fixieren	Durchschnittswert in s/m ² , um die Rippen auf einem Quadratmeter Tafelfläche zu fixieren
Schlaufen	Durchschnittswert in s, um sämtliche Halteschlaufen anzubringen
Folie	Durchschnittswert in s/m ² , um einen Quadratmeter Folie aufzulegen
Plattenauflegen	Durchschnittswert in s, um eine Platte aufzulegen
Sanitär	Durchschnittswert in s, um ein Sanitärmodul zu installieren
Elektro	Durchschnittswert in s, um eine Elektro-Zugschnur einzulegen
Dämmung	Durchschnittswert in s/m ² , um einen Quadratmeter Dämmung einzusetzen
Schwelle	Durchschnittswert in s/m, um einen Meter der Schwelle mit Folie abzudichten
Zwischenstücke	Durchschnittswert in s/m ² , um die Zwischenstücke der Dachsparren einzusetzen
Lattung	Durchschnittswert in s/m ² , um einen Quadratmeter Dämmung aufzulegen
Wandauflage	Durchschnittswert in s/m ² , um die Wandauflagestreifen an einem Quadratmeter der Deckenfläche anzubringen
Abzug	Durchschnittswert in s, um ein Abzugsrohr einzusetzen
Stahlträger	Durchschnittswert in s, um einen Stahlträger einzubauen
Schalung	Durchschnittswert in s/m ² , um einen Quadratmeter Schalung aufzulegen
Holzplatten	Durchschnittswert in s, um einen Quadratmeter Sperrholzplatten aufzulegen
Spatzenbretter	Durchschnittswert in s/m, um auf einem Meter der Tafellänge die Spatzenbretter einzusetzen
Zusatzstreifen	Durchschnittswert in s/m, um auf einem Meter Tafellänge Zusatzstreifen an den Dachbalken anzubringen
Konterlattung	Durchschnittswert in s/m ² , um einen Quadratmeter der Konterlattung aufzulegen
Dachlattung	Durchschnittswert in s/m ² , um einen Quadratmeter der Dachlattung aufzulegen
Tafelauflegen	Durchschnittswert in s, um eine Tafel auf den Tisch aufzulegen
Schnellverbinder	Durchschnittswert in s, um einen Schnellverbinder zu montieren
Einrichten	Durchschnittswert in s, um die Spannelemente am Tisch einzurichten
Maschinenstunde	Maschinenstundensatz in €/h
Arbeitsstunde	Personalkosten in €/h multipliziert mit der Anzahl der Arbeiter

Tabelle 6.8: Parameter Zimmermeistertisch

Multifunktionsbrücke

Der Prototyp „Multifunktionsbrücke“ führt mechanische Bearbeitungen an der vormontierten Tafelseite durch. Bei der Maschine kann es sich um eine typische Nagel- oder Multifunktionsbrücke – wie von der Fa. Weinmann Holzbausystemtechnik hergestellt – handeln. Darüber hinaus lassen sich aber auch Bearbeitungsprozesse beispielsweise mit Hilfe eines Portalbearbeitungszentrums oder eines 6-Achs-Roboters darstellen.

Da der Tafel keine zusätzlichen Bauteile hinzugefügt werden (Nägeln und Klammern werden nicht als Einzelbauteile simuliert), können hier alle Bearbeitungszeiten summiert werden, so dass nur eine Bearbeitungsstation notwendig ist, wie in Bild 6.11 gezeigt. Die Bearbeitung wird durch den Eingang eines Auftrags-BEs ausgelöst. Per Methode werden Fertigungszeiten und angefallene Kosten nach dem Bearbeitungsvorgang auf die Attribute der Tafel übertragen.

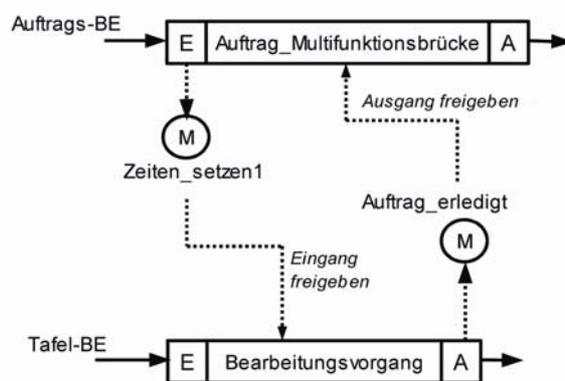


Bild 6.11: Methodensteuerung im Modell der Multifunktionsbrücke

Bei der Berechnung der Zeiten überprüft eine Methode, ob Operationen vorzunehmen sind, die vor dem Wenden der Tafel stattfinden, oder ob es sich bereits um die Tafel-Rückseite handelt (Bild 6.12). Entsprechend müssen die zugehörigen Informationen aus den Auftragsdaten ausgelesen und gemeinsam mit den Maschinenparametern (Tabelle 6.9) zur Zeitermittlung herangezogen werden. Zunächst werden die Platten festgenagelt, wobei sich die Bearbeitungszeit nach der Strecke richtet, die die Multifunktionsbrücke abfahren muss, da der eigentliche Nagelvorgang während des Verfahrens erfolgt und die entscheidende Größe hier also die Verfahrensgeschwindigkeit der Brücke ist. Für die Befestigung der weiteren Bauteile (Lattung nageln, Schalung klammern) wird als Bezugsgröße die gesamte Tafelfläche angesetzt, da diese Bauteile sich über die gesamte Fläche erstrecken und die Befestigungselemente in regelmäßigen Abständen gesetzt werden. Da sich Nägel und Klammern in einem Magazin befinden, wird mittels Zählvariablen der Füllstand von Klammer- und Nagelmagazin überwacht, so dass im Falle eines leeren Magazins die Nachfüllzeit zur Gesamtzeit addiert werden muss.

Wenn Öffnungen gebohrt werden, wird die Bearbeitungszeit aus einem Durchschnittswert errechnet, der die Zeit repräsentiert, die zum Anfahren der Position und für den eigentlichen Bohrvorgang notwendig ist und mit der Gesamtzahl der Bohrungen multipliziert wird. Zusätzlich kann noch ein Werkzeugwechsel notwendig sein (bei verschiedenen Bohrungsdurchmessern), so dass die Werkzeugwechselzeit noch dazu addiert wird. Weitere Öffnungen (Fenster, Sanitär, etc.) können gesägt oder gefräst werden, wobei sich die Zeit aus einem allgemeinen Wert zum Anfahren der Positionen und dem Vorschub zusammensetzt,

der mit der Säge- bzw. Frässtrecke multipliziert wird. Das Absägen der Platten, Lattung und Schalung hängt von den Außenlängen der Tafel ab. Normalerweise handelt es sich um die Tafelbreite, die in die Berechnung einfließt. Eine Ausnahme bildet die Konterlattung bei Dachtafeln, die senkrecht zur Tafellänge aufgebracht wird und somit auch entlang der Tafellänge abgesägt werden muss (Bild 6.13).

Grundsätzlich kann es vorkommen, dass eine Bearbeitungsoperation bei dem vorliegenden Tafeltyp nicht in Frage kommt (z.B. Dachlattung festnageln bei einer Wandtafel). Für die Berechnung der gesamten Bearbeitungszeit stellt dies jedoch kein Problem dar, da in der Maschinenspezifikation die Parameter abhängig vom Tafeltyp hinterlegt sind. Nicht durchführbare Operationen für einen bestimmten Tafeltyp fließen durch eine Bearbeitungszeit „Null“ nicht in die Berechnung mit ein.

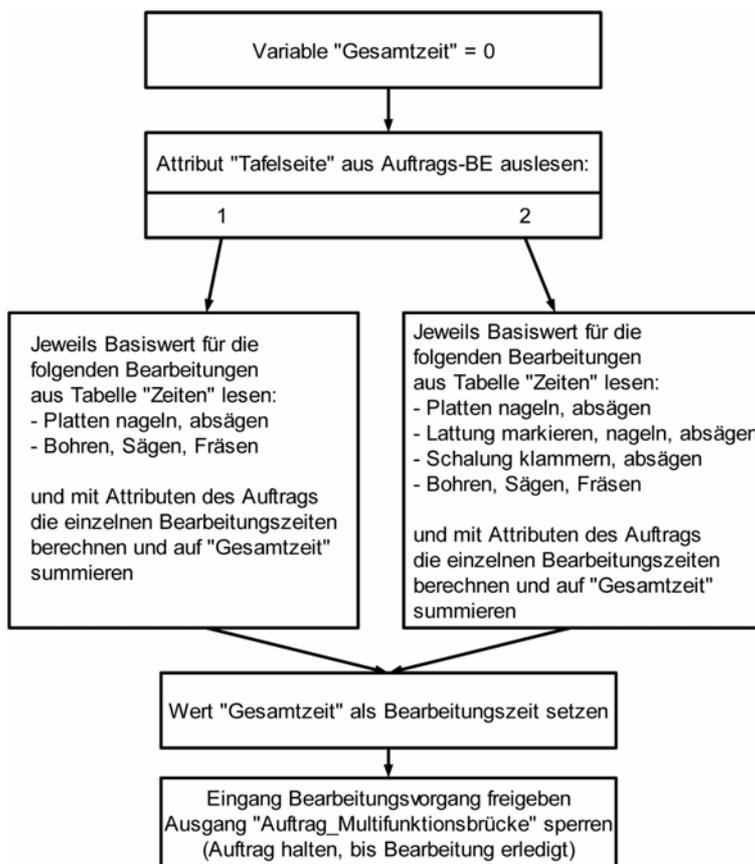


Bild 6.12: Berechnung der Bearbeitungszeiten der Multifunktionsbrücke

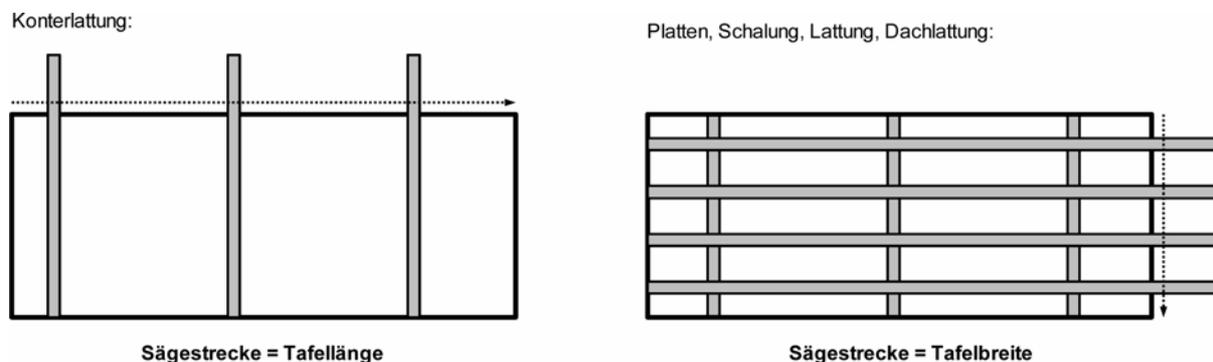


Bild 6.13: Sägeoperationen der Multifunktionsbrücke

Parameter	Erläuterung
Typ	Typbezeichnung der Tafel (HUELLE_WAND, HUELLE_DACH, ...)
Nageln	Kehrwert der Verfahrensgeschwindigkeit beim Nageln in s/m
Nagelmagazin	Inhalt eines Nagelmagazins in Stück
MagazinNagel	Zeit in s, die zum Nachfüllen des Nagelmagazins benötigt wird
Klammern	Kehrwert der Verfahrensgeschwindigkeit beim Klammern in s/m
Klammermagazin	Inhalt eines Klammermagazins in Stück
MagazinKlammern	Zeit in s, die zum Nachfüllen des Klammermagazins benötigt wird
Absägen	Kehrwert der Verfahrensgeschwindigkeit beim Absägen der Plattenüberstände in s/m
Positionieren	Durchschnittswert in s, um eine beliebige Position auf einer Tafel anzufahren
Sägen	Kehrwert der Verfahrensgeschwindigkeit in s/m beim Sägen von Öffnungen
Fräsen	Kehrwert der Verfahrensgeschwindigkeit in s/m beim Fräsen von Öffnungen
Bohrungen	Zeit in s zum Herstellen einer Bohrung
Bohrwerkzeuge	Zeit in s zum Wechseln eines Bohrwerkzeugs
Lattenmarker	Durchschnittswert in s, um auf einem Quadratmeter Tafelfläche Markierungen anzubringen
Lattennägel	Durchschnittswert in s, um auf einem Quadratmeter Tafelfläche die Lattung festzunageln
Lattensäge	Kehrwert der Verfahrensgeschwindigkeit in s/m beim Absägen der Überstände der Lattung
Schalungsklammern	Durchschnittswert in s, um auf einem Quadratmeter Tafelfläche die Schalung festzuklammern
Schalungssäge	Kehrwert der Verfahrensgeschwindigkeit in s/m beim Absägen der Überstände der Schalung
Schnellverbinder	Durchschnittswert in s, um die Öffnungen für ein Schnellverbinder-Element zu erzeugen
Maschinenstunde	Maschinenstundensatz in €/h
Arbeitsstunde	Personalkosten in €/h multipliziert mit der Anzahl der Arbeiter

Tabelle 6.9: Maschinenparameter Multifunktionsbrücke

Schmetterlingswender

Mit dem „Schmetterlingswender“ wird der Prototyp einer Wendevorrichtung für Holztafeln bereitgestellt. Zum Wendevorgang zählt die Zeit, die benötigt wird, um zwei Tische nebeneinander zu fahren, in eine vertikale Position zu bringen, die Tafel zu übergeben, die Tische wieder abzusenken und in die Ausgangspositionen zurückzuführen. Diese Zeit ist unabhängig vom Typ der zu wendenden Tafel. Die Verknüpfung von Auftragsdaten und Materialfluss

folgt dem bewährten Schema (Bild 6.14). Das Eintreffen eines Auftrags löst die Methode zur Freigabe des Wendevorgangs aus. Erst nachdem dieser abgeschlossen ist, wird der Ausgang des Auftragspuffers geöffnet, so dass Material und zugehöriges Auftrags-BE gleichzeitig zur Folgestation umgelagert werden.

Die beim Wendevorgang anfallenden Maschinen- und Arbeitskosten werden berechnet und in die entsprechenden Attribute der Tafel geschrieben. Des Weiteren signalisiert ein Attribut „Tafelseite“ den nachfolgenden Bearbeitungsstationen, dass die Tafel gewendet worden ist.

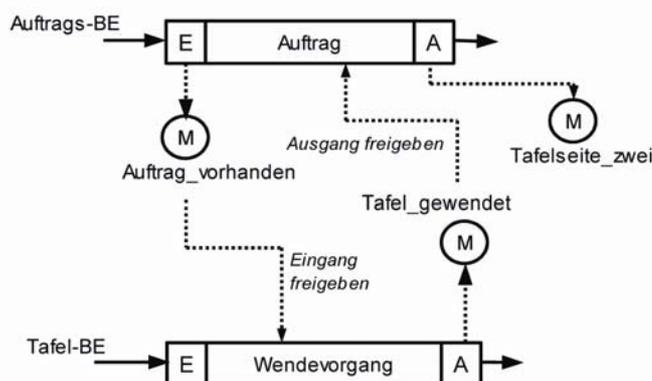


Bild 6.14: Methodensteuerung im Modell des Schmetterlingswenders

Parameter	Erläuterung
Typ	Enthält nur einen Eintrag, keine Unterscheidung des Tafeltyps
Wenden	Durchschnittswert in s, um die Tische zu verfahren, die Tafel zu wenden und die Tische wieder in Ausgangsposition zurückzufahren
Maschinenstunde	Maschinenstundensatz in €/h
Arbeitsstunde	Personalkosten in €/h multipliziert mit der Anzahl der Arbeiter

Tabelle 6.10: Maschinenparameter Schmetterlingswender

Werker im Finishbereich:

Der „Werker“ hat die Aufgabe, Fenster, Türen und Rollläden in die Außenwandtafeln einzubauen und die Isolierung anzubringen. Für jeden Arbeitsschritt ist ein individueller Auftrag vorgesehen, der in einen Puffer eintritt. Dieser Auftrag enthält dann die Informationen über das zu verarbeitende Bauteil und die zugehörige Tafel. Durch die Eingangssteuerung des Auftragspuffers wird eine Methode aufgerufen, die aus der Parametertabelle "Zeiten" die zum vorliegenden Auftragsstyp gehörenden Informationen ausliest und die Bearbeitungszeit berechnet. Zusätzlich wird noch der Ausgang des Puffers ("Tür", "Fenster", "Rollläden" oder "Isolierung"), der das gerade benötigte Bauteil bereithält, geöffnet, so dass das Material an die Bearbeitungsstation übergeben werden kann.

Per Methode werden Baugruppenzuordnung und Bauteilname auf die entsprechenden Attribute des vom Werker verbauten Materials geschrieben, zusätzlich werden Gewicht und Materialkosten ermittelt. Zur Berechnung dieser Werte wird auf die Materialdatenbank zugegriffen, die Basiswerte für Kosten und Gewicht enthält. Bei der Isolierung liegen diese bezogen auf einen Quadratmeter vor, so dass zusammen mit der Fläche der Tafel, die als

Information im Auftrag mitgeliefert wird, die Werte berechnet werden können. Im Fall der anderen Bauteile handelt es sich um feste Werte pro Stück, die direkt übertragen werden.

Für die Montagevorgänge von Türen, Fenstern und Rollläden wird jeweils eine konstante Bearbeitungszeit angesetzt. Die Bearbeitungszeit beim Aufkleben der Isolierschicht aus Styropor ist abhängig von der Tafelfläche, da die gesamte Außenwand der Tafel abzüglich Fenster- und Türöffnungen beklebt werden muss. Mit Hilfe der Bearbeitungszeit und der Lohnkosten aus der Parametertabelle des Werkers können die Arbeitskosten berechnet werden. Kommen zusätzliche maschinelle Montagehilfsmittel zum Einsatz, werden die anfallenden Maschinenkosten ebenfalls berechnet. Nicht berücksichtigt werden Werkzeuge und Handarbeitsmaschinen wie beispielsweise Akkuschrauber.

Parameter	Erläuterung
Typ	Name des Einbauteils ("Tür", "Fenster", "Rolladen", "Isolierung")
Einbau	Durchschnittswert in s, um das Teil zu verbauen Bei Isolierung: Durchschnittswert in s/m ² , um einen Quadratmeter Isolierung aufzukleben
Maschinenstunde	Maschinenstundensatz in €/h
Arbeitsstunde	Personalkosten eines Werkers in €/h

Tabelle 6.11: Parameter Werker (Finishbereich)

6.3.6 Fertigungsabschnitte

Zur Modellierung der unterschiedlichen Bereiche einer Holztafelherstellung werden die Maschinenprototypen miteinander kombiniert und um weitere Elemente wie etwa Handhabungsvorgänge erweitert. Diese Fertigungsabschnitte haben weiterhin einen universellen Charakter und sind nicht auf einen konkreten Fabrikbetrieb bezogen.

Abbund (Rippenfertigung)

Zentrales Element der Rippenfertigung ist die Abbundanlage. Zusätzlich werden die Vorgänge des Einlegens der Rohbalken und der Entnahme der bearbeiteten Werkstücke simuliert. Diese Vorgänge sind jeweils durch eine einzelne Bearbeitungsstation nachgebildet. Für Änderungen am Einlege- oder Entnahmenvorgang kann die Anpassung im Modell im einfachsten Fall dadurch erfolgen, dass eine veränderte Bearbeitungszeit eingetragen wird. Darüber hinaus ist es möglich, die Bearbeitungsstationen durch ein anderes Element auszutauschen (beispielsweise einen speziellen Roboterbaustein).

Während die eigentlichen Materialien (Rohmaterial, bearbeitete Rippen) durch alle Stationen geführt werden, werden die Auftrags-BEs direkt in das Unternetzwerk der Abbundanlage weitergeleitet, da die spezifischen Auftragsdaten keinen Einfluss auf das Einlegen und die Entnahme haben und hier nicht zusätzlich verarbeitet werden müssen.

Plattenzuschnitt

Im Fertigungsbereich "Plattenzuschnitt" ist die Plattensäge durch zwei Bearbeitungsstationen ergänzt, die das Auflegen und die Entnahme der Platten nachbilden. Wie bei der Rippenfer-

tigung wird auch hier der Auftrag direkt an das Unternetzwerk der Plattensäge weitergeleitet, während das Material den Weg durch alle sämtliche Stationen nimmt.

Tafelfertigung

Der Fertigungsabschnitt "Tafelfertigung" setzt sich aus zwei Zimmermeistertischen, einem Schmetterlingswender und einer Multifunktionsbrücke zusammen, mit denen es möglich ist, eine Tafel zu montieren, beidseitig maschinell zu bearbeiten und schließlich senkrecht aufzustellen. Der Ablauf der Tafelfertigung gliedert sich wie folgt:

- Bauteile der Tafel auf Tisch 1 auflegen
- mit Hilfe der Multifunktionsbrücke verbinden und bearbeiten
- Tische verfahren, Tafel wenden
- Bauteile für zweite Tafelseite auf Tisch 2 auflegen
- mit Hilfe der Multifunktionsbrücke verbinden und bearbeiten
- Tisch aufstellen (nur bei Wandtafeln), Tafel entnehmen

Damit im Modell ein geradliniger Materialfluss möglich ist, wurde das Modell der Multifunktionsbrücke doppelt eingesetzt, obwohl beide Modelle dieselbe Maschine darstellen. Daher muss gewährleistet werden, dass immer nur eine der beiden Multifunktionsbrücken zur gleichen Zeit durch einen Auftrag belegt sein kann. Aus der Abfolge der Fertigung ergeben sich noch weitere Einschränkungen bzw. Bedingungen, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen: Der Betrieb des Schmetterlingswenders ist beispielsweise nur möglich, wenn sich die Multifunktionsbrücke gerade nicht im Betrieb befindet (d.h. nicht oberhalb eines Tisches verfährt), da sonst die Tische nicht aufgestellt werden können. Außerdem kann eine Tafel von Tisch 1 auf Tisch 2 nur dann übergeben werden, wenn sich auf Tisch 2 keine Tafel befindet. Insgesamt existieren 16 unterschiedliche Zustände, die sich aus den möglichen Belegungen der beiden Tische mit Tafeln, der Aktivität der Multifunktionsbrücke und des Wenders ergeben.

Um die logischen Zustände 'Tisch frei/belegt' und 'Brücke aktiv/frei' zu erfassen, sind im Modell der Tafelfertigung entsprechende boolesche Variablen vorhanden. Aufträge werden zwischen den einzelnen Fertigungseinrichtungen immer von einem Puffer aufgenommen, so dass über die Eingangssteuerung der Puffer Methoden ausgelöst werden können, die die Zustandsänderungen erfassen. Es muss beachtet werden, dass die Modelle der einzelnen Fertigungseinrichtungen nur die Vorgänge darstellen, die gerade ausgeführt werden, was aber nicht bedeutet, dass eine Fertigungseinrichtung sofort wieder frei ist, wenn ein BE diese verlässt. Anhand der Zimmermeistertische wird dieser Zusammenhang deutlich (vgl. Bild 6.15): Die Vorgänge des Auflegens und Zusammenbaus sind im Netzwerk "Tisch1" modelliert. Wenn diese Bearbeitungen abgeschlossen sind, kommt die Multifunktionsbrücke zum Einsatz und das Tafel-BE geht in das Netzwerk "Multifunktionsbrücke_S1" über. Da die Multifunktionsbrücke aber über dem Zimmermeistertisch verfährt, liegt die Tafel in der Realität natürlich immer noch auf dem "Tisch1", der somit noch nicht für einen neuen Auftrag freigegeben werden kann. Die Freigabe darf erst dann erfolgen, wenn die Tafel mit Hilfe des Schmetterlingswenders gewendet und von "Tisch2" aufgenommen wurde.

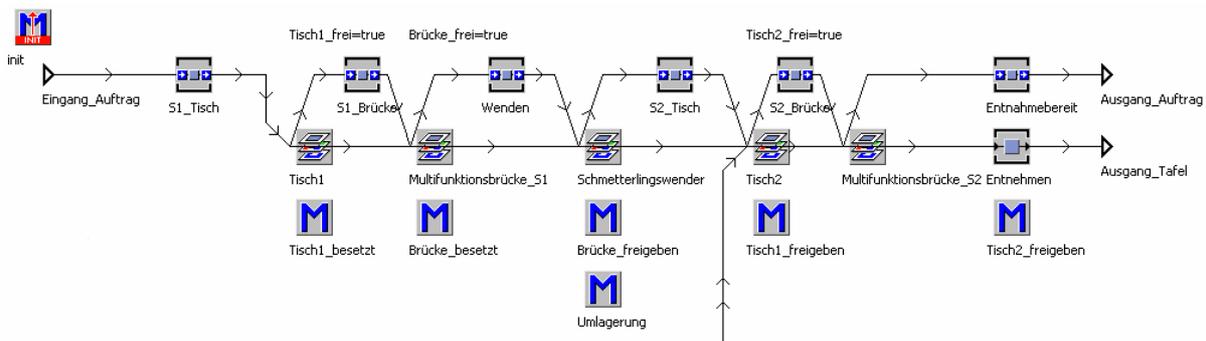


Bild 6.15: Modellierung der Tafelfertigung (Ausschnitt)

Finishbereich

Im Finishbereich sind zum einen die Bahnen zur Aufnahme der Tafeln modelliert, und zum anderen die Werker, die den Einbau der noch fehlenden Teile vornehmen. Der Finishbereich ist so angelegt, dass eine bestimmte Anzahl Werker vorhanden ist, die je nach Verfügbarkeit die anstehenden Aufträge übernehmen und ausführen. Die Anzahl der Bahnen und der Werker ist dabei beliebig variierbar.

Die Bahnen der Finishlinie sind als einfache Bearbeitungsstationen modelliert, die jeweils eine Kapazität von 1 besitzen. Die Werker sind vom gleichnamigen Prototypen abgeleitet. Bei Eingang eines Fertigungsauftrags werden anhand der mitgelieferten Informationen über zu verbauende Fenster, Türen und Rollläden Unteraufträge für die einzelnen Werker generiert. Die erzeugten Unteraufträge werden in einem Auftragspuffer gesammelt und von dort an die Werker-Netzwerke weitergeleitet. Hierbei wird der Nachfolgebaustein mit dem geringsten Inhalt gesucht, was eine Verteilung der Aufträge auf die verfügbaren Werker bewirkt, die gerade keinen Auftrag besitzen. Die Werker sind keiner bestimmten Finishbahn zugeordnet, sie suchen sich die Bahn, in der sich die zu ihrem aktuellen Auftrag gehörende Tafel befindet, selbstständig.

6.3.7 Auswertung

Der Auswertungsbereich des Simulationsmodells protokolliert die gefertigten Tafeln. Dabei werden die Baugruppenzuordnung, bestehend aus Projekt- und Baugruppenname sowie Stücklistennummer, der Bauteiltyp, die Fertigungszeit der Gesamttafel, die Material-, Maschinen- und Lohnkosten sowie das Gewicht ausgegeben. Zu diesem Zweck existiert im Auswertungsbereich eine Methode, die jeweils bei Abschluss der Fertigung einer Tafel aufgerufen wird. Diese liest die Attribute des Förderhilfsmittels „Tafel“ sowie seines Inhalts, d.h. der Einzelbauteile, aus. Die Ergebnisse werden in eine Auswertedatei ausgegeben. Tabelle 6.12 zeigt einen Auszug einer derartigen Ergebnisausgabe.

Bauteilspezifische Attribute der gefertigten Tafeln wie Länge, Höhe, Breite, erfolgte Bearbeitungen und Material werden simulationsintern mit den Auftragslisten abgeglichen. Auslastung von Bearbeitungsstationen, Puffer- und Lagerbelegung etc. werden durch die von eM-Plant zur Verfügung gestellten Auswertungsbausteine erfasst.

Tafel	Bauteil	Ta	Te	Materialkosten	Maschinenkosten	Arbeitskosten	Gewicht
EG25000502_AE5_S47	QS			14.64	0.85	0.47	10.00
EG25000502_AE5_S47	QS			14.64	0.85	0.47	10.00
EG25000502_AE5_S47	QS			14.64	0.85	0.47	10.00
EG25000502_AE5_S48	QS			5.52	0.85	0.47	4.00
EG25000502_AE5_S88	LS			4.89	1.50	0.83	3.00
EG25000502_AE5_S89	LS			5.97	2.15	1.19	8.00
EG25000502_AE5_S90	QS			14.10	1.50	0.83	18.00
EG25000502_AE5_S90	QS			14.10	1.50	0.83	18.00
EG25000502_AE5_S147	UG			15.12	7.25	4.03	25.00
EG25000502_AE5_S148	QS			14.64	0.85	0.47	18.00
EG25000502_AE5_S151	OG			15.12	4.10	2.28	19.00
EG25000502_AE5_S171	QS			14.64	2.73	1.51	18.00
EG25000502_AE5_S0	Folie			20.27	0.00	0.00	6.76
EG25000502_AE5_S149	Platte i			39.06	0.00	0.00	8.00
EG25000502_AE5_S0	Dämmung			67.58	0.00	0.00	33.79
EG25000502_AE5_S150	Platte a			39.75	0.00	0.00	8.00
EG25000502_AE5_S0	Isolierung			0.43	0.00	0.43	0.43
EG25000502_AE5_S0	Fenster			260.00	0.00	12.78	73.00
EG25000502_AE5_S29	HUELLE_AUSSENWAND-Seite1	03:59:56			85.04	86.95	290.98
EG25000502_AE5_S29	HUELLE_AUSSENWAND-Seite2	05:05:11			34.94	45.64	290.98
Summe		01:05:15		575.11	144.96	159.67	872.94

Tabelle 6.12: Ergebnisausgabe des Simulationslaufs (Auszug)

6.3.8 Konfigurationssoftware für die Materialflusssimulation

Zur Variation der Fertigungsaufträge und Konfiguration der Maschinen- und Materialdatenbank wurde eine spezielle Konfigurationssoftware entwickelt (Bild 6.16). Das Programm wurde plattformunabhängig unter C++ erstellt, um einen universellen Einsatz zu gewährleisten.

Die primäre Funktion des Programms ist die Erstellung und Variation der Auftragsliste für die Materialflusssimulation. Es ist in der Lage, beliebig viele aus dem 3D-CAD/CAM-System exportierte Gebäudemodelle einzulesen und zu einer Gesamtauftragsliste zusammenzufügen. Die Einzeltafeln der Gebäude werden mit ihrem Typ (Außen- und Innenwand, Dach, Decke) und der zugehörigen Projekt- und Bauteilbezeichnung angezeigt. Ein Statusfenster informiert über die Anzahl der zur Verfügung stehenden Tafeln. Die Anwahl einer Tafel gibt deren Hauptabmessungen (Länge x Breite) und im Falle einer Wandtafel die Zahl der zugehörigen Fenster und Türen aus. Mit Hilfe dieser Informationen können vom Benutzer Einzeltafeln zu einer sog. Multitafel zusammengefügt werden. Die Multitafel setzt sich aus kleineren Tafeln zusammen, die während der Produktion als eine einzelne, großformatige Tafel behandelt werden. Auf diese Weise können Maschinenkapazitäten, d.h. die Länge eines Zimmermeistertisches, optimal ausgenutzt werden.

Aus der Gesamtheit der Tafeln können beliebige Auftragslisten generiert werden. Beispielsweise ist es möglich, den Fertigungsauftrag auf einen bestimmten Tafeltyp einzuschränken. Genauso kann definiert werden, ob die Tafeln hintereinander nach Typ sortiert oder untereinander gemischt in der virtuellen Produktionsumgebung der Materialflusssimulation in Auftrag gegeben werden sollen.

Als weitere Funktionalität bietet das Programm den Zugriff auf die Maschinen- und Materialdatenbank der Materialflusssimulation. Maschinen werden zunächst anhand ihres Typs (Abbundanlage, Multifunktionsbrücke usw.) definiert. Für jeden Typ können mit Hilfe der Software beliebig viele Datensätze angelegt werden, die unterschiedliche Hersteller, technische Ausführungen und Automatisierungsgrade abbilden. Ähnliches gilt für die Materialdaten: auch hier können unterschiedliche Datensätze hinterlegt werden, die beispielsweise die Einkaufspreise des jeweiligen Fertighausherstellers oder verschiedene

Ausstattungsstandards (etwa Standard, Mittelklasse oder Luxus) des Gebäudes repräsentieren.

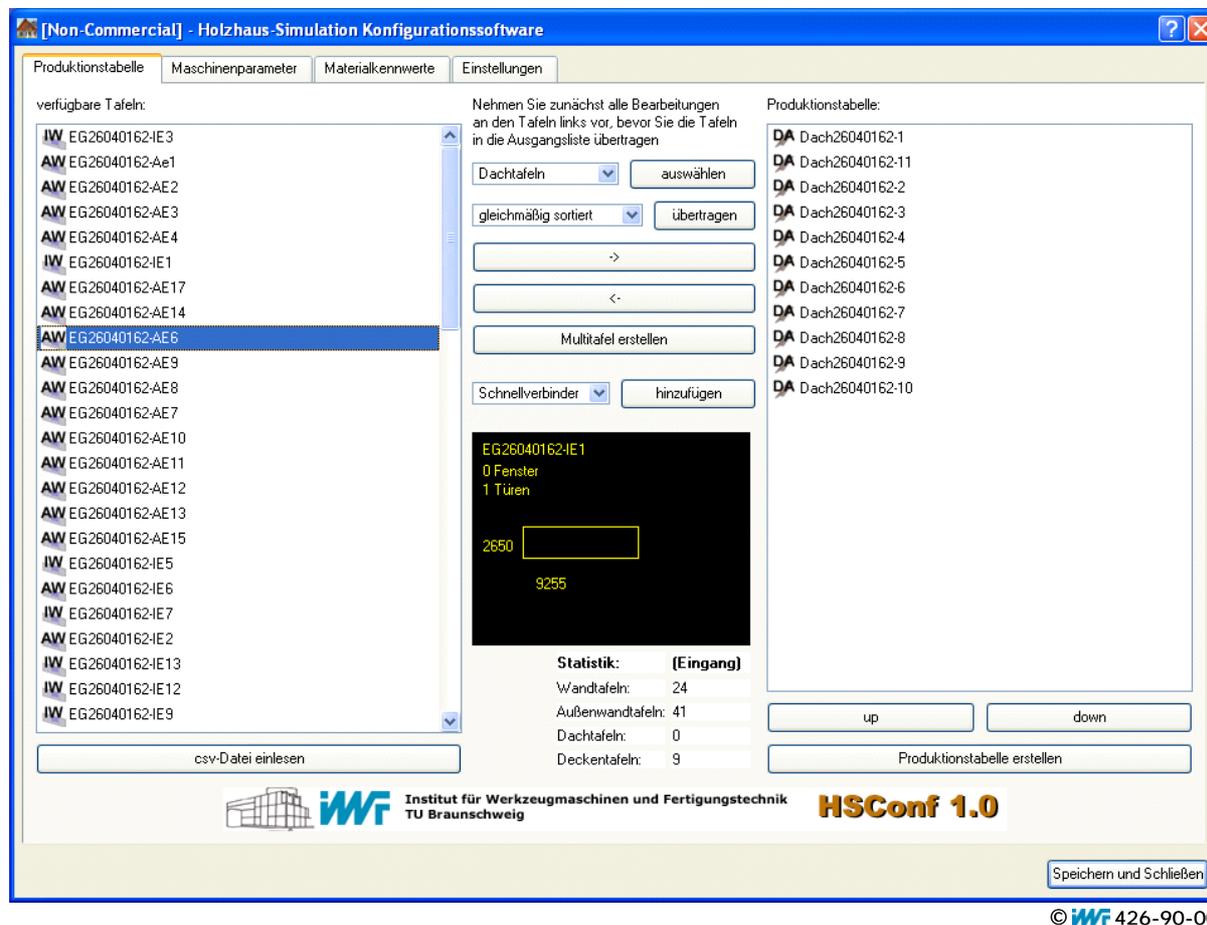


Bild 6.16: Software zur Konfiguration der Materialflusssimulation

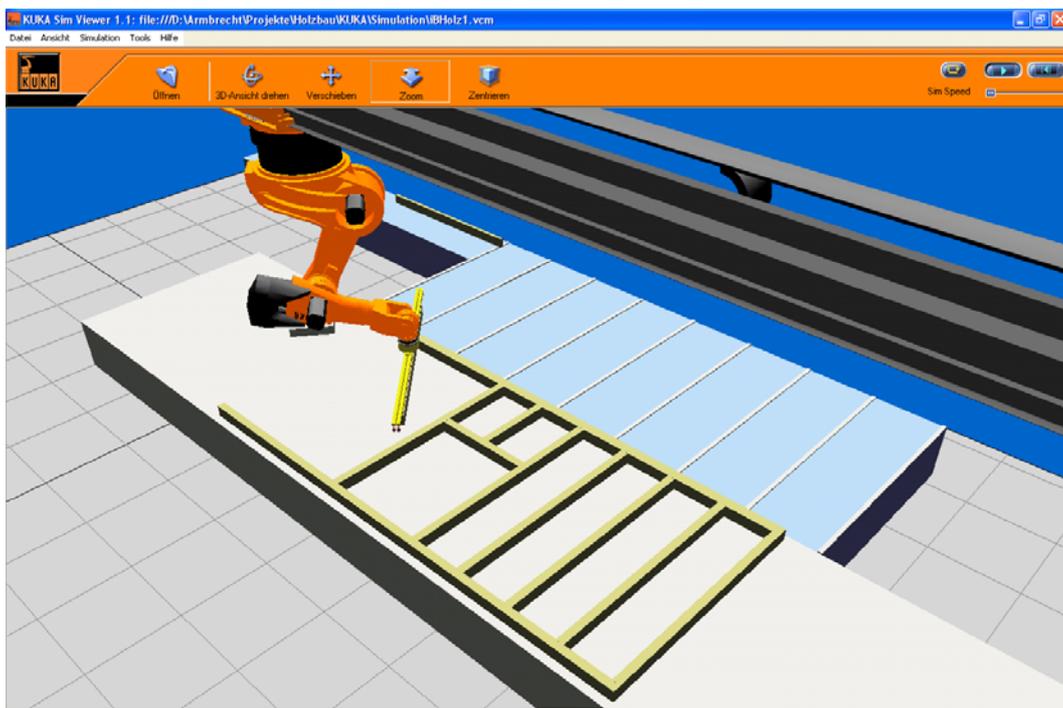
6.4 Ermittlung der Datenbasis

Grundlage für die Datenbasis der Materialflusssimulation bilden die von der Fa. Baukmeier durchgeführten Zeitaufnahmen im Werk Hameln. Sämtliche manuellen und automatischen Montage- und Bearbeitungsschritte wurden dabei erfasst und ausgewertet. Darüber hinaus wurden Informationen über Material- und Personalkosten zur Verfügung gestellt. Die Fa. Weinmann Holzbausystemtechnik lieferte die technischen Daten ihrer Maschinenteknologie sowie die zugehörigen Investitionskosten. Mit Hilfe dieser Kosten war es möglich, Maschinenstundensätze für die einzelnen Anlagenkomponenten zu berechnen.

Nicht im realen Betrieb ermittelbare Kennzahlen flossen aus der 3D-Fertigungssimulation in die Materialflusssimulation ein. Dies betrifft insbesondere die Art und Anzahl von Maschinentypen und deren Anordnung, da dies die Länge der Förderstrecken und die Art der eingesetzten Förderhilfsmittel beeinflusst. Einen Sonderfall nehmen die 6-Achs-Roboter der Fa. KUKA Roboter ein. Hier führte KUKA mit einer firmeneigenen Software zusätzliche, gezielte Simulationsläufe in den Bereichen „Abbund/Riegelwerk“ und „Einbringung von Dämmstoffen“ an den definierten Standardbauteilen durch (Bild 6.17). Anhand dieser Simulationen konnten unter Berücksichtigung von Werkstückabmessungen und -gewichten die jeweils erforderli-

chen Robotertypen und Lineareinheiten dimensioniert werden. Mit der Kenntnis des Robotertyps und der zugehörigen technischen Daten wurden im nächsten Schritt die exakten Taktzeiten ermittelt.

Aus der Gesamtheit der ermittelten Daten wurden im Anschluss die Maschinen- und Materialdatenbanken für die Materialflusssimulation erstellt und die im folgenden Kapitel beschriebenen Simulationsläufe durchgeführt.



© IWF 429-58-00

Bild 6.17: Simulation einer Riegelwerksstation mittels „KUKA-Sim“

7 Versuchsdurchführung, Ergebnisse

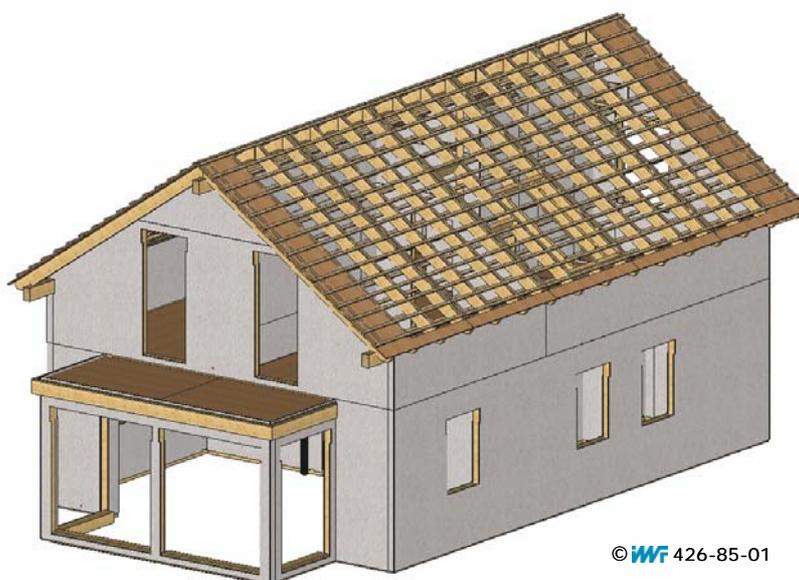
7.1 Gebäudemodelle und deren Eigenschaften

Insgesamt kommen drei Wohngebäude in der Materialflusssimulation zum Einsatz. Die Beispielhäuser 1 und 2 wurden von der Fa. Baukmeier zur Verfügung gestellt. Das dritte Beispielhaus ist das im Rahmen von Teilvorhaben 1 (BR+I, TU München) entwickelte Systemhaus.

Die Gebäudedaten der Fa. Baukmeier lagen als cadwork 3D-Dateien vor. Die Gebäude waren vollständig durchkonstruiert. Die Sachdaten und Fertigungsinformationen mussten jedoch nachträglich vervollständigt werden, um eine Übergabe zu der Materialflusssimulation zu ermöglichen. Hierbei handelte es sich um Materialdaten, Stücklisten und Produktionslisten sowie um die Erzeugung der Maschinendaten der auf den Abbundanlagen zu fertigenden Rippen. Für das Systemhaus aus Teilvorhaben 1 lagen IfC-Dateien mit den Hüllen der Wandtafeln sowie der Decken und der Dachelemente vor. Mit Hilfe von 2D-Detailzeichnungen konnten so die Wandtafeln auskonstruiert werden. Die Vervollständigung der Sachdaten und Fertigungsinformationen erfolgte analog zu den ersten beiden Beispielhäusern.

7.1.1 Gebäudemodell 1

Bei dem ersten untersuchten Gebäude (Bild 7.1) handelt es sich um ein schlichtes Einfamilienhaus bestehend aus einem Erdgeschoss mit einem Vorbau und einem ausgebauten Obergeschoss mit Balkon. Das Dach ist als Satteldach ausgebildet und als Pfettendach konstruiert. In dem Dach sind Wechsel für Dachfenster vorhanden, die aus Stabilitätsgründen für den Transport erst bauseits ausgeschnitten werden. Die Sanitärinstallationen sind an Installationsvorwänden montiert. Insgesamt werden 62 Tafeln mit 604 Rippen in dem Haus verarbeitet (siehe Tabelle 7.1).



© IWF 426-85-01

Bild 7.1: Gebäudemodell 1 (Fa. Baukmeier)

Wandtafel

Die Außenwände sowie die tragenden Innenwände sind mit einem 140 mm Riegelwerk ausgebildet, während nicht tragende Innenwände mit einem 90 mm Riegelwerk konstruiert sind. Stiele an Wandecken sowie an Fenster- und Türöffnungen haben eine Querschnittsbreite von 90 mm, sonstige Stiele sind 50 mm breit. Alle Wände sind beidseitig mit 15 mm Fermacellplatten beplankt. Verschiedene Wandanschlusssituationen sind in Bild 7.2 dargestellt.

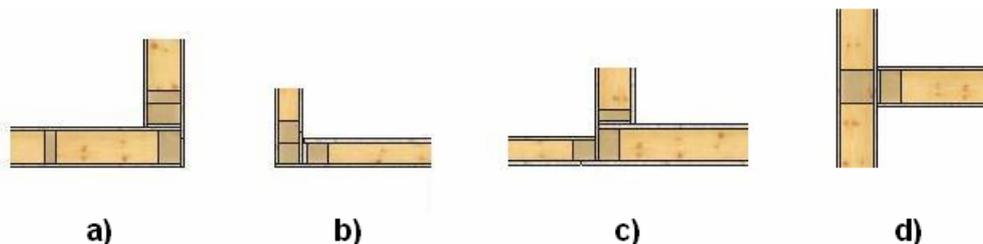


Bild 7.2: Wandanschlüsse Gebäudemodell 1 – a) und b) Außenecken, c) Innenecke d) T-Stoß

Das Riegelwerk ist wie folgt aufgebaut: die Stiele werden an ihren Bauteilenden um einen Zentimeter verlängert und in entsprechend tiefe Ausblattungen mit einem beidseitigen Zugabemaß von 1 mm in der Breite in den Schwellen und Rähmen fixiert. Auf die gleiche Art und Weise werden die Riegel der Türen und Fenster in die Stiele eingelassen. Ausnahmen bilden hier die Drempelwände im Dachgeschoss sowie die Giebelwände im Spitzboden. Hier wird die Position der Stiele lediglich durch Markierungen an Schwellen und Rähmen festgelegt. Weitere Bearbeitungen am Riegelwerk sind Bohrungen an Stielen in Wandanschlüssen, Ausblattungen durch Elektroinstallationen oder an Türdurchgängen in den Schwellen, Schlitzlöcher in Schwellen und Rähmen an Abluftschächten, Längsfälze an den Schwellen der Außenwandtafeln im Erdgeschoss, Längsschnitte als Fasungen an den Rähmen der Innenwände im Dachgeschoss oder an Stielen diagonaler angeschlossener Wandtafeln.

Die Bearbeitungen an den Gesamttafeln bestehen aus Bohrungen, Sägeoperationen, die an den Außenkanten der Platten sowie an den Kanten der Fenster- und Türöffnungen entstehen, und Nageloperationen. Alle Bearbeitungen werden sowohl vor als auch nach dem Wenden der Tafeln ausgeführt. Die Vernagelung der Platten erfolgt bei einem Randabstand von 20 mm alle 75 mm. Dabei werden sowohl vertikale und horizontale als auch diagonale Nagellinien erzeugt. Die Nagellinien beziehen sich jeweils auf die Stiele. Stiele werden bei einem Randabstand von 20 mm alle 200 mm vernagelt.

Deckentafel

Das Riegelwerk der Deckentafeln, die Balkenlage, ist zum Boden des Obergeschosses mit 25 mm Sperrholzplatten belegt und zur Erdgeschossdecke mit einer Lattung versehen. Die Latten im Innenbereich der Tafeln weisen einen Querschnitt von 60x23 mm² auf, während die Lattung im Randbereich der Tafeln einen Querschnitt von 80x23 mm² besitzt. Die Balken haben einen Querschnitt von 120x240 mm² bzw. 80x240 mm² im Bereich des Balkons und des Obergeschossflures.

Die Position der Deckenbalken wird mit Hilfe von Markierungen festgelegt. Dadurch erhält ein Großteil der Balken lediglich Kappsägeschnitte. Eine Ausnahme bilden hier die Balken im

Übergangsbereich zum Balkon, die in das Profil eines HEB 200 Stahlträgers eingeschoben werden. Die Randbalken werden zur Verbindung mit der Erdgeschosebene im Wesentlichen im Bereich der Stiele gebohrt. Im Bereich der Feuchträume geht die Balkenlage bis zur Außenhülle des Gebäudes. In diesem Bereich sind die Balken mit Kerven versehen. Weitere Bearbeitungen sind Ausblattungen im Bereich von Installationen sowie an Anschlüssen der Balkenlage an Randbalken.

Die Bearbeitungen an den Gesamttafeln entsprechen im Wesentlichen denen der Wandtafeln. Die Platten werden bei einem Randabstand von 20 mm alle 100 mm vernagelt.

Dachtafel

Im Bereich des Dachüberstandes liegt zwischen den Sparren und der Außenlattung eine Verschalung aus 19 mm Baufaserholz. Die Sparren haben einen Querschnitt von 80x240 mm² mit Ausnahme der Sparren, die vollständig im Bereich des Dachüberstandes liegen und einen um die Verschalung reduzierten Querschnitt von 80x221 mm² aufweisen. Die Stellbretter zur Dachtraufe stehen senkrecht in den Dachtafeln. Die Sparren liegen ca. alle 80 cm auf den Pfetten auf, die Konterlatten auf den Sparren haben einen Querschnitt von 60x23 mm². Die Latten der Außenlattung besitzen einen Querschnitt von 50x30 mm² und werden in einem Abstand von 33,1 cm montiert, während die Innenlattung wie bei den Deckentafeln aus 60x30 mm² Latten in einem Abstand von 41,6 cm besteht.

Die Bearbeitungen des Riegelwerkes beschränken sich auf Schrägschnitte am First und Hexenschnitte an der Traufe, Kerven und Bohrungen an den Auflagerstellen der Pfetten, Ausfräsungen für die Stellbretter und Traufschalungen für die Verschalung. Die Platten werden bei einem Randabstand von 20 mm alle 100 mm vernagelt. Die Konterlattenvernagelung erfolgt bei einem Abstand von 24 mm zur Lattenkante mit je einem Nagelpunkt in der Mitte.

7.1.2 Gebäudemodell 2

Das zweite untersuchte Gebäude (Bild 7.3) ist ähnlich dem ersten Beispiel ein Einfamilienhaus bestehend aus einem Erdgeschoss mit einem Vorbau und einem ausgebauten Obergeschoss mit Balkon. Optisch auffällig sind der runde Turmanbau und der Wintergarten im Erdgeschoss mit der tieferen Traufe. Das Dach ist als Satteldach ausgebildet und als Pfettendach konstruiert. In dem Dach sind Wechsel für bauseits zu montierende Dachfenster vorhanden. Die Sanitärinstallationen sind zum großen Teil direkt an den Wänden montiert, lediglich im Obergeschoss sind Installationsvorwände vorhanden.



Bild 7.3: Gebäudemodell 2 (Fa. Baukmeier)

Die Konstruktionsdetails entsprechen im Wesentlichen denen aus Beispielhaus 1. Der Umfang der Tafeln und Bauteile ist hier jedoch größer (siehe Tabelle 7.1). Insgesamt werden 85 Tafeln mit 811 Rippen verarbeitet.

Durch den Turmanbau und den Wintergarten gibt es besondere Anschlusssituationen für die Wandtafeln (Bild 7.4).



Bild 7.4: Wandanschlüsse Gebäudemodell 2 – a) Außenecke Turm, b) Innenecke Turm, c) Außenecke Wintergarten, d) Innenecke Wintergarten

Die Deckentafeln haben bei einer Länge von fast 10 m eine größere Spannweite als in Beispielhaus 1 mit maximal 7,40 m. Dadurch ergeben sich höhere Querschnitte bei den Deckenbalken bis zu 240x240 mm².

Die Dachtafeln haben eine Länge von 6,5 m bzw. 8,4 m im Bereich des Wintergartens gegenüber einer Länge von 5 m in Gebäudemodell 1. Der Sparrenabstand liegt dadurch bei ca. 70 cm. Die Stellbretter sind im Bereich des Wintergartens vertikal also nicht senkrecht in den Dachtafeln eingesetzt.

7.1.3 Gebäudemodell 3

Das dritte Beispielhaus, das Systemhaus der TU München, wird ausführlich in Teilvorhaben 1 beschrieben. Es handelt sich um ein zweigeschossiges Einfamilienhaus mit einem Pultdach sowie Decken aus Massivholzplatten, so dass nur die in Holztafelbauweise

ausgeführten Wände in der Materialflusssimulation berücksichtigt werden. In diesem Haus kommt durchgängig die Schnellverbindertechnik zum Einsatz. Die mechanische Verbindung der Wand-, Dach- und Deckentafeln wird durch den Verbinder „PowerCon“ hergestellt. „AquaCon“ stellt die Wasseranschlüsse zwischen den Tafeln her, während „EnerCon“ Strom- und Busleitungen verbindet.



Bild 7.5: Gebäudemodell 3 (TU München, TV1)

	Gebäudemodell 1	Gebäudemodell 2
Wandtafeln EG	21 (12 Außenwandtafeln)	30 (20 Außenwandtafeln)
Rippen EG	214 (147 Positionen)	292 (210 Positionen)
Wandtafeln OG	24 (8 Außenwandtafeln)	35 (21 Außenwandtafeln)
Rippen OG	258 (166 Positionen)	327 (244 Positionen)
Deckentafeln	7	9
Rippen Decke	76 (48 Positionen)	107 (73 Positionen)
Dachtafeln	10	11
Rippen Dach	56 (43 Positionen)	56 (52 Positionen)
Tafeln insgesamt	62	85
Rippen insgesamt	604	811

Tabelle 7.1: Anzahl der Tafeln und Rippen der Gebäudemodelle 1 und 2

7.2 Variation der Produktionslisten und der Auftragsreihenfolgen

Ziel dieses Arbeitspunktes war es, mit Hilfe der Materialflusssimulation den Einfluss der Gebäudemodelle und der jeweils zugehörigen Auftragsreihenfolgen auf Fertigungszeiten und –kosten zu ermitteln. Dazu wurden für jedes der drei Gebäudemodelle unterschiedliche Varianten der Auftragsliste generiert, wobei die entwickelte Konfigurationssoftware (siehe Kapitel 6.3.8) zum Einsatz kam. Der Einfluss der Auftragsreihenfolgen wurde sowohl am Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier als auch an der Durchlaufzeit mit manuellen Arbeitsvorgängen untersucht. Die Realisierung der Durchlaufzeit erfolgte mit Hilfe der entwickelten Prototypen der Fertigungseinrichtungen. Im Falle der Fertigung nach Baukmeier wurde weiterhin analysiert, welche Auswirkung die Aufhebung der Trennung zwischen den beiden Linien nach Wandtafeln bzw. Dach-/Deckentafeln hat. Bei der Produktion der Wandtafeln des Systemhauses aus TV1 wird die Wandtafellinie zur Herstellung der Außenwände, die Dach/Deckenlinie für die Innenwände genutzt.

Die Auswertung der Simulationsläufe erfolgte anhand der von der Simulation ausgegebenen Dateien. Für jede der durchgeführten Variationen werden die Gesamtfertigungszeiten für das Gebäude in Arbeitstagen, die mittlere Tafeldurchlaufzeit sowie die Gesamtfertigungskosten, unterteilt nach Material-, Personal- und Maschinenkosten gegenüber gestellt.

7.2.1 Gebäudemodell 1 (Baukmeier)

Tabelle 7.2 stellt die Variantenbildung für die Produktionsaufträge bei den Gebäuden 1 und 2 im Überblick dar. Die Auftragslisten nach Variante 1 bis 3 sind nach Tafeltyp geordnet. Die Reihenfolge der einzelnen Typen – Außenwand, Innenwand, Dach, Decke – wurde entsprechend der Übersicht abgewandelt. Bei den Varianten 4 bis 6 werden die Tafelaufträge untereinander gemischt an die virtuelle Fertigungsumgebung der Materialflusssimulation übergeben. Im Falle der Variante 6 werden zunächst das vollständige Dachgeschoss und die Dachtafeln produziert, anschließend erfolgt die Herstellung der Tafeln des Erdgeschosses und der Decke.

VARIANTE	AUFTRAGSREIHENFOLGE
1	alle AW – alle DA – alle DE – alle IW
2	alle DA – alle IW – alle DE – alle AW
3	alle IW – alle AW – alle DA – alle DE
4	IW – DA – AW – DE – IW – DA – AW – DE...
5	IW – AW – IW – AW..., DA – DE – DA – DE...
6	DG (AW – IW – DA - AW – IW – DA...), EG (AW – IW – DE - AW – IW – DE...)

AW: Außenwandtafel
IW: Innenwandtafel

DA: Dachtafel
DE: Deckentafel

EG: Erdgeschoss
DG: Dachgeschoss

Tabelle 7.2: Varianten bei der Generierung der Auftragslisten, Einzelfertigung von Gebäude 1 und 2

Bild 7.6 und Bild 7.7 stellen die Ergebnisse für einen an den realen Betrieb der Fa. Baukmeier angelehnten Fertigungsablauf dar. Die Produktion erfolgt mit auf zwei getrennten Linien – eine für die Fertigung von Wandtafeln, die andere für Dach- und Deckentafeln – die von einer einzelnen Abbundanlage mit Rippen versorgt werden. Für die Bearbeitungsvorgänge wie Sägen und Nageln kommt je eine Multifunktionsbrücke zum Einsatz, während Montagevorgänge manuell durchgeführt werden.

Man erkennt, dass der Einfluss der Auftragsreihenfolge relativ gering ist. Die Gesamtfertigungsdauer liegt bei etwa 5 Tagen, mit einer Differenz von ca. 4 Stunden zwischen der langsamsten (Nr. 2) und der schnellsten Variante (Nr. 4). Dies spiegelt sich auch in den mittleren Durchlaufzeiten der Tafeln wieder, die bei etwas mehr als 2 Stunden liegt. Die Gesamtzeit von etwa 5 Tagen entspricht sehr gut der von der Fa. Baukmeier bezifferten Durchlaufzeit für ein Gebäude. Je nach Auftragsvariante liegen die Gesamtkosten der Fertigung, bestehend aus den Material-, Lohn- und Maschinenkosten, bei ca. 42.500 €.

In Bild 7.8 und Bild 7.9 wird deutlich, welchen Einfluss eine Aufhebung der Trennung zwischen einer Linie für Wand- und einer für die Dach-/Deckentafeln haben wird. Zwar bleibt die mittlere Durchlaufzeit der Tafeln nahezu gleich, jedoch verringert sich die Gesamtdauer der Produktion um fast einen Arbeitstag. Die größte Differenz der Fertigungszeiten besteht zwischen Auftragsvariante 3 und 6 mit ca. 5,5 Stunden. Infolge der verringerten Fertigungsdauer sinken die Kosten für die Herstellung des Gebäudes auf etwa 40.000 €. Der Unterschied zum Betrieb mit einer Trennung nach Wand bzw. Dach/Decke liegt in der besseren Auslastung der Maschinenkapazitäten und des Personals. Für eine Umsetzung in der Praxis müsste lediglich sichergestellt werden, dass die produzierten Außenwandtafeln auch von der Dach-/ Deckenlinie per Hallenkran in den Finishbereich transportiert werden können.

Die Ergebnisse für den Fall einer kontinuierlichen Fertigung mit U-förmigen Materialfluss zeigen Bild 7.10 und Bild 7.11. Es handelt sich hierbei nicht um eine automatisierte Produktionsanlage, sämtlichen Montagevorgänge werden weiterhin per Hand vorgenommen. Für den Abbund und die Tafelbearbeitung kommen konventionelle Abbundanlagen und Multifunktionsbrücken zum Einsatz. Bei den Simulationen wurde daher die identische Datenbasis wie beim Ablauf entsprechend der Fa. Baukmeier verwendet. Unterschiede bei Zeiten und Kosten resultieren daher allein aus der Umorganisation der Fertigung zu einer einzelnen Linie, bei der nach jedem Bearbeitungsschritt die Tafel an die Folgestation weitergereicht wird. Dies äußert sich in höheren mittleren Durchlaufzeiten für Tafeln. Trotzdem ist Gesamtdauer für die Herstellung des Gebäudes mit etwas mehr als 4 Tagen niedriger als bei der konventionellen Baukmeier-Fertigung. Die Abhängigkeit von der Reihenfolge der Fertigungsaufträge tritt deutlicher zutage, Variante 5 erweist sich hier als die schnellste. Durch die Neuorganisation des Fertigungsablaufs können die Kosten der Produktion auf knapp unter 40.000 € gesenkt werden.



- > Gebäudemodell 1
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

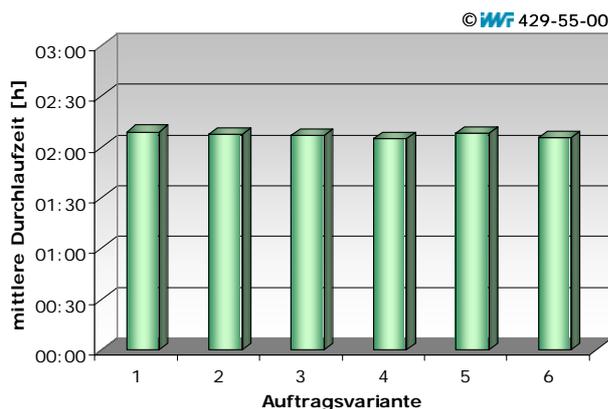
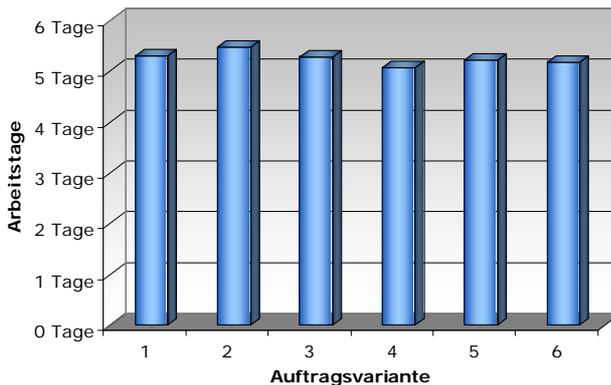


Bild 7.6: Haus 1, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von AW/IW und DA/DE



- > Gebäudemodell 1
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

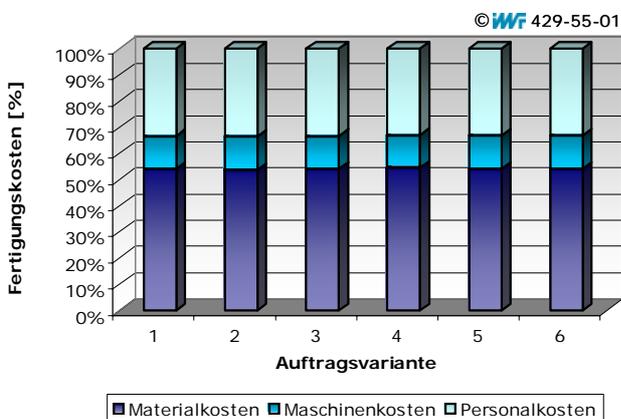
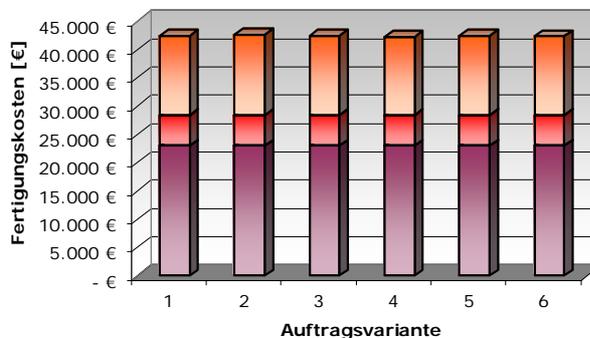


Bild 7.7: Haus 1, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von AW/IW und DA/DE



- > Gebäudemodell 1
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > keine Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

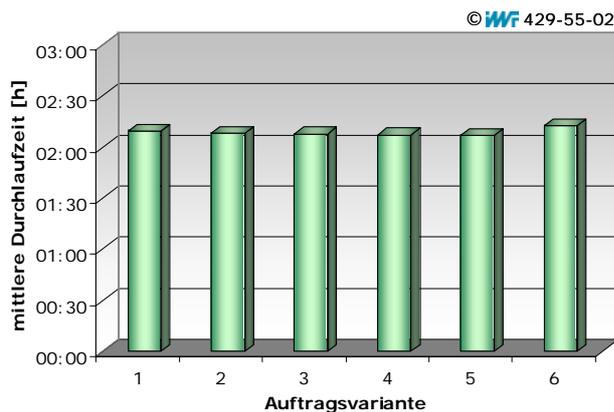
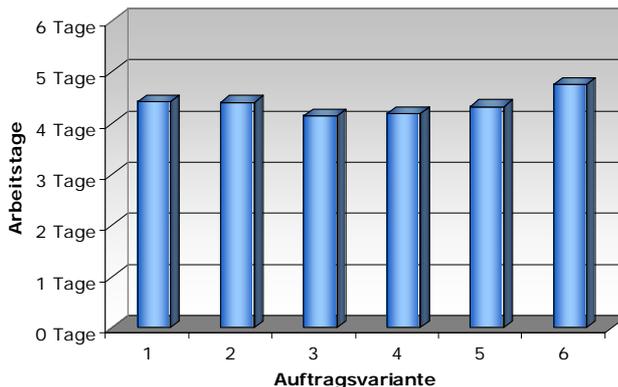


Bild 7.8: Haus 1, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von AW/IW und DA/DE



- > Gebäudemodell 1
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > keine Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

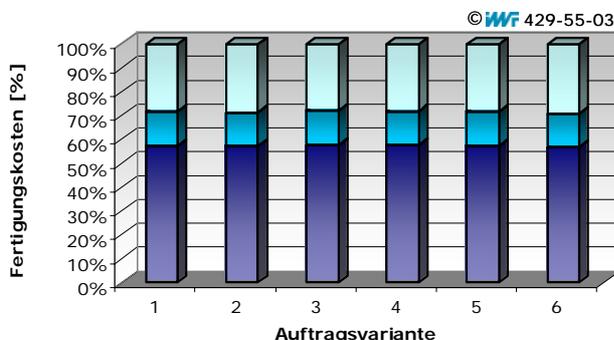
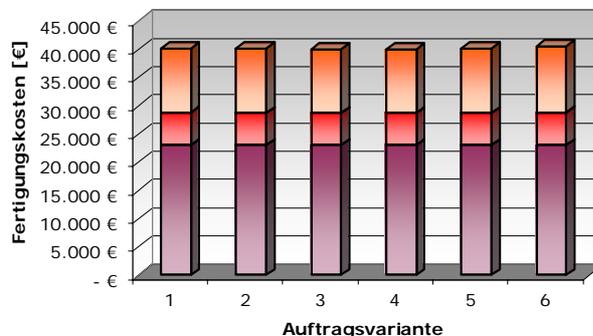


Bild 7.9: Haus 1, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von AW/IW und DA/DE



- > Gebäudemodell 1
- > Durchlauffertigung mit manuellen Arbeitsvorgängen

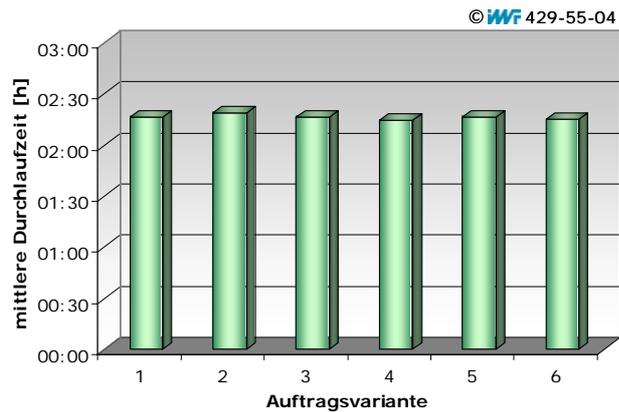
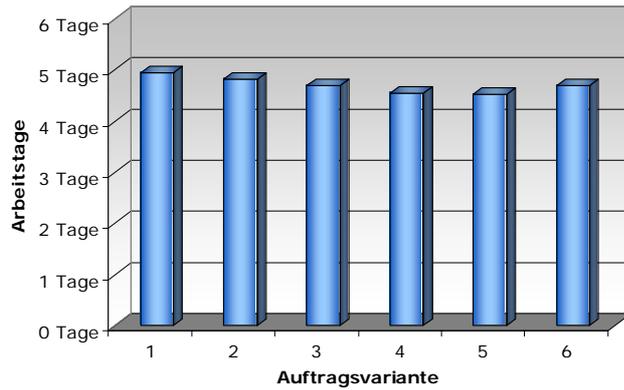


Bild 7.10: Haus 1, Durchlauffertigung (manuell)



- > Gebäudemodell 1
- > Durchlauffertigung mit manuellen Arbeitsvorgängen

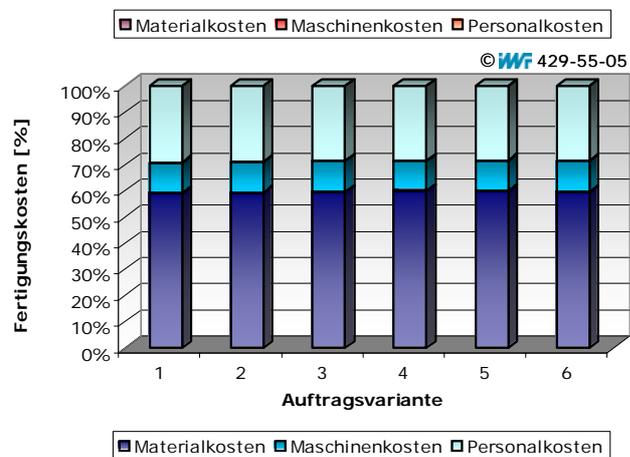
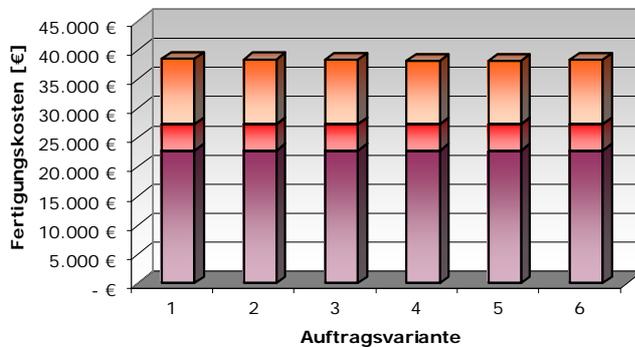


Bild 7.11: Haus 1, Durchlauffertigung (manuell)

7.2.2 Gebäudemodell 2 (Baukmeier)

Für die Untersuchung des 2. Gebäudemodells gilt dieselbe Variantenbildung wie bei Beispielshaus 1 (Tabelle 7.2). Zunächst wurde wieder der Ablauf entsprechend der Fertigung bei Baukmeier, d.h. mit einer Trennung der Aufträge nach Wand bzw. Dach/Decke, untersucht (Bild 7.12 und Bild 7.13). Aufgrund der im Vergleich zu Haus 1 größeren Anzahl Tafeln und höheren Komplexität einiger Elemente (Turmanbau, Wintergarten) beträgt die Fertigungsdauer für das Gebäude über 7 Arbeitstage. Die gestiegene Komplexität der Konstruktion äußert sich auch in den um ca. 15 min höheren mittleren Tafeldurchlaufzeiten. Mit Ausnahme der Auftragsvariante 2 ist praktisch kein Einfluss auf die Gesamtzeit feststellbar. Die Fertigungskosten wurden zu ungefähr 57.000 € ermittelt.

Hebt man die Trennung der nach Wand und Dach/Decke auf, so können die Fertigungszeiten deutlich reduziert werden, wie in Bild 7.14 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass in diesem Fall die Wahl der Auftragsreihenfolge eine weitaus größere Rolle spielt. Je nach Variante kann die Dauer der Produktion von Gebäude 2 um bis zu 2 Tage verringert werden (Nr. 2 und 5). Für diese Varianten sinken die Fertigungskosten auf ca. 52.500 € (Bild 7.15). Man erkennt, dass in diesem Fall der Anteil der Personalkosten an der Gesamtsumme sinkt.

Bei der Durchlauffertigung mit manuellen Arbeitsvorgängen schließlich ergeben sich Fertigungszeiten von etwas mehr als 6 Tagen (Bild 7.16). Wie schon bei dem Gebäudemodell 1 erweist sich die Auftragsvariante Nr. 5 als die schnellste. Die Kosten für die Produktion werden zu ungefähr 52.000 € berechnet (Bild 7.17). Als Folge der raschen Fertigungszeiten ist der Personalkostenanteil geringer als bei der konventionellen Fertigung.



- > Gebäudemodell 2
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

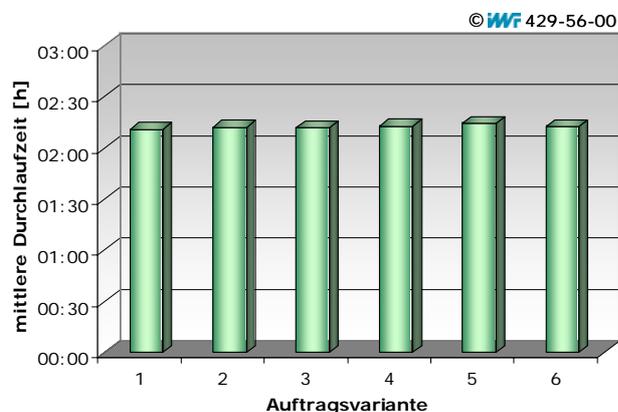
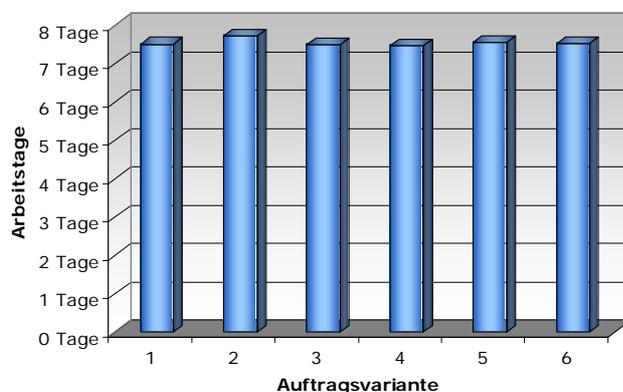


Bild 7.12: Haus 2, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von AW/IW und DA/DE



- > Gebäudemodell 2
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

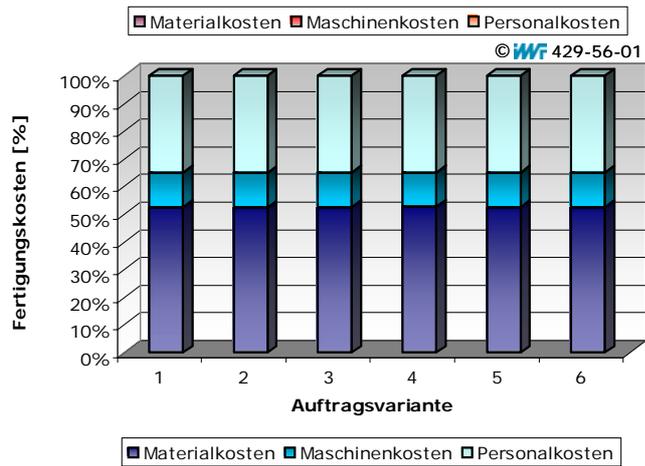
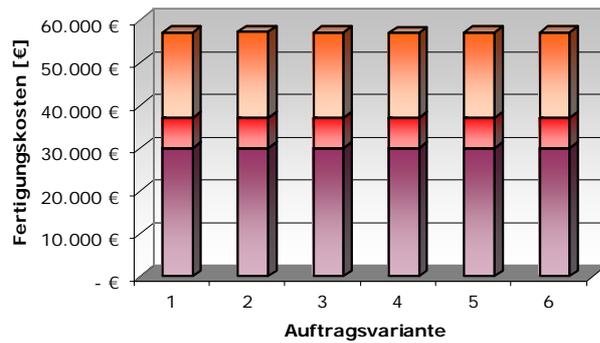


Bild 7.13: Haus 2, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von AW/IW und DA/DE



- > Gebäudemodell 2
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > keine Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

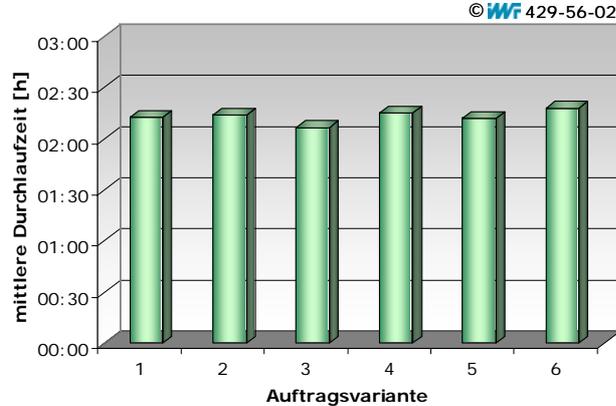
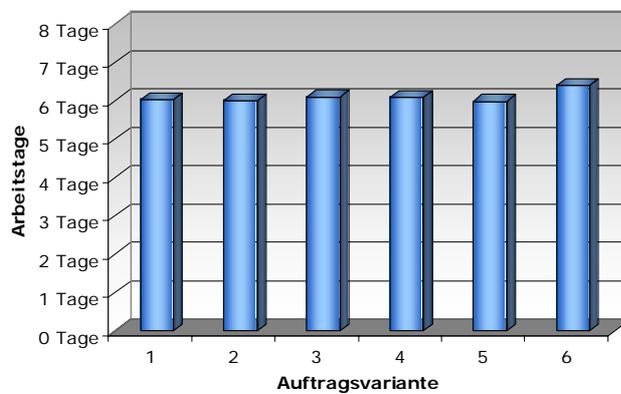


Bild 7.14: Haus 2, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von AW/IW und DA/DE



- > Gebäudemodell 2
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > keine Auftragsstrennung nach Wand und Dach/Decke

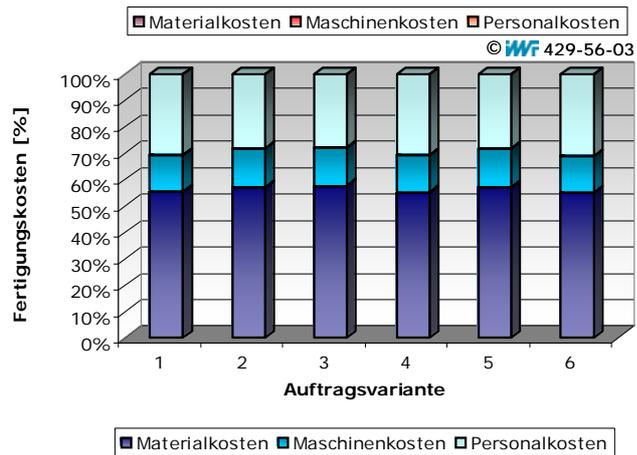
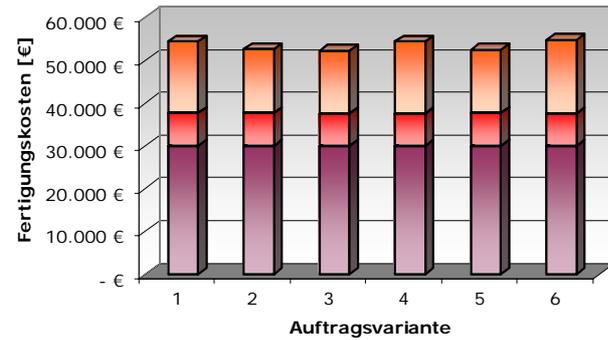


Bild 7.15: Haus 2, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von AW/IW und DA/DE



- > Gebäudemodell 2
- > Durchauffertigung mit manuellen Arbeitsvorgängen

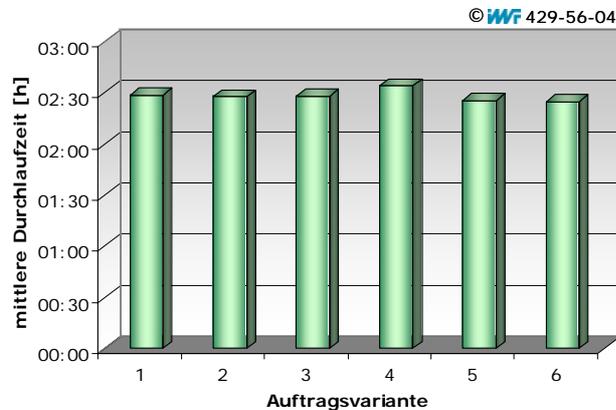
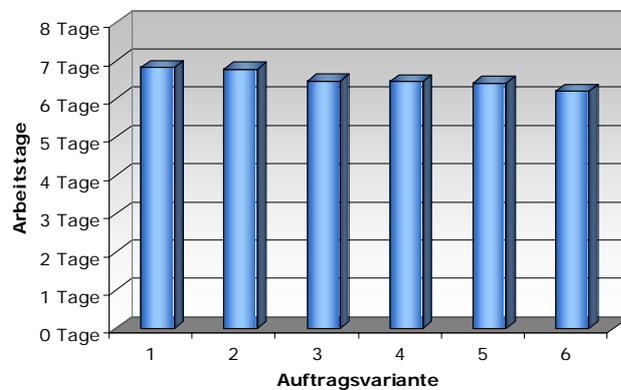


Bild 7.16: Haus 2, Durchauffertigung (manuell)



- > Gebäudemodell 2
- > Durchauffertigung mit manuellen Arbeitsvorgängen

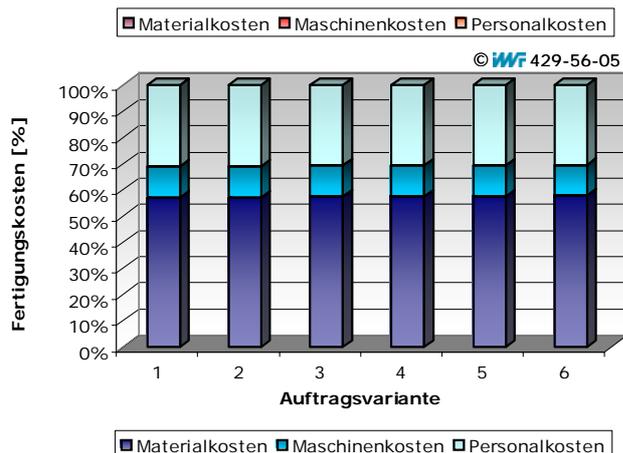
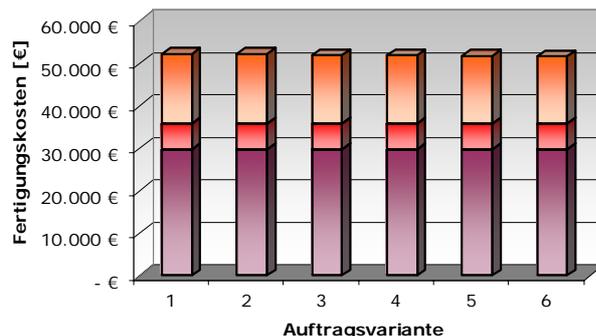


Bild 7.17: Haus 2, Durchauffertigung (manuell)

7.2.3 Gebäudemodell 3 (TU München)

Da bei dem Systemhaus der TU München nur die Fertigung der Wandtafeln simuliert wird, verringert sich die Zahl der möglichen Auftragsvarianten (Tabelle 7.3). Die Ergebnisse der Simulationsläufe sind in Bild 7.18 bis Bild 7.20 dargestellt. Man erkennt, dass die Auftragsreihenfolge vor allem bei der konventionellen, an die Baukmeier-Produktion angelehnten Fertigung einen Einfluss auf die Fertigungszeit hat. Die Fertigung in der Linie mit U-förmigen Materialfluss weist mit ca. 2 Tagen die kürzeste Gesamtdauer auf und ist praktisch unabhängig von der Reihenfolge der Tafelaufträge. Im Gegensatz zu den Gebäudemodellen 1 und 2 ist beim Systemhaus der Anteil der Materialkosten an den Gesamtherstellungskosten mit 60 bis 70% sehr hoch. Die Erklärung sind die installierten Schnellverbinder, die die Materialkosten bei der Vorfertigung deutlich erhöhen.

VARIANTE	AUFTRAGSREIHENFOLGE
1	alle IW –alle AW
2	alle AW –alle IW
3	IW – AW – IW – AW...

AW: Außenwandtafel, IW: Innenwandtafel

Tabelle 7.3: Varianten bei der Generierung der Auftragslisten, Gebäude 3



> Gebäudemodell 3

> Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier

> Auftragstrennung nach Außen-/Innenwand

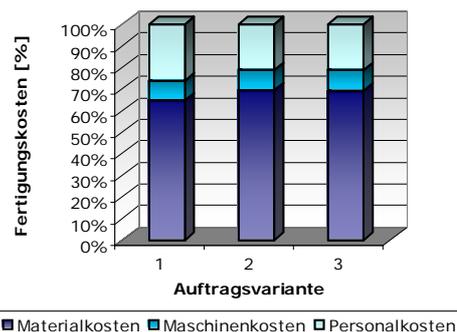
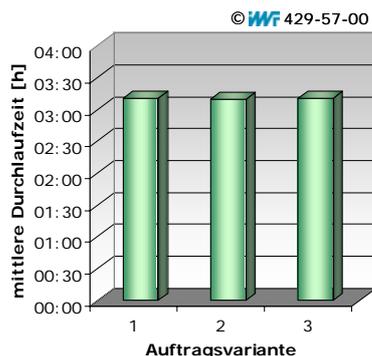
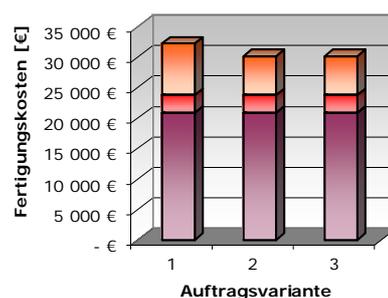
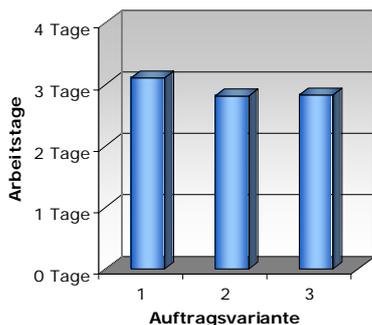


Bild 7.18: Haus 3, Fertigung nach Baukmeier, Trennung von Außen-/Innenwand



> Gebäudemodell 3

> Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier

> keine Auftragstrennung nach Außen-/Innenwand

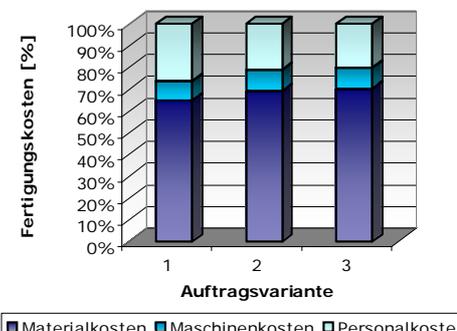
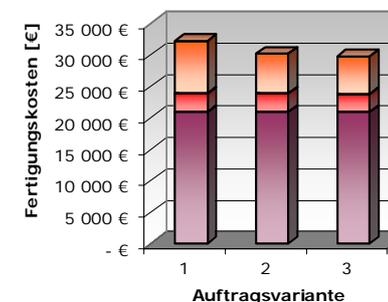
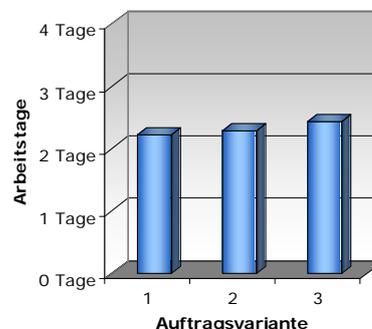


Bild 7.19: Haus 3, Fertigung nach Baukmeier, keine Trennung von Außen-/Innenwand



> Gebäudemodell 3

> Durchlaufzeit mit manuellen Arbeitsvorgängen

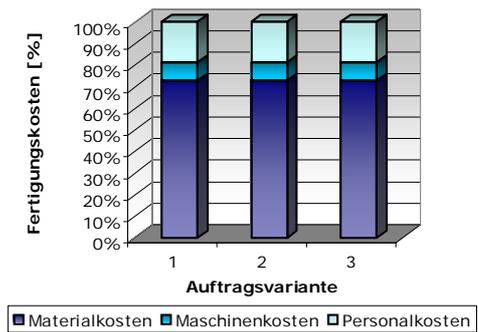
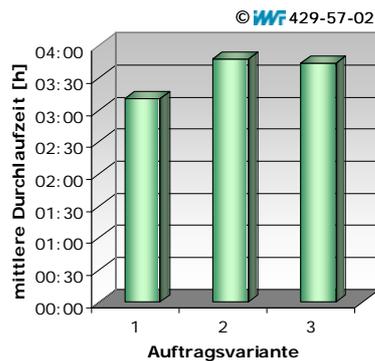
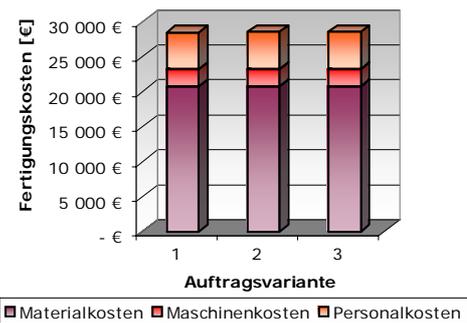
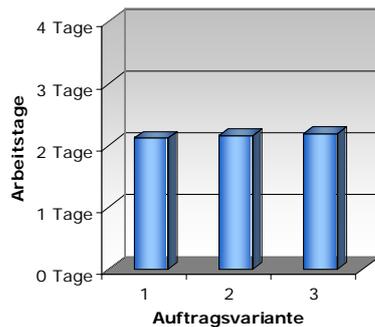


Bild 7.20: Haus 3, Durchlaufzeit (manuell)

7.2.4 Kombinierte Fertigung von Gebäude 1 und 2

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Gebäude 1 und 2 zu einem einzigen Produktionsauftrag zusammengefasst und mit Hilfe der entwickelten Modelle in der Materialflusssimulation gefertigt. Die zugehörigen Varianten sind in Tabelle 7.4 gezeigt. Wie in Bild 7.21 erkennbar, hat diese Auftragsvariation nur einen geringen Einfluss auf das Simulationsergebnis. Als am schnellsten erweist sich die Variante 3, bei der die Tafeln beider Häuser gemeinsam produziert werden. Die Fertigungskosten liegen in der Summe bei knapp 100.000 €, etwa ein Drittel davon entfällt auf die Personalkosten, ungefähr 50% auf das benötigte Material (Bild 7.22).

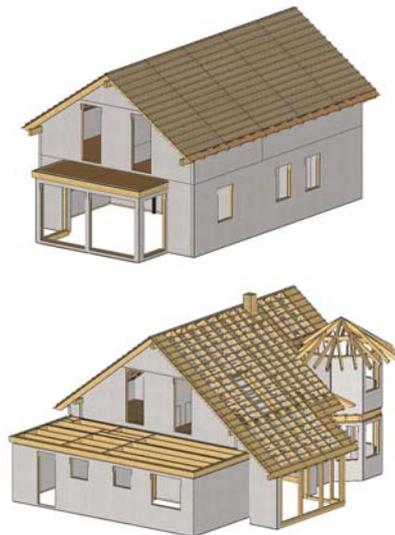
VARIANTE	AUFTRAGSREIHENFOLGE
1	H1 (alle AW – alle DA – alle DE – alle IW), H2 (alle AW – alle DA – alle DE – alle IW)
2	H1+H2 (alle AW – alle DA – alle DE – alle IW)
3	H1+H2 (IW – DA – AW – DE – IW – DA – AW – DE...)
4	H1+H2 (IW – AW – IW – AW..., DA – DE – DA – DE...)

AW: Außenwandtafel
IW: Innenwandtafel

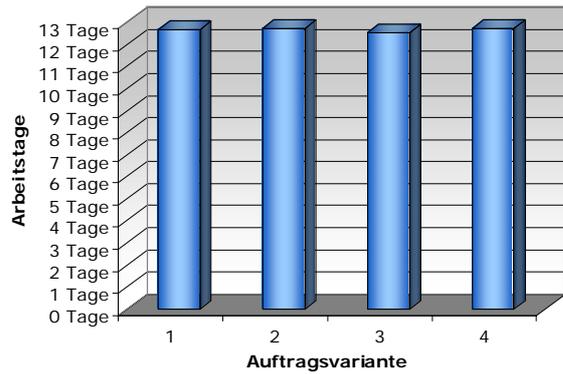
DA: Dachtafel
DE: Deckentafel

H1: Gebäude 1
H2: Gebäude 2

Tabelle 7.4: Varianten bei der Generierung der Auftragslisten, kombinierte Fertigung von Gebäude 1 und 2



- > Gebäudemodell 1+2
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke



© IWF 429-72-00

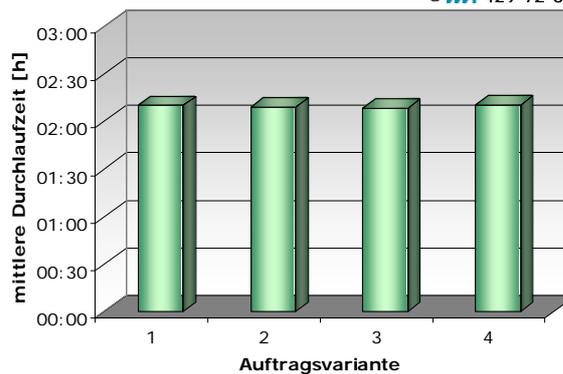
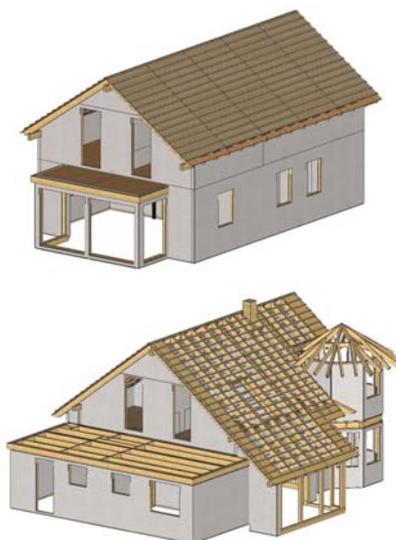
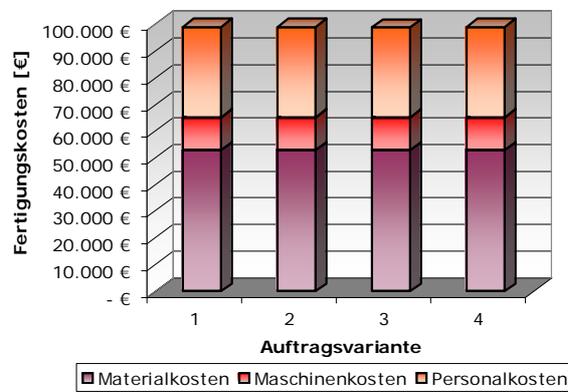


Bild 7.21: Fertigungszeiten bei gleichzeitiger Produktion von Gebäude 1 und 2



- > Gebäudemodell 1+2
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke



© IWF 429-72-01

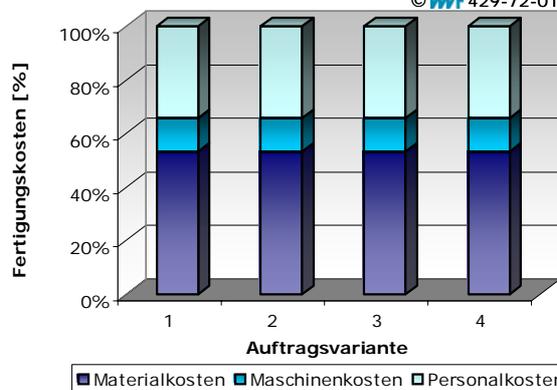


Bild 7.22: Fertigungskosten bei gleichzeitiger Produktion von Gebäude 1 und 2

7.3 Untersuchung verschiedener Fertigungs- und Automatisierungskonzepte

Im folgenden Kapitel werden die im Verlauf der Arbeiten analysierten und neu entwickelten Fertigungskonzepte miteinander bezüglich Zeiten und Kosten miteinander verglichen. Untersucht werden ein dem Baukmeier-Werk in Hameln entsprechender Ablauf, ein analoger Fabrikbetrieb mit zwei gleichberechtigten Tafelfertigungslinien (d.h. Verzicht auf die Trennung nach Wand und Dach/Decke) sowie eine Durchlauf fertigung mit U-förmigen Materialfluss. Für jede dieser drei Fertigungsvarianten werden wiederum unterschiedliche Stufen des Automatisierungsgrades mit Hilfe der Simulation analysiert. Dazu werden eine oder mehrere Montage- bzw. Handhabungsvorgänge durch entsprechende Robotertechnik ersetzt. Die Umsetzung erfolgt durch Änderung der der Simulation zu Grunde liegenden Datenbasis anhand der aus den 3D-Simulationen und allgemeinen technischen Daten ermittelten Parameter (siehe Kapitel 6.4). In den Übersichtsdiagrammen bezeichnet „Standardbauteile“ diejenigen Bauteile, die grundsätzlich in jeder Tafel verbaut werden: Rippen, Platten, Dämmmaterial, Schlaufen, Folien. „Starre Bauteile“ umfasst sämtliche starren, vom Roboter einfach zu handhabenden Bauteile wie Rippen, Platten, Lattung, Konterlattung, Stahlträger, Zusatzstreifen und Dachlattung. Zu den „Sonderbauteilen“ zählen u.a. Elektro- und Sanitärinstallationen bzw. die entsprechenden Schnellverbinder.

Sämtliche Untersuchungen wurden an dem Gebäude 2 in der Auftragsvariante 5 durchgeführt. Das Gebäudemodell wurde aufgrund der höheren Komplexität und der größeren Tafelanzahl ausgewählt. Die Reihenfolge der Tafelaufträge nach Variante 5 hat sich in den Untersuchungen des vorangegangenen Kapitels als die mit den im Mittel geringsten Durchlaufzeiten und Kosten erwiesen.

7.3.1 Automatisierung des Fertigungsablaufs nach Baukmeier

In Bild 7.23 sind die Fertigungszeiten für das Gebäudemodell 2 dargestellt. Man erkennt, dass eine partielle Automatisierung der Prozesse „Folie“, „Sanitär“, „Dämmung“ und „Lattung“ im Vergleich zur manuellen Fertigung, d.h. dem Verzicht auf den Einsatz von Robotern, keine Vorteile bei der Durchlaufzeit des Gesamtgebäudes mit sich führt. Dagegen bieten eine Automatisierung der Riegelwerksstation und des Plattenauflegens ein höheres Potential zur Verringerung der Fertigungszeiten. Die gleichzeitige Automatisierung der Montagevorgänge von Standardbauteilen (Rippen, Platten, Dämmmaterial, Schlaufen, Folien) senkt die Produktionsdauer von 7 auf 4 Tage. Im Vergleich dazu lässt sich durch eine Vollautomatisierung ein nur geringfügig höherer Geschwindigkeitsvorteil erzielen. Analog zu der Verringerung der Gesamtfertigungszeiten sinken auch die mittleren Durchlaufzeiten der Einzeltafeln (Bild 7.24). Bei der Betrachtung der Kosten wird deutlich, dass die Vollautomatisierung trotz geringer Fertigungszeiten keinen Vorteil gegenüber dem Ablauf mit manuellen Tätigkeiten bietet. Zwar sinken die Personalkosten, allerdings steigen die Maschinenkosten erheblich an (Bild 7.25 und Bild 7.26). Die aus Kostensicht beste Variante besteht in der Automatisierung von Handhabungsvorgängen starrer Bauteile. Schwierig vom Roboter zu greifende Bauteile werden weiterhin vom Werker montiert. Auf diese Weise steigen die Maschinenkosten nur unwesentlich, während die Kosten für das Personal infolge verkürzter Fertigungszeiten deutlich verringert werden.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Fall, dass die Trennung zwischen Wandtafel- und Dach-/Deckentafelproduktion aufgehoben wird (Bild 7.27 bis Bild 7.30). Allerdings ist hier der

Einfluss einer automatisierten Riegelwerks- und Plattenauflegestation auf die Fertigungszeit weniger stark ausgeprägt. Eine Vollautomatisierung verursacht sogar höhere Gesamtkosten als die konventionelle Fertigung mit manuellen Tätigkeiten. Es zeigt sich, dass die Automatisierung bei der Handhabung starrer Bauteile den besten Kompromiss aus Fertigungszeit und –kosten darstellt.



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier mit Automatisierungslösungen
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

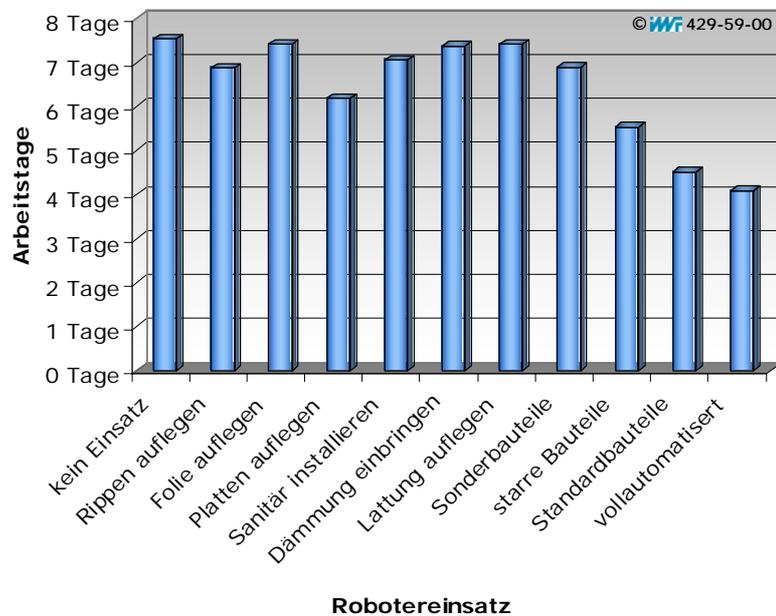


Bild 7.23: Gesamtfertigungszeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, Auftragstrennung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier mit Automatisierungslösungen
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

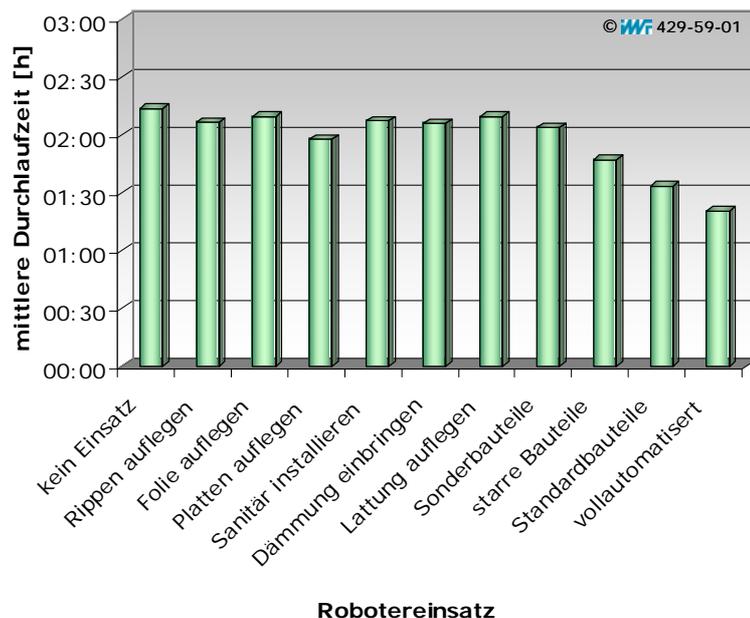


Bild 7.24: Tafel-Durchlaufzeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, Auftragstrennung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier mit Automatisierungslösungen
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

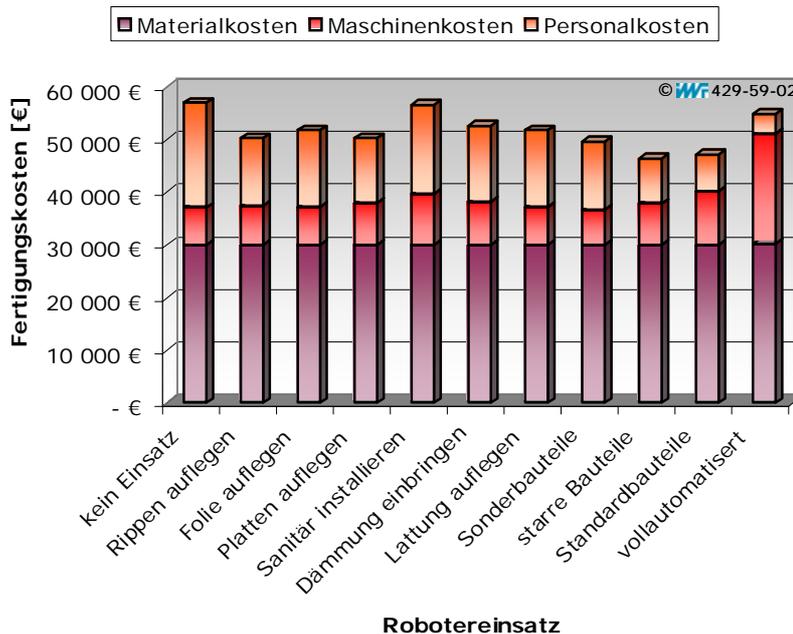


Bild 7.25: Fertigungskosten (absolut) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, Auftragstrennung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier mit Automatisierungslösungen
- > Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

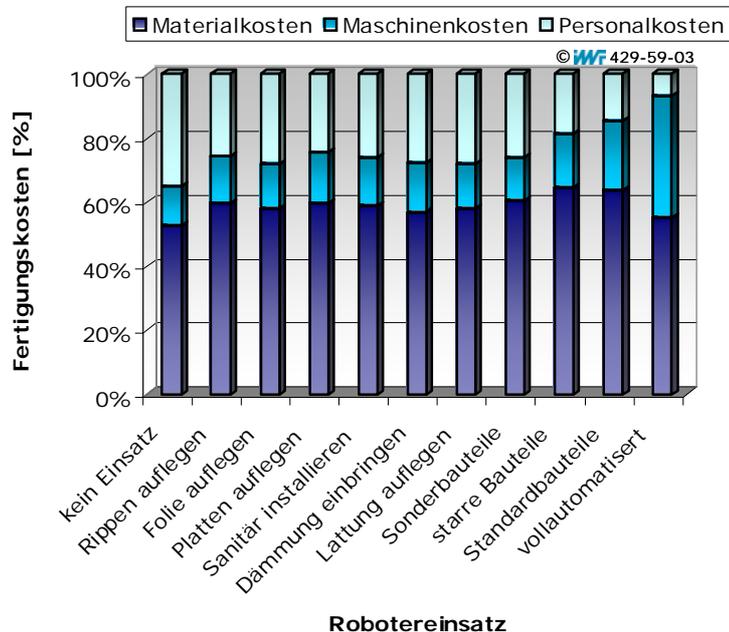
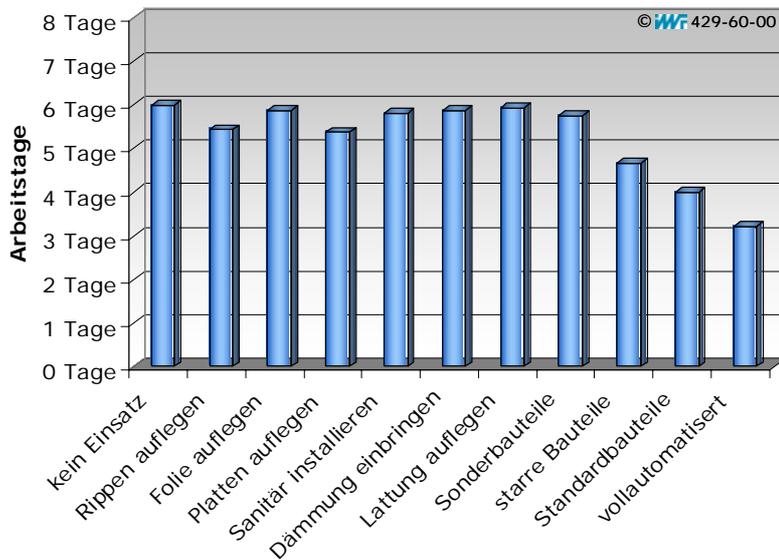


Bild 7.26: Fertigungskosten (relativ) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, Auftragstrennung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier mit Automatisierungslösungen
- > keine Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

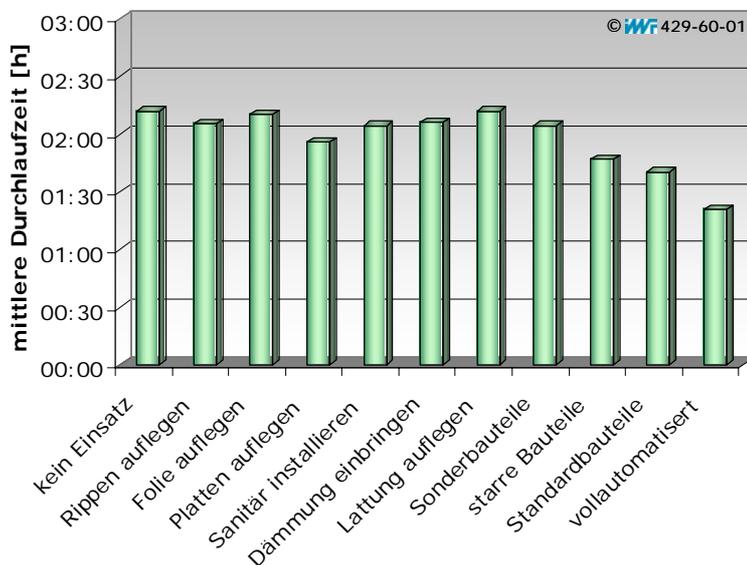


Robotereinsatz

Bild 7.27: Gesamtfertigungszeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, keine Auftragstrennung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier mit Automatisierungslösungen
- > keine Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke



Robotereinsatz

Bild 7.28: Tafel-Durchlaufzeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, keine Auftragstrennung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier mit Automatisierungslösungen
- > keine Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

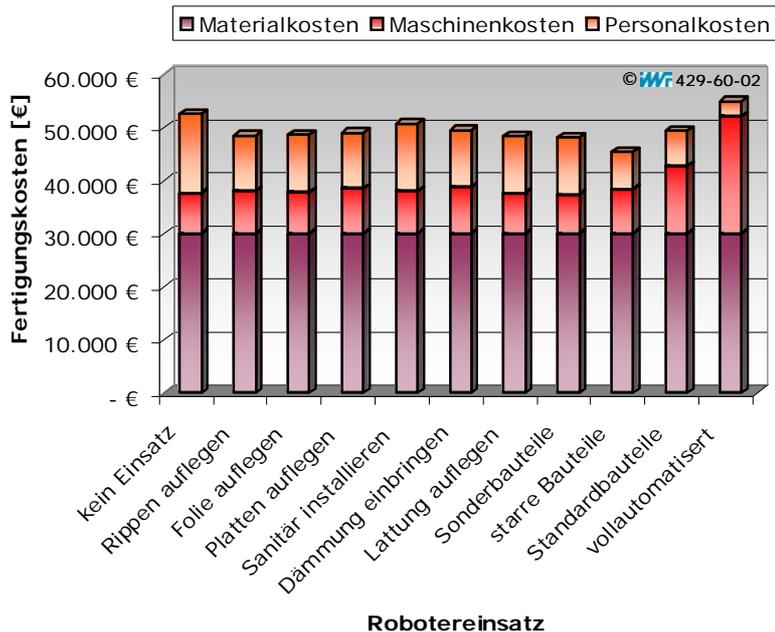


Bild 7.29: Fertigungskosten (absolut) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, keine Auftragstrennung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Fertigungsablauf der Fa. Baukmeier mit Automatisierungslösungen
- > keine Auftragstrennung nach Wand und Dach/Decke

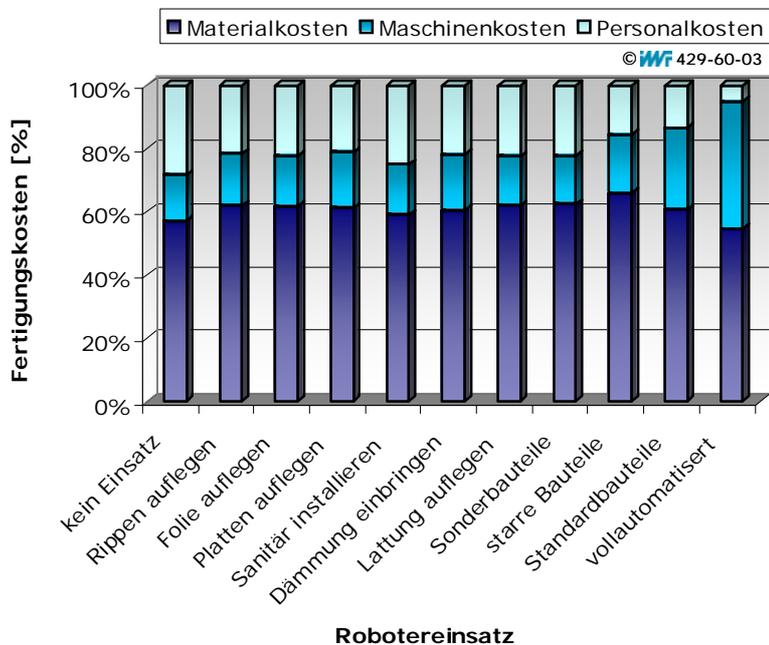


Bild 7.30: Fertigungskosten (relativ) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Baukmeier, keine Auftragstrennung)

7.3.2 Automatisierung der Durchlauffertigung

Bei der Durchlauffertigung, d.h. der Fertigungsvariante mit einer Linie verketteter Bearbeitungsstationen in U-Form, wird der manuelle Produktionsablauf mit einer vollautomatisierten Lösung sowie der Teilautomatisierung einzelner Stationen verglichen. Die vollautomatisierte Variante entspricht der in Kapitel 5.5 in der 3D-Fertigungssimulation entwickelten Anlage. Für diesen Fall wird zusätzlich die Fertigung im 2-Schicht-Betrieb untersucht.

Wie in Bild 7.31 ersichtlich, hat eine Teilautomatisierung der Plattenauflegestation, der Montagestation oder der Aufbringung der Dampfsperre keine Auswirkung auf die Gesamtfertigungsdauer. Da die Stationen in Reihe miteinander verknüpft sind, bietet die Verringerung der Bearbeitungszeit eines einzelnen Montagevorgangs keinen Geschwindigkeitsvorteil. Wird beispielsweise die Beplankung der Tafeln von einem Automaten vorgenommen, kommt es aufgrund der manuellen und damit langsameren Folgestationen zum Rückstau. Anders verhält es sich bei der Riegelwerksstation: Diese steht am Anfang der Prozesskette und benötigt – insbesondere bei Wandtafeln – eine höhere Bearbeitungszeit als die folgenden Stationen. Durch die Automatisierung wird dieser „Flaschenhals“ der Produktion beseitigt und die Fertigungszeit für das Gebäude um ca. 2 Tage gesenkt. Eine Vollautomatisierung verringert die Zeit weiter. Die Einführung eines 2-Schicht-Betriebs schließlich führt zu einer Produktionsdauer von weniger als zwei Tagen.

Unter dem Gesichtspunkt der Kostenersparnis bedeutet die Automatisierung der Riegelwerksstation die optimale Variante (Bild 7.33 und Bild 7.34). Während die Maschinenkosten nur unmerklich steigen, können die Personalkosten deutlich verringert werden. Eine Teilautomatisierung der anderen Einzelstationen führt infolge gestiegener Maschinenkosten sogar zu höheren Gesamtfertigungskosten. Bei der vollautomatisierten Fertigung fallen anteilig entsprechend hohe Maschinenkosten an, die Personalkosten werden dagegen minimiert.



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Durchlauffertigung mit automatisierten Arbeitsvorgängen

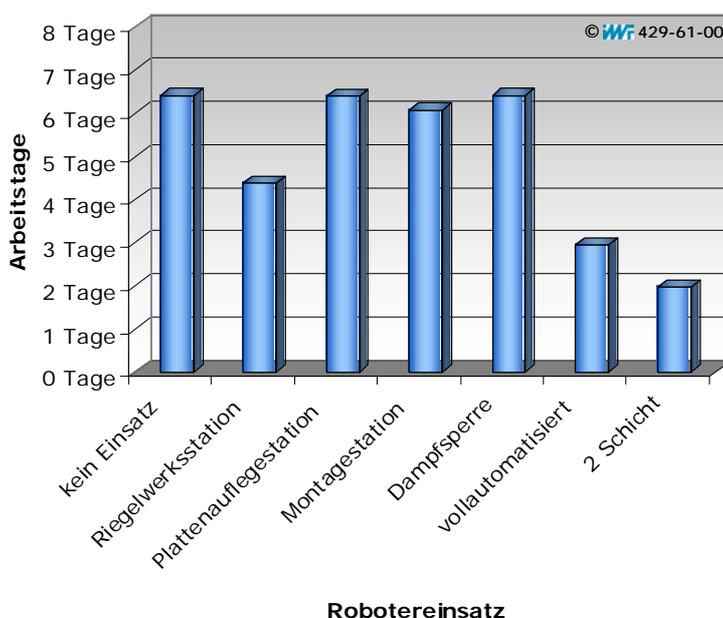
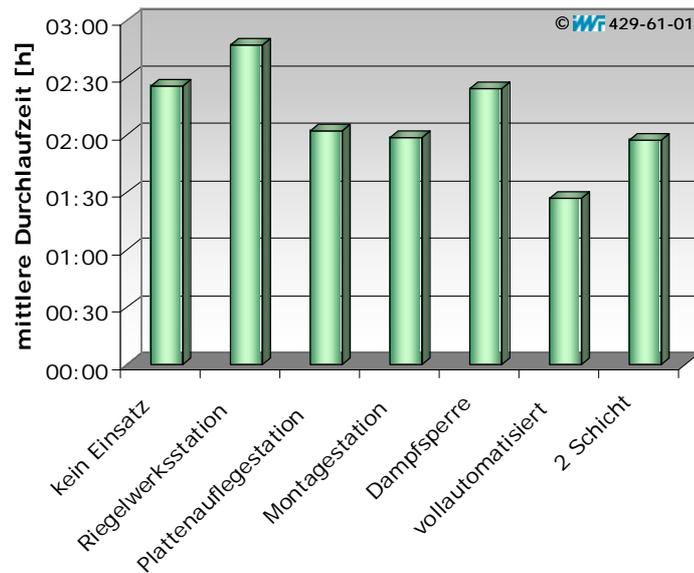


Bild 7.31: Gesamtfertigungszeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Durchlauffertigung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Durchlauffertigung mit automatisierten Arbeitsvorgängen

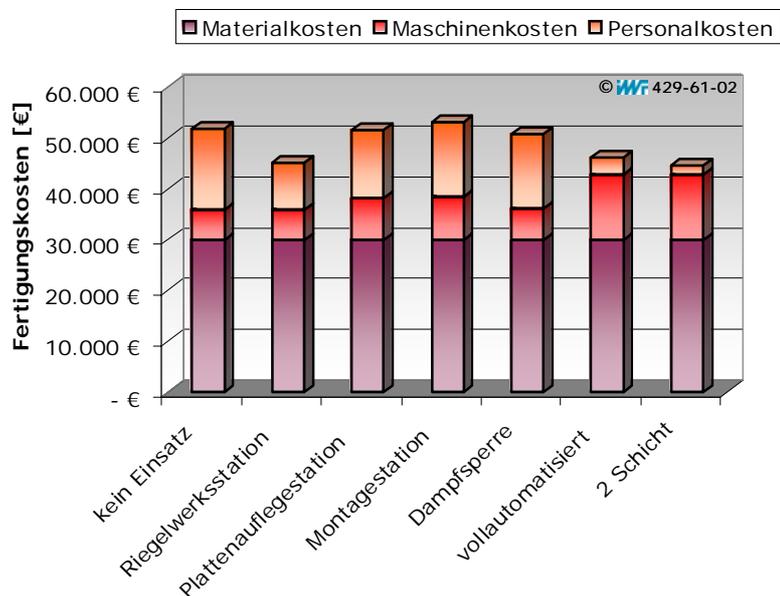


Robotereinsatz

Bild 7.32: Tafel-Durchlaufzeit in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Durchlauffertigung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Durchlauffertigung mit automatisierten Arbeitsvorgängen



Robotereinsatz

Bild 7.33: Fertigungskosten (absolut) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Durchlauffertigung)



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5
- > Durchlaufertigung mit automatisierten Arbeitsvorgängen

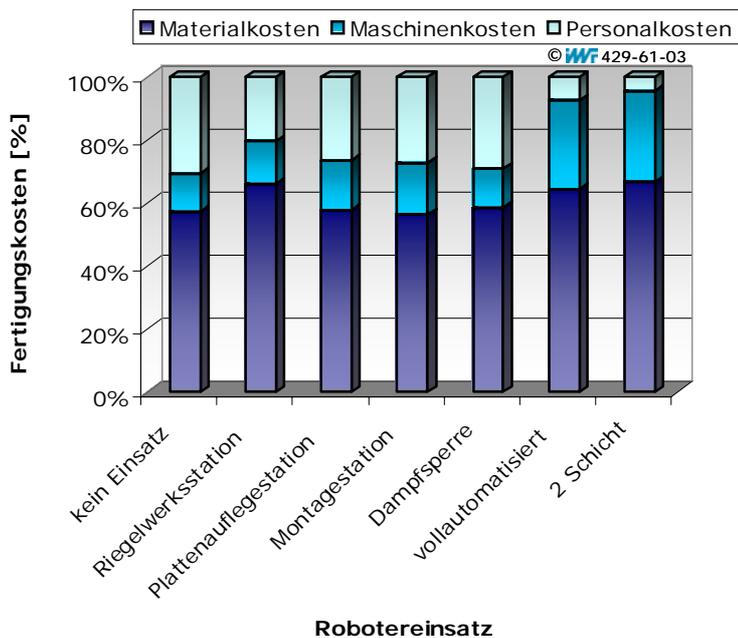


Bild 7.34: Fertigungskosten (relativ) in Abhängigkeit vom Automatisierungsgrad (Durchlaufertigung)

7.4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Zusammenfassend werden im Folgenden die unterschiedlichen Fertigungskonzepte in unterschiedlichen Automatisierungsgraden gegenüber gestellt. Tabelle 7.5 fasst die in den Diagrammen miteinander verglichenen Fertigungsabläufe zusammen. Als Referenz dient Variante 1, d.h. die Fertigung nach dem Stand der Technik bei der Fa. Baukmeier.

VARIANTE	FERTIGUNGSABLAUF
1	Fertigung nach Baukmeier, manuelle Montagevorgänge, Auftragstrennung
2	Fertigung nach Baukmeier, manuelle Montagevorgänge, keine Auftragstrennung
3	Fertigung nach Baukmeier, Montage starrer Bauteile automatisiert, Auftragstrennung
4	Fertigung nach Baukmeier, Montage starrer Bauteile automatisiert, keine Auftragstrennung
5	Durchlaufertigung, manuelle Montagevorgänge
6	Durchlaufertigung, vollautomatisiert
7	Durchlaufertigung, Riegelwerksstation automatisiert
8	Durchlaufertigung, vollautomatisiert, 2-Schicht-Betrieb

Tabelle 7.5: Übersicht der Varianten des Fertigungsablaufs

Der Vergleich der Fertigungszeiten macht deutlich, dass bereits durch eine bessere Ausnutzung bestehender Anlagen die Durchlaufzeiten verringert werden können (Bild 7.35 und Bild 7.36). Eine Alternative ist die Nutzung beider Linien sowohl für Wand- als auch Dach-/Deckentafeln. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Umorganisation der Fertigung, so dass auf einer einzelnen Linie mit hintereinander verketteten Stationen (Durchlauffertigung, U-Form) produziert wird. Sollen Montagevorgänge automatisiert werden, so bieten sich insbesondere die starren Bauteile an. Im Falle der Durchlauffertigung kommt neben einer Vollautomatisierung der Einsatz von Robotern im Bereich der Riegelwerksstation in Frage.

Die entstehenden Fertigungskosten können mit Hilfe aller Varianten gesenkt werden (Bild 7.37 und Bild 7.38). Die Automatisierung von Handhabungsvorgängen in einer konventionellen Fertigung erhöht die Maschinenkosten nur in geringem Maße, trägt aber signifikant zur Senkung der Personalkosten bei. Eine vollautomatisierte Durchlauffertigung verursacht in Relation zu Material und Personal sehr hohe Maschinenkosten. Die Lösung in Form einer automatisierten Riegelwerksstation führt zu den geringsten Kosten bei gleichzeitiger Senkung der Fertigungszeit von über 7 auf etwa 4 Arbeitstage.



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5

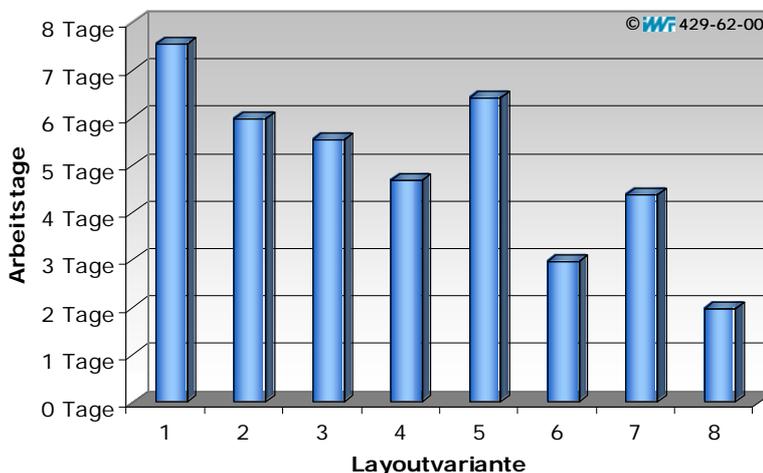


Bild 7.35: Vergleich der Gesamtfertigungszeit für unterschiedliche Fertigungsabläufe



- > Gebäudemodell 2
- > Auftragsvariante 5

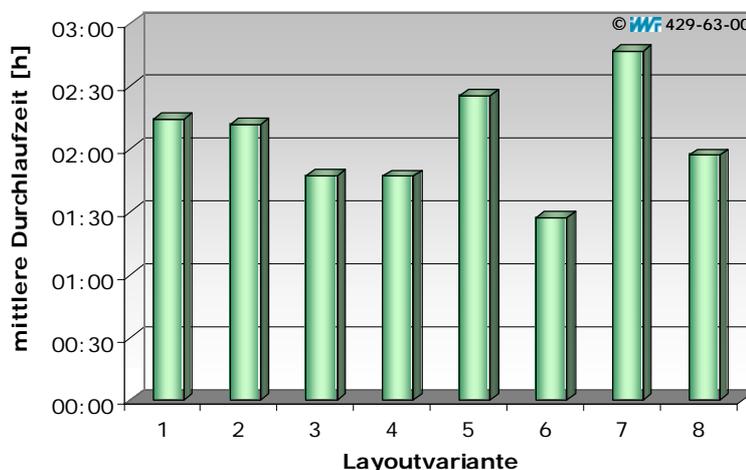


Bild 7.36: Vergleich der Tafel-Durchlaufzeit für unterschiedliche Fertigungsabläufe



> Gebäudemodell 2

> Auftragsvariante 5

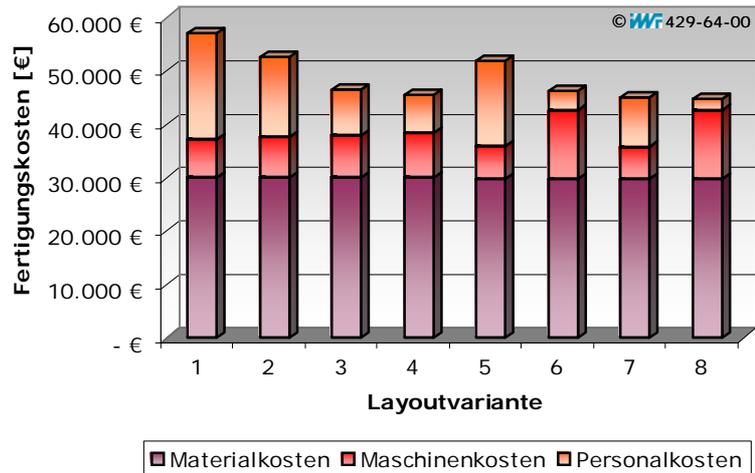


Bild 7.37: Vergleich der Fertigungskosten (absolut) für unterschiedliche Fertigungsabläufe



> Gebäudemodell 2

> Auftragsvariante 5

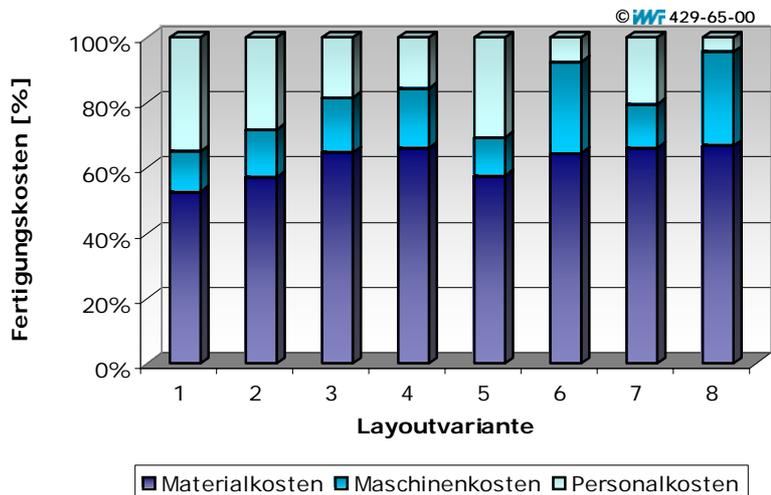


Bild 7.38: Vergleich der Fertigungskosten (relativ) für unterschiedliche Fertigungsabläufe

8 Auswirkungen der Automatisierung auf die Qualitätssicherung

Die Automatisierung von Fertigungsabläufen wird in Verbindung mit den entwickelten Methoden der virtuellen Produktion zu einer Steigerung der Produktqualität im Holztafelbau führen.

Durch den Einsatz automatisierter Fertigungseinrichtungen wird sichergestellt, dass sämtliche für die herzustellende Tafel benötigten Bauteile zum einen überhaupt verbaut und zum anderen auch an der geforderten Position mit der notwendigen Genauigkeit montiert werden. Das Auslassen von Bauteilen beispielsweise im Riegelwerk oder die Verwechslung ähnlicher Baugruppen wird vermieden. Gleiches gilt für maschinell durchgeführte Bearbeitungsvorgänge wie die Fixierung von Bauteilen und das Setzen von Bohrungen. Die Voraussetzung sind intelligente Maschinensysteme, die etwa über Barcode oder Funktransponder in der Lage sind, die korrekten Bauteile zu identifizieren. Eine weitere Möglichkeit sind Lichtschranken und Kamerasysteme, die die Lage von aufzunehmenden Werkstücken erkennen und die ordnungsgemäße Positionierung überwachen.

Automatisierung erfordert zwangsläufig einen sorgfältigen Planungsprozess im Vorfeld der Fertigung. Genau dieser Prozess wird von den virtuellen Produktions- und Simulationstechniken unterstützt. Mittels 3D-Simulation kann der Fertigungsprozess vorab im Rechner anhand der vom CAD/CAM-System generierten CNC-Daten simuliert werden, um eventuelle Fehler im Maschinenprogramm aufzudecken, Kollisionskontrollen durchzuführen oder benötigte Werkzeuge bereitzustellen. Auf diese Weise werden unproduktive Zeiten vermieden und Kosten minimiert, die durch Maschinencrashes, falsche bzw. fehlerhafte Bearbeitungen oder fehlende Werkzeuge/Werkstücke entstehen könnten.

Die Materialflusssimulation ist ein weiteres Hilfsmittel zur Qualitätssicherung bereits im Planungsprozess. Hiermit werden frühzeitig Produktionsengpässe aufgedeckt und der Bedarf an Fertigungshilfsmittel ermittelt. Da die Simulation explizit für jedes geplante Bauprojekt anhand der CAD-Daten durchgeführt werden kann, ist eine rechtzeitige Materialbedarfsrechnung und –bereitstellung möglich. Der Abgleich zwischen Simulationsergebnis und dem Planungsprozess hilft, mögliche Inkonsistenzen im Datenmodell des Gebäudes oder bei dessen Verarbeitung aufzudecken und somit Fehler zu vermeiden. Ein weiterer Punkt ist die Qualitätssicherung in Bezug auf Liefertreue und Kosten: Für jedes Gebäude und dessen Einzeltafeln können die zu erwartenden Fertigungszeiten und –kosten berechnet werden. Durch eine frühzeitige Kalkulation im Planungs-/Konstruktionsprozess wird es möglich, die zu erwartenden Kosten für die Herstellung des Hauses zu ermitteln und Terminprobleme bei der Auslieferung durch falsch eingeschätzte Produktionszeiten zu verhindern.

9 Zusammenfassung

Das Ziel des in diesem Bericht geschilderten Teilvorhabens 2 war die Optimierung der Vorfertigung von Holzhäusern in Tafelbauweise in Bezug auf Fertigungszeiten und –kosten bei gleichzeitiger Steigerung der Produktqualität, um die Akzeptanz des Bauherren gegenüber dem Holzfertigungsbau zu steigern. Gemeinsam mit den Projektpartnern sollten Methoden entwickelt werden, um bestehende Fertigungseinrichtungen zu optimieren und in Hinblick auf die im Holztafelbau übliche Losgröße 1 zu flexibilisieren. Erreicht werden sollte dieses Ziel durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades und den Einsatz virtueller Produktionstechniken, die im Holzbau bislang noch nicht verbreitet sind. Als besondere Randbedingung wurde definiert, dass die Arbeiten insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen Wege zur Optimierung ihrer bestehenden Anlagentechnik aufzeigen sollen.

Zunächst erfolgte eine Untersuchung der bestehenden Produktionssysteme. Anhand der Fertigung eines Holzbauunternehmens wurde eine detaillierte Übersicht der zur Herstellung des Multifunktionsbauteils Tafel erforderlichen Bearbeitungs- und Montageschritte erstellt. Eine Bauteil- und Verbindungsanalyse erfasste die im Tafelbau verwendeten Werkstücke und ihre fertigungstechnischen Besonderheiten. Gleichzeitig wurden Anforderungen an das im Teilvorhaben 3 an der BTU Cottbus entwickelte Produktmodell definiert. Auf dieser Basis konnten die Randbedingungen für die zu entwickelnde Fertigungsstrategie formuliert werden. Eine Automatisierungspotentialanalyse zeigte diejenigen Prozessschritte auf, die unter technischen Gesichtspunkten einen hohen Eignungsgrad für eine Automatisierung aufweisen. Hierzu zählen insbesondere die starren und daher gut vom Automaten zu handhabenden Bauteile wie Platten und Rippen. Andere Materialien wie beispielsweise die Dämmstoffe erfordern spezielle Greifersysteme.

Im weiteren Vorgehen wurden zwei Simulationstechniken eingesetzt, die in gegenseitiger Wechselwirkung zueinander standen: eine 3D-Fertigungssimulation und eine ereignisorientierte Materialflusssimulation.

Mit Hilfe der 3D-Simulation wurden werkstückangepasste Greifersysteme konzipiert. Dazu zählt ein Greifer zur Handhabung sowohl stabförmiger als auch flächiger Bauteile, um Nebenzeiten durch Werkzeugwechsel zu vermeiden und den Platzbedarf innerhalb der Fertigungszelle zu verringern. Des Weiteren wurde ein System zur automatisierten Einbringung des Dämmmaterials entwickelt. Die Umsetzung des Konzeptes eines Multifunktionsbearbeitungszentrums in der 3D-Umgebung demonstrierte anhand von zuvor definierten Standardtafeln aus den Bereichen Wand, Dach und Decke, wie mit einer kompakten Anlage Bearbeitungs- und Handhabungsvorgänge zur Tafelfertigung kombiniert werden können. Im Anschluss wurden weitere Variationen des Fertigungsablaufs mit Hilfe bestehender und neu zu entwickelnder Produktionstechnik skizziert. Aus diesen Varianten wurde eine U-förmige, vollautomatisierte Linien- oder Durchlauf Fertigung ausgewählt und ebenfalls in der 3D-Simulationsumgebung als virtuelle Fertigungsstraße umgesetzt.

Das Kernstück der Arbeiten stellt die Materialflusssimulation des Fertigungsablaufs bei der Tafelherstellung dar. Diese ist als modulares und parametrisiertes Modell konzipiert, um die Anpassung an beliebige Fertigungsbetriebe des Holztafelbaus zu ermöglichen. Erreicht wird dieses Ziel durch die Bereitstellung aller benötigten Maschinen-, Material- und Prozessdaten in Form externer Datenbanken. Fertigungsaufträge der Simulation können für jeden Simula-

tionslauf individuell aus dem virtuellen Gebäudemodell im CAD/CAM-System generiert werden. Hierzu wurde eine spezielle Ausgabeschnittstelle definiert und umgesetzt, die sämtliche relevanten Projekt-, Bauteil-, Geometrie- und Fertigungsdaten aufbereitet und an die Materialflusssimulation übergibt. Die Entwicklung eines speziellen Konfigurationstools erlaubt die Verwaltung der Auftrags- und Maschinendaten von außerhalb, so dass direkte Eingriffe in das Simulationsmodell weitgehend vermieden werden. Die notwendige Datenbasis für die Durchführung der Simulationsläufe wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Meisterstück-Haus Baukmeier, KUKA Roboter und Weinmann Holzbausystemtechnik erarbeitet. Hier ergab sich die Wechselwirkung mit der 3D-Simulation, mit deren Hilfe fehlende Maschinentypen und –daten, Förderstrecken oder Abmessungen ermittelt wurden.

Die Durchführung der Materialflusssimulationen erfolgte anhand realer Gebäudemodelle, darunter das von der TU München im Teilvorhaben 1 entwickelte Systemhaus auf Basis der Schnellverbindertechnik. Es konnte gezeigt werden, dass die Auftragsreihenfolge der Einzeltafeln abhängig vom Gebäudemodell unterschiedlich starken Einfluss auf die Fertigungszeiten und –kosten haben. Die Ergebnisse machen weiterhin deutlich, dass bereits durch eine Neuorganisation bestehender Fertigungsanlagen sowohl Zeiten als auch Kosten gesenkt werden können. So bedeutet die Anordnung der Maschinenteknik zu einer U-förmigen Linienfertigung unter Beibehaltung der manuellen Prozessschritte einen erheblichen Produktivitätsgewinn. Die gezielte Automatisierung der Riegelwerksstation führt zu einer weiteren Senkung der Fertigungszeiten und –kosten. Eine Vollautomatisierung dagegen kann die Gesamtkosten nicht weiter senken, führt aber zu nochmals verringerten Durchlaufzeiten des Gebäudes. Dies bedeutet, dass für kleine und mittelständische Unternehmen mit geringen Stückzahlen Automatisierungslösungen zunächst nur bis zu einem gewissen Grad sinnvoll sind. Soll aber der Ausstoß der Anlage zu einem späteren Zeitpunkt gesteigert werden, können mit Hilfe des Simulationsmodells die erforderlichen Veränderungen am Produktionsablauf ermittelt werden.

Mit der Materialflusssimulation wird dem Holzfertighaus- wie auch dem Maschinenhersteller ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, mit dessen Hilfe bestehende Anlagen neu organisiert und optimiert werden können. Darüber hinaus wird es aber auch möglich, Neuinvestitionen im Vorfeld der Anschaffung bezüglich ihres technischen und wirtschaftlichen Nutzens zu bewerten und zu projektieren. Die Rückführung der Simulationsergebnisse in die 3D-Fertigungssimulation erlaubt die Visualisierung der geplanten Fertigungsstraße und deren Optimierung bezüglich Anordnung von Maschinen manuellen Arbeitsplätzen in Hinblick auf Arbeitsräume, Erreichbarkeit und Sicherheit.

Das im Antrag vom 22.02.2002 gestellte Forschungsziel wurde erreicht.

10 Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft Holz e.V. (Hrsg.): Das Holzhaus - Argumente für eine wachsende Alternative, Informationsdienst Holz, 1999
- [2] Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (Hrsg.): Holz - Rohstoff der Zukunft, Informationsdienst Holz, 2001
- [3] Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (Hrsg.): Nachhaltiges Bauen mit Holz, Informationsdienst Holz, 2002
- [4] Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (Hrsg.): Holzhäuser – Werthaltigkeit und Lebensdauer, Informationsdienst Holz, 2002, Holzbau Handbuch, Reihe 3, Teil 1, Folge 2
- [5] Bundesverband Deutscher Fertigbau e.V.: Moderner Holzhausbau in Fertigbauweise, Verlag WEKA Media, 2001
- [6] Kessel, M.H., Sierig, U.: Schallschutz im Geschosswohnbau, Bauen mit Holz 11 (1999), S. 28-38
- [7] Bundesverband Deutscher Fertigbau e.V. (BDF): Geschäftsbericht 2002/2003, <http://www.bdf-ev.de>
- [8] Hans Hundegger Maschinenbau GmbH, <http://www.hundegger.de>
- [9] Weinmann Holzbausystemtechnik GmbH, <http://www.weinmann-partner.de>
- [10] Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, TU Berlin: Potentiale und Möglichkeiten des integrierten Umweltschutzes in der Holzfertighausindustrie, Abschlußbericht zum BMBF-Vorhaben FKZ 0339865, 2001
- [11] Osterrieder, P., Weichert, J.: Produktmodell DtH für den Ingenieurholzbau, Zimmermannsbau und Fertighausbau, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Schriftenreihe Statik und Dynamik, 2000
- [12] Spingler, J.C., Beumelburg, K.: Automatisierungspotential-Analyse - Eine Methode zur technischen und wirtschaftlichen Klassifizierung von Automatisierungspotentialen, Werkstattstechnik online 92 (2002) 3, S. 62-64
- [13] Volmer J.: Industrieroboter-Entwicklung, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1984
- [14] Weinmann Holzbausystemtechnik GmbH, SEMA GmbH, GranIT GmbH: Schnittstellenbeschreibung Fertighauselemente Version 3.2a, 2004



Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. J. Hesselbach



Institut für Baukonstruktion und Holzbau

Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel

Ökologische Herstellung von Holzhäusern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse

Förderkennzeichen: 0330423

Teilvorhaben 2 im Verbundprojekt

**Innovativer Holzsystembau durch optimierte Fertigungs-
und integrierte Planungsmethoden**

Schlussbericht

Anlage B: Kurzfassung

Institut für Werkzeugmaschinen
und Fertigungstechnik
Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19 B
D - 38106 Braunschweig
Telefon: (0531) 391 - 7601
Telefax: (0531) 391 - 5842

Institut für Baukonstruktion
und Holzbau
Technische Universität Braunschweig
Schleinitzstraße 21A
D - 38106 Braunschweig
Telefon: (0531) 391 - 7800
Telefax: (0531) 391 - 8193

Automatisierte und fertigungsoptimierte Produktionsprozesse¹⁾

Die Holztafelbauart ist die unter den Holzhausbausystemen am häufigsten verwendete Konstruktionsart. Ein enormer Vorteil gegenüber der konventionellen Ziegelbauart liegt in dem hohen Vorfertigungsgrad der Holztafeln, der eine Automatisierung der Produktionsabläufe im Werk ermöglicht. Für den Kunden eines Hauses in Holztafelbauart sind diese Vorteile nur zum Teil ausschlaggebend, für ihn steht zuallererst der Anspruch an ein kostengünstiges, aber qualitativ hochwertiges Gebäude im Vordergrund. Dieser Anspruch, verbunden mit den stets kundenspezifischen Gebäudeentwürfen, konfrontiert die Holzbauunternehmen mit einer planungsintensiven Fertigung der Losgröße 1. Hieraus resultiert ein hoher Zeit- und Kostendruck bei der Vorfertigung des Holzhauses im Werk. Die Produktion im Holzhausbau heute ist, wie bei Einzel- und Kleinserienfertigung üblich, eine Mischung aus teilautomatisierter und manueller Fertigung. Im Gegensatz zur bereits in hohem Maße automatisierten Möbelbranche variiert der Anteil von automatisierten und manuellen Tätigkeiten in den einzelnen Holzbaubetrieben sehr stark. Geprägt durch den zumeist klein- und mittelständischen Aufbau der Betriebe leidet die Holzbaubranche an erheblichen Strukturmängeln und Wettbewerbsnachteilen, die durch den kommenden europäischen Markt noch erheblich verschärft werden. – Von Prof. Dr.-Ing. M. H. Kessel, Dr.-Ing. H.-W. Hoffmeister, Dipl.-Math. S. Quast und Dipl.-Ing. C. Armbrecht²⁾

¹⁾ Das vom BMBF unter dem Kennzeichen 0330423 geförderte Teilvorhaben 2 „Ökologische Herstellung von Holzhäusern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse“ wurde gemeinsam mit den Firmen Meisterstück-Haus Baukmeier (Hameln), Weinmann Holzbausystemtechnik (St. Johann-Lonsingen) und KUKA Roboter (Augsburg) durchgeführt.

²⁾ Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel ist Leiter des Instituts für Baukonstruktion und Holzbau (iBHolz), Dr.-Ing. Hans-Werner Hoffmeister ist stellvertretender Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der Technischen Universität Braunschweig. Dipl.-Math. Susanne Quast und Dipl.-Ing. Christian Armbrecht sind wissenschaftliche Mitarbeiter am iBHolz bzw. am IWF.

1 Zielsetzung

Das Ziel der Forschungsarbeiten des Teilvorhabens 2 ist es, die fertigungstechnischen Voraussetzungen für die weitgehend automatische Produktion von Holzhäusern in Tafelbauart zu schaffen. Dazu ist eine Flexibilisierung der Fertigung in Hinblick auf die Losgröße 1 erforderlich. Durch diese Maßnahmen soll die Produktivität bei der Herstellung von Häusern in Holztafelbauart gesteigert, gleichzeitig aber auch die Qualität des Planungs- und Fertigungsprozesses verbessert werden. Eine Möglichkeit, Automatisierungs- und Fertigungskonzepte zu entwickeln und sowohl unter technischen als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu bewerten, stellen Simulationstechniken dar. Mit Hilfe von Softwarewerkzeugen der Fabrik- und Anlagenplanung sollen daher Maschinensysteme modelliert und mit dem Produktionsumfeld verknüpft werden.

Das Ergebnis ist eine Produktionsstraße zur Fertigung von Holzhäusern im virtuellen Raum, die sowohl zur Optimierung bestehender Fabrikbetriebe als auch als Prototyp für Anlagenneuentwicklungen dienen kann. An diesem virtuellen Modell können die Funktionen einer realen Anlage bereits vorab getestet und bezüglich ihres Kosten-Nutzen-Verhältnisses im Vorfeld einer Investitionsentscheidung beurteilt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Großteil der deutschen Holzhaushersteller zu den kleinen und mittelständischen Unternehmen zählt. Die Wirtschaftlichkeit des Automatisierungskonzeptes muss daher auch bei geringen Stückzahlen gegeben sein. Investitionskosten müssen gering gehalten und der bestehende Platz im Fertigungsbetrieb nach Möglichkeit ohne Hallen- bzw. -ausbau genutzt werden. Neben minimierten Durchlaufzeiten muss auch die Auslastung der Anlagen eine hohe Priorität genießen.

2 Lösungsweg

2.1 Analyse des Fertigungsablaufs

In Zusammenarbeit mit den Industriepartnern wurde die Übersicht einer Produktionsanlage für Holzhäuser in Holztafelbauart nach dem Stand der Technik hinsichtlich des Automatisierungsgrades erstellt. Die dabei analysierten Montage- und Bearbeitungsschritte sind allgemeingültig und sowohl auf die Produktion als auch die Produkte beliebiger Holzfertighaushersteller übertragbar.

Abb. 1 stellt im Überblick den Ablauf bei der Herstellung von Gebäuden in Holztafelbauweise dar. Die Abbundanlage dient der Fertigung der Rippen (stabförmige Bauteile) als Grundbestandteil jedes Tafелеlementes. Die Rippen werden vom Abbund zu den Fertigungsbereichen für Wand-, Dach- und Deckentafeln (flächige Bauteile) transportiert. Die Wandtafelfertigung wird unterteilt nach Innen- und Außenwandtafeln. Während Innenwände genau wie die fertigen Dach- und Deckentafeln direkt in den Versand-/Verladebereich gefördert werden, durchlaufen die Außenwände zusätzlich die Finishlinie, so dass sie baustellenfertig mit bereits montierten Fenstern, Türen oder Rollläden das Werk verlassen.

Die beschriebene Aufteilung ergibt sich infolge der unterschiedlichen Anforderungen an das Multifunktionsbauteil Tafel, das statisch und bauphysikalisch bei Decken- bzw. Außenwandtafeln sehr unterschiedliche Aufgaben zu übernehmen hat.

2.2 Entwicklung einer ganzheitlichen Fertigungsstrategie

Die Entwicklung der ganzheitlichen Fertigungsstrategie erfolgte auf der Grundlage des analysierten Produktionsablaufs. Unabhängig vom Automatisierungsgrad des Holzfertighausherstellers ist dieser Ablauf zunächst identisch, was die Montagereihenfolge der Bauteile sowie die Bearbeitungsvorgänge (Nageln, Sägen, Bohren etc.) betrifft. Abweichungen im Detail können infolge der von Hersteller zu Hersteller verschiedenen konstruktiven Ausführungen des Gebäudes auftreten, wobei der Grundaufbau der Tafel beibehalten wird. Eine wesentliche Anforderung an die zu entwickelnde Fertigungsstrategie war daher die Allgemeingültigkeit für den Holztafelbau, so dass die Fertigung unabhängig von bestimmten Herstellern oder Produkten ist. Gleichzeitig muss die Anlage aber derartig flexibel ausgelegt sein, dass - entsprechende Planungsdaten vorausgesetzt - die Gebäude beliebiger Fertighaushersteller kundenindividuell produziert werden können.

Flexibilität heißt in diesem Zusammenhang, dass die Anlage eine Vielfalt von Bearbeitungssequenzen ermöglicht, mit denen sich die notwendigen Fertigungsabläufe realisieren lassen und mit denen das gesamte Bauteilspektrum der hochindividuellen Tafelherstellung abgedeckt wird. Dies bedeutet einerseits, dass die Achsen der Bearbeitungs- und Montageeinrichtungen die erforderlichen Freiheitsgrade und Reichweiten aufweisen müssen, um alle in Frage kommenden Orte (sowohl die Position als auch die Orientierung im Raum) auf einer Tafel anfahren zu können. Zum anderen ist es erforderlich, dass die Maschinensteuerung mit den jeweiligen individuellen Teileprogrammen angesprochen wird und keine fixen, einmalig festgelegten Programme ablaufen lässt. Weiterhin muss ein schneller Austausch der Werkzeuge und Greifersysteme gewährleistet sein, der automatisch ohne Eingriff von außen durch den Maschinenbediener erfolgt. Wichtig ist die freie Wählbarkeit der Werkzeuge, um den jeweils vorliegenden Fertigungsauftrag ausführen zu können. Werkzeuge müssen mit einem Minimum an Aufwand hinzugefügt oder entfernt werden können. Maschinenintegrierte Handhabungssysteme minimieren die Zahl der Eingriffe durch den Werker und erlauben ein autonomes Arbeiten.

Neben der Maschinenteknik gilt es auch, die Fördervorgänge und damit den Materialfluss zu optimieren. Um einen effektiven Materialfluss zu erreichen, müssen weitere Anforderungen an den Fertigungsablauf gestellt werden: Die Bauteile sollen geradlinig und strömungsgünstig die Fertigung durchlaufen. Jede umständliche Führung des Materialstroms bedeutet Raumverlust und Kostenerhöhung. Aufeinander folgende Arbeitsbereiche sollen dicht zusammen liegen, Fördervorgänge sind generell zu vermeiden. Transporteinheiten und Förderhilfsmittel müssen an die Bauteile angepasst werden. Des Weiteren ist es erforderlich die Reststoffe mit einzubeziehen: ausgeschnittene Teile müssen entfernt, Späne abtransportiert und nicht mehr benötigte Fertigungshilfsmittel/Vorrichtungen rückgeführt werden.

Für den Fall einer Einbindung von Industrierobotern, wie etwa der 6-Achs-Roboter des Forschungspartners KUKA, wurden weitere Randbedingungen an die Fertigungsstrategie formuliert: Bereitstelleneinrichtungen und Bearbeitungsmaschinen müssen so ausgelegt werden, dass der Roboter

Werkstücke geometrieunabhängig immer an denselben Positionen aufnehmen kann. Dies wird durch zelleneigene, flexible Spannsysteme und Fördereinrichtungen erreicht, ebenso wie durch die Teilebereitstellung an einer definierten Position und Lage. In den Roboter integrierte Sensorik wie Kamerasysteme oder Kraftmesseinrichtungen können die Aufnahme bzw. Bearbeitung der Bauteile unterstützen. Eine Werkstückidentifizierung, beispielsweise über Barcode, stellt sicher, dass tatsächlich das zum jeweiligen Zeitpunkt benötigte Bauteil vorliegt. Diese Maßnahmen erhöhen die Sicherheit des Produktionsablaufs und garantieren eine gleich bleibende Fertigungsqualität.

2.3 Automatisierungspotentialanalyse

Abhängig von der Betriebsgröße und der Zahl der jährlich zu produzierenden Häuser können unterschiedlich hohe Grade der Automatisierung in Frage kommen. Aus diesem Grund wurde eine Untersuchungsmethode angewandt, die es ermöglicht, anhand von technischen und wirtschaftlichen Kriterien eine Klassifizierung der verschiedenen Prozesse einer Montage hinsichtlich deren Potential zur Automatisierung vorzunehmen. Mit Hilfe dieser Analyse wurde eine Datengrundlage geschaffen, auf der sinnvoll Automatisierungsentscheidungen gefällt werden können. Zusammen mit den oben definierten Randbedingungen konnten so gezielte Fertigungsstrategien für die Holztafelherstellung entwickelt und im weiteren Projektverlauf ausgearbeitet werden. Bei der Automatisierungspotential-Analyse werden drei Phasen durchlaufen:

1. Charakterisieren und Bewerten der manuellen Prozesse zur technischen Klassifizierung,
2. Wirtschaftliche Bewertung der Arbeitsschritte mit Automatisierungspotential und
3. Ranking der Automatisierungspotentiale anhand der technischen und wirtschaftlichen Faktoren.

Die Beurteilung, inwieweit eine Automatisierung wirtschaftlich ist, muss durch eine Zusammenstellung der Einsparungspotentiale und der Investitionskosten bewertet werden. Diese beiden Faktoren bestimmen die Amortisationszeit des Automatisierungskonzeptes und sind je nach Unternehmensgröße und individueller Kostenstruktur unterschiedlich. Im Rahmen der Entwicklung der Fertigungsstrategie wurde zunächst nur die erste Phase der Automatisierungspotential-Analyse durchlaufen. Der dabei ermittelte Automatisierungseignungsgrad gibt Auskunft über die technische Machbarkeit einer Automatisierung der untersuchten Prozessschritte. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgte im weiteren Verlauf der Arbeiten mit Hilfe eines speziell entwickelten Simulationswerkzeugs.

Die Resultate zeigen, dass ein Großteil der Prozessschritte in der Vorfertigung von Holzfertighäusern ein unter technischen Gesichtspunkten hohes Automatisierungspotential aufweist. Nur 17% aller Montageschritte erweisen sich als schlecht automatisierbar. Es handelt sich dabei um die Prozessschritte

- Gurtschlaufen anbringen,
- Auflegen der Dampfsperre,
- Einlegen von Zugschnüren,
- Faserdämmung einbringen und
- Spannen der diffusionsoffenen Folie.

In diesen Prozessschritten werden biegeschlaffe Bauteile gefügt. Diese Bauteile sind in der Handhabung für den Automaten schwierig und stellen außerdem für die Materialbereitstellung Probleme dar. Folien (Dampfsperre, diffusionsoffene Folie) sind empfindlich und dürfen nicht reißen. Für eine Automatisierung dieser Vorgänge wird die Entwicklung spezieller Greifersysteme notwendig. Die gut automatisierbaren Prozesse bestehen zumeist aus dem Fügen starrer Bauteile mit einfacher Handhabung für Automaten. Hier ist mit geringem Aufwand unter Anwendung konventioneller Greifersysteme eine Automatisierung realisierbar.

2.4 Auslegung virtueller Fertigungsstraßen durch Kopplung von Simulationstechniken

Der gewählte Ansatz sah die Simulation eines Fabrikbetriebs zur Vorfertigung von Häusern in Tafelbauweise auf zwei unterschiedlichen Ebenen vor: Zum einen auf der einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation, die Abläufe anhand ihrer Bearbeitungszeiten und gegenseitigen Abhängigkeiten charakterisiert. Zum anderen in Form von 3D-Fertigungssimulationen, die Anlagenkomponenten anhand ihrer Geometrien und Kinematiken in einer virtuellen Umgebung abbilden.

Die Materialflusssimulation bietet den Vorteil großer Flexibilität und Anpassbarkeit an unterschiedlichste Fertigungskonzepte, Maschinensysteme und Produkte. Die Elemente des Fabrikbetriebs werden anhand ihrer technischen und betriebswirtschaftlichen Eigenschaften abstrahiert dargestellt. Die realen Geometrien eines Bauteils oder einer Maschine sind zunächst nicht von Bedeutung. Mit Hilfe des Simulationsmodells lassen sich beispielsweise Mengenflüsse aufeinander abstimmen, indem die Auslastung von Maschinen- und Lagerkapazitäten analysiert wird. Ebenso lassen sich Engpässe in der Fertigung identifizieren und Durchlaufzeiten ermitteln. Bei der Auslegung von Fertigungslinien können auf diese Weise z.B. Bedarf und Art von Transportmitteln ermittelt werden. Ein weiterer Nutzen liegt in der Durchführung von Modellrechnungen, in denen die Auswirkung von Automatisierungslösungen auf die Fertigung bestimmt wird. Die Anpassbarkeit der Materialflusssimulation ermöglicht in diesem Zusammenhang die Durchführung von Kosten-Nutzen-Analysen für individuelle Fertigungsbetriebe im Vorfeld von geplanten Investitionen [1].

Die 3D-Simulation bietet im Vergleich zur Materialflusssimulation eine geringere Flexibilität, was die einmal erstellten Modelle betrifft. Maschinen und Bauteile werden mit ihren realen Geometrien modelliert. In virtuellen Fertigungszellen und -straßen erfolgt dann die Simulation sämtlicher Bewegungsabläufe der Anlagenkomponenten, um die jeweiligen Bearbeitungs-, Montage- und Transportvorgänge darzustellen [2]. Roboter und Bearbeitungsstationen stehen einerseits als Objektbibliotheken zur Verfügung, können aber auch individuell mit den zugehörigen Kinematiken modelliert werden. Der Vorteil ist die hohe Anschaulichkeit und Transparenz aufgrund der 3D-Darstellung und der Möglichkeit, den Fertigungsverlauf aus beliebigen Blickwinkeln zu verfolgen. Die simulierten Produktionsstraßen erlauben Zugänglichkeits- und Kollisionskontrollen sowie Machbarkeitsstudien im Falle neuartiger Maschinen- und Anlagenkonzepte. Montage- und Fertigungsprobleme können so schon in der Frühphase der Planung eines Produktes oder der zugehörigen Fertigung aufgedeckt werden.

Zur Optimierung der Holztafelherstellung wurden die 3D- und die Materialflusssimulation parallel eingesetzt. Dabei bestand eine Wechselwirkung zwischen den beiden Simulationssystemen, d.h. der Einsatz erfolgte nicht unabhängig voneinander, sondern in einer gegenseitigen Kopplung von Materialfluss- und 3D-Simulation (Abb. 2). Den Ausgangspunkt stellte der Produktionsablauf der Fa. Baukmeier Holzbau dar. Die dort analysierten Bearbeitungs- und Montagevorgänge, Maschinenanordnungen, Fertigungszeiten und Bauprojekte bildeten die Grundlage für die Modellierung, ergänzt um die Zuarbeiten der Projektpartner Weinmann Holzbausystemtechnik und KUKA Roboter.

3 Automatisierungskonzepte und deren Umsetzung in der 3D-Fertigungssimulation

3.1 Multifunktions-Bearbeitungszentrum

Kleine und mittelständische Unternehmen erreichen in der Regel Stückzahlen von maximal einigen 100 Häusern pro Jahr. Mit dem Ziel einer möglichst hohen Wirtschaftlichkeit wurde zunächst eine kompakte, multifunktionale Anlage entworfen, bei der nicht zwangsläufig geringe Durchlaufzeiten im Vordergrund stehen. Stattdessen soll auf einer Anlage bei relativ geringen Investitionskosten auch bei kleineren Stückzahlen wirtschaftlich gefertigt werden. Da auf der Anlage komplette Wand-, Dach- und Deckenelemente hergestellt werden, ist für eine dauerhafte Auslastung gesorgt. Stillstandszeiten werden vermieden. Voraussetzung ist eine konventionelle Abbundanlage, auf der die benötigten Rippen und Stiele auf Länge gesägt und ggf. Ausfräsungen und Bohrungen hinzugefügt werden.

Das Anlagenkonzept sieht eine Kombination aus Portalroboter, 5-Achs-Bearbeitungszentrum und Nagelbrücke vor (Abb. 3). Die Anlage ist durch zelleneigene Einrichtungen in der Lage, Werkstücke, d.h. Rippen/Stiele, Platten und Dämmmaterial, selbst zu handhaben und auf dem Arbeitstisch zu positionieren. Die Materialbereitstellung kann automatisiert über Förderbänder oder aber auch in Form lokaler Puffer erfolgen. Im gezeigten Beispiel werden die Platten etwa per Gabelstapler gefördert und in der Zelle gepuffert. Die Rippen werden über ein Förderband von der Abbundanlage aus zugeführt. Voraussetzung ist, dass die Bauteile vom Abbund in der benötigten Reihenfolge produziert werden. Die Steuerung muss über das Produktionsplanungs- und Steuerungssystem erfolgen.

Die Transporteinrichtungen sind in den Arbeitsraum des Multifunktionsportals integriert. Für einen autonomen Betrieb ist es notwendig, dass die Anlage die einzelnen Werkstücke identifiziert, um

sicherzustellen, dass das korrekte Bauteil bereitgestellt wurde bzw. um die zugehörige Einbauposition zu bestimmen. Die Werkstückidentifizierung kann beispielsweise über Barcode oder Funktransponder (RFID) erfolgen. Bei der Teilebereitstellung muss über Anschläge eine definierte Lage des Werkstücks erzeugt werden, um das sichere Greifen durch den Roboter zu ermöglichen. Alternativ ist es denkbar, über Kamerasysteme oder Lichtschranken die Bauteillage automatisch zu ermitteln und an die Robotersteuerung zu übergeben.

Darüber hinaus ist das Portal in der Lage, alle tafelfähigen Bearbeitungsschritte (Bohren, Fräsen, Sägen, Nageln) selbständig durchzuführen. Die Arbeitsspindel besitzt ein Werkzeugwechselsystem, die zugehörigen Werkzeuge werden in einem Werkzeugmagazin innerhalb der Zelle bereitgehalten. Das Magazin ist modular aufgebaut und beliebig erweiterbar. Das 5-Achskonzept sorgt für die notwendige Flexibilität bei der Bearbeitung. So können Sägeschnitte beliebiger Orientierung oder horizontale Bohrungen vorgenommen werden. Je nach eingesetztem Spindeltyp sind unterschiedliche, tafelfähige Drehzahlen und Leistungen realisierbar.

Das automatische Wenden der Tafeln erfolgt mit Hilfe eines Schmetterlingswenders. Aufgrund der Integration zweier Arbeitstische in die Fertigungszelle, verknüpft durch den Schmetterlingswender, können beide Tafelseiten auf derselben Anlage bearbeitet werden. Die Verifizierung des Konzepts erfolgte anhand definierter Standard- oder Mustertafeln (aus den Funktionsgruppen Dach, Decke und Wand), welche die unterschiedlichen in Frage kommenden Handhabungs- und Bearbeitungsaufgaben in sich vereinen. Je nach Größe des Betriebes könnten mehrere dieser Anlagen kombiniert werden, beispielsweise jeweils eine für die Wand-, Dach- und Deckenelementproduktion.

3.2 Durchlaufzeit mit U-förmigem Materialfluss

Nachdem mit dem multifunktionalen Bearbeitungszentrum eine Kompaktanlage zur Montage und Bearbeitung der Wand-, Dach- und Deckentafeln konzipiert wurde, erfolgten im weiteren Verlauf der Arbeiten Variationen des Gesamtablaufs der Fertigung. Dabei wurde das Ziel der Erhöhung des Automatisierungsgrades verfolgt, indem Förder- und Handhabungseinrichtungen, Wendeeinrichtungen und Multifunktionsbrücken miteinander kombiniert wurden. Als Handhabungsgeräte können sowohl 6-Achs-Roboter als auch Portalroboter bzw. Portalbearbeitungszentren zum Einsatz kommen. Ausgangspunkt des Fertigungsablaufs bildete stets die Abbundanlage, die über Förderbänder oder Roboter mit den weiteren Bearbeitungsstationen verknüpft wurde.

Ein Beispiel dieser entwickelten Konzepte ist die Fertigung in der Linie mit U-förmigem Materialfluss. Die Linienfertigung bietet den Vorteil einer hohen Auslastung, da das Tafелеlement von Bearbeitungsstation zu Bearbeitungsstation durchgereicht wird. Da die Bearbeitung per Multifunktionsbrücke oder der Wendeprozess nicht an derselben Station wie die Montagevorgänge von Riegelwerk, Beplankung oder Dämmstoffen erfolgen und somit die Montagestation nicht blockiert wird, kann bereits an der Folgetafel gearbeitet werden. Die Durchführung der Montageoperationen kann sowohl manuell als auch vollautomatisiert erfolgen, auf den grundsätzlichen Fertigungsablauf hat dies keinen Einfluss. Unterschiede werden sich aber hinsichtlich Fertigungszeiten und -kosten ergeben. Für die Umsetzung in der 3D-Simulation wurde zunächst die vollautomatische Variante gewählt.

Abb. 4 zeigt einen Überblick der realisierten Anlage. Der durch das Raster angedeutete Hallenboden stellt die Grundfläche des Werks der Fa. Baukmeier in Hameln dar. Die Anlage wurde so konzipiert, dass sie in den vorhandenen Bauraum integriert werden kann. Der Forderung nach Nutzung bestehender Hallenflächen wird damit Rechnung getragen.

4 Modellierung und Optimierung des Fertigungsablaufs mittels Materialflusssimulation

4.1 Konzept

Das Ziel bei der Erstellung der Materialflusssimulation war die Schaffung eines universellen Modells der Abläufe bei der Vorfertigung von Elementen des Holztafelbaus. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Nachbildung beliebiger Produktionsabläufe ohne Beschränkung auf ein bestimmtes Fertigungskonzept oder Maschinenspektrum. Typ, Anzahl und Eigenschaften der eingesetzten Maschinen, Roboter, Fördereinrichtungen und Werker sollen beliebig variiert und miteinander

kombiniert werden können. Darüber hinaus soll die Durchführung dieser Variationen bei minimalem Eingriff in das eigentliche Simulationsmodell erfolgen können.

Zu diesem Zweck wurde die Materialflusssimulation mit einer hierarchischen, modularen Struktur versehen. Die Gesamtfertigung setzt sich aus einzelnen Fertigungsabschnitten wie Abbund, Wandtafelfertigung oder Versand zusammen. Diese Fertigungsbereiche greifen wiederum auf einen Maschinenpool zurück, der beispielsweise aus Abbundanlagen, Multifunktionsbrücken oder Transport-/Fördereinrichtungen besteht. Es handelt sich dabei um eine Art „Baukastensystem“, das beliebig erweiter- und untereinander kombinierbar ist. Die Funktionalität der einzelnen Maschinen bzw. Bearbeitungsstationen wird mit Hilfe des Simulationssystems nachgebildet. Hierzu zählen die jeweiligen von der Station ausführbaren Bearbeitungs-, Montage- und Transportvorgänge, also etwa Fräs- und Sägeoperationen, Zusammenbau des Riegelwerks oder internes Teilehandling. Um eine möglichst große Flexibilität des Simulationsmodells zu erzielen, liegt der Maschinenpool in parametrisierter Form vor. So wird beispielsweise die Vorschubgeschwindigkeit beim Sägen oder die Zeit für das Auflegen einer Dachlatte nicht durch feste Zahlenwerte, sondern durch Variablen in der Programmiersprache der Simulationsumgebung repräsentiert.

Die zugehörigen Maschinen- und Prozessdaten werden in externen Datenbanken verwaltet und erst bei Beginn eines Simulationslaufs eingelesen (Abb. 5) und den Variablen zugewiesen. Die Simulation kann somit durch Änderungen an der Datenbasis auf einfache Weise variiert werden. Neben den Maschinenparametern liegen auch die Fertigungsaufträge als externe Daten vor. Die Generierung dieser Auftragslisten erfolgt anhand von Produktionslisten und Fertigungsinformationen direkt aus einem 3D-CAD/CAM-System. Neben den Bauteildaten wie Typ, Anzahl und Werkstoff berücksichtigen die Listen sämtliche zugehörigen Bearbeitungs- und Montagevorgänge. Das Simulationsmodell ist somit nicht starr und an ein festes Teilespektrum gebunden, sondern ermöglicht die dynamische Fertigung beliebiger Wand-, Dach- und Deckentafeln basierend auf realen Konstruktionsdaten.

Das Konzept externer Datenbanken erlaubt zwei unterschiedliche Strategien zur Optimierung von Abläufen mit Hilfe der Materialflusssimulation: zum einen können für konstante Auftragsdaten Variationen an den Maschinenparametern vorgenommen werden, um beispielsweise den Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit beim Sägen auf Durchlaufzeit und Produktionskosten zu ermitteln. Auf der anderen Seite kann für einen festen Fertigungsablauf die Auftragssteuerung (Auftragsreihenfolge, Bildung von Multitafeln...) optimiert werden.

4.2 Datentransfer

Der Datentransfer erfolgt in Form von MS Excel-Tabellen, die vom CAD/CAM-System aus dem 3D-Gebäudemodell generiert werden. Neben Geometrie- und Technologiemerkmale werden zusätzlich betriebswirtschaftliche Kenngrößen wie Zeiten und Kosten benötigt. Die Anforderungen an die Schnittstelle zur Materialflusssimulation können in vier Bereiche aufgeteilt werden:

1. **Typisierung der Bauteile:** Mit Hilfe einer eindeutigen Typisierung aller Bauteile innerhalb einer Tafel erfolgt die Zuweisung zu Quelle und Ziel in der Materialflusssimulation. Aus dem Typ lassen sich die Bauteile den einzelnen Bearbeitungsstationen zuordnen. Außerdem gibt der Typ Auskunft über die Position der Bauteile innerhalb einer Tafel.
2. **Identifizierung der Bauteile:** Eine eindeutige Identifizierung der Bauteile dient dem Erstellen und Benennen der einzelnen Aufträge innerhalb der Materialflusssimulation. Von der Konstruktion über die Materialbeschaffung und die Fertigung bis zur Montage muss eine eindeutige Identifizierung aller Bauteile, die in einer Materialflusssimulation betrachtet werden, möglich sein. Zu Berücksichtigen ist dabei, dass in der Materialflusssimulation mehrere Gebäude gleichzeitig verarbeitet werden können.
3. **Kosten gemäß Stückliste:** Mit Hilfe der Stücklisteninformationen und Materialkenndaten werden Materialkosten berechnet und die Materialverwaltung organisiert.
4. **Kosten gemäß Produktionsliste:** Hier werden der Zeitaufwand und die Kosten während der Fertigung ermittelt. Diese Informationen werden zur Auslastungsoptimierung der Produktionsanlage verwendet.

Jede Zeile der Tabelle entspricht einem Fertigungsauftrag in der Materialflusssimulation. Dabei kann es sich um ein Bauteil (z.B. eine Rippe) oder eine Baugruppe (eine Dach-, Decken- oder Wandtafel) handeln.

4.3 Aufbau und programmtechnische Realisierung

In Abb. 6 ist die Umsetzung des Konzeptes einer modularen, parametrisierten Materialflusssimulation mit Hilfe der Software „eM-Plant 7.0“ der Fa. Tecnomatix gezeigt. Dargestellt ist das Gesamtmodell, d.h. die oberste Hierarchiestufe der Holztafelfertigung. Im Bereich „Fertigung“ wird im vorliegenden Fall der mit Hilfe des Projektpartners Baukmeier ermittelte Produktionsablauf nach dem Stand der Technik analog zu Abb. 1 wiedergegeben, der die Grundlage für die Simulationserstellung bildete. Aufgrund des modularen Aufbaus der Fertigungseinrichtungen können hier aber beliebige Abläufe simuliert werden, das Modell ist nicht auf die Nachbildung eines konkreten Betriebs beschränkt.

Die Visualisierung des Simulationsablaufs erfolgt über Zustandsgrafiken, die den aktuellen Status der einzelnen Fertigungsabschnitte symbolisieren. Diese erhöhen die Anschaulichkeit und erleichtern die Verifizierung des ordnungsgemäßen Ablaufs, was aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten und Bedingungen (z.B. Sperrung einer Station für den Werker, solange die Multifunktionsbrücke arbeitet) notwendig wird.

Zusätzlich ist ein Schichtkalender in das Modell integriert, der einen Schichtbetrieb inklusive Pausenzeiten simuliert. Die Funktion ermöglicht die Abbildung beliebiger Schichtsysteme für die unterschiedlichen Fertigungsbereiche und -stationen. Für jeden Arbeitsplatz werden separat die Wochenarbeitstage, die tägliche Arbeitszeit sowie die Pausenzeiten definiert. Beispielsweise kann für den Abbundbereich ein 2-Schichtsystem realisiert werden, während in der Tafelfertigung im 1-Schichtbetrieb gearbeitet wird. Ebenso ist es möglich, gesetzliche Feiertage oder Betriebsferien zu berücksichtigen. Die virtuelle Produktion kann somit an den realen Zeitablauf eines Geschäftsjahres anpassen werden, wodurch sich weitere Einsatzmöglichkeiten des Modells zur Auftrags- und Produktionsplanung erschließen.

4.4 Konfigurationssoftware für die Materialflusssimulation

Zur Variation der Fertigungsaufträge und Konfiguration der Maschinen- und Materialdatenbank wurde eine spezielle Konfigurationssoftware entwickelt. Das Programm wurde plattformunabhängig unter C++ erstellt, um einen universellen Einsatz zu gewährleisten.

Die primäre Funktion des Programms ist die Erstellung und Variation der Auftragsliste für die Materialflusssimulation. Es ist in der Lage, beliebig viele aus dem 3D-CAD/CAM-System exportierte Gebäudemodelle einzulesen und zu einer Gesamtauftragsliste zusammenzufügen. Die Einzeltafeln der Gebäude werden mit ihrem Typ (Außen- und Innenwand, Dach, Decke) und der zugehörigen Projekt- und Bauteilbezeichnung angezeigt. Ein Statusfenster informiert über die Anzahl der zur Verfügung stehenden Tafeln. Die Anwahl einer Tafel gibt deren Hauptabmessungen (Länge x Breite) und im Falle einer Wandtafel die Zahl der zugehörigen Fenster und Türen aus. Mit Hilfe dieser Informationen können vom Benutzer Einzeltafeln zu einer sog. Multitafel zusammengefügt werden. Die Multitafel setzt sich aus kleineren Tafeln zusammen, die während der Produktion als eine einzelne, großformatige Tafel behandelt werden. Auf diese Weise können Maschinenkapazitäten, d.h. die Länge eines Zimmermeistertisches, optimal ausgenutzt werden.

Aus der Gesamtheit der Tafeln können beliebige Auftragslisten generiert werden. Beispielsweise ist es möglich, den Fertigungsauftrag auf einen bestimmten Tafeltyp einzuschränken. Genauso kann definiert werden, ob die Tafeln hintereinander nach Typ sortiert oder untereinander gemischt in der virtuellen Produktionsumgebung der Materialflusssimulation in Auftrag gegeben werden sollen.

Als weitere Funktionalität bietet das Programm den Zugriff auf die Maschinen- und Materialdatenbank der Materialflusssimulation. Maschinen werden zunächst anhand ihres Typs (Abbundanlage, Multifunktionsbrücke usw.) definiert. Für jeden Typ können mit Hilfe der Software beliebig viele Datensätze angelegt werden, die unterschiedliche Hersteller, technische Ausführungen und Automatisierungsgrade abbilden. Ähnliches gilt für die Materialdaten: auch hier können unterschiedliche Datensätze hinterlegt werden, die beispielsweise die Einkaufspreise des jeweiligen Fertighausherstellers oder verschiedene Ausstattungsstandards (etwa Standard, Mittelklasse oder Luxus) des Gebäudes repräsentieren.

4.5 Ermittlung der Datenbasis

Grundlage für die Datenbasis der Materialflusssimulation bilden die von der Fa. Baukmeier durchgeführten Zeitaufnahmen im Werk Hameln. Sämtliche manuellen und automatischen Montage- und Bearbeitungsschritte wurden dabei erfasst und ausgewertet. Darüber hinaus wurden Informationen

über Material- und Personalkosten zur Verfügung gestellt. Die Fa. Weinmann Holzbausystemtechnik lieferte die technischen Daten ihrer Maschinenteknologie sowie die zugehörigen Investitionskosten. Mit Hilfe dieser Kosten war es möglich, Maschinenstundensätze für die einzelnen Anlagenkomponenten zu berechnen.

Nicht im realen Betrieb ermittelbare Kennzahlen flossen aus der 3D-Fertigungssimulation in die Materialflusssimulation ein. Dies betrifft insbesondere die Art und Anzahl von Maschinentypen und deren Anordnung, da dies die Länge der Förderstrecken und die Art der eingesetzten Förderhilfsmittel beeinflusst. Einen Sonderfall nehmen die 6-Achs-Roboter der Fa. KUKA Roboter ein. Hier führte KUKA mit einer firmeneigenen Software zusätzliche, gezielte Simulationsläufe in den Bereichen „Abbund/Riegelwerk“ und „Einbringung von Dämmstoffen“ an den definierten Standardbauteilen durch (Abb. 7). Anhand dieser Simulationen konnten unter Berücksichtigung von Werkstückabmessungen und -gewichten die jeweils erforderlichen Robotertypen und Lineareinheiten dimensioniert werden. Mit der Kenntnis des Robotertyps und der zugehörigen technischen Daten wurden im nächsten Schritt die exakten Taktzeiten ermittelt.

Aus der Gesamtheit der ermittelten Daten wurden im Anschluss die Maschinen- und Materialdatenbanken für die Materialflusssimulation erstellt und die im folgenden Kapitel beschriebenen Simulationsläufe durchgeführt.

5 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

5.1 Analyisierte Gebäudemodelle

Insgesamt kommen drei Wohngebäude in der Materialflusssimulation zum Einsatz. Die Beispielhäuser 1 und 2 wurden von der Fa. Baukmeier zur Verfügung gestellt. Das dritte Beispielhaus ist das im Rahmen von Teilvorhaben 1 (TU München) entwickelte Systemhaus.

Die Gebäudedaten der Fa. Baukmeier lagen als cadwork 3D-Dateien vor [3]. Die Gebäude waren vollständig auskonstruiert. Die Sachdaten und Fertigungsinformationen mussten jedoch nachträglich vervollständigt werden, um eine Übergabe zu der Materialflusssimulation zu ermöglichen. Hierbei handelte es sich um Materialdaten, Stücklisten und Produktionslisten sowie um die Erzeugung der Maschinendaten der auf den Abbundanlagen zu fertigenden Rippen. Für das Systemhaus der TU München lagen die Daten im vom Teilvorhaben 3 (BTU Cottbus) weiterentwickelten IFC-Standard mit den Hüllen der Wand-, Decken- und Dachtafeln vor [4]. Mit Hilfe von 2D-Detailzeichnungen konnten so die Wandtafeln auskonstruiert werden. Die Vervollständigung der Sachdaten und Fertigungsinformationen erfolgte analog zu den ersten beiden Beispielhäusern.

5.2 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Im Verlauf der Untersuchungen wurden nicht nur unterschiedliche Fertigungskonzepte und Automatisierungsgrade miteinander verglichen, sondern auch die Einflüsse bei der Generierung von Fertigungsaufträgen für die virtuelle Produktionsumgebung ermittelt. Auf diese Weise konnte gezeigt werden, dass bereits der Planungsprozess, in dem über die Reihenfolge von Aufträgen und die Zusammenfassung mehrerer Bauprojekte zu einem Gesamtvorhaben entschieden wird, Einfluss auf die späteren Durchlaufzeiten und Fertigungskosten nehmen kann (Abb. 8). Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass bereits durch eine geschickte Planung der Fertigungsaufträge die Durchlaufzeit um bis zu einem halben Arbeitstag gesenkt werden kann.

Abb. 9 fasst einige der durchgeführten Simulationsexperimente zusammen, in denen der Automatisierungsgrad des Fertigungsablaufs variiert wurde. Als Referenz dient dabei die Variante Nr. 1, die den Ablauf nach dem heutigen Stand der Technik bei der Fa. Baukmeier darstellt. Das untersuchte Gebäude ist ein Einfamilienhaus bestehend aus einem Erdgeschoss mit einem Vorbau und einem ausgebauten Obergeschoss mit Balkon. Das Haus besitzt einen runden Turmanbau und einen Wintergarten im Erdgeschoss mit tieferer Traufe.

Der Vergleich der Fertigungszeiten macht deutlich, dass bereits durch eine bessere Ausnutzung bestehender Anlagen die Durchlaufzeiten verringert werden können. Eine Alternative ist die Nutzung beider Linien sowohl für Wand- als auch Dach-/ Deckentafeln. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Umorganisation der Fertigung, so dass auf einer einzelnen Linie mit hintereinander verketteten Stationen (Durchlauffertigung, U-Form) produziert wird. Sollen Montagevorgänge automatisiert werden, so bieten sich insbesondere die starren Bauteile an. Im Falle der Durchlauffertigung kommt

neben einer Vollautomatisierung der Einsatz von Automatisierungslösungen im Bereich der Riegelwerksstation in Frage.

Die entstehenden Fertigungskosten können mit Hilfe aller Varianten gesenkt werden. Geringfügige Einsparungen bei den Materialkosten ergeben sich durch eine Verschnittoptimierung im Falle automatisierter Fertigungseinrichtungen. Da die Konstruktionsweise der Gebäude unverändert bleibt, können allerdings keine signifikanten Einsparungen bei den Materialkosten erzielt werden. Die Automatisierung von Handhabungsvorgängen in einer konventionellen Fertigung erhöht die Maschinenkosten nur in geringem Maße, trägt aber erheblich zur Senkung der Personalkosten bei. Eine vollautomatisierte Durchlauffertigung verursacht in Relation zum Personal sehr hohe Maschinenkosten. Die Lösung in Form einer automatisierten Riegelwerksstation führt zu um mehr als 25% reduzierten Kosten bei gleichzeitiger Senkung der Fertigungszeit von über 7 auf etwa 4 Arbeitstage.

6 Zusammenfassung

Mit der Materialflusssimulation wird dem Holzhaus- wie auch dem Maschinenhersteller ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, mit dessen Hilfe bestehende Anlagen neu organisiert und optimiert werden können. Darüber hinaus wird es aber auch möglich, Neuinvestitionen im Vorfeld der Anschaffung bezüglich ihres technischen und wirtschaftlichen Nutzens zu bewerten und zu projektieren. Die Rückführung der Simulationsergebnisse in die 3D-Fertigungssimulation erlaubt die Visualisierung der geplanten Fertigungsstraße und deren Optimierung bezüglich Anordnung von Maschinen manuellen Arbeitsplätzen in Hinblick auf Arbeitsräume, Erreichbarkeit und Sicherheit.

Die Durchführung der Materialflusssimulationen erfolgte anhand realer Gebäudemodelle, darunter das von der TU München im Teilvorhaben 1 entwickelte Systemhaus auf Basis der Schnellverbindertechnik. Es konnte gezeigt werden, dass die Auftragsreihenfolge der Einzeltafeln abhängig vom Gebäudemodell unterschiedlich starken Einfluss auf die Fertigungszeiten und –kosten haben. Die Ergebnisse machen weiterhin deutlich, dass bereits durch eine Neuorganisation bestehender Fertigungsanlagen sowohl Zeiten als auch Kosten gesenkt werden können. So bedeutet die Anordnung der Maschinenteknik zu einer U-förmigen Linienfertigung unter Beibehaltung der manuellen Prozessschritte einen erheblichen Produktivitätsgewinn. Die gezielte Automatisierung der Riegelwerksstation führt zu einer weiteren Senkung der Fertigungszeiten und –kosten. Eine Vollautomatisierung dagegen kann die Gesamtkosten nicht weiter senken, führt aber zu nochmals verringerten Durchlaufzeiten des Gebäudes. Dies bedeutet, dass für kleine und mittelständische Unternehmen mit geringen Stückzahlen Automatisierungslösungen zunächst nur bis zu einem gewissen Grad sinnvoll sind. Soll aber der Ausstoß der Anlage zu einem späteren Zeitpunkt gesteigert werden, können mit Hilfe des Simulationsmodells die erforderlichen Veränderungen am Produktionsablauf identifiziert werden.

Neben einer Reduzierung von Fertigungszeiten und –kosten wird die Automatisierung von Fertigungsabläufen in Verbindung mit den entwickelten Methoden der virtuellen Produktion zu einer Steigerung der Produktqualität im Holztafelbau führen. Durch den Einsatz automatisierter Fertigungseinrichtungen wird sichergestellt, dass sämtliche für die herzustellende Tafel benötigten Bauteile zum einen überhaupt verbaut und zum anderen auch an der geforderten Position mit der notwendigen Genauigkeit montiert werden. Das Vergessen von Bauteilen beispielsweise im Riegelwerk oder die Verwechslung ähnlicher Baugruppen wird vermieden. Gleiches gilt für maschinell durchgeführte Bearbeitungsvorgänge wie die Fixierung von Bauteilen und das Setzen von Bohrungen. Die Voraussetzung sind intelligente Maschinensysteme, die etwa über Barcode oder Funktransponder in der Lage sind, die korrekten Bauteile zu identifizieren. Eine weitere Möglichkeit sind Lichtschranken und Kamerasysteme, die die Lage von aufzunehmenden Werkstücken erkennen und die ordnungsgemäße Positionierung überwachen.

Automatisierung erfordert zwangsläufig einen sorgfältigen Planungsprozess im Vorfeld der Fertigung. Genau dieser Prozess wird von den virtuellen Produktions- und Simulationstechniken unterstützt. Mittels 3D-Simulation kann der Fertigungsprozess vorab im Rechner anhand der vom CAD/CAM-System generierten CNC-Daten simuliert werden, um eventuelle Fehler im Maschinenprogramm aufzudecken, Kollisionskontrollen durchzuführen oder benötigte Werkzeuge bereitzustellen. Auf diese Weise werden unproduktive Zeiten vermieden und Kosten minimiert, die durch Maschinencrashes, falsche bzw. fehlerhafte Bearbeitungen oder fehlende Werkzeuge/Werkstücke entstehen könnten.

Die Materialflusssimulation ist ein weiteres Hilfsmittel zur Qualitätssicherung bereits im Planungsprozess. Hiermit werden frühzeitig Produktionsengpässe aufgedeckt und der Bedarf an Fertigungshilfsmitteln ermittelt. Da die Simulation explizit für jedes geplante Bauprojekt anhand der CAD-Daten durchgeführt werden kann, ist eine rechtzeitige Materialbedarfsrechnung und –bereitstellung möglich. Der Abgleich zwischen Simulationsergebnis und dem Planungsprozess hilft, mögliche Inkonsistenzen im Datenmodell des Gebäudes oder bei dessen Verarbeitung aufzudecken und somit Fehler zu vermeiden. Ein weiterer Punkt ist die Qualitätssicherung in Bezug auf Liefertreue und Kosten: Für jedes Gebäude und dessen Einzeltafeln können die zu erwartenden Fertigungszeiten und –kosten berechnet werden. Durch eine frühzeitige Kalkulation im Planungs-/Konstruktionsprozess wird es möglich, die zu erwartenden Kosten für die Herstellung des Hauses zu ermitteln und Terminprobleme bei der Auslieferung durch falsch eingeschätzte Produktionszeiten zu verhindern.

7 Literatur

- [1] VDI-Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, VDI-Verlag, Düsseldorf
- [2] Hoffmeister, H.-W., Sachers, M.: Flexible Fertigungszellen in der Möbelfertigung, HOB - Die Holzbearbeitung, 46 (1999) 1/2, S. 78-83
- [3] Kessel, M.H.: Rechnergestützte Planung und Fertigung im Holzbau, in: Innovationen für die Holzbearbeitung von morgen, 11. Braunschweiger Holztechnisches Kolloquium, 10.-12.10.2000, TU Braunschweig, 2000, S. 29.1-29.8
- [4] Osterrieder, P., Richter, S., Fischer, M.: A Product Data Model for Design and Fabrication of Timber Buildings, Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, wcte 2004, Lahti, Finland

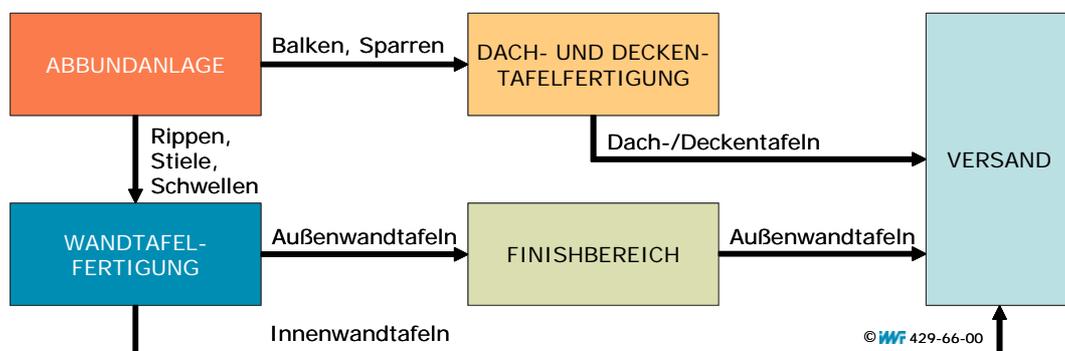


Abb. 1: Übersicht des Fertigungsablaufs bei der Herstellung von Holzhäusern in Tafelbauweise

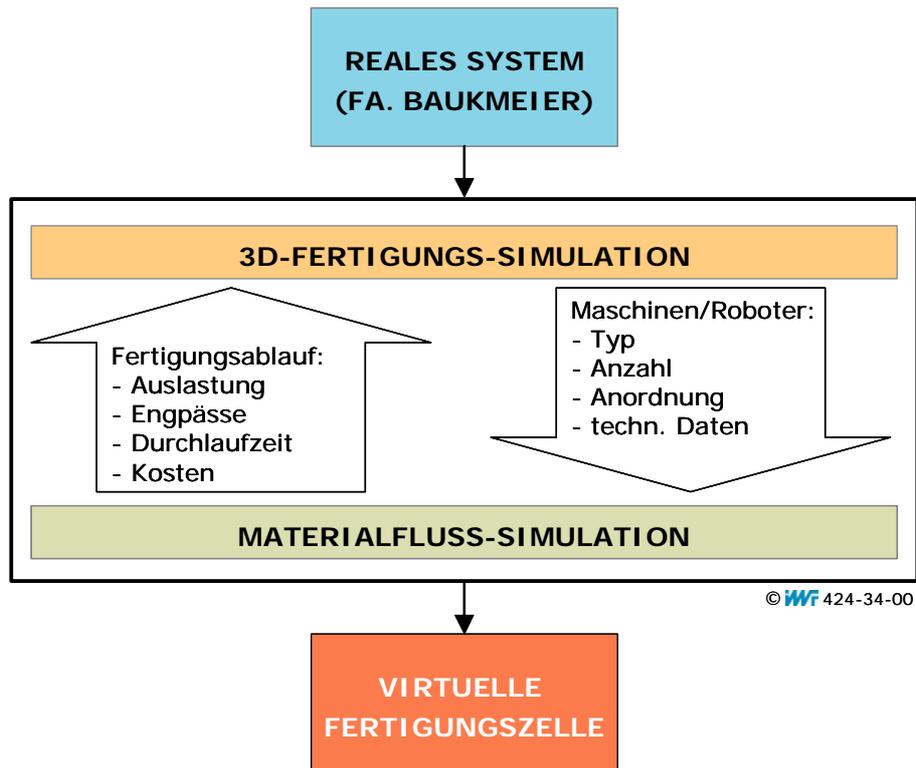
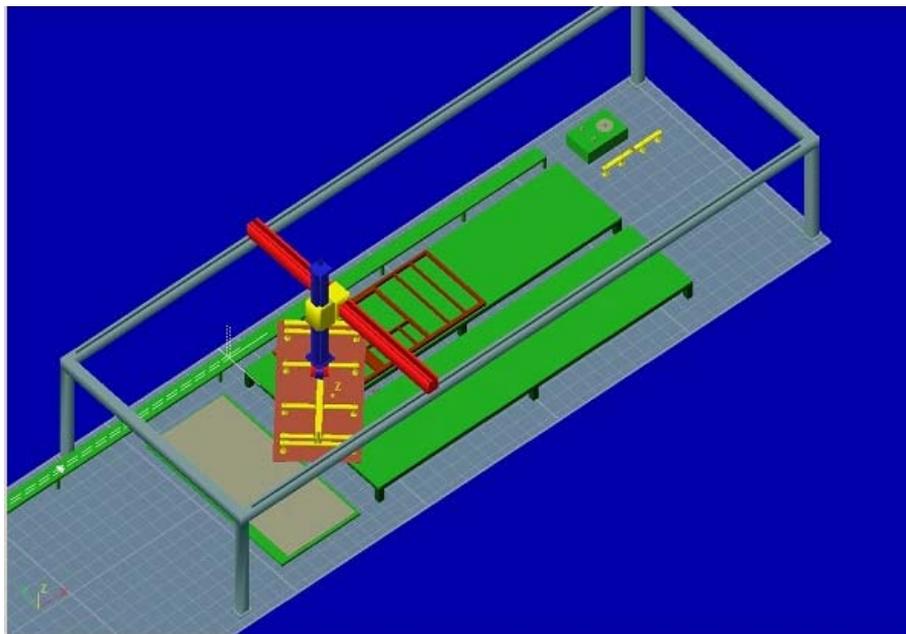
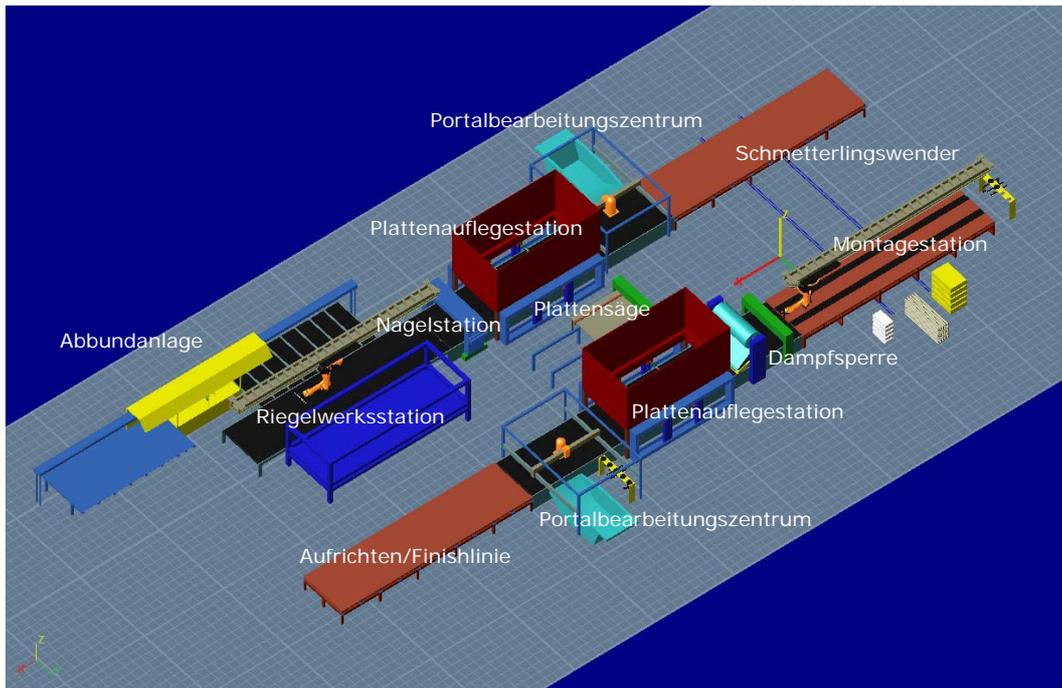


Abb. 2: Wechselwirkung zwischen den eingesetzten Simulationsumgebungen



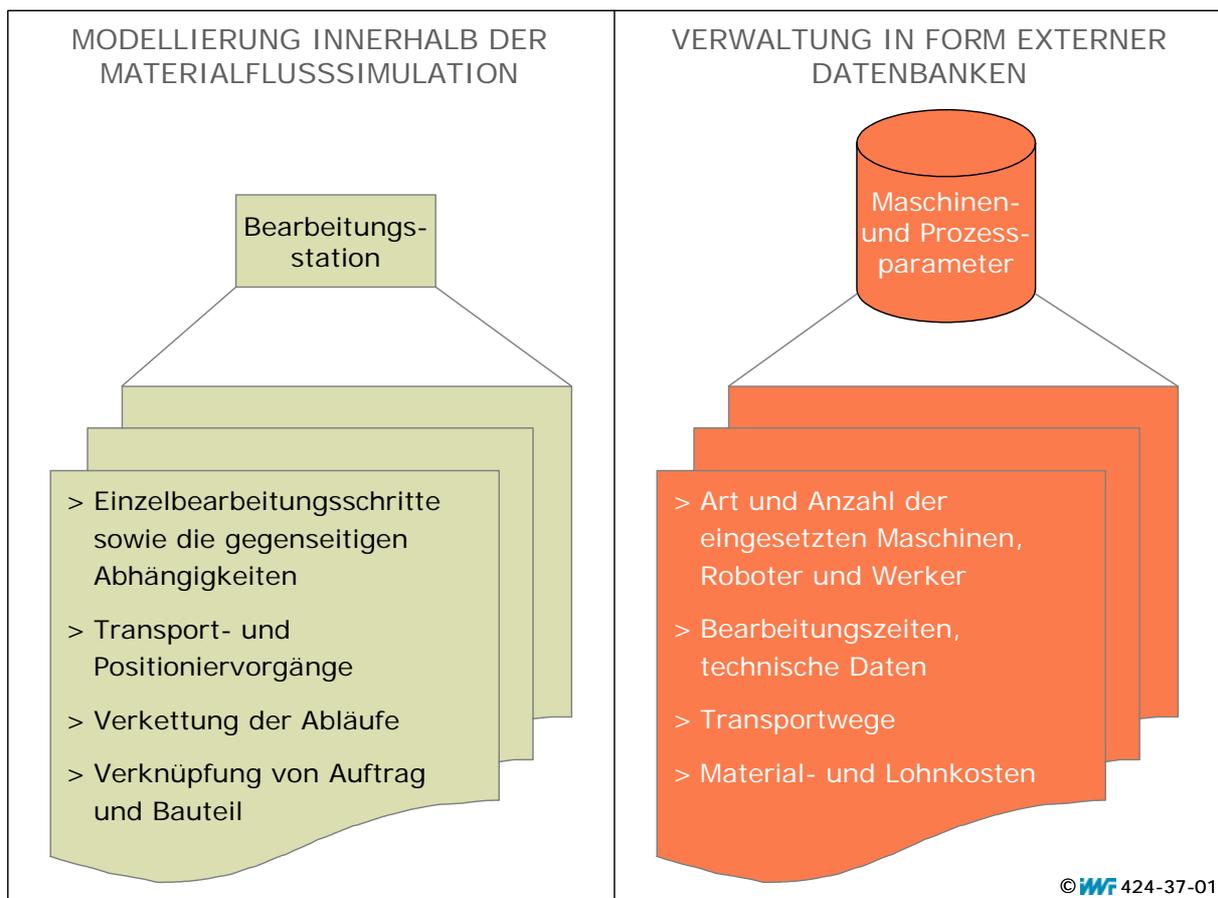
© Wf 424-40-01

Abb. 3: Multifunktionsbearbeitungszentrum in Portalbauweise



© Wf 426-73-00

Abb. 4: Durchlaufzeitung mit U-förmigen Materialfluss



© Wf 424-37-01

Abb. 5: Trennung von Simulationsmodell (links) und den zugehörigen Maschinen- und Prozessdaten (rechts)

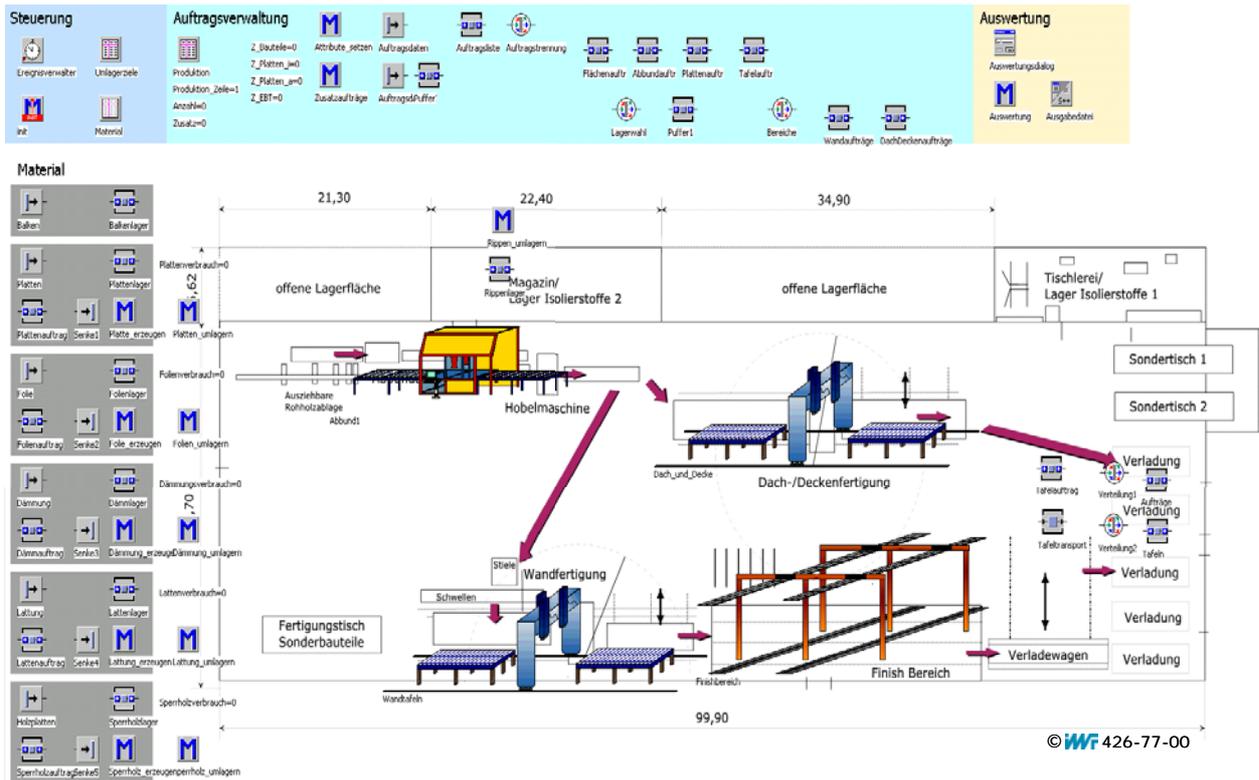


Abb. 6: Gesamtmodell der Holztafelherstellung in der Materialflusssimulation

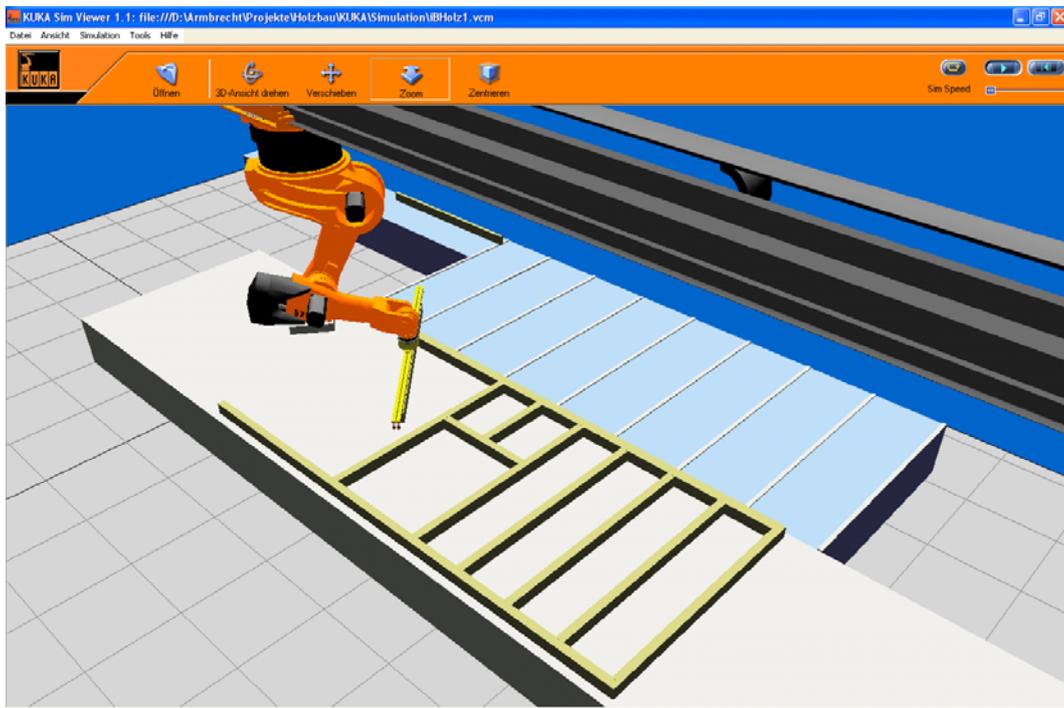


Abb. 7: Simulation einer Riegelwerksstation bei Einsatz eines KUKA-Roboters



- > Gebäudemodell 1
- > Fertigungsablauf
der Fa. Baukmeier
- > Auftragstrennung
nach Wand und Dach/Decke

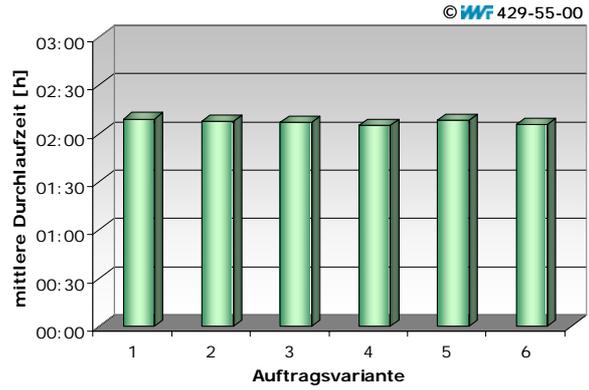
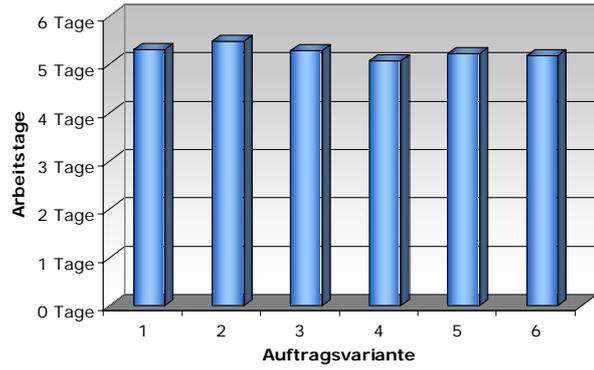
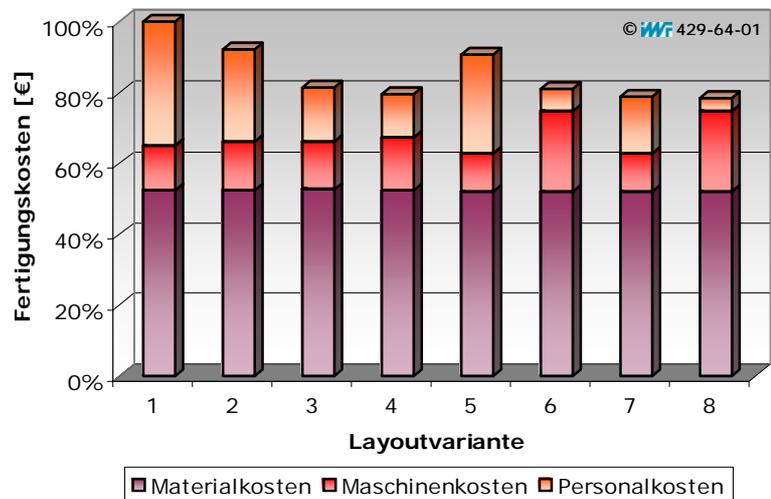
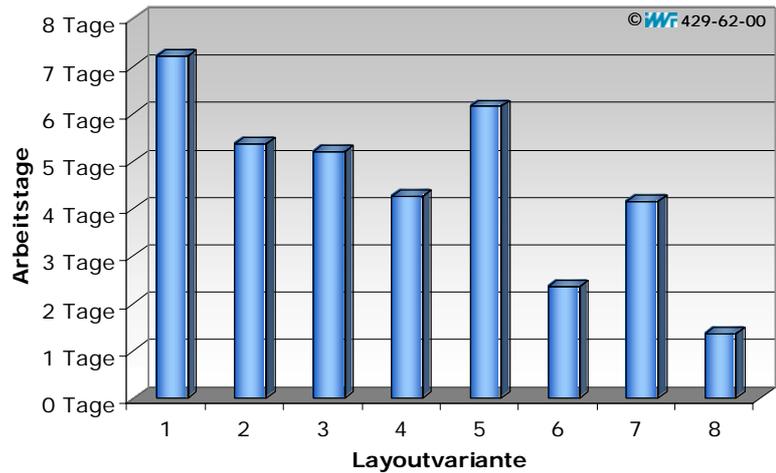


Abb. 8: Gesamtfertigungszeit und mittlere Tafeldurchlaufzeit bei Variation der Auftragsreihenfolge



> Gebäudemodell 2

> Auftragsvariante 5



VARIANTE	FERTIGUNGSABLAUF
1	Fertigung nach Stand der Technik, manuelle Montagevorgänge, Auftragstrennung
2	Fertigung nach Stand der Technik, manuelle Montagevorgänge, keine Auftragstrennung
3	Fertigung nach Stand der Technik, Montage starrer Bauteile automatisiert, Auftragstrennung
4	Fertigung nach Stand der Technik, Montage starrer Bauteile automatisiert, keine Auftragstrennung
5	Durchlaufertigung, manuelle Montagevorgänge
6	Durchlaufertigung, vollautomatisiert
7	Durchlaufertigung, Riegelwerksstation automatisiert
8	Durchlaufertigung, vollautomatisiert, 2-Schicht-Betrieb

Abb. 9: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse hinsichtlich Fertigungszeiten und -kosten