

Manfred Bornewasser  
Sven Hinrichsen *Hrsg.*

# Informatrische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage

Theorie und Praxis

---

# Informatrische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage

---

Manfred Bornewasser • Sven Hinrichsen  
Hrsg.

# Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage

Theorie und Praxis

*Hrsg.*

Manfred Bornewasser  
Institut für Psychologie  
Universität Greifswald  
Greifswald, Deutschland

Sven Hinrichsen  
Labor für Industrial Engineering  
Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe  
Lemgo, Deutschland

ISBN 978-3-662-61373-3

ISBN 978-3-662-61374-0 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61374-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Alexander Grün

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort

Erst mit der Ausführung des Montageprozesses entsteht ein Erzeugnis höherer Komplexität, das die vom Kunden gewünschten Eigenschaften erfüllt. Die Funktion der industriellen Montage ist aber nicht nur von entscheidender betrieblicher, sondern auch von volkswirtschaftlicher Bedeutung, da in Deutschland zehntausende von Montagearbeitsplätzen in Branchen wie dem Maschinen- oder Fahrzeugbau bestehen. Diese Arbeitsplätze verändern sich. So führt die hohe Wettbewerbsintensität in einzelnen Branchen zu einer hohen Innovationsdynamik. Diese findet wiederum ihren Ausdruck in Produkten, die durch Integration von Zusatzfunktionen aus immer mehr Einzelteilen bestehen, in einer Vielzahl an Varianten am Markt angeboten oder sogar kundenindividuell gestaltet werden. Dadurch steigt die Komplexität der Montagearbeit. Beschäftigte haben im Hinblick auf die Auswahl des aufzunehmenden Bauteils, des zu nutzenden Werkzeugs oder der anzuwendenden Arbeitsmethode eine Vielzahl an Entscheidungen zu treffen. Es stellt sich daher die Frage, wie mit dieser zunehmenden Komplexität umzugehen und wie diese seitens der Beschäftigten zu bewältigen ist, ohne dass es zu Überbeanspruchungen der Beschäftigten und einem Verfehlen von Produktivitätszielen kommt. Während Montage bislang vornehmlich als energetische Arbeit begriffen wurde, sind künftig die kognitiven Anteile der Montagearbeit in den Vordergrund zu rücken. Montagesystemgestaltung ist demnach verstärkt ein Handlungsfeld der kognitiven oder auch neurokognitiven Ergonomie. In diesem Zusammenhang spielt das Komplexitätsmanagement eine entscheidende Rolle: Während früher Strategien des Vereinfachens, z. B. durch fortschreitende Arbeitsteilung, im Vordergrund standen, gewinnen heute Strategien des Beherrschens der Komplexität an Bedeutung. Im Zentrum dieses Paradigmenwechsels stehen dabei informatorische Assistenzsysteme, die den Beschäftigten im Montageprozess mit Informationsangeboten unterstützen und so die wachsende Komplexität sicher beherrschbar machen.

Das vorliegende Buch möchte dazu anregen, eine betriebliche Strategie für ein umfassendes Informationsmanagement in der variantenreichen Montage zu entwickeln und umzusetzen, damit die industrielle Montagearbeit weiterhin Zukunft in Deutschland hat. Dieses Buch beinhaltet wesentliche Ergebnisse des öffentlich geförderten Projektes Montexas4.0. Es entstand im Zusammenspiel von Arbeitspsychologen, Wirtschaftsingenieuren, Produktionstechnikern und Informatikern, von Wissenschaftlern und Praktikern, in

Laboren und in betrieblichen Arbeitskontexten. Unser Dank gilt allen Beschäftigten und Autoren, die das Projekt getragen, unterstützt und bereichert haben. Besonderer Dank gilt den Unternehmen HOMAG Kantentechnik und Spier Fahrzeugwerk, die den Anforderungen der Wissenschaft stets aufgeschlossen gegenüberstanden und in hohem Maße zum Gelingen des Projektes beigetragen haben. Er gilt Herrn Dr. Raymond Djaloëis vom Projektträger Karlsruhe für seine Unterstützung während der gesamten Projektlaufzeit und Frau Sabine Bromby vom Springer-Verlag für ihre freundliche Förderung dieser Publikation.

Greifswald und Lemgo, Deutschland  
September 2020

Manfred Bornewasser  
Sven Hinrichsen

---

## Förderhinweis



Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt Montexas4.0 wurde im Rahmen des Programms „Zukunft der Arbeit“ (Förderkennzeichen 02L15A260ff.) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBWF) und dem Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Veränderung der Gestaltungsparadigmen industrieller Montagearbeit. . . .</b>	<b>1</b>
	Sven Hinrichsen und Manfred Bornewasser	
1.1	Historische Entwicklung der Montagearbeit . . . . .	2
1.2	Bedeutung der industriellen Montage . . . . .	5
1.3	Begriff und Merkmale der Montage . . . . .	6
1.4	Montagesysteme als spezielle Arbeitssysteme. . . . .	7
1.5	Montagesystemtypen . . . . .	9
1.6	Veränderung der Gestaltungsparadigmen . . . . .	13
1.7	Hinweise für die betriebliche Praxis . . . . .	15
1.8	Zum Aufbau des Buches . . . . .	16
	Literatur. . . . .	19
<b>2</b>	<b>Informatorische Gestaltung der Montage mittels Assistenzsystemen . . . . .</b>	<b>21</b>
	Sven Hinrichsen	
2.1	Bedeutung . . . . .	22
2.2	Informatorische Gestaltung der manuellen Montage. . . . .	24
2.2.1	Einordnung in die ergonomische Montagesystemgestaltung . . . . .	24
2.2.2	Kompatibilitätsprinzip . . . . .	25
2.2.3	Gestaltung von Montageinstruktionen. . . . .	26
2.2.4	Anordnung und Kennzeichnung von Arbeitsgegenständen. . . . .	29
2.3	Begriff, Nutzen und Merkmale von Montageassistenzsystemen. . . . .	31
2.4	Wirkungsweise und Klassifikation von Montageassistenzsystemen . . . . .	32
2.5	Forschung und Beispiele zu Montageassistenzsystemen. . . . .	35
2.6	Hinweise für die betriebliche Praxis . . . . .	38
	Literatur. . . . .	40
<b>3</b>	<b>Montage und Komplexität . . . . .</b>	<b>43</b>
	Manfred Bornewasser	
3.1	Montage als Handlungssystem mit invarianter Ordnung. . . . .	44
3.2	Moderne Montage: Einfachheit weicht zunehmender Komplexität . . . . .	45

3.3	Zunahme der Informationsverarbeitung und der kognitiven Beanspruchung. ....	51
3.4	Komplexität führt zur Steigerung der Fehleranzahl. ....	54
3.5	Messen von Komplexität als objektive oder subjektive Größe. ....	56
3.6	Hinweise für die betriebliche Praxis: Auszüge aus Workshops. ....	62
	Literatur. ....	63
<b>4</b>	<b>Mentale Beanspruchung in der Montage</b> .....	<b>65</b>
	Dominic Bläsing	
4.1	Belastungs-Beanspruchungs-Konzept der Arbeitswissenschaft. ....	66
4.2	Mentale Beanspruchung durch Information. ....	68
4.3	Erfassung mentaler Beanspruchung im Feld. ....	73
4.3.1	Subjektive Verfahren. ....	73
4.3.2	Beobachtungsverfahren. ....	74
4.3.3	Physiologische Messungen. ....	74
4.4	Definition objektiver Beanspruchungsgrenzen und deren Erfassung. ....	79
4.5	Hinweise für die betriebliche Praxis. ....	83
	Literatur. ....	84
<b>5</b>	<b>Montage als Gegenstand kognitiver Ergonomie</b> .....	<b>89</b>
	Manfred Bornewasser	
5.1	Ergonomie als Wissenschaft von der Arbeit. ....	90
5.2	Energetische Ergonomie. ....	93
5.3	Kognitive Ergonomie. ....	96
5.4	Praxis einer kognitiven Ergonomie. ....	102
5.5	Hinweise für die betriebliche Praxis. ....	107
	Literatur. ....	108
<b>6</b>	<b>Produktivität der Montagearbeit</b> .....	<b>113</b>
	Sven Bendzioch, Sven Hinrichsen und Manfred Bornewasser	
6.1	Bedeutung des Produktivitätsmanagements. ....	114
6.2	Grundlagen zum Produktivitätsmanagement. ....	115
6.3	Produktivitätssteigerung durch informatorische Assistenzsysteme – Ergebnisse einer Laborstudie. ....	118
6.3.1	Einführung. ....	118
6.3.2	Untersuchungsteilnehmer. ....	120
6.3.3	Untersuchungsdesign. ....	120
6.3.4	Versuchsdurchführung. ....	122
6.3.5	Hypothesen. ....	123
6.3.6	Ergebnisse der Untersuchung. ....	124
6.3.7	Limitationen und Interpretation der Untersuchung. ....	129
6.4	Empfehlungen zur Produktivitätssteigerung mittels informatorischer Assistenzsysteme. ....	130
6.5	Hinweise für die betriebliche Praxis. ....	132
	Literatur. ....	133

<b>7 Einführung von Montageassistenzsystemen</b> . . . . .	135
Sven Bendzioch, Manfred Bornewasser und Sven Hinrichsen	
7.1 Merkmale von Veränderungsprozessen . . . . .	136
7.2 Herausforderungen bei der Einführung von Assistenzsystemen . . . . .	137
7.3 Einführung eines Assistenzsystems im Kontext des agilen Managements . . . . .	140
7.4 Einführung eines Assistenzsystems mittels eines klassischen Phasenmodells . . . . .	143
7.5 Gemeinsamkeiten und Differenzen zwischen beiden Einführungsmodellen . . . . .	152
7.6 Hinweise für die betriebliche Praxis . . . . .	154
Literatur . . . . .	155
<b>8 Fallstudie zur Einführung eines Montageassistenzsystems bei einem Spezialanbieter im Nutzfahrzeugmarkt</b> . . . . .	159
Philip Sehr, Alexander Nikolenko und Andreas Wilke	
8.1 Analyse der Ausgangssituation und Festlegen des Projektrahmens . . . . .	160
8.2 Konkretisieren der Ziele . . . . .	163
8.3 Grobplanung . . . . .	164
8.4 Feinplanung . . . . .	166
8.5 Realisieren und Einsetzen . . . . .	169
8.6 Hinweise für die betriebliche Praxis . . . . .	170
Literatur . . . . .	171
<b>9 Low-Code-Programmierung als Ansatz zur Gestaltung bedarfsgerechter informatorischer Assistenzsysteme – eine Fallstudie</b> . . . . .	173
Benjamin Adrian, Sven Hinrichsen, Andreas Schulz und Ernst Voß	
9.1 Ausgangssituation und Zielsetzung . . . . .	174
9.2 Merkmale der Low-Code-Programmierung . . . . .	175
9.3 Beschreibung des betrachteten Arbeitssystems . . . . .	177
9.4 App- und cloudbasierte Softwaregestaltung . . . . .	178
9.4.1 Ziel und Vorgehensweise . . . . .	178
9.4.2 Anforderungen an die Softwaregestaltung . . . . .	178
9.4.3 Informationsmodell und Schnittstellengestaltung (Back-End) . . . . .	179
9.4.4 Gestaltung der Benutzeroberfläche (Front-End) . . . . .	181
9.5 Hinweise für die betriebliche Praxis . . . . .	184
Literatur . . . . .	185
<b>10 Entwicklungstrends in der Montage</b> . . . . .	187
Sven Hinrichsen, Natalia Moriz und Manfred Bornewasser	
10.1 Einführung . . . . .	188
10.2 Paradigmenwechsel in der Montagesystemgestaltung . . . . .	189

---

10.3	Entwicklungstrends im Kontext der industriellen Individualmontage. . . .	193
10.3.1	Komplexität als Auslöser von Veränderung . . . . .	193
10.3.2	Lösungsansätze zur industriellen Individualmontage . . . . .	193
10.3.3	Ziele der industriellen Individualmontage . . . . .	196
10.3.4	Handlungsfeld 1: Intelligente Montagetechnik . . . . .	198
10.3.5	Handlungsfeld 2: Intelligente Informationslogistik . . . . .	200
10.3.6	Handlungsfeld 3: Intelligente Assistenzsysteme . . . . .	200
10.3.7	Handlungsfeld 4: Integriertes Informationsmanagement. . . . .	202
10.3.8	Handlungsfeld 5: Integration einzelner Fertigungsmodule in die Montage . . . . .	203
10.4	Entwicklungstrends in der Gestaltung von Montageassistenzsystemen . . . .	203
10.5	Hinweise für die betriebliche Praxis . . . . .	208
	Literatur. . . . .	211
	<b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .	<b>215</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

4D-Modell	Vier Dimensionen des Ressourcenverbrauchs nach Wickens
5S	Methode des Toyota-Produktionssystems zur Beseitigung von Verschwendung durch Sortieren, Systematisieren, Säubern, Standardisieren, Selbstdisziplin und ständige Verbesserung
AR	Augmented Reality
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
CAD	Computer-Aided Design
CIO	Chief Innovation Officer
CXI	Complexity Index
DFA	Design for Assembly
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DHM	Digitales Menschmodell (Digital Human Model)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DXF	Drawing Interchange File Format
EAWS	European Assembly Work Sheet
EDA	Elektrodermale Aktivität
EEG	Elektroenzephalografie
EKG	Elektrokardiogramm
EKP	Ereigniskorrelierte Potenziale
EN	Europäische Normen
ERP	Enterprise Resource Planning
ESD	Elektrostatische Entladung (Electrostatic Discharge)
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomografie
fNIRS	funktionelle Nahinfrarotspektroskopie
HR	Herzfrequenz (Heart Rate)
HRV	Herzfrequenzvariabilität (Heart Rate Variability)
Hz	Maßeinheit Hertz
IOT	Internet der Dinge (Internet of Things)

---

ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
IT	Informationstechnologie
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LASI	Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik
LED	Leucht- oder Lumineszenz-Diode (Light Emitting Diode)
LMM	Leitmerkalmethode
MEG	Magnetenzephalografie
MMAL	Mixed Model Assembly Line
MTM	Methods-Time Measurement
MTM-HWD	Methods-Time Measurement – Human Work Design
MTM-MEK	Methods-Time Measurement für die Einzel- und Kleinserienfertigung
NASA-TLX	National Aeronautics and Space Administration -Task Load Index
OKR	Objectives and Key Results
PAC	Product Assembly Complexity
PDCA	Plan, Do, Check and Adjust
PLM	Product Lifecycle Management
PMI	Project Management Institute
RAS	Reconfigurable Assembly System
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V.
RFID	Radio-Frequency Identification
RMS	Reconfigurable Manufacturing System
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
SMART	Spezifisch, Messbar, Anspruchsvoll, Realistisch und Terminiert
SPEC	Specification
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SUS	System Usability Scale
TS	Technical Specification (Technische Spezifikation)
UTAUT	Unified Theory of Acceptance and Use of Technology
XLS	Excel Spreadsheet
XML	Extensible Markup Language

---

## Autorenverzeichnis

**Benjamin Adrian** Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, Deutschland

**Sven Bendzioch** Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, Deutschland

**Dominic Bläsing** Universität Greifswald, Greifswald, Deutschland

**Manfred Bornewasser** Universität Greifswald, Greifswald, Deutschland

**Sven Hinrichsen** Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, Deutschland

**Natalia Moriz** Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, Deutschland

**Alexander Nikolenko** Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, Deutschland

**Andreas Schulz** Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, Deutschland

**Philip Sehr** Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, Deutschland

**Ernst Voß** HOMAG Kantentechnik GmbH, Lemgo, Deutschland

**Andreas Wilke** Spier GmbH & Co. Fahrzeugwerk KG, Steinheim, Deutschland



# Veränderung der Gestaltungsparadigmen industrieller Montagearbeit

# 1

Sven Hinrichsen und Manfred Bornewasser

## Inhaltsverzeichnis

1.1 Historische Entwicklung der Montagearbeit .....	2
1.2 Bedeutung der industriellen Montage .....	5
1.3 Begriff und Merkmale der Montage .....	6
1.4 Montagesysteme als spezielle Arbeitssysteme .....	7
1.5 Montagesystemtypen .....	9
1.6 Veränderung der Gestaltungsparadigmen .....	13
1.7 Hinweise für die betriebliche Praxis .....	15
1.8 Zum Aufbau des Buches .....	16
Literatur .....	19

## Zusammenfassung

Montagetätigkeiten werden von Menschen seit Jahrtausenden ausgeführt. Mit dem Aufkommen neuer Technologien und sich ändernder Marktanforderungen hat sich diese Tätigkeit im Zeitverlauf aber immer wieder verändert. Mit der handwerklichen Montage, der Massenmontage, der variantenreichen Serienmontage und der industriellen Individualmontage können vier Entwicklungsstufen unterschieden werden, in denen soziotechnische Montagesysteme ganz unterschiedliche Gestaltung erfahren.

S. Hinrichsen (✉)

Labor für Industrial Engineering, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe,  
Lemgo, Deutschland

E-Mail: [sven.hinrichsen@th-owl.de](mailto:sven.hinrichsen@th-owl.de)

M. Bornewasser

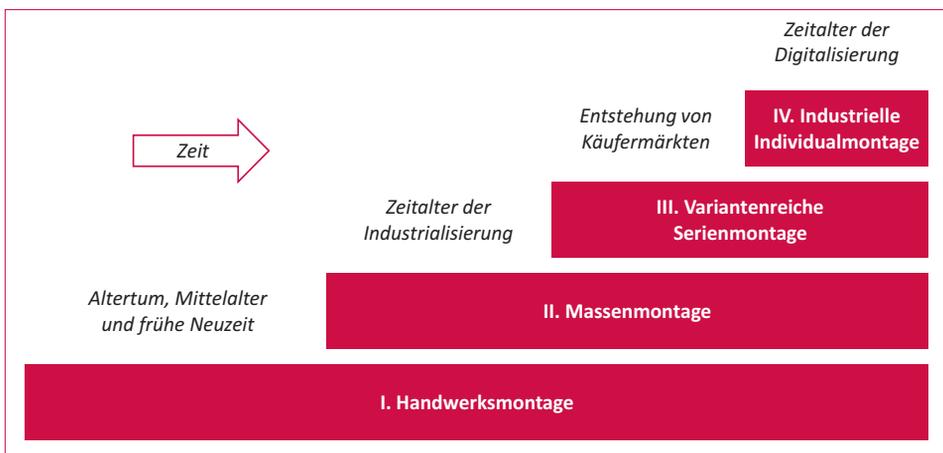
Institut für Psychologie, Universität Greifswald, Greifswald, Deutschland

E-Mail: [bornewas@uni-greifswald.de](mailto:bornewas@uni-greifswald.de)

Aufgrund des anhaltenden Trends zu komplexeren Produkten, zu steigender Variantenvielfalt und sinkenden Losgrößen sowie einer hohen Innovationsdynamik bedarf es neuartiger Ansätze, um den aktuellen Herausforderungen gerecht zu werden. Hierbei spielt das Komplexitätsmanagement eine entscheidende Rolle: Während früher Strategien des Vereinfachens z. B. durch fortschreitende Arbeitsteilung im Vordergrund standen, gewinnen heute Strategien des Beherrschens der Komplexität – vor allem durch den Einsatz informatorischer Assistenzsysteme – an Bedeutung.

## 1.1 Historische Entwicklung der Montagearbeit

Montage hat eine lange Tradition. Schon in den frühen Phasen der Menschheitsgeschichte bauen Menschen aus verschiedenen Einzelteilen nützliche Objekte zusammen, um sie entweder für den Eigenbedarf zu nutzen oder aber als Erzeugnis auf den Markt zu bringen. Dabei kommt es entscheidend darauf an, dass die Einzelteile zueinander passen und fest miteinander verbunden sind, denn nur dann erfüllen sie ihre beabsichtigte Funktion. Durch die Montage, die im Kern immer aus dem Handhaben und Fügen von Einzelteilen besteht, entstehen Erzeugnisse höherer Komplexität (Lotter 2012a). Die Verfahren des Fügens und Handhabens haben sich allerdings im Verlaufe der Menschheitsgeschichte immer wieder stark gewandelt. Montage kann dabei – in Anlehnung an bestehende Systematiken wie „craft production“, „mass production“ und „lean production“ (Womack et al. 2007) – gemäß Abb. 1.1 in die Entwicklungsstufen der handwerklichen Montage, der Massenmontage, der variantenreichen Serienmontage und der industriellen Individualmontage untergliedert werden.



**Abb. 1.1** Entwicklungsstufen der Montagearbeit

Handwerkliche Montagearbeiten wurden bereits in der Steinzeit ausgeführt, indem etwa bearbeitete Steine – sogenannte Rückenmesser – mittels Pflanzenteer auf beinerne oder hölzerne Geschoßspitzen oder Schneideinstrumente aufgesetzt wurden (Löhr 1986). Mit dem Aufkommen neuer Werkstoffe in der Bronze- und der sich anschließenden Eisenzeit ergaben sich neue Möglichkeiten beim Fügen von Einzelteilen, indem beispielsweise Bronzeniete verwendet wurden (Ebner 2001). Im Lauf der Geschichte nahm die Komplexität der in Werkstätten handwerklich hergestellten Produkte immer weiter zu, so dass die Montage schließlich auch als eigenständiger Teil des Produktionsprozesses an Bedeutung gewann. Handwerkliche Arbeiten bleiben jedoch immer dadurch gekennzeichnet, dass Produkte nach Kundenwunsch individualisiert hergestellt werden. Dabei übernimmt der Handwerker oftmals nicht nur die ausführenden Aufgaben der Fertigung der Einzelteile und ihrer anschließenden Montage, sondern plant die Ausführung seiner Arbeiten und kontrolliert seine Ergebnisse. Aufgrund dieser ganzheitlichen Aufgabe und variierender Kundenanforderungen kam und kommt der Qualifizierung im Handwerk eine besondere Bedeutung zu.

Mit der Industrialisierung im 18. und 19. Jahrhundert kam die Massenproduktion und mit ihr die Massenmontage auf. Das sich in dieser Zeit entwickelnde Produktionssystem basiert auf der Erkenntnis, dass mit der Herstellung großer Massen standardisierter Erzeugnisse Skaleneffekte zu erzielen sind, d. h. mit einer zunehmenden Produktionsmenge kommt es etwa zu einer Degression der Fixkosten, zu Produktivitätssteigerungen infolge von Erfahrungskurveneffekten und Kostenvorteilen bei der Beschaffung, so dass die Stückkosten sinken (z. B. Vahs und Schäfer-Kunz 2015). Kernelemente des sich als überaus erfolgreich herausstellenden neuen Produktionssystems sind die Arbeitsteilung, die Standardisierung von Arbeitsabläufen und Arbeitsmitteln (auf Basis von wissenschaftlichen Experimenten und Zeitstudien anstelle des im Handwerk vorherrschenden „Faustregelums“), die Erzielung von Spezialisierungsvorteilen durch eine hohe Arbeitsteilung und die Schaffung von Leistungsanreizen über „Pensum und Bonus“ (Taylor 1995, erstmals 1913). Eine Ausprägung dieses Produktionssystems bildet die Montage an Fließbändern, die sog. Fließmontage, die von Henry Ford im Jahr 1908 für das äußerst erfolgreiche T-Modell eingeführt wurde. Die schnelle Verbreitung dieses hocharbeitsteiligen, aber auch hochproduktiven Montagekonzeptes führte dazu, dass Montagearbeit in vielen Industriebranchen zu einer „Hilfsarbeitertätigkeit“ wurde (Lotter 2012a).

Durch den stetigen Ausbau von Produktionskapazitäten, eine Liberalisierung von Märkten und einen zunehmenden globalen Wettbewerb haben sich zentrale Märkte mehr und mehr von Verkäufer- zu Käufermärkten entwickelt (z. B. Vahs und Schäfer-Kunz 2015). Die Produzenten sahen sich gezwungen, stärker auf die Wünsche ihrer Kunden nach einem breiten Angebot an Produktvarianten einzugehen. Ein auf diese Anforderungen ausgerichtetes Produktionssystem hat das Unternehmen Toyota Motors entwickelt, wengleich zunächst nicht der globale Wettbewerb im Vordergrund stand, sondern die Bedürfnisbefriedigung eines nach Ende des zweiten Weltkrieges recht kleinen japanischen Inlandsmarktes. Dieser Markt verlangte „viele Modelle in kleiner Stückzahl zu niedrigen Kosten“ (Ohno 1993). Diese Marktanforderungen konnten in einem nach den Prinzipien

der Massenmontage organisierten Produktionssystem mit seiner hohen Arbeitsteilung nicht realisiert werden. Lange Umrüstzeiten oder hoch spezialisierte Beschäftigte mit geringer Einsatzflexibilität passen nicht zu den Anforderungen nach einer variantenreichen und kundenorientierten Produktion (Ohno 1993). Daraufhin entwickelte Toyota Schritt für Schritt ein seinen Kundenanforderungen entsprechendes Produktionssystem, das eine variantenreiche Serienmontage beinhaltet. Beibehalten wurde die Standardisierung. Neue elementare Prinzipien dieses Produktionssystems sind das Eliminieren von Verschwendung bzw. das Wertschöpfungsprinzip (Value), das Gestalten von Wertströmen von Wareneingang bis Warenausgang (Value Stream), das Flussprinzip (Flow), das Zieh-Prinzip (Pull) und das Streben nach Perfektion (Womack und Jones 2003). Da Produktvarianten zumeist erst mit der Montage der Erzeugnisse entstehen, kommt der Funktion der Montage und der mit ihr verbundenen Logistik ein besonderer Stellenwert im Toyota-Produktionssystem zu, da mit steigender Variantenvielfalt die Zahl der zu verarbeitenden Einzelteile und damit die organisatorisch-logistische Komplexität in der Montage zunimmt. Um diese, im Vergleich zur Massenmontage hohe Komplexität zu beherrschen, kommt im Toyota-Produktionssystem der systematischen Personalauswahl, -entwicklung und -führung eine große Bedeutung zu (Liker und Meier 2008). Zudem tragen unterstützende Methoden wie Kanban, Poka-Yoke oder Andon sowie ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess (Kaizen) dazu bei, die Erzeugnisse trotz hoher Komplexität effizient und fehlerfrei zu montieren.

Mit der Entwicklung des Produktionskonzeptes der Industrie 4.0 steigen die Anforderungen nochmals an, indem eine im Vergleich zur Serienmontage gestiegene Vielfalt an Produktvarianten über standardisierte Prozesse produziert werden soll. Dabei besteht die Erwartung, „individualisierte Produkte zu Preisen üblicher Massenprodukte“ in Losgröße 1 herzustellen (Kagermann et al. 2013). Dieses technikzentrierte Produktionskonzept geht von der Vorstellung aus, dass über das „Internet der Dinge“ (engl.: IOT – Internet of things) die traditionelle Trennung von virtueller und realer Welt weitgehend aufgehoben wird, so dass physische Objekte (things) über autonome eingebettete Systeme drahtlos untereinander und über das Internet kommunizieren (Kagermann et al. 2013). Neben der informationstechnischen Vernetzung der Produktion gewinnen in der industriellen Individualproduktion werkzeuglose Fertigungsverfahren, z. B. Laserschneiden oder additive Verfahren, an Bedeutung, da diese in der Lage sind, kundenindividuelle Teile in Losgröße 1 wirtschaftlich zu erzeugen. Mit einer solchen industriellen Individualproduktion bzw. -montage geht ein weiterer Anstieg der Komplexität einher. Daher kommt es insbesondere in der modernen Montage darauf an, möglichst durchgängige digitale Prozessketten zu gestalten. Für die manuelle Montage bedeutet diese Anforderung, dass digitale Montageinstruktion auf Basis von Ablaufmodellen automatisiert aus den Auftrags- und Produktdaten generiert und den Beschäftigten in der Montage fallweise bereitgestellt werden, damit diese dann die individualisierten Produkte in nacheinander geschalteten Arbeitsschritten erzeugen können.

### **Zur Aussagekraft der Entwicklungsstufen der Montagearbeit**

Das aufgezeigte Stufenmodell der Montagearbeit (s. Abb. 1.1) ist nicht so zu verstehen, dass die einzelnen Stufen strikt voneinander zu trennen wären und einander ablösen. Alle Entwicklungsstufen bestehen auch heute noch nebeneinander, verlieren oder gewinnen jedoch im Zeitverlauf an Bedeutung. Beispielsweise trägt die Digitalisierung auch zu einer Veränderung handwerklicher Leistungen bei. So können ehemals vor allem handwerklich erstellte Produkte (z. B. Balkon- und Terrasengeländer) heute in Online-Shops vom Kunden aus einem umfangreichen Baukasten unter Eingabe der benötigten Abmessungen konfiguriert werden. Die Teilefertigung erfolgt dann über in hohem Maße industrialisierte Prozesse in Losgröße 1. Lediglich die Endmontage eines solchen Produktes wird dann noch vom Handwerker vor Ort vorgenommen.

Auch hat sich die Bedeutung der manuellen Montagearbeit im Zeitverlauf verändert. Die mit der Massenmontage einhergehende Standardisierung der Montageprozesse führte über den Einsatz von Robotern und Automaten zu einer deutlichen Reduktion der manuellen Anteile am Montageprozess, besonders im Bereich schwerer körperlicher Arbeit. Allerdings werden selbst in der Massenmontage nicht alle Verrichtungen automatisiert ausgeführt, da einzelne Verrichtungen nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand automatisiert werden können. Trotz Fortschritten in der Automation erfolgen die variantenreiche Serienmontage und die industrielle Individualmontage auch heute noch überwiegend manuell, da etwa schwer zu prognostizierende Absatzmengen und Produktlebenszyklen zu einem hohen Investitionsrisiko führen und der Mensch im Vergleich zur Technik eine höhere Einsatzflexibilität aufweist.

---

## **1.2 Bedeutung der industriellen Montage**

Im Verarbeitenden Gewerbe sind über sechs Millionen Beschäftigte in Deutschland tätig (Statistisches Bundesamt 2018). Sie arbeiten in rund 46.000 Betrieben. Das Verarbeitende Gewerbe trägt aufgrund seiner Exportstärke erheblich zum gesellschaftlichen Wohlstand in Deutschland bei. Große Branchen des Verarbeitenden Gewerbes (z. B. elektrotechnische Industrie, Maschinenbau, Automobilindustrie) haben gemein, dass die in diesen Branchen tätigen Betriebe zumeist über große Montagebereiche verfügen. Nach Schätzungen liegt in Deutschland der Tätigkeitsschwerpunkt von gut einer Million Beschäftigten beim Montieren, Zusammensetzen und Installieren (Müller et al. 2009). Aufgrund des anhaltenden Trends zu komplexer werdenden Produkten mit steigender Variantenvielfalt und sinkenden Losgrößen erfolgt die Montage – trotz vergleichsweise hoher Personalkosten am Wirtschaftsstandort Deutschland und fortschreitender Automationstechnologie – vielfach manuell oder teilautomatisiert. Eine Verlagerung der Montagefunktion ins Aus-

land oder eine Übertragung der Funktion an Lieferanten (Outsourcing) kommen zumeist nicht in Frage, da sich die Montage am Ende der Wertschöpfungskette eines Betriebes befindet (Koether und Rau 2012), eine vergleichsweise hohe logistische und organisatorische Komplexität aufweist und ein Outsourcing bzw. eine Verlagerung sich daher auch negativ auf die Liefertermintreue auswirken kann. Zudem hat die Montage einen entscheidenden Einfluss auf die Produktqualität, weshalb vielfach auch Messungen und Prüfungen am Montageobjekt durchzuführen sind.

### 1.3 Begriff und Merkmale der Montage

Unter Montage oder Montieren wird die Gesamtheit aller manuellen und maschinellen Vorgänge verstanden, die der Schaffung einer lösbaren oder unlösbaren Verbindung von geometrisch bestimmten Körpern dienen (Lotter 2012a; Seliger 2018). Der Montage geht die Fertigung von Einzelteilen voraus. Dabei werden unter Einsatz von Fertigungsverfahren aus Rohteilen Fertigteile hergestellt (E DIN 8580:2020-01 2020). Erst durch die Montage entsteht ein Produkt höherer Komplexität als Verbund verschiedener Teile, welches die vom Kunden gewünschten Funktionen erfüllt.

Montagevorgänge bestehen immer aus Füge- und Handhabungsvorgängen. Zusätzlich kann die Montage gemäß Abb. 1.2 Vorgänge des Kontrollierens und Justierens sowie diverse Sonderfunktionen beinhalten (Spur und Helwig 1986; Lotter 2012a). Fügen ist gemäß DIN 8593-0:2003-09 (2003) „das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.“ Entsprechend dieser Norm ist Fügen „nicht mit Montieren gleichzusetzen. Montieren wird zwar stets unter Anwendung von Fügeverfahren durchgeführt, es schließt jedoch zusätzlich auch alle Handhabungs- und Hilfsvorgänge einschließlich des Messens und Prüfens mit ein. Außerdem gehören zum



**Abb. 1.2** Funktionen der Montage

Fügen auch Fertigungsverfahren, die nicht im Zusammenhang mit Montieren angewendet werden, z. B. Verseilen, Einvulkanisieren, Ummanteln.“

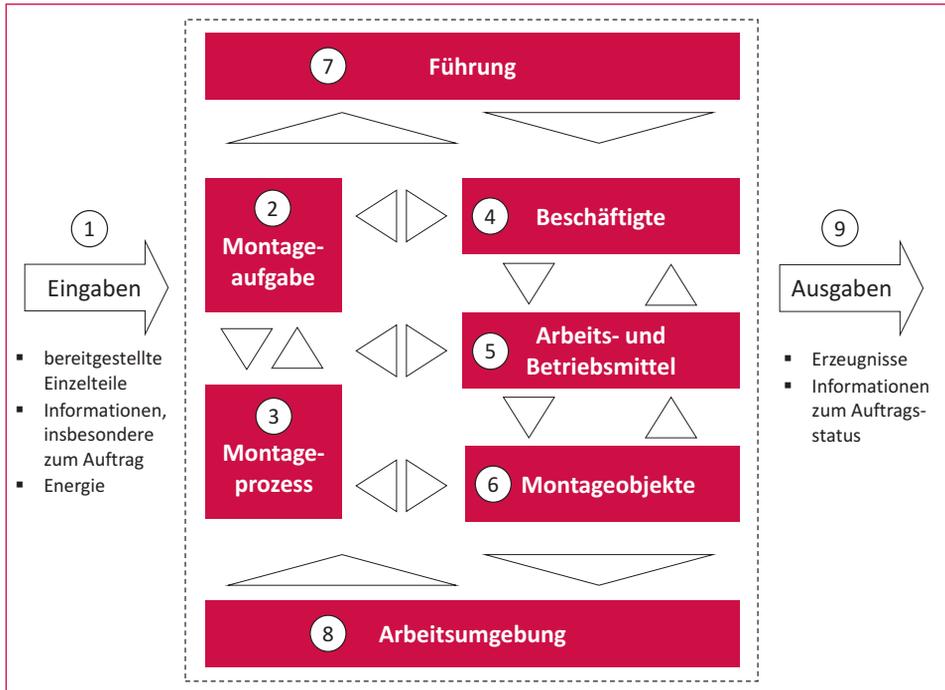
Handhaben ist gemäß VDI-Richtlinie 2860 (1990) „das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugskordinatensystem“. Justieren beinhaltet das Einstellen oder Abgleichen eines Messsystems derart, dass die Anforderungen an das Messsystem (z. B. Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit) erfüllt werden (DIN 1319-1:1995-01 1995). Tätigkeiten des Justierens werden beispielsweise häufig im Rahmen der Endmontage von Maschinen ausgeführt. Kontrollieren hat nach VDI-Richtlinie 2860 (1990) Mess- und Prüfvorgänge zum Gegenstand. Beim Prüfen wird nach dieser Richtlinie lediglich kontrolliert, ob ein Zustand erfüllt ist oder nicht. Beim Messen findet hingegen ein Vergleich mit vorgegebenen Bezugsgrößen statt. Ergebnis des Messens ist ein Messwert auf einer Kardinalskala mit einem definierten Nullpunkt. Darüber hinaus sind in der betrieblichen Praxis der industriellen Montage eine große Anzahl an Sonderfunktionen auszuführen – wie zum Beispiel das Aufspielen von Software auf ein Gerät, das individuelle Markieren oder das Verpacken eines Produktes.

---

## 1.4 Montagesysteme als spezielle Arbeitssysteme

Ein Montagesystem stellt entsprechend des Arbeitssystemansatzes ein abgegrenztes, aber zugleich offenes, sozio-technisches System dar (Heeg 1988), welches den Zweck hat, Erzeugnisse zu montieren. Systeme sind gegenüber ihrer Umwelt abgegrenzt. Offenheit kommt dadurch zustande, dass das System aus seiner Umwelt Eingaben erhält, zu denen insbesondere Informationen zum Montageauftrag, bereitgestellte Einzelteile als Montageobjekte und Energie zählen (s. Abb. 1.3). Durch das zielgerichtete Zusammenwirken von Betriebsmitteln und Beschäftigten sowie der Beschäftigten untereinander werden mit Hilfe der Systemeingaben Erzeugnisse montiert. Der Vorgang der Transformation von Eingaben in Ausgaben wird auch als Montageprozess bezeichnet. Während dieses Prozesses wirken physikalische Umwelteinflüsse auf die Beschäftigten ein. Diese werden als Arbeitsumgebung bezeichnet (Schlick et al. 2018). Bei der Gestaltung von manuellen Montagesystemen ist die Beleuchtung eine wichtige Arbeitsumgebungsgröße. Führung soll das Erreichen von Sachzielen (montierte Erzeugnisse in der geforderten Menge und Qualität) und Effizienzzielen (z. B. Arbeitsproduktivität) unterstützen (Grochla 1978) und beinhaltet die Einflussnahme des Führenden auf den Geführten und umgekehrt (Neuberger 2002).

Bei der Gestaltung eines Montagesystems stellt sich im Hinblick auf einzelne Systemelemente (s. Abb. 1.3) eine Vielzahl an Fragen, von denen eine Auswahl nachfolgend aufgeführt wird:



**Abb. 1.3** Modell eines Montagesystems (nach Schlick et al. 2018, modifiziert)

1. Welche *Eingaben* sind zur Ausführung der Montageaufgabe erforderlich? Wie sind einzelne Eingaben bereitzustellen (z. B. Aufbereitung der Auftragsinformationen, Art der Teilebehälter und Ort ihrer Bereitstellung)?
2. Welche Anforderungen bestehen im Hinblick auf die Ausführung der *Montageaufgabe* (Produktionsmengen, Produktvarianten, Auftragsstruktur, Qualität etc.)?
3. Wie ist der *Montageprozess* zu gestalten, damit Sach- und Effizienzziele erreicht werden? Welche Methoden kommen bei der Prozessgestaltung zur Anwendung (z. B. REFA-Zeitaufnahme, MTM, Vorranggraph)?
4. Wie soll die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Betriebsmitteln vorgenommen werden? Wie viele *Beschäftigte* werden benötigt? Wie ist die Arbeitsorganisation zu gestalten? Wie werden Beschäftigte qualifiziert?
5. Welcher Montagesystemtyp entspricht den Systemanforderungen am besten? Welche *Arbeits- und Betriebsmittel* werden benötigt? Lassen sich Ansätze der Einfachautomation (Takeda 2006) umsetzen? Welche Informations- und Kommunikationstechnik wird benötigt, um ein anforderungsgerechtes Informationsmanagement zu realisieren?
6. Wie werden einzelnen *Montageobjekte* im Arbeitssystem bereitgestellt?
7. Wie hat *Führung* zu erfolgen, um die Systemziele, bei denen nach Sach- und Effizienzzielen unterschieden werden kann, nachhaltig zu erreichen und motivationsfördernde Arbeitsbedingungen zu schaffen?

8. Wie ist die *Arbeitsumgebung*, insbesondere die Beleuchtung, zu gestalten, damit gute ergonomische Arbeitsbedingungen für die Beschäftigten entstehen?
9. Welche Anforderungen bestehen an die *Ausgaben* (z. B. Auftragsdokumentation, Verpackungsvorschriften, Kennzeichnung der Fertigware)?

Bei der Gestaltung eines Montagesystems kommt dem Montageprozess eine zentrale Bedeutung zu. Der Montageprozess (s. Abb. 1.3) wird in Ablaufabschnitte untergliedert (REFA 1997) und beschreibt Abschnitt für Abschnitt das Zusammenwirken von Beschäftigten, Arbeits- und Betriebsmitteln sowie Montageobjekten. Jeder einzelne Ablaufabschnitt kann als Transformation einer Eingabe in eine Ausgabe interpretiert werden. Montageprozessbeschreibungen stellen Standards dar und bieten damit den Beschäftigten Orientierung und Handlungsanleitung (z. B. Imai 1998). Darüber hinaus bilden diese Standards, die auch als Montageanleitung oder -anleitung bezeichnet werden, eine Grundlage für Lernprozesse, indem der bestehende Standard hinterfragt und kontinuierlich weiterentwickelt wird (z. B. Imai 1998). Komplexe, arbeitsteilig ausgeführte manuelle Montageprozesse – beispielsweise in der Automobilmontage – werden vielfach mit Hilfe von Vorranggraphen (Bokranz und Landau 2006) geplant.

#### **Planung von Montageprozessen mittels Vorranggraph**

Zu Planungszwecken wird der komplexe Montageprozess in Ablaufabschnitte unterteilt. Ein Ablaufabschnitt, auch als Verrichtung bezeichnet, umfasst häufig das Aufnehmen und Platzieren eines einzelnen Bauteils. In der Regel wird jeder Verrichtung eine Planzeit für ihre Ausführung zugeordnet. Verrichtungen werden auf Basis der Erzeugnisstruktur in logische Beziehungen zueinander gesetzt, indem einer Verrichtung eine oder mehrere vorangehende und eine oder mehrere nachfolgende Verrichtungen zugeordnet werden. Der Vorranggraph beinhaltet demnach sämtliche Verrichtungen für die Montage eines Erzeugnisses und verdeutlicht visuell, welche Optionen bei der Festlegung der Reihenfolge von Verrichtungen bestehen. Der Vorranggraph bildet für die Planung der Arbeitsorganisation und insbesondere für die Austaktung von Montagelinien eine wichtige Grundlage.

---

## **1.5 Montagesystemtypen**

Abb. 1.3 zeigt ein Modell eines Montagesystems, also eine idealisierte Darstellung, die wesentliche Systemelemente und ihre Beziehungen untereinander verdeutlichen soll. Diese Darstellung ist bewusst so abstrakt gehalten, damit beispielsweise jedes real existierende Montagesystem anhand dieses Modells analysiert und beschrieben werden kann. Dabei fällt jedoch auf, dass die einzelnen Systemelemente von Montagesystem zu Montagesystem ganz unterschiedlich ausgeprägt sind. Gleiches gilt für die Beziehungen der Elemente zueinander. Fast kein reales Montagesystem gleicht dem anderen und dennoch wird