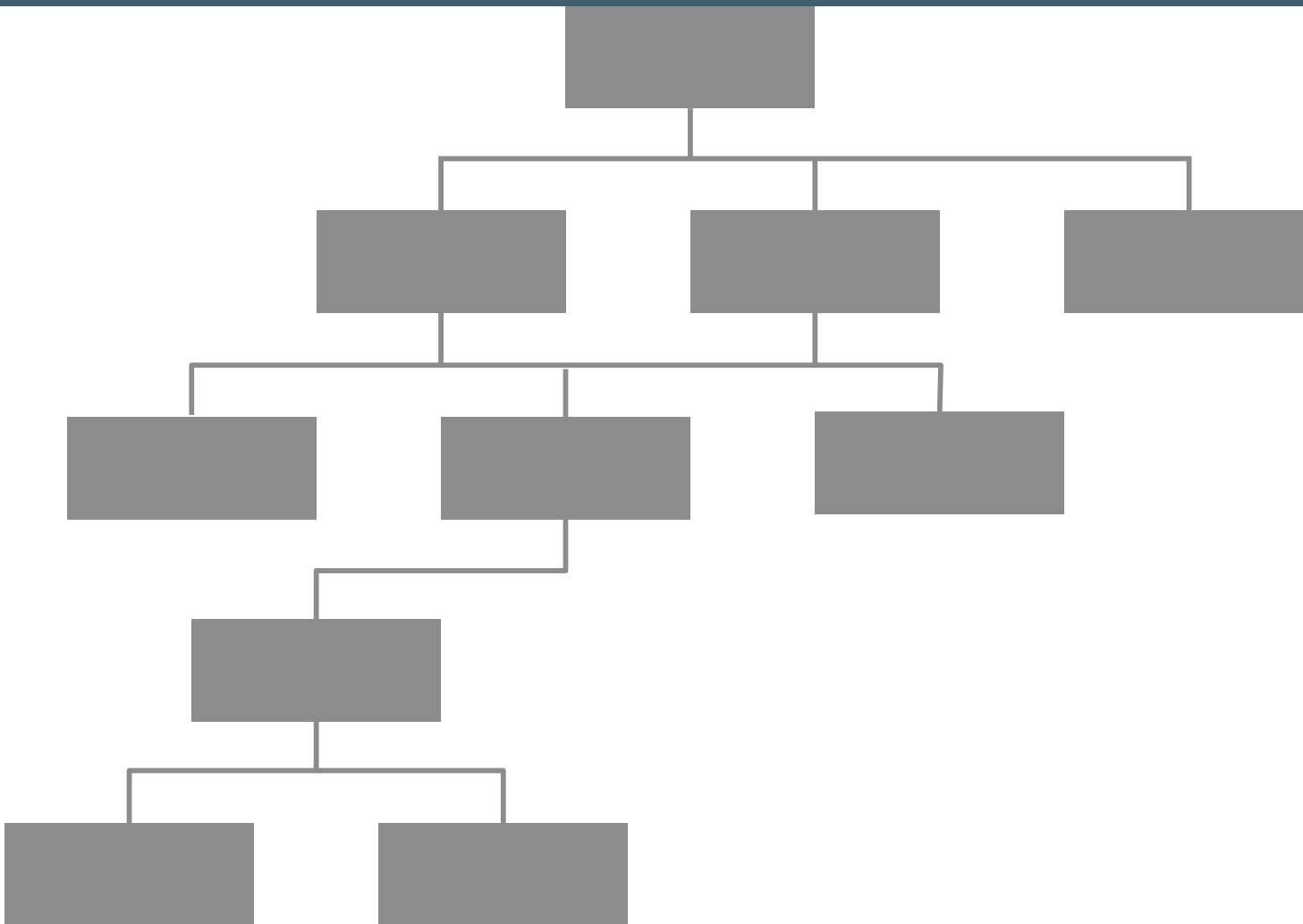


Axel Korge

Ein Verfahren zur Generierung von Fertigungsstücklisten im Rahmen von Anpassungsplanungen



SCHRIFTENREIHE ZU ARBEITSWISSENSCHAFT UND TECHNOLOGIEMANAGEMENT

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dieter Spath

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e. h. mult. Dr. h. c. mult. Hans-Jörg Bullinger

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT
der Universität Stuttgart, Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart

Band 19

Axel Korge

Ein Verfahren zur Generierung von Fertigungsstücklisten
im Rahmen von Anpassungsplanungen

Impressum

Kontaktadresse:

*Institut für Arbeitswissenschaft
und Technologiemanagement IAT
der Universität Stuttgart und
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-01, Fax -2299
www.iat.uni-stuttgart.de
www.iao.fraunhofer.de*

*Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft
und Technologiemanagement*

Herausgeber:

*Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h. c. Dieter Spath
Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. mult.
Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger*

*Institut für Arbeitswissenschaft
und Technologiemanagement IAT
der Universität Stuttgart und
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO*

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

*Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet
diese Publikation in der Deutschen National-
bibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über www.dnb.de abrufbar.*

ISSN 2195-3414

ISBN 978-3-8396-0867-8

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2015

Druck und Weiterverarbeitung:

*IRB Mediendienstleistungen
Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB, Stuttgart*

*Für den Druck des Buches wurde chlor-
und säurefreies Papier verwendet.*

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2015

*Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-2500, Fax -2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
<http://verlag.fraunhofer.de>*

Alle Rechte vorbehalten

*Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile ur-
heberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über
die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hin-
ausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Ver-
lages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere
für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfil-
mungen sowie die Speicherung in elektronischen
Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnun-
gen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt
nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen
im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-
Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und des-
halb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit
in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze,
Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug
genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann
der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständig-
keit oder Aktualität übernehmen.*

Geleitwort

Grundlage der Arbeiten am Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart und am kooperierenden Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO ist die Überzeugung, dass unternehmerischer Erfolg in Zeiten globalen Wettbewerbs vor allem bedeutet, neue technologische Potenziale nutzbringend einzusetzen. Deren erfolgreicher Einsatz wird vor allem durch die Fähigkeit bestimmt, kunden- und mitarbeiterorientiert Technologien schneller als die Mitbewerber zu entwickeln und anzuwenden. Dabei müssen gleichzeitig innovative und anthropozentrische Konzepte der Arbeitsorganisation zum Einsatz kommen. Die systematische Gestaltung wird also erst durch die Bündelung von Management- und Technologiekompetenz ermöglicht. Dabei wird durch eine ganzheitliche Betrachtung der Forschungs- und Entwicklungsthemen gewährleistet, dass wirtschaftlicher Erfolg, Mitarbeiterinteressen und gesellschaftliche Auswirkungen immer gleichwertig berücksichtigt werden.

Die im Rahmen der Forschungsarbeiten an den Instituten entstandenen Dissertationen werden in der »Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement« veröffentlicht. Die Schriftenreihe ersetzt die Reihe »IPA-IAO Forschung und Praxis«, herausgegeben von H. J. Warnecke, H.-J. Bullinger, E. Westkämper und D. Spath. In dieser Reihe sind in den vergangenen Jahren über 500 Dissertationen erschienen. Die Herausgeber wünschen den Autoren, dass ihre Dissertationen aus den Bereichen Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement in der breiten Fachwelt als wichtige und maßgebliche Beiträge wahrgenommen werden und so den Wissensstand auf ein neues Niveau heben.



Dieter Spath



Hans-Jörg Bullinger

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in Stuttgart.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Dieter Spath, Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaft und Technologie-management IAT der Universität Stuttgart und des Fraunhofer IAO, für die wissenschaftliche Unterstützung und die wohlwollende Förderung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz, Leiter des Instituts für Konstruktionstechnik und Technisches Design, danke ich für die wertvollen Anregungen und die Übernahme des Mitberichts.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer IAO gilt mein Dank für die Zusammenarbeit sowie für die Motivation und Unterstützung beim Erstellen der Arbeit.

Insbesondere bedanke ich mich bei Dr. Sebastian Schlund, Dr. Stefan Gerlach und Prof. e.h. Hans-Peter Lentjes für die kritische Durchsicht der Arbeit.

Ein wichtiger Dank geht an die studentischen Mitarbeiterinnen Alina Zaretser sowie besonders an Maria Reisinger.

Vor allem danke ich meiner lieben Gabi und meinen Kindern für Motivation und Geduld während all der gemeinsamen Jahre.

Stuttgart im März 2015

Axel Korge

Lebenslauf

Axel Korge
Jahrgang 1955

Ausbildung:

Dipl.-Ing Maschinenbau, Universität Stuttgart,
Schwerpunkte Fabrikbetriebslehre und Angewandte Informatik

seit 1985

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Fachgebiet

Ganzheitliche Produktionssysteme (Lean-Management) mit Schwerpunkt auf Arbeitsgestaltung und Strukturierung von Montagen und Materialbereitstellung

Ein Verfahren zur Generierung von Fertigungsstücklisten im Rahmen von Anpassungsplanungen

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Axel Korge
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Oktober 2014

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT
der Universität Stuttgart

2014

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen	15
Kurzfassung	16
Abstract	16
1 Einleitung	17
1.1 Die Fertigungsstückliste	17
1.2 Festlegung von Montagebaugruppen	20
1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung	21
1.4 Aufbau der Arbeit	23
2 Fertigungsstücklisten im Fabrikbetrieb	25
2.1 Anpassungsplanung bei der Erstellung von Fertigungsstücklisten	25
2.2 Erzeugnisstrukturen und Strukturstücklisten	28
2.3 Funktions- und fertigungsgerechte Gliederung	29
2.4 Bedeutung der Fertigungsstückliste	29
2.5 Erstellung von Fertigungsstücklisten mit Standard-IT-Systemen	31
3 Fertigungsgerechte Erzeugnisstrukturierung	33
3.1 Relevanz in aktuellen Forschungsaktivitäten	33
3.1.1 Fabrikplanung: Gestaltung schlanker Produktionssysteme	33
3.1.2 Globalisierung: Verlagerung von Teilmengen der Produktion	34
3.1.3 Variantenmanagement: Module und Baukästen bei Mass-Customization	35
3.1.4 Konstruktionsmethodik: Design for Assembly	36
3.1.5 Produktdatenmanagement: Datengliederung für die Digitale Fabrik	36
3.2 Bekannte Verfahren zur Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen	37
3.2.1 Fügeflächenanalyse (Gairola 1981)	37
3.2.2 Erzeugnis- und Montagestrukturierung (Ungeheuer 1986)	37
3.2.3 Wissensbasierter Entwurf montagegerechter Produkte (Richter 1991)	38
3.2.4 Variant Mode and Effects Analysis - VMEA (Caesar 1991)	39
3.2.5 Montagegerechte Produktgestaltung (Spies 1997)	39
3.2.6 Modulare Produktentwicklung (Göpfert 1998)	39
3.2.7 Modular Function Deployment - MFD (Erixon 1998)	40

3.2.8	Produktstrukturierung (Rapp 1999)	41
3.2.9	Modularisierung von Produkten im Anlagenbau (Baumgart 2005)	41
3.2.10	Globalisierungsgerechte Produktstrukturierung (Große-Heitmeyer 2006)	42
3.2.11	Iterative Produktstruktur-Optimierung (Zagel 2006)	42
3.2.12	Produktstrukturierung für mechatronische Systeme (Steffen 2007)	43
3.2.13	Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle (Bossmann 2007)	43
3.2.14	Entwicklung modularer Produktfamilien (Blees 2011)	44
3.2.15	Bewertung der bekannten Verfahren	44
4	Automatische Anpassungsplanung statt manueller Neuplanung	50
4.1	Lösungsansatz	50
4.2	Begründung des Lösungsansatzes	53
4.3	Innovation des zu entwickelnden Verfahrens	54
4.4	Verfahrensspezifische Konzepte zur Umsetzung der Ziele	54
4.4.1	Effizienz durch Algorithmierbarkeit	55
4.4.2	Effektivität durch wirksame Ähnlichkeitsanalyse	55
4.4.3	Universalität durch Anwendung der Prädikatenlogik	56
5	Entwurf eines Stücklisten-Adaptors	58
5.1	Definition von Begriffen für den Stücklisten-Adaptor	58
5.2	Integritätsbedingungen	58
5.3	Ausgangssituation bei der Anpassungsplanung	61
5.4	Schritt 1: Vergleich der Konstruktionsstücklisten	63
5.4.1	Explizieren von Ähnlichkeitsrelationen mit Inferenzregeln	63
5.4.2	Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen	70
5.5	Schritt 2: Erstellung der neuen Fertigungsstückliste	72
5.5.1	Kopieren von Baukomponenten in die neue Fertigungsstückliste	73
5.5.2	Manuelle Überarbeitung der neuen Fertigungsstückliste	76
5.5.3	Vier Wege in die neue Fertigungsstückliste	78
5.6	Gesamtablauf des Verfahrens	80
6	Eindeutige, prädikatenlogische Beschreibung der Modelle und Methoden	82
6.1	Einführung in die Prädikatenlogik mit Prolog	83
6.1.1	Fakten, Regeln, Anfragen und Inferenzmechanismus	83
6.1.2	Auswertung eines prädikatenlogischen Regelsystems	86
6.2	Die Methode zum Vergleich der Konstruktionsstücklisten	89

6.2.1	Inferenzregeln erzeugen neue Ähnlichkeitsrelationen	89
6.2.2	Das Regelwerk	91
6.3	Die Methode zur Generierung der neuen Fertigungsstückliste	92
6.3.1	Definition von Teilmengen	92
6.3.2	Zuordnungskriterien und Aktionen	96
6.4	Das Modell zur Abbildung von Zusammenhängen zwischen Erzeugnissen	100
6.4.1	Relationstypen	100
6.4.2	Attribute, die den Bezug zu Stücklisten und Baukomponenten herstellen	102
6.4.3	Das Attribut "Verantwortlicher"	103
6.4.4	Das Attribut "Sicherheit"	103
6.4.5	Das Attribut "Quantität"	104
6.4.6	Abspeicherung neuer Ähnlichkeitsrelationen	105
7	Evaluierung	106
7.1	Theoretische Evaluierung: Das Verfahren ist universell	106
7.1.1	Nachweis der Universalität	106
7.1.2	Prognose der Effizienz	106
7.2	Praktische Anwendung 1: Das Verfahren ist effizient	108
7.2.1	Ausgangssituation für das Praxisbeispiel 1	108
7.2.2	Automatische Ableitung von Ähnlichkeitsrelationen	110
7.2.3	Kombinatorische Mehrdeutigkeiten	112
7.2.4	Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen	113
7.2.5	Automatische Ableitung der neuen Fertigungsstückliste	114
7.2.6	Manuelle Überarbeitung der neuen Fertigungsstückliste	118
7.3	Praktische Anwendung 2: Das Verfahren ist effektiv	120
7.3.1	Ausgangssituation für das Praxisbeispiel 2	120
7.3.2	Schritt 1: Vergleich der Konstruktionsstücklisten	121
7.3.3	Schritt 2: Erstellung der neuen Fertigungsstückliste	122
7.4	Zusammenfassung der Evaluierungen	123
8	Zusammenfassung	125
9	Ausblick	127
10	Anhang 1: Inferenzregeln	129
10.1	Regeln zur Ermittlung der einstufigen Verwendungen (Regelgruppe HOE)	129
10.2	Regeln zur Ermittlung des einstufigen Aufbaus (Regelgruppe HUE)	132
10.3	Regeln zur Ermittlung der mehrstufigen Verwendung (Regelgruppe HOM)	134

10.4 Regeln zur Ermittlung des mehrstufigen Aufbaus (Regelgruppe HUM)	136
10.5 Regeln zur Ermittlung der Ersetzung (Regelgruppe ERS)	137
10.6 Regeln bezüglich gleicher Sachnummer (Regelgruppe GLEICH)	141
10.7 Regeln für das Erzeugnis (Regelgruppe WURZEL)	142
10.8 Regeln für Einzelteile (Regelgruppe BLATT)	143
10.9 Hilfsregeln	144
11 Anhang 2: Ähnlichkeitsrelationen	145
11.1 Auswahl sinnvoller Ausprägungen des Attributs "Quantität"	145
11.2 Vergleich und Speicherung neuer Ähnlichkeitsrelationen	146
11.2.1 Definition von Typen des Informationsgehalts	147
11.2.2 Vergleich der Quantitäten	149
11.2.3 Vergleich der Sicherheit	149
11.2.4 Vergleich des Verantwortlichen	150
11.2.5 Aktionen als Folge des Vergleichs der Ähnlichkeitsrelationen	150
11.3 Aktionen zur Behandlung von Widersprüchen	152
11.4 Das Prinzip der Ursprungs- und Folgeänderungen	154
12 Literatur	156

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Die Strukturstückliste als Darstellungsform der Erzeugnisstruktur	17
Abbildung 2:	Bedeutung der Fertigungsstückliste im Produktionsunternehmen	18
Abbildung 3:	Entwickeln und Konstruieren gemäß VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221]	19
Abbildung 4:	Evaluierbare Ziele des zu entwickelnden Verfahrens	22
Abbildung 5:	Charakterisierung des zu entwickelnden Verfahrens	23
Abbildung 6:	Merkmale der Planungsarten (in Anlehnung an [Schw11])	25
Abbildung 7:	Zuordnung von Konstruktionsphasen zu Konstruktionsarten [Fis08]	27
Abbildung 8:	Eigenschaften der Planungsarten	28
Abbildung 9:	Die Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen als Querschnittsthema aktueller Forschungsfelder	33
Abbildung 10:	Eignung der Verfahren für das Tagesgeschäft im Stücklistenwesen	49
Abbildung 11:	Die Idee des neuen Verfahrens	51
Abbildung 12:	Konstruktions- und Fertigungsstückliste zu einem Erzeugnis bestehen aus den gleichen Einzelteilen	60
Abbildung 13:	Ausgangssituation im einführenden Beispiel	62
Abbildung 14:	Der 2-stufige Aufbau des Stücklisten-Adaptors	63
Abbildung 15:	Konstruktionsstücklisten als Eingangsdaten für den Stücklisten-Adaptor	63
Abbildung 16:	Explizit abgespeicherten Zusammenhänge (Zwischenstand 1)	65
Abbildung 17:	Explizit abgespeicherte Zusammenhänge (Zwischenstand 2)	66
Abbildung 18:	Explizit abgespeicherten Zusammenhänge (Zwischenstand 3)	68
Abbildung 19:	Explizit abgespeicherte Ersetzungen nach der automatischen Ableitung	69
Abbildung 20:	Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen (Ausgangszustand)	71
Abbildung 21:	Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen (Zwischenzustand)	72
Abbildung 22:	Kopieren einer unveränderten Baukomponente in die neue Fertigungsstückliste	73
Abbildung 23:	Kopieren einer veränderten Baukomponente in die neue Fertigungsstückliste	74
Abbildung 24:	Kopieren weiterer Baukomponenten in die neue Fertigungsstückliste	74
Abbildung 25:	Generierung einer unveränderten Fertigungsbaugruppe aus ihren Kindern	75
Abbildung 26:	Generierung einer veränderten Fertigungsbaugruppe aus ihren Kindern	75
Abbildung 27:	Fertigstellen der neuen Fertigungsstückliste	76
Abbildung 28:	Manuelle Überarbeitung der neuen Fertigungsstückliste	77
Abbildung 29:	Partielle Neuplanung der neuen Fertigungsstückliste	78
Abbildung 30:	Ablauf und Bausteine des Stücklisten-Adaptors.	81
Abbildung 31:	Möglichkeiten zur Abbildung von Stücklisten	84
Abbildung 32:	Anwendung der Regel 30 im einleitenden Beispiel	87
Abbildung 33:	Entfallende, ersetzte und hinzukommende Baukomponenten	93

Abbildung 34:	Un-, konstruktions- und fertigungsspezifische Baukomponenten	94
Abbildung 35:	Kombination der Relationen	96
Abbildung 36:	Mögliche Ausprägungen der Ähnlichkeitsrelationen	102
Abbildung 37:	Ausgangssituation im Praxisbeispiel 1	109
Abbildung 38:	Formaler Vergleich der Konstruktionsstücklisten im Praxisbeispiel 1	111
Abbildung 39:	Entstehung kombinatorischer Mehrdeutigkeiten	113
Abbildung 40:	Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen im Praxisbeispiel 1	114
Abbildung 41:	Formale Ableitung der neuen Fertigungsstückliste im Praxisbeispiel 1	117
Abbildung 42:	Manuelle Überarbeitung der neuen Fertigungsstückliste im Praxisbeispiel 1	119
Abbildung 43:	Ersetzbarkeit von Ausprägungen der Quantität	146
Abbildung 44:	Die relevanten Ausprägungen des Attributs Quantität	146
Abbildung 45:	Definition der Typen des Informationsgehalts	148
Abbildung 46:	Ableiten einer Vergleichsrelation durch Vergleich der Ausprägungen des Attributs Quantität	149
Abbildung 47:	Aktionen als Folge des Vergleichs von Ähnlichkeitsrelationen	151

Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen

ä _{bk} ho _e (...)	Ähnlichkeitsrelation: Einstufige Verwendung
ä _{bk} ho _m (...)	Ähnlichkeitsrelation: Mehrstufige Verwendung
ä _{bk} hu _e (...)	Ähnlichkeitsrelation: Einstufiger Aufbau
ä _{bk} hu _m (...)	Ähnlichkeitsrelation: Mehrstufiger Aufbau
ä _{bk} ersetzung (...)	Ähnlichkeitsrelation: Ersetzung
Abb.	Abbildung
BK	Baukomponente (Baugruppe oder Einzelteil)
BK _{alt}	Baukomponente in der alten Stückliste
BK _{neu}	Baukomponente in der neuen Stückliste
F-	Fertigungs...
F-BK	Fertigungsspezifische Baukomponente
F-BK _{entfällt}	Teilmenge der entfallenden fertigungsspezifischen Baukomponenten
F-BK _{ersetzt}	Teilmenge der ersetzten fertigungsspezifischen Baukomponenten
F-BK _{hinzu}	Teilmenge der hinzukommenden fertigungsspezifischen Baukomponenten
F-St	Fertigungsstückliste
K-	Konstruktions...
K-BK	Konstruktionsspezifische Baukomponente
K-BK _{ersetzt}	Teilmenge der ersetzten konstruktionsspezifischen Baukomponenten
K-BK _{entfällt}	Teilmenge der entfallenden konstruktionsspezifischen Baukomponenten
K-BK _{hinzu}	Teilmenge der hinzukommenden konstruktionsspez. Baukomponenten
St _{alt}	Alte Stückliste (des bereits geplanten Erzeugnisses)
St _{neu}	Neue Stückliste (des zu planenden Erzeugnisses)
U-	Unspezifische ...
U-BK	Unspezifische Baukomponente
U-BK _{entfällt}	Teilmenge der entfallenden unspezifischen Baukomponenten
U-BK _{ersetzt}	Teilmenge der ersetzten unspezifischen Baukomponenten
U-BK _{hinzu}	Teilmenge der hinzukommenden unspezifischen Baukomponenten

Kurzfassung

Der Stücklisten-Adaptor ist ein Verfahren zur Generierung von Fertigungsstücklisten im Rahmen von Anpassungsplanungen. Anpassungsplanungen sind Vorgehensweisen, die zur Erstellung neuer Pläne auf vorhandene Pläne zurückgreifen. In der Praxis werden Anpassungsplanungen für mindestens die Hälfte der zu planenden Erzeugnisse durchgeführt.

Der Stücklisten-Adaptor hat das Potenzial, den Aufwand im Stücklistenwesen von Produktionsunternehmen signifikant zu reduzieren. Eine Evaluierung anhand von zwei Praxisbeispielen zeigt, dass über 80% der Montagebaugruppen in der neuen Fertigungsstückliste automatisch und korrekt ermittelt werden konnten. Zusatzaufwände zur Anwendung des Verfahrens entstehen nicht, insbesondere muss keine verfahrensspezifische Datenbasis gepflegt werden.

Das Verfahren ist eindeutig und vollständig beschrieben und es ist einfach genug, um mit aktuell verfügbarer IT-Technologie programmiert zu werden. Eine Umsetzung in Unternehmenssoftware, etwa in Systeme für Enterprise-Resource-Planning (ERP) oder Produktdatenmanagement (PDM), ist problemlos möglich.

Abstract

The so-called BOM Adaptor is a method for generating a manufacturing bill of materials (BOM) in the context of adaptation planning. Adaptation planning offers an approach to generate new plans based on existing plans. In practice adaptation planning is used for at least half of new product development projects.

BOM Adaptor has the potential to reduce the effort for production planning in manufacturing companies significantly. An evaluation based on two practical examples shows that over 80% of the subassemblies could be determined automatically and correctly in the new manufacturing BOM. There are no additional efforts for applying the method in particular no procedure-specific database needs to be maintained.

The method is described mathematically accurate and complete and it is simple enough to be programmed with currently available information technology. An implementation in enterprise software such as enterprise resource planning (ERP) and product data management (PDM) should be no problem.

1 Einleitung

Stücklisten bilden gemeinsam mit Zeichnungen und Arbeitsplänen die Basis des betrieblichen Datenbestands und damit die Grundlage der weiteren Informationsverarbeitung im Produktionsunternehmen [Spa11-1, Wes06]. Strukturstücklisten dokumentieren die Erzeugnisstruktur, das ist die mengenmäßige Zusammensetzung eines Erzeugnisses aus seinen Baugruppen und Einzelteilen, wobei jede Baugruppe jeweils bis zu ihrer niedrigsten Ebene aufgegliedert ist [DIN199], [Dan09]. Abbildung 1 stellt einer beispielhaften Erzeugnisstruktur die entsprechende Strukturstückliste gegenüber.

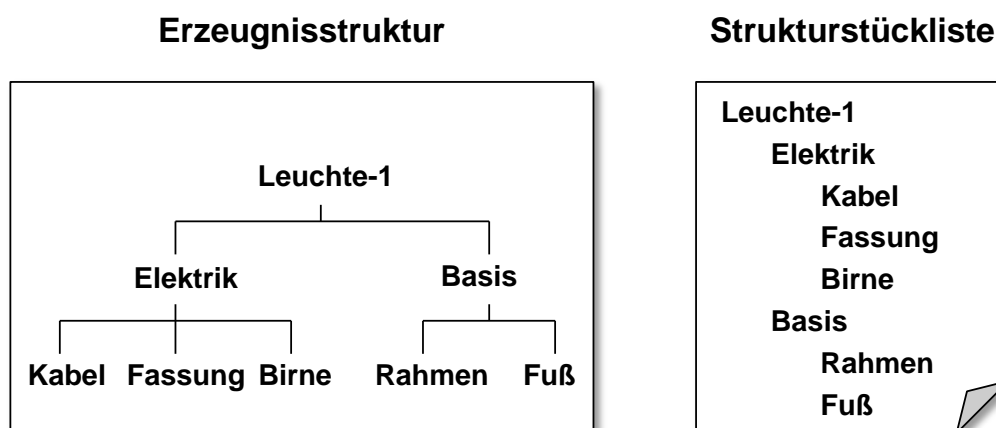


Abbildung 1: Die Strukturstückliste als Darstellungsform der Erzeugnisstruktur

Strukturstücklisten können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten gebildet werden. Konstruktionsstücklisten¹ werden nach funktionalen Gesichtspunkten gegliedert, sie zählen die zur Erfüllung bestimmter Funktionen notwendigen Einzelteile und Konstruktionsbaugruppen auf.

1.1 Die Fertigungsstückliste

Die Fertigungsstückliste² wird entsprechend dem Fertigungs- und Montageablauf gegliedert. Sie dokumentiert, wie ein bestimmtes Erzeugnis³ aus Einzelteilen und Montagebaugruppen hergestellt wird, und dient schlussendlich dazu, die erforderlichen Teile und Baugruppen von der Beschaffung über die verschiedenen Fertigungsschritte bis zu den Montagen zu disponie-

¹ Die Konstruktionsstückliste repräsentiert die funktionale Erzeugnisstruktur eines Erzeugnisses, also den Aufbau aus Konstruktionsbaugruppen.

² Die Fertigungsstückliste repräsentiert die fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur eines Erzeugnisses, also dessen Aufbau aus Montagebaugruppen.

³ Gebräuchlich ist auch der Begriff Produkt. In Übereinstimmung mit /Din199/ wird in dieser Arbeit der Begriff Erzeugnis verwendet.

ren und zu steuern. Fertigungsstücklisten bilden eine unverzichtbare Basis für die Produktionssteuerung und alle wesentlichen Auswertungen des Materialwesens [Gru03], [Wes06], [Wie08]. Neben Produktion und Auftragsabwicklung nutzen auch weitere Unternehmensfunktionen fertigungsgerechte Erzeugnisstrukturen⁴ (Abbildung 2).

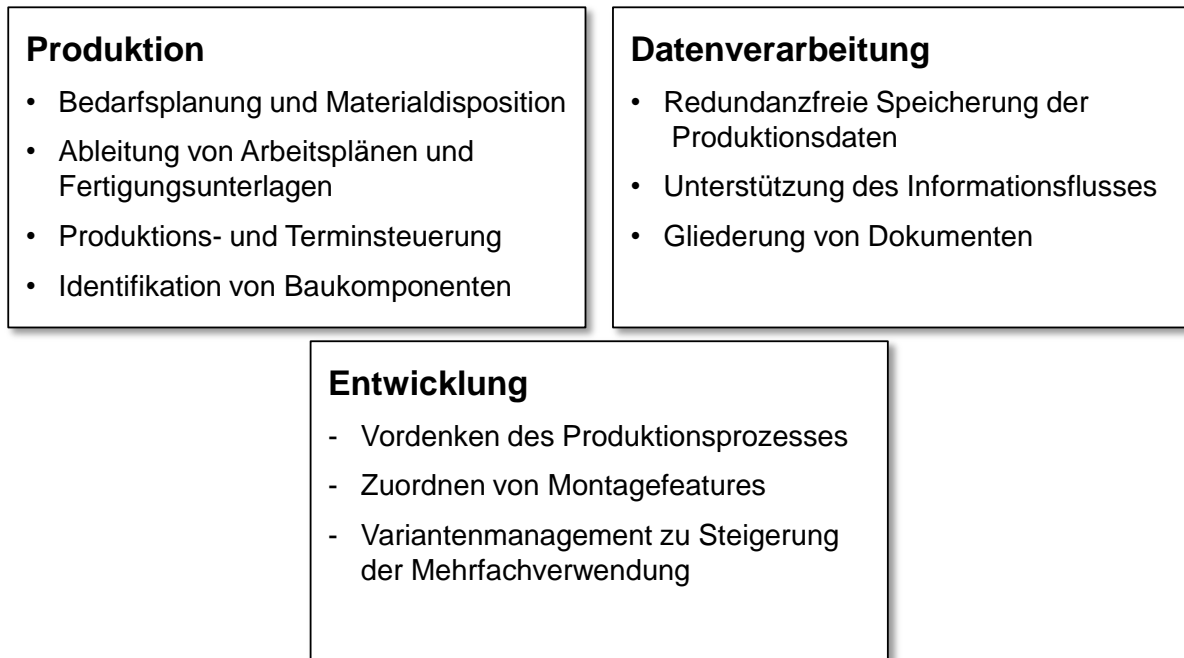


Abbildung 2: Bedeutung der Fertigungsstückliste im Produktionsunternehmen

Die Stücklisten für ein Erzeugnis werden im letzten Arbeitsschritt des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses formal erstellt (Abbildung 3)⁵. Hierbei wird die Produktdokumentation fertiggestellt, die die Einzelteil-, Baugruppen- und Gesamtzeichnungen, die Stücklisten und weitere Vorschriften und Anleitungen enthält. Allerdings entsteht bereits im Arbeitsschritt 4 eine fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur, die im Gegensatz zur Funktions- oder Wirkstruktur bereits die Gliederung der Lösung erkennen lässt [Spa11-1]. Noch früher im Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses werden die Freiräume zur Gestaltung einer fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur festgelegt. Der Gestaltungsgrad eines Erzeugnisses nach Design for X-Kriterien sinkt, wenn die Funktionsstruktur ungeeignet gewählt wird. Damit hierdurch kein Potenzial ungenutzt bleibt, muss der Konstrukteur den Fertigungsprozess und weitere Abhängigkeiten frühzeitig proaktiv berücksichtigen [Bin10], [IKTD13].

⁴ Der Sprachgebrauch ist in den unterschiedlichen Fachbereichen uneinheitlich. Im Fabrikbetrieb ist der Begriff Fertigungsstückliste üblich, während in der Forschung zu Fabrikplanung und Fabrikbetrieb eher die Begriffe Erzeugnisstruktur oder Erzeugnisgliederung verwendet werden. Bei Konstruktionsmethoden und beim Variantenmanagement wird oft der Begriff Produktstruktur benutzt.

⁵ Stücklisten können für unterschiedliche Zwecke erstellt werden, etwa Beschaffungs-, Ersatzteil- oder Kalkulationsstücklisten. Das zu entwickelnde Verfahren wird am Beispiel der Generierung von Fertigungsstücklisten entwickelt.

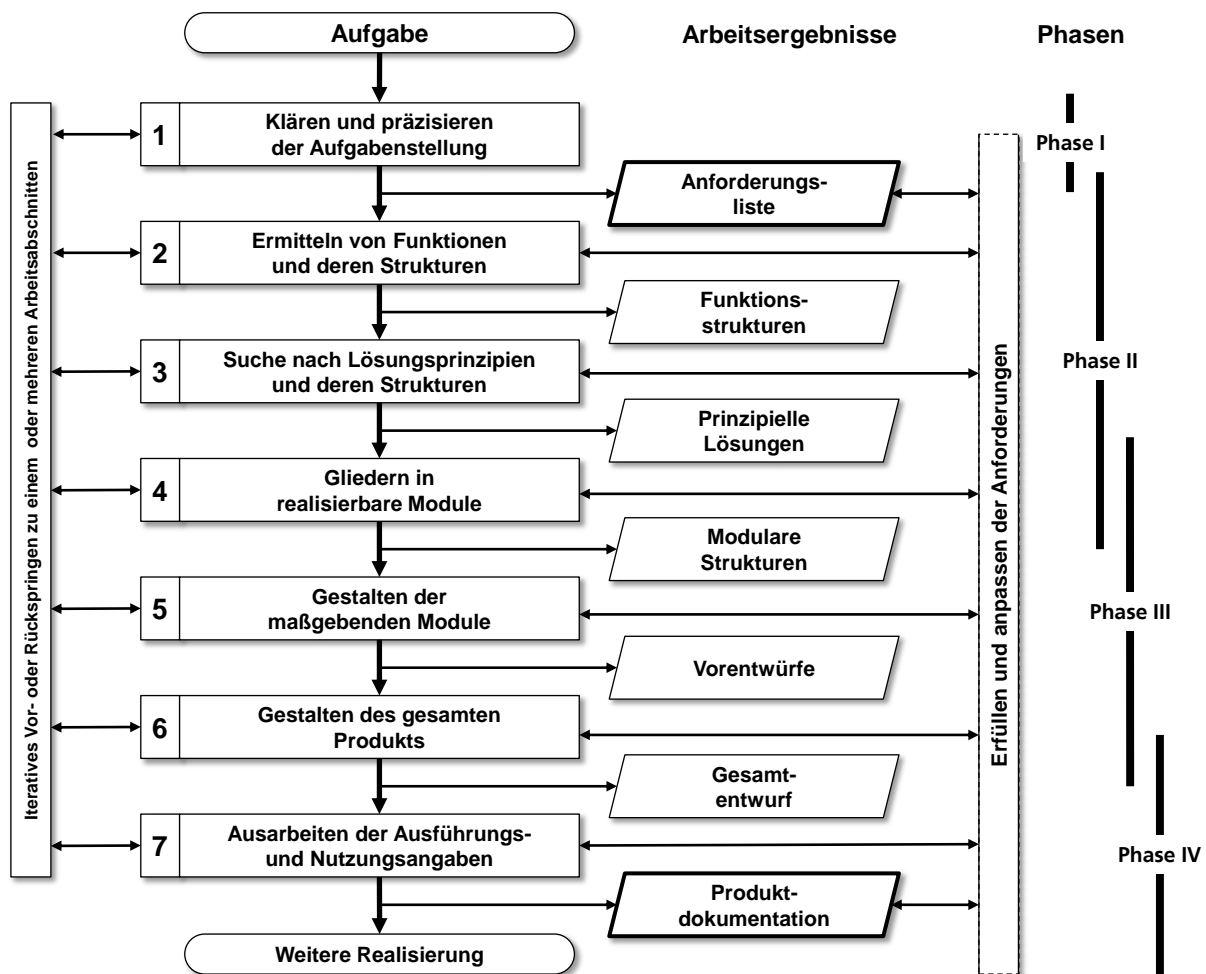


Abbildung 3: Entwickeln und Konstruieren gemäß VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221]

Zunächst entsteht die Konstruktionsstückliste, aus ihr wird die Fertigungsstückliste abgeleitet. Ableiten einer Fertigungsstückliste bedeutet, die Konstruktionsstückliste eines Erzeugnisses so umzuarbeiten, dass eine fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur entsteht. Dazu werden Konstruktionsbaugruppen, die nicht wirtschaftlich montiert werden können, aufgelöst und stattdessen werden Montagebaugruppen festgelegt.

Damit ein Erzeugnis eindeutig bestimmt werden kann, muss zu jedem Erzeugnis eine Stückliste vorhanden sein [Kur09]. Der Aufwand für das Stücklistenwesen ist beträchtlich⁶. Zwar können Konstruktionsstücklisten mit hoher EDV-Unterstützung erzeugt werden, da Konstruktionszeichnungen normalerweise entsprechend den Funktionen des Erzeugnisses gegliedert sind [Köh02]. Die anschließende Ableitung der Fertigungsstückliste ist aber ein aufwändiger, konzeptioneller Planungsschritt.

⁶ Ältere Quellen beziffern den Aufwand für das Stücklistenwesen auf 20% der Entwicklungstätigkeiten [Kom98].

1.2 Festlegung von Montagebaugruppen

Konstruktionsbaugruppen, die nicht wirtschaftlich montiert werden können, zu erkennen und geeignete Montagebaugruppen festzulegen, ist methodisch herausfordernd. Eine Montagebaugruppe muss montiert, geprüft, gebucht, transportiert und gelagert werden können. Mit den bisher bekannten Verfahren erforderte die Festlegung von Montagebaugruppen die Kreativität und das Produktionswissen erfahrener Planer [Nae12], [Wie08], [Pah07]. Eine EDV-Unterstützung bei der Festlegung von Montagebaugruppen beschränkte sich bisher auf Editier- und Dokumentationsfunktionen sowie Checklisten oder Diagramme, ergänzt durch Prozesspläne für eine systematische Vorgehensweise. Bereits 1995 bemängelte Grupp [Gru95], dass der Entwicklungsstand der Rechnerunterstützung in Konstruktion und Arbeitsplanung der Bedeutung des Stücklistenwesens nicht gerecht wird. In Kapitel 3 wird gezeigt, dass dieses Defizit bis heute besteht. In der Praxis werden Fertigungsstücklisten überwiegend manuell mit Editierfunktionen wie Cut and Paste erstellt.

Eine Ausnahme bildet die Konfigurierung. Sie kann von EDV-Stücklistensystemen wirkungsvoll unterstützt werden [Schö11], [Sti07], [Dan09], [Eig09]. Bei der Konfigurierung wird vorbereitend eine Variantenstückliste⁷ erstellt, in der die Erzeugnisstrukturen aller produzierbaren Erzeugnisvarianten bereits vorgedacht sind [Gro04] und in der eine Variantenlogik definiert ist, welche Baugruppen für welche Parameter erforderlich sind. Die Fertigungsstückliste einer konkreten Erzeugnisvariante wird dann automatisiert durch Variantengeneratoren herausgefiltert.

Dieser methodische Ansatz ermöglicht eine wirkungsvolle Reduktion der Komplexität der Stücklistenerstellung. Statt umfassendes Produktionswissen zu benutzen, wird eine zweckspezifische Variantenlogik aufgebaut [Zag06, Dan09]. Deshalb bleibt die Informationsmenge einer Variantenstückliste beherrschbar. Auch ist die Auswertung der Variantenlogik einfach genug, um sie eindeutig zu beschreiben und in programmierbare Regeln zu fassen. Die Konfigurierung ist mit aktueller Technologie informationstechnisch abbildbar und ermöglicht eine weitgehende EDV-Unterstützung. Der Gesamtaufwand für die Erstellung von Fertigungsstücklisten für Variantenerzeugnisse kann durch Variantengeneratoren signifikant gesenkt werden.

Vergleichbare Stücklistengeneratoren auch für Anpassungsplanungen würden den Aufwand im Stücklistenwesen der Produktionsunternehmen wesentlich reduzieren. Bei einer Anpassungsplanung wird die Fertigungsstückliste eines ähnlichen Erzeugnisses abgeändert, bis sie das neue Erzeugnis darstellt – das ist in der Praxis der weitaus häufigste Planungsfall bei der Stücklistenerstellung.

⁷ „Die Variantenstückliste ist eine Zusammenfassung mehrerer Stücklisten auf einem Vordruck, um verschiedene Gegenstände mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Bestandteile gemeinsam aufführen zu können.“ [Din199].

In Kapitel 3 wird gezeigt, dass die bisherigen Verfahren zur Ableitung von Fertigungsstücklisten und zur Festlegung von Montagebaugruppen sich auf Neuplanungen konzentrieren. Bei der Neuplanung wird nicht auf vorhandene Stücklisten zurückgegriffen, vielmehr wird die Fertigungsstückliste völlig neu erstellt. Die resultierenden Verfahren sind zu komplex, um sie im Tagesgeschäft des Stücklistenwesens anzuwenden. Mit bisherigen Verfahren konnte ein Planer beim Tagesgeschäft im Stücklistenwesen nicht wirkungsvoll entlastet werden.

1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Untersuchung, wie eine zweckspezifische Komplexitätsreduktion auch bei Anpassungsplanungen gelingt. Anpassungsplanung bedeutet, einen vorhandenen Plan, hier die Fertigungsstückliste eines ähnlichen Erzeugnisses, so umzuarbeiten, dass sie das neu zu planende Erzeugnis abbildet. Es wird gezeigt, dass im Stücklistenwesen genügend spezifische Regeln implizit bekannt sind, um die Anpassungsplanung eindeutig und vollständig zu beschreiben. Diese Regeln werden herausgearbeitet und zu einem Regelsystem zusammengefasst, das einfach genug ist, dass es mit aktuell verfügbaren Mitteln programmiert werden kann.

Aufgabenstellung der Arbeit ist die Entwicklung eines Stücklisten-Adaptors, der die Erstellung von Fertigungsstücklisten im Rahmen von Anpassungsplanungen unterstützt. Bei einer Anpassungsplanung wird die Fertigungsstückliste des neuen Erzeugnisses aus der bekannten Fertigungsstückliste eines bereits geplanten, ähnlichen Erzeugnisses abgeleitet. Dabei wird die Fertigungsstückliste des bereits geplanten Erzeugnisses als Ausgangspunkt benutzt und so überarbeitet, dass sie das neue Erzeugnis darstellt. Unveränderte Umfänge⁸ werden übernommen und ähnliche Umfänge werden angepasst. Nur für grundlegend neue Lösungen wird eine partielle Neuplanung durchgeführt.

Der Stücklisten-Adaptor wird für Erzeugnisse mit strukturierten Stücklisten entwickelt⁹, denn er verarbeitet die Erzeugnisstrukturen der Konstruktions- und Fertigungsstücklisten. Strukturierte Stücklisten sind typisch für die komplexen Erzeugnisse der Metall- und Elektroindustrie.

Der Stücklisten-Adaptor kopiert die Montagebaugruppen aus der Fertigungsstückliste des bekannten, bereits geplanten Erzeugnisses und arbeitet dabei die veränderten Einzelteile des neuen, zu planenden Erzeugnisses ein. Die veränderten Einzelteile ermittelt der Stücklisten-Adaptor vorab durch Vergleich der Konstruktionsstücklisten von altem und neuem Erzeugnis. Der Stücklisten-Adaptor kann also eine bestehende Fertigungsstückliste "abschreiben"

⁸ Unveränderte Umfänge sind Einzelteile und Baugruppen, die auch im alten Erzeugnis, das der Anpassungsplanung zugrunde liegt, vorhanden sind.

⁹ Bei einfachen Erzeugnissen ohne Baugruppen gibt es keinen Unterschied zwischen funktions- und fertigungsgerechter Erzeugnisstruktur, die das Verfahren auswerten könnte.

und dabei die veränderten Umfänge so einarbeiten, dass eine Fertigungsstückliste für das neu zu planende Erzeugnis entsteht.

Der Stücklisten-Adaptor zielt darauf ab, den Aufwand des Planers bei der Anpassungsplanung von Fertigungsstücklisten zu minimieren. Damit muss sich ein Verfahren an der Zielsetzung messen lassen, effizient zu sein, so dass der Aufwand für die Anwendung geringer ist, als bei einer manuellen Erstellung der Fertigungsstückliste. Das bedeutet, dass nur wenige Planungsaufgaben anfallen dürfen, die vom Planer durchgeführt werden müssen. Ebenfalls dürfen keine umfangreichen Dateneingaben zur Anwendung erforderlich sein, denn je mehr Informationen erhoben, aufbereitet und eingegeben werden müssen, desto unwahrscheinlicher ist ein erfolgreicher Einsatz eines Stücklisten-Adaptors in Unternehmen.

Notwendigerweise muss der Stücklisten-Adaptor außerdem effektiv sein, damit die Güte der Ergebnisse gewährleistet ist. Insbesondere stellt sich die Anforderung, dass die generierten Baugruppen wirtschaftlich produziert werden können, also beispielsweise montier-, prüf- und lagerbar sind. Dies bedingt, dass alle relevanten Produktionsaspekte angemessen berücksichtigt werden.

Darüber hinaus soll ein Verfahren möglichst universal sein, so dass es ohne aufwändige Vorbereitung für verschiedenartige Montagefälle eingesetzt werden kann. Insbesondere soll das Verfahren auch für komplexe Erzeugnisse, die vielfältige Fertigungstechnologien benötigen, ohne Training anwendbar sein. Die dazu erforderliche Daten- oder Wissensbasis muss mit realistischem Aufwand erstellt und gepflegt werden können.

Die Ziele, die ein Verfahren zur Generierung von Fertigungsstücklisten erfüllen muss, sind somit Effizienz, Effektivität und Universalität (Abbildung 4).

Effizienz	Der Aufwand für die Anwendung des Verfahrens ist geringer, als bei einer manuellen Erstellung der Fertigungsstückliste.
Effektivität	Die mit dem Verfahren definierten Montagebaugruppen können wirtschaftlich produziert werden.
Universalität	Das Verfahren kann ohne aufwändige Vorbereitung für verschiedenartige Montagefälle eingesetzt werden.

Abbildung 4: Evaluierbare Ziele des zu entwickelnden Verfahrens

1.4 Aufbau der Arbeit

Abbildung 5 gibt einen zusammenfassenden Überblick über das zu entwickelnde Verfahren. Das Verfahren hat das Potenzial, den Aufwand im Stücklistenwesen der Produktionsunternehmen signifikant zu reduzieren. Die Anpassungsplanung ist der weitaus häufigste Planungsfall bei der Stücklistenerstellung, sie kann für mindestens die Hälfte der zu planenden Erzeugnisse angewendet werden¹⁰.

Aufgabenstellung	Unterstützung von Anpassungsplanungen bei der Erstellung von Fertigungsstücklisten bzw. fertigungsgerechten Erzeugnisstrukturen
Wissenschaftliche Relevanz	Bereitstellung einer anwendbaren Lösung für eine grundlegende Aufgabenstellung in mehreren aktuellen Forschungsfeldern
Lösungsansatz	Zweckspezifische Komplexitätsreduktion durch explizieren und nutzen des generellen Bauplans von Erzeugnisstrukturen
Gegenstandsbereich	Erzeugnisse mit strukturierten Stücklisten (z.B. komplexe Erzeugnisse der Metall- und Elektroindustrie)
Ziel	Entlastung im Stücklistenwesen bei Anpassungsplanungen durch Übertragung von zeitraubenden Routineaufgaben auf die EDV
Evaluierung	Nachweis von Effizienz, Effektivität und Universalität

Abbildung 5: Charakterisierung des zu entwickelnden Verfahrens

¹⁰ siehe Kapitel 2.1

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert:

- Kapitel 1 führt in die Thematik ein und klärt erste Begriffe.
- In Kapitel 2 werden der Handlungsbedarf und die Anforderungen an das Verfahren abgeleitet. Dazu werden Neuplanung, Anpassungsplanung und Konfigurierung voneinander abgegrenzt. Ausgehend von der heutigen Situation im Stücklistenwesen produzierender Unternehmen wird dargestellt, wie Fertigungsstücklisten im Fabrikbetrieb genutzt werden, welche Defizite bezüglich ihrer Erstellung bestehen und welcher Nutzen aus einer EDV-Unterstützung der Anpassungsplanung resultieren kann.
- Kapitel 3 bildet den aktuellen Stand der Forschung ab. Es wird gezeigt, dass nicht nur im Fabrikbetrieb, sondern auch in weiteren Forschungsfeldern intensiv an Verfahren zur Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen geforscht wird. Die bekannten Verfahren werden vorgestellt und auf ihre Eignung für den Einsatz im Tagesgeschäft des Stücklistenwesens bei der Anpassungsplanung hin bewertet.
- Kapitel 4 verdeutlicht den gewählten Lösungsansatz und begründet die damit verbundene Innovation. Es wird aufgezeigt, mit welchen spezifischen Konzepten die Ziele erreicht werden sollen und wie die Zielerreichung evaluiert werden kann.
- Das neue Verfahren wird in den Kapiteln 5 und 6 entwickelt. Um eine erste, schnelle Orientierung zu ermöglichen, wird das Verfahren in Kapitel 5 anhand des einleitenden Beispiels zunächst anschaulich eingeführt. In Kapitel 6 erfolgt dann die exakte prädikatenlogische Beschreibung.
- Kapitel 7 evaluiert das Verfahren. Zunächst wird es theoretisch untersucht, um Potenziale und Grenzen abzuschätzen. Anschließend wird das Verfahren anhand von zwei Praxisbeispielen angewendet und bezüglich der Ziele Effizienz, Effektivität und Universalität bewertet.
- In Kapitel 8 werden abschließend die erzielten Ergebnisse zusammengefasst und der Bedarf an weiteren Forschungsarbeiten aufgezeigt.

2 Fertigungsstücklisten im Fabrikbetrieb

2.1 Anpassungsplanung bei der Erstellung von Fertigungsstücklisten

REFA [REFA91] schlägt für die Arbeitsplanerstellung eine Einteilung in Neuplanung, Anpassungsplanung und Konfigurierung vor. Diese Einteilung lehnt sich an die Konstruktionsarten Neukonstruktion, Anpassungskonstruktion und Variantenkonstruktion an [Ehr09], [Gro11].

Neuplanung und Neukonstruktion kennzeichnen das Konstruieren und Planen eines Erzeugnisses nach einem neuen Lösungsprinzip völlig ohne Rückgriff auf Vorbildlösungen. Anpassungsplanung und Anpassungskonstruktion gehen zwar von bekannten Vorbildern aus, passen sie aber an eine veränderte Aufgabenstellung an. Bei der Konfigurierung beziehungsweise Variantenkonstruktion steht die prinzipielle Lösung fest, die Gestalt der Bauteile und Baugruppen kann jedoch mit Hilfe allgemeingültiger Variationsregeln (z. B. Veränderung der Bauteilabmessungen) optimiert werden. Variationen sind innerhalb der Grenzen vorausgedachter Systeme möglich. Die Planungsarten unterscheiden sich entsprechend nach ihrer Komplexität, ihrer Neuartigkeit und Variabilität sowie nach dem Strukturierungsgrad und der Ähnlichkeit mit bekannten Erzeugnissen (Abbildung 6).

Planungsart Merkmal	Neuplanung	Anpassungsplanung	Konfigurierung
Komplexität	hoch		niedrig
Neuartigkeit	hoch		niedrig
Variabilität	hoch		niedrig
Strukturiert- heitsgrad	niedrig		hoch
Ähnlichkeit mit bekannten Erzeugnissen	niedrig		hoch

Abbildung 6: Merkmale der Planungsarten (in Anlehnung an [Schw11])

Für die Erstellung von Fertigungsstücklisten werden diese Festlegungen konkretisiert.

- Die Neuplanung zeichnet sich dadurch aus, dass zur Stücklistenerstellung nicht auf vorhandene Stücklisten zurückgegriffen wird. Es wird vielmehr Wissen über Produktionsabläufe, Technologien, Teileeigenschaften und dergleichen zu Hilfe genommen.
- Bei der Anpassungsplanung wird die Stückliste eines ähnlichen Erzeugnisses als Basisstückliste verwendet. Diese wird durch Ändern, Umhängen, Einfügen oder Löschen von Baugruppen und Einzelteilen verändert, bis sie das neue Erzeugnis darstellt.
- Konfigurierung bezeichnet das Zusammenstellen der Stückliste für ein Erzeugnis aus einer vordefinierten, gegebenenfalls parametrisierbaren Stückliste. Dazu muss zunächst eine konfigurierbare Variantenstückliste aufgebaut werden, welche die Stücklisteninformationen aller produzierbaren Baugruppen bereits enthält. Diese kann beispielsweise als Stückliste mit Filterbedingungen (z. B. "diese Baugruppe ist gültig nur für Variante X") oder als System von Produktionsregeln (z. B. "wenn Teil A verbaut wird, muss auch Teil B verwendet werden") ausgeprägt sein.

Die Vorteile von Anpassungsplanungen bei der Erstellung von Fertigungsstücklisten sind offensichtlich. Dadurch, dass lediglich vorhandene Stücklisten abgeändert werden müssen, ist nur ein Bruchteil der bei einer Neuplanung erforderlichen Planungsaufwände erforderlich. Optimierungen, die für das bereits geplante Erzeugnis durchgeführt wurden, werden übernommen.

Die mit Anpassungsplanungen verbundenen Einschränkungen sind in der Praxis begrenzt, denn das Erzeugnisprogramm eines Unternehmens ändert sich normalerweise nicht sprunghaft und grundlegend. In der Praxis des Maschinenbaus und der Elektroindustrie überwiegen Anpassungskonstruktionen mit 45-65%; Variantenkonstruktionen werden in 20-30% durchgeführt; nur 15-25% sind Neukonstruktionen [Arn04], [Vaj09], [Ehr09], [Kur09].

Der Anteil der Anpassungsplanung liegt etwa in Höhe der Anpassungskonstruktion, denn bei der Entwicklung eines Erzeugnisses sind Konstruktions- und Planungsart typischerweise gleich (Abbildung 7). Eventuell liegt der Anteil von Anpassungsplanung tatsächlich sogar etwas höher, da auch Teilumfänge von Neukonstruktionen oft als Anpassungsplanung durchgeführt werden können. Eine Anpassungsplanung ist immer dann durchführbar, wenn Erzeugnisse geplant werden, deren Erzeugnisstrukturen in etwa schon bekannt sind. Selbst bei Neuteilen handelt es sich in der Regel um Teile, die nur aufgrund geringfügiger geometrischer Abweichungen eine neue Sachnummer erhalten haben, aber unter montage-technischen Gesichtspunkten durchaus mit einem oder mehreren vorhandenen Teilen vergleichbar sind [Köh89]. Überdies kann bei der Neukonstruktion eines Erzeugnisses meist auf bereits vorhandene Baugruppen zurückgegriffen werden, die dann lediglich im Rahmen einer Anpassungs- oder Variantenkonstruktion modifiziert werden [Fis08]. Andererseits müssen auch bei der Anpass-

sungskonstruktion mitunter einzelne Komponenten neu konstruiert werden, dann fällt bei der Anpassungsplanung eine partielle Neuplanung an. Auch bei Variantenkonstruktionen müssen teilweise Anpassungsplanungen durchgeführt werden. Denn wenn Unternehmen aufgrund des Aufwands auf die Erstellung von Variantenstücklisten verzichten, kann keine automatische Konfigurierung erfolgen.

Konstruktionsart \ Konstruktionsphase	Neu-konstruktion	Anpassungs-konstruktion	Varianten-konstruktion
Planen Aufgabenklärung			
Konzipieren Funktionsfindung, Prinzipierarbeit			
Entwerfen Filtern aus Variantenstücklisten			
Ausarbeiten Zeichnungserstellung, Stücklistenerstellung			



Phase vollständig durchlaufen



Phase nicht oder nur für einzelne Funktionsträger durchlaufen

Abbildung 7: Zuordnung von Konstruktionsphasen zu Konstruktionsarten [Fis08]

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für mindestens die Hälfte der entwickelten Erzeugnisse eine Anpassungsplanung bei der Erstellung der Fertigungsstückliste durchgeführt werden kann. Konfigurierungen, ein weiteres Viertel, sind bereits heute automatisierbar [Dan09], [Zag06]. Nur für das verbleibende Viertel der Planungsfälle ist eine aufwändige Neuplanung erforderlich (Abbildung 8).

Eigenschaft Planungsart	Anwendungshäufigkeit	Aufwand	Algorithmierbarkeit
Neuplanung Erstellung von neuen Stücklisten	15-25% (immer möglich)	hoch	kritisch (Komplexität)
Anpassungsplanung Abändern vorhandener Stücklisten	45-65%	mittel	eventuell möglich
Konfigurierung Filtern aus Variantenstücklisten	20-30%	sehr gering (nach aufwändiger Vorbereitung)	nachgewiesen

Abbildung 8: Eigenschaften der Planungsarten

2.2 Erzeugnisstrukturen und Strukturstücklisten

Die Erzeugnisstruktur stellt dar, aus welchen Einzelteilen und Baugruppen ein bestimmtes Erzeugnis aufgebaut ist. Sie ist definiert als Gesamtheit der nach einem bestimmten Gesichtspunkt festgelegten Beziehungen zwischen den Baugruppen und Einzelteilen eines Erzeugnisses [DIN199]. Die Strukturstückliste ist eine Darstellungsform der Erzeugnisstruktur. Sie ist definiert als „ein für den jeweiligen Zweck vollständiges, formal aufgebautes Verzeichnis für einen Gegenstand, das alle zugehörigen Gegenstände unter Angabe von Bezeichnung (Benennung, Sachnummer), Menge und Einheit enthält“ [DIN199]. Eine Strukturstückliste enthält die Baugruppen und Einzelteile aller niedrigeren Ebenen in strukturierter Form, wobei jede Baugruppe jeweils bis zu ihrer niedrigsten Stufe aufgegliedert ist.

Damit erfüllt die Strukturstückliste (bzw. die Erzeugnisstruktur) zwei grundlegende und im Fabrikbetrieb unverzichtbare Funktionen. Zum einen definiert sie Einzelteile und Baugruppen, sodass diese identifiziert werden können und dass deren Aufbau eindeutig beschrieben ist [DIN199]. Zum anderen bildet sie das Ordnungsschema, nach dem produktbeschreibende Unterlagen, etwa Zeichnungen, Stammdaten oder Arbeitspläne, gegliedert und zugeordnet werden können [DIN6789].

2.3 Funktions- und fertigungsgerechte Gliederung

Stücklisten (bzw. Erzeugnisstrukturen) werden nach unterschiedlichen Gesichtspunkten gegliedert.

Die Konstruktionsstückliste bzw. die funktionale Erzeugnisstruktur ist die typische Sicht der Konstruktionsbereiche. Sie zählt die zur Erfüllung bestimmter Funktionen notwendigen Einzelteile und Konstruktionsbaugruppen auf. Die Konstruktionsstückliste entsteht während der Produktentwicklung [Ehr09], [Eig09], [Nae12]. Der Konstrukteur realisiert Funktionen und zeichnet die dazu erforderlichen Einzelteile und Konstruktionsbaugruppen. Die Konstruktionszeichnungen sind funktional gegliedert, diese Gliederung der Konstruktionszeichnungen stellt bereits eine Repräsentationsform der funktionalen Erzeugnisstruktur dar. Die Konstruktionsstückliste kann aus der Struktur der Zeichnungen abgeleitet werden.

Produktion und Logistik brauchen eine Fertigungsstückliste, deren Erzeugnisstruktur entsprechend dem Fertigungs- und Montageablauf strukturiert ist [Gru03], [Wie08], [Kur09]. Die Fertigungsstückliste beschreibt, wie das Erzeugnis aus Einzelteilen und Montagebaugruppen hergestellt wird, also den fertigungstechnischen Ablauf vom Rohstoff zum Einzelteil in der Teilefertigung und von den Einzelteilen über die Baugruppen zum Erzeugnis in den Montagen [REFA91]. Die Fertigungsstückliste muss aus der Konstruktionsstückliste abgeleitet werden [REFA91], [Eve02], [Kur09].

2.4 Bedeutung der Fertigungsstückliste

Die Fertigungsstückliste liefert die Datengrundlage für alle wesentlichen Auswertungen des Materialwesens, wie Materialbedarfsermittlung, Verfügbarkeitskontrolle oder Disposition. Insbesondere bei der Serienfertigung von komplexen Erzeugnissen, setzen alle Aktivitäten zur Produktionsplanung und zur Kostenrechnung auf der Fertigungsstückliste auf. Die Fertigungsstückliste ist Basis für die Produktionsplanung, etwa die Erstellung von Arbeitsplänen und die Erzeugniskalkulation, und stellt für die meisten Module in Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen (PPS) das zentrale Kernstück dar. Der Nutzen, den ein PPS-System für den einzelnen Anwender hat, wird stark von den verwalteten Stücklistenarten beeinflusst [Grü94]¹¹.

Ohne Montagebaugruppen können Fertigungsunterlagen nicht prozessgerecht strukturiert und zu lagernde Zwischenerzeugnisse nicht eindeutig definiert werden. DIN 6789 „Dokumentationssystematik“ [DIN6789] fordert eine Fertigungsstückliste insofern, dass die Gliederung produktbeschreibender Daten und Unterlagen anhand der fertigungsgerechten Erzeugnisglie-

¹¹ Viele der Methoden und Modelle, die dem Fabrikbetrieb zugrunde liegen, entstanden in sehr frühen Arbeiten des Bereichs Produktionstechnik und wurden mit Aufkommen der Informationstechnologie zur heute üblichen Ausprägung weiterentwickelt [Lip67], [Gru71], [Gru85].

derung erfolgt. Nicht nur Materialstammdaten werden Einzelteilen und Baugruppen zugeordnet. Auch weitere produktbeschreibende Daten und Dokumente werden entsprechend der Erzeugnisstruktur gegliedert, dies ermöglicht die Speicherung und den Zugriff auf beliebige DV- oder manuell erzeugte Dokumente.

Die Ableitung einer Fertigungsstückliste aus der Konstruktionsstückliste verursacht erheblichen Aufwand. Dazu kommt das Problem, die Konsistenz zu gewährleisten, es muss sichergestellt sein, dass alle verschiedenen Stücklisten eines Erzeugnisses beim Änderungsdienst kohärent modifiziert werden [Sch01], [Zag06]. Deshalb wird in Industriebetrieben teilweise eine gemeinsame Stückliste, also eine Mischung aus Konstruktions- und Fertigungsstückliste, angestrebt. Teilweise werden Baugruppen, die nur für Konstruktionszwecke relevant sind, als Pseudo- oder Dummi-Baugruppen angelegt, deren Komponenten im Fertigungsprozess direkt in die übergeordnete Baugruppe eingebaut werden.

Aber auch eine gemeinsame Stückliste für Konstruktion und Produktion ist problematisch. Die Erzeugnisstruktur einer gemeinsamen Stückliste wird vor allem durch die Konstrukteure beeinflusst [Ley06]. Zumindest aber ist zur Festlegung „gemeinsamer“ Baugruppen eine intensive Kommunikation zwischen Konstruktion und Produktion erforderlich. Dies führt in der Praxis zu einem hohen Abstimmungsaufwand und langen Durchlaufzeiten, obwohl nur eine einzige, gemeinsame Stückliste erstellt und gepflegt werden muss. Vor allem aber weicht der Fertigungsablauf oft stark von der Funktionsstruktur ab, Konstruktionsbaugruppen können dann nicht wirtschaftlich montiert werden. In diesem Fall kann die gemeinsame Stückliste nicht gleichermaßen fertigungs- und funktional gegliedert werden, Zielkonflikte entstehen.

- Wenn eine Baugruppe nicht entsprechend der Funktion strukturiert ist, so verursacht dies Intransparenz für die Konstrukteure, beispielsweise müssen dann Konstruktionszeichnungen so gestaltet werden, dass sie Montagebaugruppen darstellen. Bei einer Änderung im Fertigungsablauf müssen auch CAD-Modelle umstrukturiert werden. Der Aufwand und die Gefahr von Fehlern steigen an und Änderungskonstruktionen werden erschwert.
- Wird die Stückliste nicht entsprechend dem Fertigungsablauf strukturiert, so sind später Baugruppen für Terminierung, Vor- und Endmontage, Prüfung, Transport und Lagerung nicht eindeutig identifizierbar, außerdem wird die Erstellung von Arbeitsplänen erschwert. Die Fertigungsstückliste ist eine unverzichtbare Basis für die rationelle Produktion. Mangelnde Fertigungs- und Montageorientierung bei Stücklisten ist der wesentliche Schwachpunkt in der gesamten Produktionsplanung, gerade bei den Stücklistenstrukturen sind hohe und weitgehend unbeachtete Einsparungspotentiale verbergen [Her96].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine gemeinsame Stückliste die Belange der unterschiedlichen Bereiche über den Produktlebenszyklus hinweg nur unzureichend abdecken kann [Zag06]. Vor allem bei Erzeugnissen mit komplexem Aufbau und großer Teilezahl kann eine gemeinsame Stückliste die unterschiedlichen Aufgabenstellungen und Anforderungen meist nicht befriedigend erfüllen. Andererseits ist die manuelle Ableitung der Fertigungsstückliste aus der Konstruktionsstückliste für jedes einzelne Erzeugnis aufwändig und fehlerträchtig.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma würde ein Verfahren bieten, das die Erstellung von Fertigungsstücklisten weitgehend automatisiert. So wäre es möglich, zwei Stücklistenarten zu pflegen und damit den Bedürfnissen von Konstruktion und Produktion gerecht zu werden, aber trotzdem den Aufwand für die Planer im Stücklistenwesen begrenzt zu halten.

2.5 Erstellung von Fertigungsstücklisten mit Standard-IT-Systemen

Standard-IT-Systeme zur Verarbeitung von Stücklisten sind CAD- (computer-aided design), ERP- (Enterprise Resource Planning) und zunehmend PDM-Systeme (Produktdaten-Management) [Eig09], [Sen08], [Sch06].

Die Konstruktionsstückliste lässt sich mit geeigneten Standard-IT-Systemen automatisch aus den im CAD-System gespeicherten Modellen und Zeichnungsstrukturen ableiten [Sen08], [Nae12]. Die Fertigungsstückliste muss dagegen manuell erstellt werden. Dazu wird die Konstruktionsstückliste kopiert und die Erzeugnisstruktur manuell verändert. Hilfestellung bieten dabei Editier-Funktionen, etwa Neuanlage, Löschen, Ändern, Kopieren oder Verschieben, sowie Such- und Darstellungsfunktionen, etwa Ein- und Ausblenden oder Filtern [Mei11], [Kle08], [Ben11]. Struktur-Browser unterstützen die Visualisierung von Stücklisten. Sie sind in der Lage, die komplette Erzeugnisstruktur in Form einer hierarchischen Ansicht darzustellen [Sche06], [SAP13-1]. Teilweise ist es möglich, unterschiedliche Stücklisten zum Vergleich nebeneinander zu stellen [Kle08].

Eine rudimentäre Überprüfung der Konsistenz zwischen einer Konstruktionsstückliste und der zugehörigen Fertigungsstückliste ermöglichen Standard-IT-Systeme durch Funktionen zum Stücklistenvergleich. Ihre Wirkung ist jedoch auf den direkten Vergleich von Teilenummern und Stücklistenpositionen beschränkt. Ein Stücklistenvergleich mit SAP [SAP13-1] etwa kann darstellen, ob eine Position (das sind Einzelteile oder Baugruppen) in beiden Stücklisten vorhanden ist oder ob Vergleichsfelder (also Daten) dieser Positionen in beiden Stücklisten die gleichen Werte haben.

Einen Schritt weiter geht die Geführte Synchronisierung (PLM-WUI-GSS) [SAP13-2]. Sie hat zum Ziel, die Fertigungsstückliste bei Konstruktionsänderungen aktuell zu halten. Zunächst muss der Planer die Quellstruktur mit Editierfunktionen zur Zielstruktur umstrukturieren, also

die Konstruktionsstückliste manuell zur Fertigungsstückliste umarbeiten¹². Diese Umstrukturierungen speichert eine sogenannte Reconciliation-Workbench. Eine Synchronisierungseinheit stellt dann die Verbindung zwischen der Quell- und Zielstruktur her und übernimmt neue Änderungsstände der Konstruktionsstückliste als Vorschlag für die Fertigungsstückliste. Einen Vergleich von Stücklisten, die unabhängig voneinander erstellt wurden, kann die Geführte Synchronisierung nicht durchführen. Auch die Geführte Synchronisierung bietet somit keine methodische Unterstützung bei der Erstellung der Fertigungsstückliste, sondern lediglich bei deren Pflege.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Standard-IT-Systeme nur Editier-Funktionen für die manuelle Erstellung von Fertigungsstücklisten bereitstellen. Die Abgrenzung von Montagebaugruppen bei der Erstellung von Fertigungsstücklisten ist alleinige Aufgabe des Planers.

¹² Diesen Planungsschritt könnte das zu entwickelnde Verfahren unterstützen, wenn ein ähnliches Erzeugnis als Planungsgrundlage zur Verfügung steht.

3 Fertigungsgerechte Erzeugnisstrukturierung

3.1 Relevanz in aktuellen Forschungsaktivitäten

Im Rahmen von Fabrikplanung, Globalisierung, Variantenmanagement, Konstruktionsverfahren und der Digitalen Fabrik wird seit Jahrzehnten intensiv an Verfahren zur Generierung von fertigungsgerechten Erzeugnisstrukturen geforscht (Abbildung 9). In diesem Zusammenhang wurde eine breite Palette an Verfahren entwickelt. Bevor diese Verfahren dargestellt werden, werden die betreffenden Forschungsfelder in einer kurzen Übersicht vorgestellt. Dabei wird die Verwendung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen im jeweiligen Forschungsfeld verdeutlicht und es wird aufgezeigt, wie eine automatische Anpassungsplanung diese Aufgabenstellung unterstützen könnte.

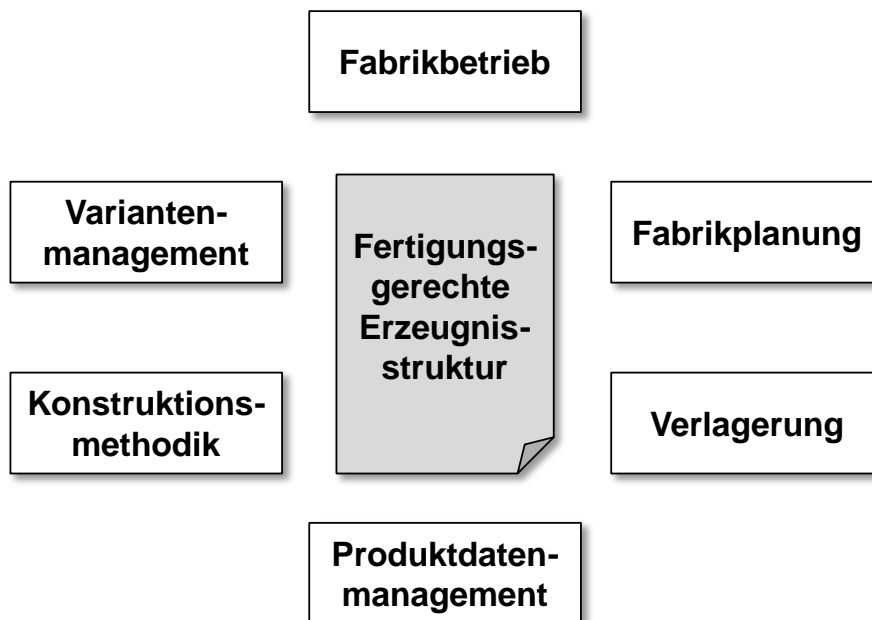


Abbildung 9: Die Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen als Querschnittsthema aktueller Forschungsfelder

3.1.1 Fabrikplanung: Gestaltung schlanker Produktionssysteme

Erzeugnisse sind die wichtigste Ausgangsbasis für die Fabrikplanung [Hel10], [Gru09]. Die fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur bestimmt den Produktionsprozess, also die Produktionsschritte und deren Reihenfolge [Neu01], [Ley06]. Einzelteile legen Fertigungsstufen fest, ausgehend von Montagebaugruppen können Vor- und Endmontagestufen bestimmt werden [Pon11]. Schlanke Produktionssysteme, etwa Mini-Factories, Fertigungsinseln oder Komplett-

montagesysteme, werden entsprechend der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur prozessgerecht segmentiert [Kor10], [Kor09], [Spa08], [Spa01], [Wes01]. So entstehen Bereiche, die nach Prozessen und Produkten segmentiert sind. Das reduziert die Komplexität der Koordinationsaufgaben, sodass eine Zugsteuerung mit einfachen dezentralen Regelkreisen realisiert werden kann [Wes09], [Spa03], [Bul00], [Kor97]. Die Segmente werden so im Layout angeordnet, dass ein gerichteter Material- und Informationsfluss entsteht. Kurze Wege und eine gute Übersicht vereinfachen Handhabung und Bereitstellung. Durch Bildung montagegerechter Baugruppen können Vormontagegrad und Parallelmontage gesteigert und somit die Durchlaufzeit gekürzt werden. Automatisierungsmöglichkeiten werden begünstigt, wodurch Montagekosten gesenkt werden können [Ung86], [Fri89], [Kon09], [Pon11], [Paw07].

Da die fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur und das Produktionssystem sich wechselseitig beeinflussen, ist eine frühzeitige Abstimmung von Erzeugnissen und Produktionsprozessen erforderlich. Um Produktionssysteme optimal gestalten zu können, ist die Generierung von Erzeugnisstrukturen, die tatsächlich fertigungsgerecht sind, unumgänglich. Andererseits muss bereits bei der Generierung einer fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur bedacht werden, wie das zugehörige Produktionssystem gestaltet ist bzw. wie es gestaltet werden soll. Da ein Großteil der gesamten Herstellkosten für ein Erzeugnis bereits von den gestaltenden und planenden Bereichen festgelegt wird, ist ein Zusammenspiel von Konstrukteuren und Planern bei der Gestaltung des Erzeugnisses und der zugehörigen Montageanlage zwingend erforderlich [Lof02]. Die Fertigungsstückliste wird als Hilfsmittel sowohl zur Gestaltung von Produkten, als auch von Herstellungsprozessen betrachtet und ist ein verbindendes Element zwischen Konstruktion, Produktion, Einkauf und Vertrieb [Vah08], [Ehr09], [Köh02].

3.1.2 Globalisierung: Verlagerung von Teilumfängen der Produktion

Verlagerungen der Produktion ins Ausland oder zu Lieferanten werden genutzt, um Kostenvorteile zu erschließen, um neue Absatzmärkte aufzubauen oder um wichtigen Kunden zu folgen. [Kry02], [Kin07], [Kin09]. Allerdings wird oftmals nicht die komplette Produktion verlagert. Dies würde zu einem Verlust an Unternehmenswissen führen. Ziel von Verlagerungen sollte die Verknüpfung der beschaffungsseitigen Einbeziehung der Weltmärkte mit der Stärkung des Standortes Deutschland sein. Hochtechnologische und humankapitalintensive Einzelteile und Baugruppen sollten weiterhin in Deutschland produziert werden, standardisierte Produktkomponenten ohne eigene Kernkompetenzen können auf den globalen Märkten dazugekauft werden [Gro06], [Gun11].

Nur in sich abgeschlossene Prozessketten sollten verlagert werden, so dass die fremdgefertigten Baukomponenten geprüft, transportiert und gelagert werden können. Eine Optimierung der Standortstruktur berücksichtigt zusätzlich drei Gesichtspunkte. Erstens müssen fertigungsgerechte Erzeugnisstrukturen nach Kompetenzgesichtspunkten generiert werden, damit Montagebaugruppen zur Verlagerung geeignet sind. Zweitens müssen die Produktionssysteme-

me an den verschiedenen Standorten jeweils an die regionalen Gegebenheiten angepasst werden [Sch08]. Berücksichtigt werden dabei beispielsweise die Qualifikation der Arbeitskräfte, die Verfügbarkeit von Technologien und die Zulieferstruktur vor Ort. Drittens sollten die fertigungsgerechten Erzeugnisstrukturen die Struktur des Produktionssystems am geplanten Standort widerspiegeln (siehe voriges Kapitel).

3.1.3 Variantenmanagement: Module und Baukästen bei Mass-Customization

Individualisierte Erzeugnisse und maßgeschneiderte Lösungen für die Kunden werden heute als ein wichtiger Faktor zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit betrachtet [Zag06], [Lin06]. Die Variantenvielfalt bei den Produkten steigt, es werden nicht mehr hohe Stückzahlen von ein und demselben Erzeugnis hergestellt, sondern vorzugsweise kleinere Stückzahlen von mehreren Produktvarianten [Pon11]. Variantenvielfalt bei den Produkten wirkt sich unmittelbar auf die Komplexität der Leistungserstellungsprozesse aus und stellt Unternehmen vor schwierige Herausforderungen [Bau07], [Bon02]. Tendenziell steigen die Kosten, da flexible Produktionsanlagen benötigt werden und kleine Produktionsstückzahlen den Rüstanteil erhöhen. Zahlreiche unterschiedliche Produktionsabläufe müssen geplant und gesteuert werden, dadurch nehmen indirekte Aufwände und Fehlermöglichkeiten zu. Die Lagerung der Vielfalt von Teilen, Baugruppen und Produkten erhöht die Bestände. Um entgegen zu wirken, entsteht ein Trend von der Programm- zur Auftragsfertigung (bzw. von der Verbrauchs- zur Bedarfssteuerung). Wenn aber Kundenaufträge nicht mehr aus Lagern abgedeckt werden, so verlängern sich Lieferzeiten, gleichzeitig nehmen die Möglichkeiten zur Kapazitätsglättung ab. Wenn Individualisierung ein wichtiger Faktor zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit ist, sind die Möglichkeiten zur Variantenbereinigung begrenzt. Zur Beherrschung der Variantenvielfalt hat sich das so genannte Mass-Customization bewährt [Pil06].

Bei der häufigsten Version des Mass-Customization werden die Erzeugnisse so in geeignete Montagebaugruppen gegliedert, dass durch Kombination einer begrenzten Anzahl von Baugruppen eine große Vielzahl von Produktvarianten zusammengestellt werden kann und dass die Variantenbildung möglichst spät im Produktionsprozess erfolgt. Je nach Optimierungsstrategie im Detail werden die Montagebaugruppen Baukästen oder Module genannt. Mit geeigneten Baukästen oder Modulen wird es möglich, ein breites Produktspektrum aus standardisierten Umfängen auf Einzelteil- und Baugruppenebene zu erzeugen [Sch05], [Rap99], [Fis08]. Die optimale Erzeugnisstruktur hat einen hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit. Allerdings bereitet das Strukturieren von Produkten in Baukästen bzw. Modulen vor allem bei einer hohen Anzahl an Produktvarianten Schwierigkeiten [Cea91].

3.1.4 Konstruktionsmethodik: Design for Assembly

Mit dem Ziel, den Konstruktionsprozess systematisch zu unterstützen, wurden zahlreiche Konstruktionsmethoden entwickelt. Daraus gingen die VDI-Richtlinien 2221 und 2222 hervor, die heute als allgemeingültige Richtlinien anerkannt sind [VDI2221], [VDI2222], [Pah07], [Spa11-2]. Das Schlagwort Design for X steht für die Bestrebungen, die gesamte Lebensdauer eines Erzeugnisses bereits bei der Konstruktion vorzudenken, von der Entwicklung über die Produktion bis zum Recycling. Alle relevanten Anforderungen an ein zu entwickelndes Erzeugnis sollen frühzeitig berücksichtigt werden. Hierunter fallen beispielsweise montage-, ergonomie-, recycling- und herstellungsgerechte Konstruktion, entsprechend muss die Entwicklung von Erzeugnissen interdisziplinär erfolgen [Bin13], [Wat08]. Das macht bereits bei der Konstruktion verschiedene, an die jeweilige Produktlebensphase angepasste Sichten auf das Erzeugnis erforderlich [Pos13].

Die fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur unterstützt hauptsächlich den Teilbereich der montagegerechten Konstruktion DfA (Design for Assembly). Ehe man sich mit den Fertigungs- und Montageanlagen befasst, ist das Erzeugnis auf fertigungs- und montagegerechte Gestaltung zu durchleuchten [Bau05], [Kon09]. Bereits im Rahmen der Konstruktion wird deshalb nicht nur die funktionale, sondern auch die fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur generiert, um herstellbare Erzeugnisse zu gewährleisten, um produktionsrelevante Daten zuordnen zu können und um Erzeugnis, Technik und Organisation im Sinne des Simultaneous Engineering parallel entwickeln zu können [Göp98], [Dec02], [Sei02].

3.1.5 Produktdatenmanagement: Datengliederung für die Digitale Fabrik

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen ... , die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden“ [VDI4499]. Integriert werden Produktentwicklung und Produktionsplanung, Gestaltung, Inbetriebnahme und Betrieb der Fabrik [Wes12], [Bra11], [Küh06]. E-Business steht für Electronic Business und damit die Anbahnung, Vereinbarung und Abwicklung elektronischer Geschäftsprozesse zwischen Marktteilnehmern [Bäc10], [Mei08], [Spa07].

Diese Informations- und Kommunikationssysteme zur Unterstützung von Unternehmensprozessen müssen vielfältige Produktdaten, die bei der Konstruktion erzeugt und über den Lebenszyklus laufend ergänzt werden, konsistent verwalten. Dazu braucht es eine Datenbasis, die das reale Erzeugnis hinreichend genau repräsentiert. Es genügt nicht, dass die Datenbasis sämtliche Daten und Informationen jedes Erzeugnisses aufnehmen kann, sie muss darüber hinaus so aufgebaut sein, dass die Daten und Informationen strukturiert abgelegt werden [Thi08], [Eve05]. Aufgrund der verschiedenen Sichtweisen der involvierten Abteilungen auf das Erzeugnis soll die Datenbasis unterschiedliche Beschreibungen des Erzeugnisses zulassen, erforderlich ist unter anderem eine Produktionssicht [Bon02], [Mut00], [Fel08], [Sti11]. Die

Gliederung der Produktionssicht entsprechend der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur ist unentbehrlich, um Produkten Fertigungs- und Montageinformationen strukturiert zuordnen zu können [DIN6789].

3.2 Bekannte Verfahren zur Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen

Die Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen, also die Festlegung von Montagebaugruppen, wird in den beschriebenen Forschungsfeldern seit drei Jahrzehnten intensiv erforscht. Bis heute wurden unterschiedlichste Verfahren entwickelt. Einige dieser Verfahren haben die Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen als primäre Aufgabe, andere unterstützen den gesamten Konstruktionsprozess oder das Variantenmanagement. Die Festlegung von Montagebaugruppen stellt in allen Fällen eine wichtige Teilaufgabe dar.

Die bekannten Verfahren werden im Folgenden kurz vorgestellt, dabei erfolgt eine Konzentration auf die Methoden und Vorgehensweisen, mit denen Montagebaugruppen festgelegt werden. Die Arbeiten werden in chronologischer Reihenfolge dargestellt, da sie teilweise aufeinander aufbauen.

Im Anschluss an die Vorstellung wird die Eignung der Verfahren für eine Anwendung im Tagesgeschäft des Stücklistenwesens von Produktionsunternehmen untersucht.

3.2.1 Fügeflächenanalyse (Gairola 1981)

Bereits 1981 schlug Gairola [Gai81] vor, durch die Analyse von Fügeflächen einen Montagegraphen aufzubauen. Ausgehend von einem beliebigen Bauelement bestimmt man die Nachfolger entlang einer bestimmten Füge-richtung, indem untersucht wird, ob zwischen zwei Bauelementen eine gemeinsame Fügefläche vorkommt. Die Vorgehensweise wird in einer Füge-richtung so lange fortgeführt, bis keine Nachfolger mehr vorkommen.

Mittels Zerlegung dieses Montagegraphen in Teilgraphen erfolgt eine systematische Bildung von Montagebaugruppen. Durch eine Auswertung der Kantenzüge wird der Montagegraph nach vorgegebenen Gesetzmäßigkeiten in Teilgraphen zerlegt. Diese Teilgraphen stellen die Montagebaugruppen dar.

3.2.2 Erzeugnis- und Montagestrukturierung (Ungeheuer 1986)

Ungeheuer [Ung86] sieht den Hauptansatzpunkt für tiefgreifende Rationalisierungserfolge im Erzeugnis, weil dessen konstruktive Ausführung sich unmittelbar auf die Montagestruktur auswirkt. Als Montagestruktur bezeichnet Ungeheuer die Gliederung des Produktionssystems in Fertigungs- und Montagebereiche. Das von ihm entwickelte Verfahren erstellt eine ferti-

gungsgerechte Erzeugnisstruktur als Basis für die anschließende rationelle Gestaltung anforderungsgerechter Montagestrukturen. Für die Festlegung von Montagebaugruppen skizzierte Ungeheuer drei unterschiedliche Vorgehensweisen, genannt deterministische, synthetische und analytische Methode. Die deterministische Methode geht von der Betrachtung des Gesamterzeugnisses aus und unterteilt dieses in vormontierbare und prüfbare Baugruppen. Die synthetische Methode geht von der Betrachtung der Einzelteile aus. Das Erzeugnis wird Teil für Teil, dem Montageablauf folgend, zusammengesetzt, wobei ebenfalls ein Aufbau in vormontierbare und prüfbare Baugruppen erfolgt. Die analytische Methode ist eine Kombination aus deterministischer und synthetischer Methode.

Ungeheuer beschreibt systematische Vorgehensweisen. Sie werden durch einfache Hilfsmittel, wie Fügematrix und Checklisten, unterstützt. Großen Wert legt er auf die Projektorganisation, insbesondere die Auswahl der Teammitglieder und die Bestimmung des Projektleiters. Der Konstrukteur sollte in bestimmten Abständen Hilfestellung aus anderen Bereichen in der Frage der montagegerechten Produktstrukturierung erhalten. Prädestiniert sind für diese Aufgabe Mitarbeiter aus der Arbeitsvorbereitung, möglichst der Montageplanung, und der Montage selbst. Entscheidend für den Erfolg einer solchen Maßnahme ist deren feste Institutionalisierung.

3.2.3 Wissensbasierter Entwurf montagegerechter Produkte (Richter 1991)

Richter [Ric91] realisierte eine wissensbasierte CAD-Systemkomponente zum Entwurf montagegerechter Erzeugnisse. Sie ermöglicht dem Konstrukteur das graphisch interaktive Entwerfen von Erzeugnissen und ermittelt weitgehend automatisch die Montageabläufe zur Herstellung des Erzeugnisses. Ziel ist es, im gesamten Konstruktionsprozess Aspekte aus der Montage bei der Produktgestaltung zu berücksichtigen.

Der Funktionsumfang beinhaltet unter anderem die Bildung von Montagebaugruppen, die in fünf Stufen erfolgt. Im Rahmen der CAD-Konstruktion werden montagerelevante Form- und Lageparameter abgeleitet und Einzelteile mit Toleranzen, Passungen und Oberflächenangaben versehen. In einem zweiten Schritt werden, ausgehend von einem Basisteil, die Einzelteile, die mit dem Basisteil direkt oder indirekt in Verbindung stehen, zu vorläufigen Montagebaugruppen zusammengefasst. Zur endgültigen Abgrenzung der Montagebaugruppen werden in einem dritten Schritt die Vorgängerbeziehungen zwischen den Einzelteilen jeder vorläufigen Montagebaugruppe durch Kollisionsprüfung bestimmt. In einem vierten Schritt werden auf Basis der vorläufigen Baugruppenzuordnung und den Vorgängerbeziehungen Regeln formuliert, welche die kritischen Einzelteile ermitteln, die keiner Montagebaugruppe eindeutig zugeordnet werden können. In einem letzten Schritt wird dann die endgültige Zugehörigkeit der kritischen Bauteile festgelegt, dazu dienen Benutzerentscheidungen sowie einfache Heuristiken, die einen möglichst hohen Vormontagefaktor bewirken.

3.2.4 Variant Mode and Effects Analysis - VMEA (Caesar 1991)

Aufgabe der als Variant Mode and Effects Analysis bezeichneten Vorgehensweise von Caesar [Cae91] ist die Gestaltung variantenreicher Serienprodukte, beispielsweise in der Automobilindustrie. Zur Beherrschung der Variantenvielfalt soll die Einzelteil- und Baugruppenvielfalt auf das funktionstechnisch erforderliche Maß beschränkt werden. Aber auch bereichsspezifische Unternehmensziele, wie beispielsweise des montagegerechten Konstruierens und der Optimierung des Fertigungs- oder Fügeprozesses, werden gegenüber der variantenorientierten Produktgestaltung nicht vernachlässigt.

Die VMEA unterstützt den Entwickler und Konstrukteur bei der gezielten Variation möglicher Baugruppen. In einem iterativen Optimierungsprozess werden die Effekte der Produktgestaltung auf die Effekte im Produktionsprozess transformiert und im Rückschluss monetär bewertet. Dazu ist laut Caesar eine intensive Zusammenarbeit aller Unternehmensbereiche erforderlich. Als Hilfsmittel zur Abgrenzung von Baugruppen dient ein Katalog mit Gestaltungsmaßnahmen.

3.2.5 Montagegerechte Produktgestaltung (Spies 1997)

Das Spies-Verfahren [Spi97] ist eine systematische Vorgehensweise zur Modularisierung¹³ von Erzeugnissen, die alle relevanten Einflüsse des komplexen Groß-Serienproduktes Automobil berücksichtigt. Sie funktioniert auch mit relativ wenigen Informationen. Ziel ist die Festlegung optimaler Modulumfangs (Montagebaugruppen) mit einer geringen Anzahl an Schnittstellen, um die im Laufe des Produktlebenszyklus möglichen Probleme zu minimieren. Dazu wird der Funktionsumfang eines Erzeugnisses untersucht und eine erste Modularisierung durchgeführt. Anschließend werden die Module überarbeitet, indem die Anzahl an Schnittstellen minimiert wird, bis alle Potenziale erschlossen sind.

Das Verfahren orientiert sich am von Prof. Boothroyd entwickelten DFA-Verfahren (Design For Assembly). Die Modularisierung erfolgt in einem interdisziplinären Projektteam. Spieß nennt 5 bis 6 Teilnehmer als ideale Größe. Eine Softwareunterstützung hat in erster Linie die Aufgabe, die systematische Abarbeitung aller Analyseschritte im iterativen Prozess sicherzustellen.

3.2.6 Modulare Produktentwicklung (Göpfert 1998)

Die Modulare Produktentwicklung nach Göpfert [Göp98], [Göp00], [Göp09] hat das Ziel, die Komplexität im Produktentwicklungsprozess beherrschbar zu machen. Die Entwicklungstätigkeit jedes Moduls soll größtenteils innerhalb einer Organisationseinheit geleistet werden,

¹³ Im Variantenmanagement werden Module so gegliedert, dass durch Kombination einer begrenzten Anzahl von Montagebaugruppen eine große Vielzahl von Produktvarianten zusammengestellt werden kann (siehe Kapitel 3.1.3).

damit Module parallel entwickelt werden können und dabei von den organisatorischen Einheiten möglichst autonom und mit geringem externem Koordinationsbedarf bearbeitet werden können. „Die Grundidee der Methodik besteht darin, die Überlagerung von technischen und organisatorischen Strukturen (Konstruktions- und Montagbaugruppen) transparent darzustellen und damit einer aufeinander abgestimmten gemeinsamen Gestaltung zugänglich zu machen“ /Göp00/. Dazu wird die Architektur des Produkts in einem Graphen aus zweierlei Perspektiven dargestellt. „Während die Funktionsstruktur beschreibt, welche Haupt- und Teilfunktionen das Produkt zu erfüllen hat und durch welche Komponenten diese Funktionen jeweils realisiert werden, beschreibt die Baustruktur den physischen Zusammenbau der Komponenten zu Baugruppen, Modulen und schließlich zum Gesamtprodukt“ /Göp00/. Die Baustruktur repräsentiert die Sicht von Fertigung und Montage, also Montagebaugruppen.

Die Festlegung der Montagebaugruppen im Rahmen der modularen Produktentwicklung nach Göpfert erfolgt in interdisziplinären Workshops. Eine Gruppe von Experten aus Entwicklung, Produktion, Marketing, Einkauf und weiteren, für das spezifische Entwicklungsprojekt relevanten Funktionsbereichen, konzipiert verschiedene technische und organisatorische Gestaltungsalternativen. Konflikte aufgrund unterschiedlicher Anforderungen werden transparent gemacht und dadurch gelöst, dass die erarbeiteten Alternativen mit Hilfe einer zuvor definierten und gewichteten Kriterienliste im Team bewertet werden. Zur Unterstützung der praktischen Workshoparbeit wurde ein Softwaretool entwickelt, mit dessen Hilfe alternative Erzeugnisstrukturen visualisiert, dokumentiert und mit einfachen graphischen Editierfunktionen¹⁴ bearbeitet werden können.

3.2.7 Modular Function Deployment - MFD (Erixon 1998)

Erixon [Eri98] beschreibt ein durchgängiges, methodengestütztes Verfahren zur systematischen Entwicklung modularer Erzeugnisstrukturen. Modulare Erzeugnisstrukturen beschreiben Baugruppen, die gleichermaßen funktions- und fertigungsgerecht sind. Die Methode wurde für ein breites Spektrum an Erzeugnissen angewendet, von Seilwinden über Autotüren bis hin zu Servomotoren. Die Erzeugnisstrukturen werden in fünf Schritten entwickelt, bewertet und optimiert. Anforderungen an die Modularisierung werden durch so genannte Modultreiber abgebildet. Die Gliederung des Erzeugnisses in Module erfolgt mit der Indication Matrix, die mögliche Module anhand sogenannter Modultreiber bewertet. Erixon berücksichtigt nur einen einzigen fertigungsspezifischen Modultreiber. Mehrere auf Erixon aufbauende Arbeiten - etwa von Abele, Bruns und Hueske [Abe09] und Blees [Ble11] - zielen auf eine bessere Berücksichtigung von Produktionsaspekten und erweitern die Anzahl der fertigungsspezifischen Modultreiber.

¹⁴ Etwa die Definition technischer Einheiten als beschriftete Rechtecke oder die Definition von Beziehungen als verankerte Beziehungslinien, die beim Verschieben der Elemente bestehen bleiben.

Die Festlegung von Baugruppen mit der Indication Matrix beruht laut Erixon hauptsächlich auf dem persönlichen Wissen eines Entwicklers und der Teammitglieder.

3.2.8 Produktstrukturierung (Rapp 1999)

Rapp [Rap99] stellt eine Vorgehensweise zur Bildung modularer Produktstrukturen¹⁵ (Erzeugnisstrukturen) und Produktplattformen vor, die in verschiedenen Industrieunternehmen erfolgreich eingesetzt wird. Die Produktstrukturierung nach Rapp unterstützt die Entwicklung, Produktion und Montage sowie den Vertrieb, indem sie eine systematische Untersuchung, Bewertung und Beeinflussung der Erzeugnisstruktur ermöglicht.

Die Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen erfolgt im Rahmen von interdisziplinären Arbeitssitzungen mit Experten. Als Methode schlägt Rapp eine nicht näher spezifizierte Kombination der bereits beschriebenen Verfahren von Ungeheuer (siehe Kapitel 3.2.2) und Erixon (siehe Kapitel 3.2.7) vor, zur Visualisierung nutzt er die grafische Darstellung nach Göpfert (siehe Kapitel 3.2.6).

3.2.9 Modularisierung von Produkten im Anlagenbau (Baumgart 2005)

Ziel von Baumgart [Bau05] ist, ein praxistaugliches Verfahren zur Konzeption von Baukastensystemen für Anlagen der Verarbeitungsindustrie zu entwickeln. Ermöglicht werden soll nicht nur die Entwicklung kundenspezifisch konfigurierbarer Erzeugnisse, sondern darüber hinaus auch die Entwicklung von Produkten, die zahlreichen weiteren unternehmensinternen Anforderungen, etwa der Produktion, gerecht werden. Die Gestaltung der Erzeugnisstruktur ist Teil einer umfassenden Konstruktionsmethodik und wird durch drei Methodikbausteine unterstützt. Diese beinhalten jeweils einen Vorgehensplan mit definierten Arbeitsschritten sowie die erforderlichen Hilfsmittel (Checklisten, Matrizen, Richtlinienkataloge und tabellarische Formulare) zur Lösungsausarbeitung.

Baumgart zufolge betrifft die Durchführung eines Modularisierungsprojektes nicht ausschließlich die Produktentwicklung, sondern zieht zusätzlich auch Tätigkeiten in der strategischen Produktplanung und in der Prozessgestaltung aller Unternehmensbereiche nach sich. Im Rahmen der Verfahrensentwicklung wurde eine Rechnerunterstützung realisiert, die auf die Dokumentation der Planungsergebnisse zielt und dazu Editier-Funktionen bereitstellt. Zur Gestaltung der Produktstruktur (Festlegung von Baugruppen) wurde ein Katalog mit produktneutralen Richtlinien ausgearbeitet.

¹⁵ Modulare Erzeugnisstrukturen beschreiben Baugruppen, die gleichermaßen funktions- und fertigungsgerecht sind.

3.2.10 Globalisierungsgerechte Produktstrukturierung (Große-Heitmeyer 2006)

Große-Heitmeyer [Gro06] entwickelte einen Methodenbaukasten zur Beurteilung und Weiterentwicklung einer globalisierungsgerechten Erzeugnisstruktur. Eine globalisierungsgerechte Erzeugnisstruktur beschreibt Montagebaugruppen, die ins Ausland verlagert werden können. Das charakteristische der Methodik ist zunächst eine genaue Analyse der Erzeugnisstruktur mit dem Ziel des Varianten- und Kompetenzmanagements. Eine kompetenzorientierte Betrachtung befähigt dazu, eine Erzeugnisstruktur zu erzeugen, die es trotz Auslagerungsanforderungen von Baugruppen ermöglicht, gezielt eigene technologische Kompetenzen in Deutschland zu halten, zu stärken und auszubauen. Berücksichtigt werden Aspekte der späten Variantenbildung, der Trennung nach variantenspezifischen und variantenneutralen Fertigungsprozessen sowie der länderspezifischen Variantenvielfalt.

Gemäß Große-Heitmeyer sollte für die globalisierungsgerechte Erzeugnisstrukturierung ein kleines Projektteam, das verantwortliche Fachleute aus Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Marketing und Vertrieb umfasst, gebildet werden. Je nach Bedarf wird dieses Kernteam durch Fachleute aus den beteiligten und angrenzenden Bereichen ergänzt. Die Planung erfolgt in vier Phasen, die durch Matrizen, Portfolios und Methodenbeschreibungen unterstützt werden.

3.2.11 Iterative Produktstruktur-Optimierung (Zagel 2006)

Zagel [Zag06] geht der Frage nach, wie eine Produktstruktur (Erzeugnisstruktur) zu gestalten ist, um den verschiedenartigen Anforderungen zur Beherrschung der Produktvielfalt gerecht zu werden. Dabei strebt er an, die Vielfalt in allen Wertschöpfungsstufen zu kontrollieren, um die Befriedigung der Kundenbedürfnisse mit einer wirtschaftlichen Leistungserbringung zu vereinbaren. Zagel setzt bei der Entwicklung und Konstruktion an, um die Strukturierung variantenreicher Produkte bestmöglich zu unterstützen. In diesem Zusammenhang erweitert er das STEP Applikationsprotokoll 214¹⁶ hinsichtlich wichtiger Aspekte, etwa um alternative Sichten unterschiedlicher Bereiche. Auf Basis dieses Konzepts entwickelt Zagel eine Vorgehensweise zur iterativen Produktstruktur-Optimierung. Sie basiert auf der Bewertung einer vorhandenen Produktstruktur und unterstützt die Auswahl von Maßnahmen, die bei nicht zufriedenstellender Produktstruktur angewendet werden können.

Die Optimierungsziele von Zagel beinhalten auch Einflussfaktoren der Produktion. Die Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Überarbeitung der Produktstruktur wird durch Ursachen-Wirkungs-Diagramme und Ursache-Maßnahmenlisten unterstützt, die ebenfalls Aspekte der Produktion umfassen.

¹⁶ STEP (STandard for the Exchange of Product model data) ist ein Standard zur Beschreibung von Produktdaten /STE14/. Die Applikationsprotokolle sind Pakete von Schnittstellen und Datentypen, die für einen bestimmten Anwendungsfall konzipiert sind. Anwendungsprotokoll 214 ist besonders auf die Automobilindustrie zugeschnitten.

3.2.12 Produktstrukturierung für mechatronische Systeme (Steffen 2007)

Ziel der Arbeit von Steffen [Ste07] ist es, ein Verfahren zur Strukturierung von komplexen mechatronischen Produkten zu entwickeln, das in den frühen Entwicklungsphasen eingesetzt werden kann. Da die Herstellung eines technischen Produkts bereits von Beginn an im Entwicklungsprozess betrachtet werden muss, kann der Aspekt der Produktion im Verfahren berücksichtigt werden. Als Resultat am Ende der Konzipierung liegt eine entwicklungsorientierte Erzeugnisgliederung vor. Technische, organisatorische sowie produktstrategische Abhängigkeiten werden durch Entwurfsregeln berücksichtigt, diese werden in einer strukturierten Beschreibungsform abgebildet und in weiteren Entwicklungsschritten angewendet. Die Produktion wird dabei nur mit einer Entwurfsregel abgedeckt.

Die Strukturierung lässt sich nach Steffen weitgehend parallel durchführen und auf Teams mit speziellen Kompetenzen aufteilen. Mit Hilfe der Entwurfsregeln werden klare Entscheidungshilfen gegeben, die die Entwickler laufend im Entwicklungsprozess anwenden können. Die Anwendung der Entwurfsregeln kann dabei implizit erfolgen oder durch eine Reihe von etablierten Methoden, etwa die Module Indication Matrix nach Erixon [Eri98], unterstützt werden.

3.2.13 Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle (Bossmann 2007)

Bossmann [Bos07] stellt ein umfassendes Konzept für die integrierte Produktentstehung vor. Die Konzeptentwicklung beschäftigt sich mit der Erarbeitung von Methoden, die zeitaufwändige Tätigkeiten minimieren, indem sie größtmöglich automatisiert werden. Innerhalb des Konzeptes wird unter anderem verstärkt auf flexible Strukturen im Bereich der Produktmodellierung eingegangen, denn schon „in den frühen Phasen der Produktentstehung werden mit dem Aufbau der Produktstruktur Vorentscheidungen getroffen, die die späteren Fertigungs- und Montageprozesse sowie die logistischen Abläufe betreffen“ /Bos07/. Die Basis für einen forcierten Einsatz moderner Software „bilden standardisierte Konstruktionselemente, die unter Verwendung der Feature-Technologie erstellt werden“ /Bos07/. Durch eine frühe und verbesserte Zusammenarbeit der Abteilungen, die in den Produktentstehungsprozess involviert sind, werden die Erzeugnisse hinsichtlich der Bauteilfertigung und der Montage besser aufeinander abgestimmt. Dadurch rechnet Bossmann mit einem reibungsfreieren Produktionsanlauf.

Bossmann skizziert ein Konzept zur Generierung von Montagebaugruppen auf Basis von Montage-Features, ähnlich dem bereits beschriebenen Verfahren von Richter (siehe Kapitel 3.2.3). Montage-Features sind Informationselemente, die das Produktmodell um zusätzliche Informationen zum Montageprozess erweitern, etwa über Fügeflächen, Fügerichtungen, Toleranzen oder Greifflächen. Aus den Montage-Features wird eine Fügeflächenmatrix und ein Fügeflächengraphen abgeleitet und daraus ein Montagevorranggraph, der um Prozessin-

formationen erweitert ist. Durch Analyse des Montagevorranggraphen werden Montagebaugruppen festgelegt. Eine konkrete Methode zur Festlegung von Montagebaugruppen beschreibt Bossmann nicht.¹⁷

3.2.14 Entwicklung modularer Produktfamilien (Blees 2011)

Ergebnis der Methode von Blees [Ble11] ist eine Produktstruktur, die die Konfiguration einer großen Vielfalt von Produktvarianten auf Grundlage einer kleinen internen Vielfalt erlaubt. Ziel ist es, die Potenziale modularer Produktfamilien in allen Produktlebensphasen zu erschließen. Die Produktlebensphase Produktion wird in Anlehnung an Erixon [Eri98] durch Modultreiber berücksichtigt. Die Modultreiber nach Blees sind der Prozess (das Modul unterliegt speziellen Fertigungs- oder Montageprozessen), die Organisation (das Modul bildet einen geeigneten Arbeitsumfang für eine Organisationseinheit) und separates Testen (das Modul soll vor der Endmontage separat geprüft werden) /vgl. Ble11/. Zur visuellen Unterstützung setzt Blees bei der Ableitung von Modulen einen Netzplan ein, der auf der rautenförmigen Darstellung von Produktstrukturen nach Göpfert [Göp98] aufsetzt. Dieser Netzplan zeigt gleichzeitig die Modultreiber und die Module auf. Er hilft, Baugruppen festzulegen, welche die widersprüchlichen Anforderungen der unterschiedlichen Bereiche und Produktlebensphasen bestmöglich erfüllen.

Zur Anwendung wird die Methode als Workshop-Reihe aufbereitet. Die Reihe umfasst acht Workshops, die durch zusätzliche Vorbereitungsstermine ergänzt werden. Teilnehmer sind die Mitglieder des Entwicklungsteams der Produktfamilie sowie Vertreter aus den am Projekt beteiligten Fachbereichen.

3.2.15 Bewertung der bekannten Verfahren

In Kapitel 1.3 wurden die Ziele, an denen sich Verfahren zur Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen messen lassen müssen, begründet. Daran werden die oben beschriebenen Verfahren bewertet.

¹⁷ Die Anwendung der Feature-Technologie [Spu98], [Vaj98], zur Montageplanung erfordert integrierte Produktmodelle, die sowohl eine technische als auch eine technologische Beschreibung enthalten [Ble07], [Las09]. Die komplexen Fragestellungen der Montage werden als zukünftig zu bearbeitende Felder betrachtet, für die es derzeit keine bestehenden Lösungen gibt [Klu11]. Integrierte Produktmodelle sind ein interessanter Ansatz, in ihrer Tiefe jedoch nicht ausreichend dokumentiert [Ald09]. „Ein manuelles Eingreifen bei der Festlegung der Montagereihenfolge ist somit unumgänglich und wird auch im Rahmen der digitalen Planung weiterhin notwendig bleiben“ [Fra03:33].

Ziel 1: Effizienz

Um den Aufwand des Planers bei der Erstellung von Fertigungsstücklisten zu entlasten, muss der Aufwand für die Anwendung eines Verfahrens geringer sein, als bei einer manuellen Erstellung der Fertigungsstückliste. Das bedeutet, dass nur wenige Planungsaufgaben anfallen dürfen, die vom Planer durchgeführt werden müssen, und es dürfen keine umfangreichen Dateneingaben zur Anwendung erforderlich sein.

Auf eine umfassende Realisierung als EDV-System zielen die Fügeflächenanalyse nach Gairola [Gai81], der Wissensbasierte Entwurf montagegerechter Produkte nach Richter [Ric91], die Feature-basierten Produkt- und Prozessmodelle nach Bossmann [Bos07] und die Iterative Produktstruktur-Optimierung nach Zagel [Zag06] ab. Eine notwendige Voraussetzung zur Realisierung eines Verfahrens als EDV-System ist die Algorithmierbarkeit, also ob der gesamte Ablauf des Verfahrens vollständig definiert und jeder einzelne Planungsschritt eindeutig beschrieben ist.

Nur Gairola und Richter stellen die zur Festlegung von Montagebaugruppen erforderlichen Planungsschritte vollständig dar und beschreiben sie ausreichend konkret.

Bossmann entwickelt sein Konzept teilweise theoretisch, eine prototypische Umsetzung scheint lediglich für Teilumfänge realisiert. In Bezug auf die Generierung der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur führt er lediglich aus: „Durch die Analyse von Montagevorranggraphen können sinnvolle Baugruppen ermittelt werden, um Module zu erstellen, die vor der Montage am Produkt geprüft werden können“ [Bos07:116]. Zur Festlegung von Montagebaugruppen ist offenbar ein manueller Planungsschritt erforderlich, der nicht näher beschrieben wird.

Die Beschreibungen von Zagel, nämlich Ursachen-Wirkungs-Diagramme und Ursache-Maßnahmenlisten, reichen zur Algorithmierung der Festlegung von Montagebaugruppen nicht aus. Er merkt dazu an: „Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Konzept ist bisher nicht als vollständiger Software-Prototyp umgesetzt“ [Zag06:165]. „Grundsätzlich vorstellbar wäre auch die Überführung der Bewertungsmethoden in ein höherwertiges Optimierungssystem. [...] Hierbei müsste die Auswahl der erforderlichen Maßnahmen zur Änderung der Produktstruktur automatisch getroffen werden. [...] Das dieser Anwendung zugrunde liegende System wäre äußerst komplex und vermutlich nur mit Mitteln des „Operations Research“ realisierbar“ [Zag06:174f].

Die weiteren beschriebenen Verfahren zielen nicht primär auf Effizienz, etwa durch eine umfassende Automatisierung. Sie bezwecken eine Unterstützung von Experten unterschiedlicher Disziplinen¹⁸. Aus der Anwendung dieser Verfahren resultieren umfangreiche Projekte, bei denen zahlreiche Aufgabenstellungen in Workshops von interdisziplinären Teams bearbei-

¹⁸ Diesbezügliche Aussagen sind oben bei den Beschreibungen der Verfahren ausgeführt.

tet werden müssen. Sie beschreiben im Kern systematische Vorgehensweisen für überwiegend manuelle Planungen. Die unterstützenden Werkzeuge sind methodisch eher einfach, meist handelt es sich lediglich um Checklisten oder Diagramme. Selbständig optimierende Planungsmethoden für die Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen, die automatisiert werden könnten, werden nicht zur Verfügung gestellt. Vielmehr erfordert die Anwendung der Planungsmethoden die Kreativität und das Produktionswissen von erfahrenen Planern und Konstrukteuren.

Ein Beispiel dafür ist die Erzeugnis- und Montagestrukturierung nach Ungeheuer. Ungeheuer listet zwar eine Vielzahl produktionsrelevanter Kriterien auf, die bei der Definition von Montagebaugruppen berücksichtigt werden können, führt dann jedoch lediglich aus: „Bei einer konsequenten und systematischen Anwendung dieser Kriterien werden stufenweise mit Hilfe der deterministischen Methode die zu einer Baueinheit gehörenden Baugruppen zusammengefasst.“ [Ung86:74]. Eine eindeutige und vollständige Methode zur Abgrenzung von Montagebaugruppen, die algorithmiert werden kann, beschreibt Ungeheuer nicht.

Auch Erixon [Eri98] beschreibt beim Modular Function Deployment keine algorithmierbare Methode zur Abgrenzung von Montagebaugruppen, regt aber zu prüfen an, ob die Möglichkeit der Entwicklung eines Werkzeugs zur Mustererkennung, das auch die Strukturen und Schnittstellenbedingungen der Unterfunktionen im Erzeugnis berücksichtigt, besteht. „The MIM-matrix analysis, particularly concerning the grouping of sub-functions into modules ... rests mainly on the personal knowledge of the design engineer and team. It would be worthwhile to look into the possibilities to provide a support-tool for this process. This may possibly consist of "a pattern-recognition" function that also considers the existing structure and interface constraints of the sub-functions within the product.“ [Eri98:158f].

Baumgart [Bau05] erklärt bei der Modularisierung von Produkten im Anlagenbau, dass die Funktionen der Rechnerunterstützung in Zukunft noch erweitert werden sollten: „Die konstruktionsbegleitende Spezifikation gewährleistet die Dokumentation von Arbeitsergebnissen der Methodikanwendung. Die Ausarbeitung von Ergebnissen der Arbeitsschritte wird durch die Rechnerunterstützung allerdings hauptsächlich in der Synthese und damit nur zu einem Teil unterstützt [Bau05:178].

Die Frage, ob eine Projektarbeit von Experten unterschiedlicher Disziplinen mit aktueller Softwaretechnologie automatisieren werden kann, thematisiert Hennig [Hen01]. Er untersuchte die Anforderungen an eine EDV-Realisierung allein der Datenbasis eines Planungssystems zur integrierten Entwicklung von Produkt und Montagesystem. Diese muss unter anderem eine extrem große Menge an Daten organisieren können und ein verteiltes Arbeiten mit sehr vielen Anwendern zulassen. Hennig konnte nur Teilumfänge der Datenbasis prototypisch realisieren. Es ist ihm „nicht möglich abzuschätzen, in welchem Zeitraum und mit welchem Aufwand eine produktiv einsetzbare Realisierung erfolgen kann“ [Hen01:130].

Zwischenfazit: Mit Ausnahme der Fügeflächenanalyse nach Gairola [Gai81] und dem Wissensbasierten Entwurf montagegerechter Produkte nach Richter [Ric91] finden sich in den bekannten Verfahren zur Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen keine ausreichend ausgearbeiteten Methoden. Diese wären aber eine notwendige Voraussetzung für eine Effizienzsteigerung durch Automatisierung bei der Festlegung von Montagebaugruppen.

Ziel 2: Effektivität

Die Güte der Ergebnisse muss gewährleisten, dass die vom Verfahren definierten Baugruppen wirtschaftlich produziert werden können, also beispielsweise montier-, prüf- und lagerbar sind.

Dies bedingt eine ausreichende Berücksichtigung von Produktionsaspekten, die nur bei den Verfahren von Ungeheuer [Ung86], Spies [Spi97], Göpfert [Göp98] und Große-Heitmeyer [Gro06] möglich ist. Diese Verfahren zeigen, dass bei der Generierung von fertigungsgerechten Erzeugnisstrukturen eine große Vielfalt an Einflussfaktoren berücksichtigt werden muss: von der Geometrie (Baubarkeit) über Prüf- und Lagerbarkeit bis hin zum Produktionssystem oder gar dem Standort. Dazu kommen Fertigungstechnologien, Produktvarianten, die zu produzierende Menge und vieles mehr.

Die Fügeflächenanalyse nach Gairola [Gai81] nutzt nur ein einziges Kriterium zur Generierung der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur, Montagebaugruppen werden bei seinem Verfahren allein aus Geometriedaten abgeleitet. Geometrie kann zwar als notwendiges Ausschlusskriterium herangezogen werden, andere Kriterien, wie Montagegerechtheit oder Erreichbarkeit, werden dabei aber völlig vernachlässigt [Fra03]. Der Wissensbasierte Entwurf montagegerechter Produkte nach Richter [Ric91] und die Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle nach Bossmann [Bos07] nutzen zusätzlich einfache Montagefeatures. Zur Erstellung einer effektiven Fertigungsstückliste reicht das bei weitem nicht aus.

Die weiteren Verfahren wurden zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses oder für das Variantenmanagement entwickelt. Die Produktion wird dabei nur als einer unter vielen Gesichtspunkten betrachtet. Diese Verfahren bilden die Produktion lediglich rudimentär durch wenige, einfache Kriterien ab. Als Beispiel hierfür sei die Modularisierung von Produkten im Anlagenbau nach Baumgart genannt. Das einzige produktionsrelevante Kriterium, das nicht weiter ausgeführt wird, lautet „Produktvarianten sollen durch Zusammenbau vormontierter, standardisierter Bausteine in der Montage hergestellt werden“ [Bau05, S.106]. Ein weiteres Beispiel ist die Variant Mode and Effects Analysis nach Caesar. Lediglich zwei so genannte Gestaltungsmaßnahmen berücksichtigen produktionsrelevante Aspekte, nämlich „Auftragsneutrale Vormontageumfänge abgrenzen“ und „Vormontageumfänge gegen Ende der Montagereihenfolge vorsehen“ [Cae91:71]. Zur Erstellung einer effektiven Fertigungsstückliste, mit der wirtschaftlich produziert werden kann, reichen derartige Kriterien nicht aus.

Zwischenfazit: Allenfalls mit den Verfahren von Ungeheuer [Ung86], Spies [Spi97], Göpfert [Göp98] und Große-Heitmeyer [Gro06] ist die Festlegung von effektiven Montagebaugruppen, die wirtschaftlich produziert werden können, möglich.

Ziel 3: Universalität

Ein Verfahren soll möglichst universal sein, so dass es ohne aufwändige Vorbereitung für verschiedenartige Montagefälle eingesetzt werden kann. Insbesondere soll das Verfahren auch für komplexe Erzeugnisse, die vielfältige Fertigungstechnologien benötigen, ohne Training anwendbar sein.

Universell einsetzbar ist allenfalls die Fügeflächenanalyse nach Gairola [Gai81], denn Geometrie ist vom Montagefall weitgehend unabhängig. Alle anderen Verfahren erfordern eine aufwändige Daten- oder Wissensbasis, die - mit einem im Stücklistenwesen praktikablen Aufwand - nicht erstellt und gepflegt werden kann.

Ungeheuer bringt die Problematik auf den Punkt: „Die Kriterien für die Ermittlung solcher Haupt- und Unterbaugruppen sind aber produktabhängig. Sie müssen daher für jeden Anwendungsfall neu definiert werden.“ [Ung86:70]. Für neue Montagefälle müssen weitere Kriterien festgelegt werden und eine Auswahlmethodik, wann welches Kriterium benutzt wird, muss definiert werden. Bei Verfahren, die eine umfassende Realisierung als EDV-System anstreben¹⁹, erfordert dies eine aufwändige Erweiterung der Daten- oder Wissensbasis. Bei Verfahren, die eine Projektarbeit von Experten unterschiedlicher Disziplinen unterstützen²⁰, muss die Expertise im Expertenteam erweitert werden, es ist also eine Qualifizierung oder eine Ausweitung des Expertenteams erforderlich.

Zwischenfazit: Außer der Fügeflächenanalyse nach Gairola [Gai81] ist die Erweiterung der bisher bekannten Verfahren auf neue Montagefälle für eine Anwendung im Tagesgeschäft des Stücklistenwesens zu aufwändig.

¹⁹ Auf eine umfassende Realisierung als EDV-System zielen die Fügeflächenanalyse nach Gairola [Gai81], der Wissensbasierte Entwurf montagegerechter Produkte nach Richter [Ric91], die Feature-basierten Produkt- und Prozessmodelle nach Bossmann [Bos07] und die Iterative Produktstruktur-Optimierung nach Zagel [Zag06] ab.

²⁰ Die interdisziplinäre Projektarbeit von Expertenteams unterstützen die Variant Mode and Effects Analysis nach Ceasar [Cae91], die Montagegerechte Produktgestaltung nach Spies-Verfahren [Spi97], die Modulare Produktentwicklung nach Göpfert [Göp98], das Modular Function Deployment nach Erixon [Eri98], die Produktstrukturierung nach Rapp [Rap99], die Modularisierung von Produkten im Anlagenbau Baumgart [Bau05], die Globalisierungsgerechte Produktstrukturierung nach Große-Heitmeyer [Gro06], die Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme nach Steffen [Ste07] und die Entwicklung modularer Produktfamilien nach Bles [Ble11].

Zusammenfassende Bewertung:

Keines der bisher bekannten Verfahren ist für die Anwendung im Tagesgeschäft des Stücklistenwesens geeignet. Diese Verfahren wurden für andere Aufgabenstellungen entwickelt, und können die Ziele Effektivität, Effizienz und Universalität nicht gleichzeitig erfüllen. Bereits 1995 bemängelte Grupp, dass der Entwicklungsstand der Rechnerunterstützung in Konstruktion und Arbeitsplanung der Bedeutung des Stücklistenwesens nicht gerecht wird [Gru95]. Dieses Defizit besteht bis heute.

Verfahren \ Eignung	Anwendbarkeit im Tagesgeschäft des Stücklistenwesens		
	Effizienz	Effektivität	Universalität
Gairola	●	○	●
Ungeheuer	○	●	○
Richter	●	○	○
Caesar	○	○	○
Spies	○	●	○
Göpfert	○	●	○
Erixon	○	○	○
Rapp	○	○	○
Baumgart	○	○	○
Große-Heitmeyer	○	●	○
Zagel	○	○	○
Steffen	○	○	○
Bossmann	○	○	○
Blees	○	○	○

im Grundsatz geeignet
 prinzipbedingt ungeeignet

Abbildung 10: Eignung der Verfahren für das Tagesgeschäft im Stücklistenwesen

4 Automatische Anpassungsplanung statt manueller Neuplanung

Die bisher bekannten Verfahren zielen darauf ab, Neuplanungen zu unterstützen. Eine Neuplanung zeichnet sich dadurch aus, dass die fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur erstmals generiert wird, es wird also nicht auf vorhandene Erzeugnisstrukturen bzw. Stücklisten zurückgegriffen. Neuplanungen erfordern umfangreiches Ingenieurwissen zu Produktionsprozessen und Fertigungstechnologien, entsprechend sind die Verfahren sehr komplex. Um die Problematik einer eventuell nicht beherrschbaren Komplexität zu umgehen, entwickelt die vorliegende Arbeit ein Verfahren, das die Generierung der fertigungsgerechten Erzeugnisstrukturen von Fertigungsstücklisten im Rahmen von Anpassungsplanungen unterstützt. Die Vorteile von Anpassungsplanungen sind offensichtlich, die damit verbundenen Einschränkungen sind in der Praxis begrenzt (siehe Kapitel 2.1).

- Ein *Verfahren* beschreibt einen geregelten, in Verfahrensschritte zerlegten, nachvollziehbaren und wiederholbaren Ablauf mit unterstützenden Methoden.
- *Generierung der Fertigungsstückliste* bzw. der *fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur* eines Erzeugnisses bedeutet, die Montagebaugruppen festzulegen und die passenden Einzelteile zuzuordnen.
- *Anpassungsplanung* ist die Abänderung einer bereits bestehenden Stückliste in der Art, dass sie das neue Erzeugnis, das dem alten ähnlich ist, darstellt.

Der Stücklisten-Adaptor wird theoretisch entwickelt, prototypisch realisiert und durch zwei Anwendungen evaluiert.

4.1 Lösungsansatz

Ein einleitendes Beispiel (Abbildung 11) soll den neuen Lösungsansatz verdeutlichen²¹. Ausgangspunkt ist eine im Stücklistenwesen produzierender Unternehmen typische Planungssituation, die eine Anpassungsplanung ermöglicht. Für ein Vorgängererzeugnis sind sowohl die Konstruktionsstückliste (oben links in Abbildung 11) als auch die Fertigungsstücklisten (unten links) vorhanden. Ein neues Erzeugnis wurde konstruiert. Es ist in Form der neuen Konstruktionsstückliste dokumentiert (oben rechts). Aufgabenstellung ist es, die zunächst noch unbekannte Fertigungsstückliste für das neue Erzeugnis zu ermitteln (unten rechts).

²¹ Das zu entwickelnde Verfahren nutzt zur Identifizierung von Baukomponenten die Sachnummer. Im Interesse einer leichten Lesbarkeit, werden in den Beispielen sprechende Bezeichnungen verwendet.

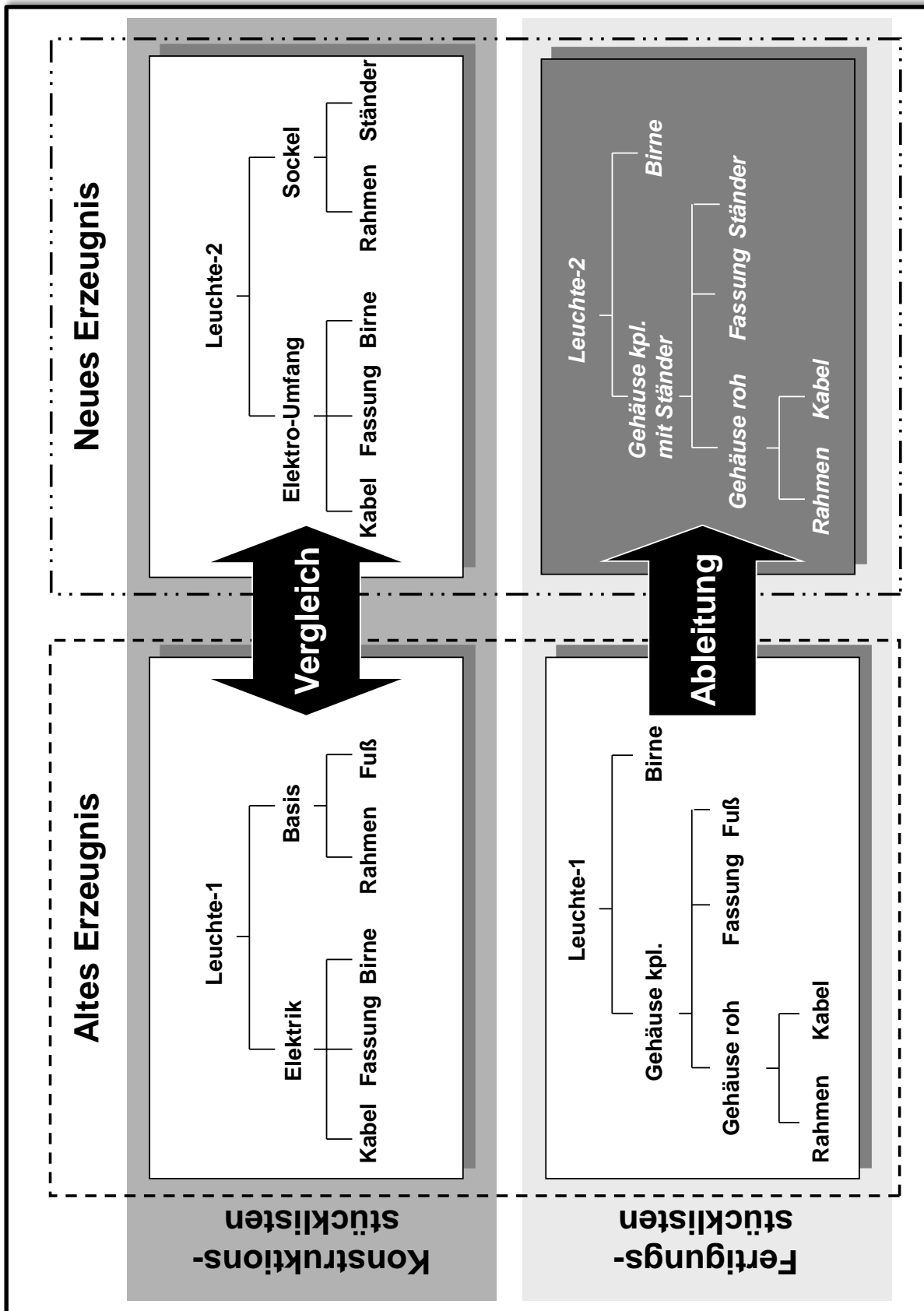


Abbildung 11: Die Idee des neuen Verfahrens

Schritt 1:

Ein Vergleich der beiden Konstruktionsstücklisten (Abbildung 11 oben) zeigt, dass das alte und das neue Erzeugnis die gleiche "Elektrik" besitzen. Zwar hat der Konstrukteur eine neue Bezeichnung vergeben, aber die Konstruktionsbaugruppe "Elektrik" in der alten Konstruktionsstückliste (links oben) und der "Elektro-Umfang" in der neuen Konstruktionsstückliste (rechts oben) setzen sich aus genau den gleichen Einzelteilen zusammen.

Deutlich wird auch, dass die alte Konstruktionsbaugruppe „Basis" und die neue Konstruktionsbaugruppe "Sockel" vermutlich ähnlich sind, da der "Rahmen" unverändert geblieben ist.

Wenn aber „Basis" und "Sockel" ähnlich sind, so kann vermutet werden, dass der entfallende "Fuß" durch den neu hinzukommenden "Ständer" ersetzt wurde.

Schritt 2:

Das Wissen aus Schritt 1 kann zum Aufbau der neuen Fertigungsstückliste genutzt werden. Alle Einzelteile der Montagebaugruppe "Gehäuse roh" in der alten Fertigungsstückliste (links unten) sind unverändert auch in der Konstruktionsstückliste des neuen Erzeugnisses (rechts oben) vorhanden. Vermutlich kann diese Montagebaugruppe mit all ihren Einzelteilen in die neue Fertigungsstückliste (rechts unten) kopiert werden.

Auch die Einzelteile der Montagebaugruppe "Gehäuse kpl." sind weiterhin vorhanden, jedoch wurde der "Fuß" durch den "Ständer" ersetzt. Entsprechend steht zu vermuten, dass die Montagebaugruppe auch in der neuen Fertigungsstückliste angelegt werden kann, allerdings mit neuer Bezeichnung (z.B. "Gehäuse kpl. mit Ständer") und mit dem geänderten Einzelteil "Ständer".

Durch Ergänzung des unverändert gebliebenen Einzelteils "Birne" wird die neue Fertigungsstückliste fertig gestellt.

Im einleitenden Beispiel konnte die gesuchte Fertigungsstückliste des neuen Erzeugnisses ohne umfassendes Produktionswissen, etwa über Technologien oder Produktionsprozesse, generiert werden²². Als Eingangsdaten wurden nur die Konstruktionsstücklisten von altem und neuem Erzeugnis sowie die Fertigungsstückliste des alten Erzeugnisses verwendet. Die Generierung erfolgte allein durch Vergleich der Sachnummern (im Beispiel wurde eine sprechende Bezeichnung verwendet) mit Hilfe von Wissen über den prinzipiellen Aufbau von Stücklisten und über grundlegende Zusammenhänge zwischen Baugruppen.

²² Im zu entwickelnden Verfahren wird aus gleichem Teileumfang nicht vollautomatisch auf gleiche Konstruktionsbaugruppen geschlossen (siehe „Elektrik“ und „Elektro-Umfang“ im einführenden Beispiel), vielmehr werden derartige Vermutungen dem Planer zur Überprüfung vorgelegt.

4.2 Begründung des Lösungsansatzes

Der Stücklisten-Adaptor schreibt die Fertigungsstückliste eines bestehenden Erzeugnisses ab und arbeitet dabei die veränderten Umfänge des neuen Erzeugnisses ein. Anders ausgedrückt: Er versucht, die Montagebaugruppen des alten Erzeugnisses mit den Einzelteilen des neuen Erzeugnisses aufzubauen²³. Resultat ist die Fertigungsstückliste für das neue Erzeugnis.

Dem neuen Lösungsansatz zur Generierung von fertigungsgerechten Erzeugnisstrukturen im Rahmen von Anpassungsplanungen liegt die Hypothese zugrunde, dass eine Art genereller Bauplan von Erzeugnisstrukturen existiert, und dass dieser genügend Informationen enthält, um eine Anpassungsplanung weitgehend automatisch durchzuführen. Zur Entwicklung eines Verfahrens werden die Integritätsbedingungen²⁴ dieses Bauplans explizit herausgearbeitet und in automatisch auswertbare Regeln gefasst.

Die Beschränkung auf Anpassungsplanungen ermöglicht es, die Komplexität des Verfahrens beherrschbar zu halten. Die Nutzung des generellen Bauplans von Erzeugnisstrukturen bietet die Chance, den Planer wirkungsvoll zu unterstützen und gleichzeitig den Umfang der erforderlichen Eingabedaten gering zu halten.

Außerdem werden bei Anpassungsplanungen Optimierungen, die für das alte Erzeugnis durchgeführt wurden, in die neue Fertigungsstückliste übertragen und Planungsfehler werden vermieden. Die damit verbundenen Einschränkungen sind in der Praxis begrenzt, da Anpassungsplanungen bei der Generierung von fertigungsgerechten Erzeugnisstrukturen in vielen Fällen anwendbar sind (siehe Kapitel 2.1). Mindestens 85% aller Entwicklungen basieren auf Vorläufererzeugnissen. In diesen Fällen wird ein Erzeugnis bearbeitet, dessen Fertigungsstückliste in etwa schon bekannt ist [Ehr09]. Selbst bei Neuteilen handelt es sich in der Regel um Teile, die nur aufgrund geringfügiger geometrischer Abweichungen eine neue Sachnummer erhalten haben, aber unter Produktionsgesichtspunkten durchaus mit einem oder mehreren vorhandenen Teilen vergleichbar sind [Köh89].

Die Anpassungsplanung, also die Abänderung bestehender Stücklisten, ist schon heute die am weitesten verbreitete manuelle Vorgehensweise. Die Anlehnung des Verfahrens an der gewohnten Vorgehensweise hat den Vorteil, dass der Planer die Abläufe nachvollziehen und (Zwischen-)Ergebnisse interpretieren kann.

²³ Wenn beispielsweise alle Einzelteile einer alten Montagebaugruppe auch in der neuen Konstruktionsstückliste vorhanden sind, so kann die betreffende Montagebaugruppe mit den neuen Einzelteilen in die neue Stückliste kopiert werden. Sind dabei alle Einzelteile unverändert geblieben, so kann die Sachnummer der alten Montagebaugruppe übernommen werden. Falls Einzelteile ersetzt wurden, oder wenn nicht alle Einzelteile im neuen Erzeugnis vorhanden sind, so wird die Montagebaugruppe verändert angelegt und dem Planer zur Überprüfung und Überarbeitung markiert.

²⁴ Integritätsbedingungen beschreiben die logische Korrektheit von Stücklisten, also Fehlerfreiheit, Widerspruchsfreiheit und Vollständigkeit.

4.3 Innovation des zu entwickelnden Verfahrens

Ganz offensichtlich liegt jeder Strukturstückliste, unabhängig vom konkreten Erzeugnis, das sie beschreibt, eine Art genereller Bauplan zugrunde. Anders ausgedrückt: Es gibt Integritätsbedingungen, die die logische Korrektheit von Stücklisten, also Fehlerfreiheit, Widerspruchsfreiheit und Vollständigkeit, allgemeingültig beschreiben.

Die zentrale Fragestellung der vorliegenden Arbeit lautet: Reichen die Integritätsbedingungen des generellen Bauplans von Erzeugnisstrukturen für eine Anpassungsplanung aus, und wie gelingt es, sie so in Inferenzregeln²⁵ abzubilden, dass die Anpassungsplanung algorithmiert werden kann? Um diese Frage zu beantworten, werden die Inferenzbedingungen explizit herausgearbeitet und in allgemeingültige, formale Inferenzregeln gefasst. Außerdem wird aufgezeigt, mit welchem Ablauf die Inferenzregeln ausgewertet werden können und mit welchen Modellen Zwischenergebnisse gespeichert werden können.

Methodisch ungelöst war bisher die Generierung der Erzeugnisstruktur in der neuen Fertigungsstückliste. Die Herausforderung liegt in den Unterschieden von funktionaler und fertigungsgerechter Erzeugnisstruktur. Einige Konstruktionsbaugruppen sind anders strukturiert, als die Montagebaugruppen des gleichen Erzeugnisses. Wenn im neuen Erzeugnis eine Konstruktionsbaugruppe konstruktiv anders ausgeführt ist als im alten Erzeugnis, so ist unklar, welche Montagebaugruppen davon betroffen sind und wie die neuen Montagebaugruppen aufgebaut sind.

Das einleitende Beispiel (Abbildung 11) deutet an, wie nicht produzierbare Konstruktionsbaugruppe aufgespürt und neue Fertigungsbaugruppen generiert werden. Diese Idee wird in ein anwendbares Verfahren umgesetzt.

4.4 Verfahrensspezifische Konzepte zur Umsetzung der Ziele

Der Stücklisten-Adaptor wird konzeptionell auf die Ziele Effizienz, Effektivität und Universalität (siehe Kapitel 1.3) ausgerichtet. Im Folgenden wird für jedes Ziel beschrieben, welche Anforderungen daraus in Bezug auf eine Anpassungsplanung entstehen, durch welche grundlegenden Konzepte diese Anforderungen umgesetzt werden sollen und wie der Stücklisten-Adaptor evaluiert werden kann.

²⁵ Inferenzregeln schließen aus explizit bekannten Fakten auf bisher verborgenes, implizites Wissen.

4.4.1 Effizienz durch Algorithmierbarkeit

Ziel 1 fordert Effizienz, also dass der Aufwand für die Anwendung des Verfahrens geringer ist, als bei einer manuellen Erstellung der Fertigungsstückliste. Planungsaufgaben, die der Planer ausführen muss, und umfangreiche Dateneingaben sind zu vermeiden.

Daraus resultiert die Anforderung, die Anpassungsplanung so weit wie möglich zu automatisieren. Um den Planer wirkungsvoll zu entlasten, soll ein Entwurf der Fertigungsstückliste vom Verfahren selbständig generiert werden. Der Planer braucht diesen lediglich zu überprüfen und begrenzt zu überarbeiten. Die angestrebte Automatisierung der Anpassungsplanung wird bereits in der Konzeption des Verfahrens angelegt. Dabei genügt es nicht zu fordern „Fasse geeignete Einzelteile zu einer Montagebaugruppe zusammen“. Notwendig ist die Ausarbeitung eines Algorithmus, das ist eine berechenbare²⁶, vollständige²⁷ und eindeutige²⁸ Handlungsvorschrift, wie dies konkret zu geschehen hat. Denn ohne Algorithmus kann ein Planungsschritt nicht automatisiert werden und bei der Anwendung wird ein manueller Eingriff des Planers erforderlich. Als methodische Basis für den Stücklisten-Adaptor wird ein Algorithmus entwickelt, dieser wird mathematisch exakt beschrieben²⁹.

Um die Notwendigkeit von Dateneingaben durch den Planer zu minimieren, sollen als Input nur Daten verwendet werden, die sowieso in ERP- oder CAD-Systemen vorhanden sind. Bezüglich der Inputdaten strebt der Stücklisten-Adaptor an, nur in den ERP- oder CAD-Systemen gespeicherte Konstruktions- und Fertigungsstücklisten zu verwenden.

Durch eine theoretische Analyse des Verfahrens kann evaluiert werden, ob der Lösungsweg vollständig aufgezeigt wird, ob jeder einzelne Planungsschritt eindeutig beschrieben ist und welche Eingabedaten erforderlich sind. In der praktischen Anwendung des Stücklisten-Adaptors wird evaluiert, welche Planungsaufgaben und Dateneingaben nicht automatisiert wurden. Sie müssen vom Planer durchgeführt werden.

4.4.2 Effektivität durch wirksame Ähnlichkeitsanalyse

Ziel 2 fordert Effektivität, also dass die mit dem Verfahren definierten Montagebaugruppen wirtschaftlich produziert werden können. Dazu ist es notwendig, dass relevante Produktions-

²⁶ Berechenbarkeit: Das Verfahren überführt Eingabedaten mit endlich vielen, festgelegten Schritten in Ausgabedaten.

²⁷ Vollständigkeit: Das Verfahren ist umfassend und durchgängig beschrieben, alle erforderlichen Planungsschritte sind abgebildet.

²⁸ Eindeutigkeit: Die Detaillierung der Beschreibung reicht aus, um daraus ein EDV-Programm bzw. die Datenbasis eines Expertensystems zu realisieren.

²⁹ Verwendet wird eine prädikatenlogische Schreibweise [Cla11], [Sta07] in Form der Notation der Programmiersprache Prolog („programming in logic“) [Clo03].

aspekte angemessen berücksichtigt werden, so dass die generierten Montagebaugruppen beispielsweise montier-, prüf- und lagerbar sind.

Charakteristisches Merkmal von Anpassungsplanungen ist es, dass Montagebaugruppen nicht neu gebildet werden, sondern dass vorhandene Baugruppen kopiert und abgeändert werden. Die Effektivität der neuen Fertigungsstückliste kann nur so gut sein, wie die der zugrunde gelegten Fertigungsstückliste. Bei Anpassungsplanungen hängt die Effektivität von drei Einflussfaktoren ab: Wie ähnlich sind sich altes und neues Erzeugnis? Wie wirtschaftlich kann das alte Erzeugnis produziert werden? Wie gut findet das Verfahren vorhandene Ähnlichkeiten und überträgt diese auf die neue Fertigungsstückliste? Das Verfahren zur Anpassungsplanung hat lediglich auf den dritten Einflussfaktor Einfluss, nämlich die Übertragung von Ähnlichkeiten von der alten in die neue Fertigungsstückliste. Die beiden anderen Einflussfaktoren müssen im Vorfeld der Anwendung berücksichtigt werden, indem der Planer ein geeignetes altes Erzeugnis auswählt, dessen Fertigungsstückliste effektive Montagebaugruppen beschreibt.

Der Stücklisten-Adaptor soll die Fertigungsstückliste des neuen Erzeugnisses so ableiten, dass sie der alten Fertigungsstückliste möglichst weit entspricht. Indem die neuen Montagebaugruppen möglichst ähnlich wie die bereits ausgeplanten und optimierten Montagebaugruppen generiert werden, wird die Effektivität der alten Fertigungsstücklisten in die neue Fertigungsstückliste übertragen.

Der Stücklisten-Adaptor kann daran gemessen werden, wie gut er Ähnlichkeiten findet und auf die neue Fertigungsstückliste überträgt. Evaluiert werden kann, ob das Verfahren Gleichheit identifiziert³⁰, Veränderungen ermittelt³¹, Neuerungen erkennt³² und Fehler vermeidet³³.

4.4.3 Universalität durch Anwendung der Prädikatenlogik

Ziel 3 fordert Universalität, also dass das Verfahren ohne aufwändige Vorbereitung und ohne Training für verschiedenartige Montagefälle eingesetzt werden kann. Es soll auch für komplexe Erzeugnisse, die vielfältige Fertigungstechnologien benötigen, anwendbar sein und die dazu erforderliche Daten- oder Wissensbasis muss mit realistischem Aufwand erstellt und gepflegt werden können.

³⁰ Unveränderte Umfänge sollen zuverlässig ermittelt und mit ihren untergeordneten Baugruppen bzw. Einzelteilen automatisch in die neue Fertigungsstückliste übernommen werden.

³¹ Veränderte Umfänge sollen lokalisiert, geeignete Montagebaugruppen vorgeschlagen und dem Planer zur Überprüfung vorgelegt werden.

³² Grundlegend neue Montagebaugruppen sollen zuverlässig erkannt werden, so dass der Planer eine partielle Neuplanung durchführen kann.

³³ Ergebnisse, die nicht dem Planer zur Prüfung vorgelegt werden, müssen zuverlässig fehlerfrei sein. Dann braucht der Planer die anderen Ergebnisse nicht zu überprüfen

Der Stücklisten-Adaptor soll in einer Weise realisiert werden, dass kein umfassendes Ingenieurwissen erforderlich ist. Denn die Bewertung der bisher bekannten Verfahren deutet darauf hin, dass aktuelle Informationstechnologie bei einer umfassenden Abbildung von Ingenieurwissen an ihre Grenzen stößt (siehe Kapitel 3.2.15). Mindestens fällt aber bei neuen Montagefällen ein Training oder eine Erweiterung der Wissensbasis an, wenn umfassendes Ingenieurwissen erforderlich ist.

Der Stücklisten-Adaptor soll ohne Bezug zu realen produktionstechnischen Bedeutungen realisiert werden. Benutzt werden soll allein der generelle Bauplan von Erzeugnisstrukturen (siehe Kapitel 4), der die logische Korrektheit von Stücklisten, also Fehlerfreiheit, Widerspruchsfreiheit und Vollständigkeit, allgemeingültig beschreibt.

Durch Anwendung mit komplexen Erzeugnissen, die vielfältige Fertigungstechnologien benötigen, kann evaluiert werden, ob der Stücklisten-Adaptor ohne Training und ohne Erweiterung der Wissensbasis universell einsetzbar ist.

5 Entwurf eines Stücklisten-Adaptors

Dieses Kapitel ermöglicht eine erste, schnelle Orientierung zum neuen Verfahren. Vorbereitend erfolgt eine Definition der verwendeten Begriffe. Im Anschluss daran werden Integritätsbedingungen im generellen Bauplan von Erzeugnisstrukturen explizit herausgearbeitet. Als Schwerpunkt führt das Kapitel in Ähnlichkeitsrelationen, Inferenzregeln und den grundlegenden Ablauf des Verfahrens anschaulich ein. Dies erfolgt anhand des einleitenden Beispiels zu einer Leuchte, das bereits aus Kapitel 4.1 (siehe Abbildung 11) bekannt ist.

5.1 Definition von Begriffen für den Stücklisten-Adaptor

Der Begriff *Baukomponente* wird als Überbegriff für Baugruppe oder Einzelteil benutzt. Er wird verwendet, wenn eine Unterscheidung nicht zweckmäßig ist.

Bei einer Erzeugnisstruktur handelt es sich um eine auf dem Kopf stehende Baumstruktur. Die *Wurzel* ist das Erzeugnis, die *Blätter* werden durch die Einzelteile gebildet und die Knoten dazwischen sind die Baugruppen³⁴. Die Erzeugnisstruktur steht im Gegensatz zum realen Baum auf dem Kopf, die *Wurzel*, das Erzeugnis steht also *oben*, die Einzelteile *unten*.

Die Verbauung einer Baukomponente in einer hierarchisch weiter oben liegenden Baugruppe wird *Verwendung* genannt. Als *Vater* wird im Verfahren die Baugruppe bezeichnet, zu der eine direkte, *einstufige* Verwendung besteht. Die *Vorfahren* einer Baukomponente sind ihr Vater, der Vater des Vaters usw., bis zum Erzeugnis, also alle Baugruppen, zu denen eine *mehrstufige* Verwendung besteht. Analog dazu beschreibt der *Aufbau* die strukturelle Zusammensetzung einer Baugruppe aus untergeordneten Baugruppen und Einzelteilen. *Kinder* sind alle Baukomponenten, zu denen eine *einstufige* Aufbau-Relation nach unten besteht. *Nachfahren* einer Baukomponente sind alle ihre Kinder, alle Kinder der Kinder usw., bis zu den Einzelteilen, also alle Baukomponenten, zu denen eine *mehrstufige* Aufbau-Relation besteht.

5.2 Integritätsbedingungen

Im Stücklistenwesen existieren Integritätsbedingungen, die alle Planer berücksichtigen. Die Integritätsbedingungen bestimmen die logische Korrektheit von Stücklisten, also Fehlerfreiheit, Widerspruchsfreiheit und Vollständigkeit. Für jeden Planer ist beispielsweise selbstverständlich, dass Baukomponenten mit gleicher Sachnummer gleich sind, und dass unterschied-

³⁴ Eine gesonderte Betrachtung von Fertigungsstufen ist für das Verfahren nicht erforderlich. Sie können als Baugruppen, in die nur eine Baukomponente eingeht, behandelt werden.

liche Baukomponenten unterschiedliche Sachnummern haben müssen. Da die Integritätsbedingungen teilweise nur implizit bekannt sind, werden sie herausgearbeitet.³⁵

Gleichheit der Sachnummern³⁶

Baukomponenten sind gleich, wenn sie die gleiche Sachnummer haben. Unterschiedliche Baukomponenten haben unterschiedliche Sachnummern. Dies gilt nicht nur innerhalb einer Stücklistenart, bei gleicher Sachnummer entsprechen sich auch die Baukomponenten aus Konstruktionsstückliste und Fertigungsstückliste. Eine Konstruktionsbaugruppe und eine Montagebaugruppe mit gleicher Sachnummer sind also gleich.

Folgerung: Für den Stücklisten-Adaptor folgt daraus, dass zur Ermittlung, ob eine Baukomponente unverändert in zwei Stücklisten vorkommt, auch die Sachnummer benutzt werden kann.

Ungleichheit der Sachnummern

Aus unterschiedlichen Sachnummern kann nicht auf unterschiedliche Baukomponenten geschlossen werden, es könnte auch Folge einer Unachtsamkeit in Konstruktion oder Produktionsplanung sein.

Folgerung: Falls zwei gleichen Baukomponenten eine unterschiedliche Sachnummer gegeben wurde, so darf dies nicht zu einem Fehler bei der Anwendung des Stücklisten-Adaptors führen, sondern allenfalls dazu, dass eine vorhandene Ähnlichkeit eventuell nicht erkannt wird.

Baugruppen mit gleicher Sachnummer haben den gleichen Aufbau

Für eine redundanzfreie Speicherung in Standard-EDV-Systemen (Baukastenstückliste) müssen Baugruppen mit gleicher Sachnummer auf nächster Ebene (Kinder) aus den gleichen Baukomponenten aufgebaut sein. Die rekursive Anwendung dieser Bedingung ergibt, dass der Aufbau von Baugruppen mit gleicher Sachnummer auf allen Ebenen bis zu den Einzelteilen genau gleich sein muss.

Folgerung: Wenn alle Einzelteile einer Montagebaugruppe des alten Erzeugnisses in die neue Fertigungsstückliste kopiert wurden, so kann auch die Montagebaugruppe selbst in die neue Fertigungsstückliste kopiert werden³⁷.

Folgerung: Montagebaugruppen, die unverändert in die neue Fertigungsstückliste übernommen werden, erhalten die Sachnummern, die sie in der alten Fertigungsstückliste haben.

³⁵ In Kapitel 6.2 wird ein System von Inferenzregeln entwickelt, das die Integritätsbedingungen im generellen Bauplan von Erzeugnisstrukturen eindeutig festlegt.

³⁶ Falls Erzeugnisse aus unterschiedlichen Nummernkreisen, etwa verschiedenen Werken, mit dem Verfahren geplant werden sollen, so muss vorab die Integrität der Sachnummern hergestellt werden.

³⁷ Pseudobaugruppen, die zwar in der Fertigungsstückliste vorhanden, aber für die Produktion nicht relevant sind, können ebenfalls kopiert werden. Dabei muss die Kennung, dass es sich um eine Pseudobaugruppe handelt, übernommen werden.

Baugruppen mit unterschiedlichem Aufbau müssen unterschiedliche Sachnummern haben. Auch diese Integritätsbedingung folgt aus der redundanzfreien Speicherung in EDV-Systemen.

Folgerung: Eine Baugruppe wird als verändert erkannt, wenn mindestens eine der Baukomponenten, aus denen sie besteht, entfällt, hinzukommt oder in veränderter Form vorhanden ist. Das gilt für Konstruktions- und Montagebaugruppen.

Folgerung: Montagebaugruppen, die mit verändertem Aufbau in die neue Fertigungsstückliste kopiert werden, erhalten eine neue Sachnummer.³⁸

Konstruktions- und Fertigungsstückliste eines Erzeugnisses enthalten genau die gleichen Einzelteile

Die funktionale Erzeugnisstruktur eines Erzeugnisses und die zugehörige fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur desselben Erzeugnisses unterscheiden sich lediglich in der Baugruppenstruktur. Jedes Einzelteil ist in beiden Erzeugnisstrukturen vorhanden (Abbildung 12).

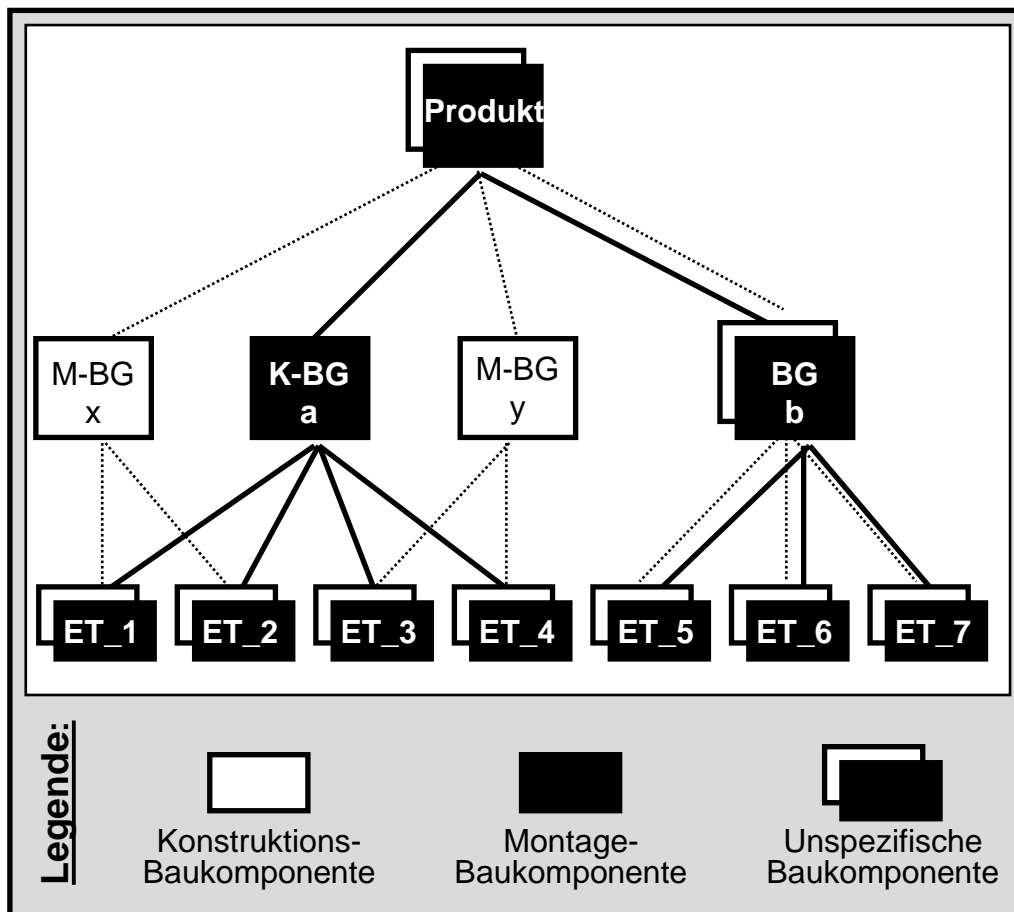


Abbildung 12: Konstruktions- und Fertigungsstückliste zu einem Erzeugnis bestehen aus den gleichen Einzelteilen

³⁸ Konstruktionsbaugruppen werden durch den Stücklisten-Adaptor nicht verändert.

Diese Eigenschaft stellt auch einen Zusammenhang zwischen den Stücklisten eines alten und eines neuen Erzeugnisses her:

Folgerung: Der Stücklisten-Adaptor kann einen großen Teil von veränderten Baugruppen ohne Kenntnis der konkreten Baugruppenstruktur durch Vergleich der Einzelteile erkennen³⁹.

Folgerung: Alle Einzelteile der neuen Konstruktionsstückliste können vom Stücklisten-Adaptor direkt in die neue Fertigungsstückliste kopiert werden, um daraus die Baugruppenstruktur bottom-up aufzubauen.

Folgerung: Beim Kopieren von Einzelteilen aus der Konstruktionsstückliste in die Fertigungsstückliste können die Sachnummern dieser Einzelteile mit übernommen werden.

Aufbau und Verwendung sind wechselseitig aufeinander bezogen

Aus dem Aufbau von Baugruppen kann auf die Verwendung ihrer Kinder geschlossen werden. Anders herum kann aus der Verwendung auf den Aufbau geschlossen werden.

Folgerung: Je mehr Kinder von zwei Baukomponenten identisch oder ähnlich⁴⁰ sind, desto zuverlässiger kann auf einen ähnlichen Aufbau geschlossen werden.

Folgerung: Andererseits kann gezielt nach Kindern gesucht werden, wenn bekannt ist, dass Baugruppen gleich oder ähnlich aufgebaut sind.

Folgerung: Aufbau und Verwendung können rekursiv, also über mehrere Stücklistenstufen hinweg ausgewertet werden, also nicht nur für die Kinder bzw. Väter, sondern auch für die Enkel und Vorfahren.

5.3 Ausgangssituation bei der Anpassungsplanung

Anhand des einleitenden Beispiels „Leuchte“, das bereits aus Kapitel 4.1 (siehe Abbildung 11) bekannt ist, werden nun Ähnlichkeitsrelationen, Inferenzregeln und der grundlegende Ablauf des Stücklisten-Adaptors anschaulich eingeführt.

Für das alte Erzeugnis existieren sowohl eine Konstruktions- als auch eine Fertigungsstückliste, für das neue Erzeugnis existiert zunächst lediglich die Konstruktionsstückliste. Die Fertigungsstückliste für das neue Erzeugnis soll im Rahmen einer Anpassungsplanung abgeleitet werden. Abbildung 13 verdeutlicht die Ausgangssituation, die Erzeugnisstrukturen sind dabei in Form von Strukturstücklisten dargestellt.

³⁹ Auch Baugruppen mit gleichem Teileumfang können verschiedenartig strukturiert sein. Ein Beispiel ist das Erzeugnis, dessen Konstruktions- und Fertigungsstückliste zwar die gleichen Teile, aber unterschiedliche Erzeugnisstrukturen (funktional und fertigungsgerecht) besitzen.

⁴⁰ Ähnlichkeit wird später definiert.

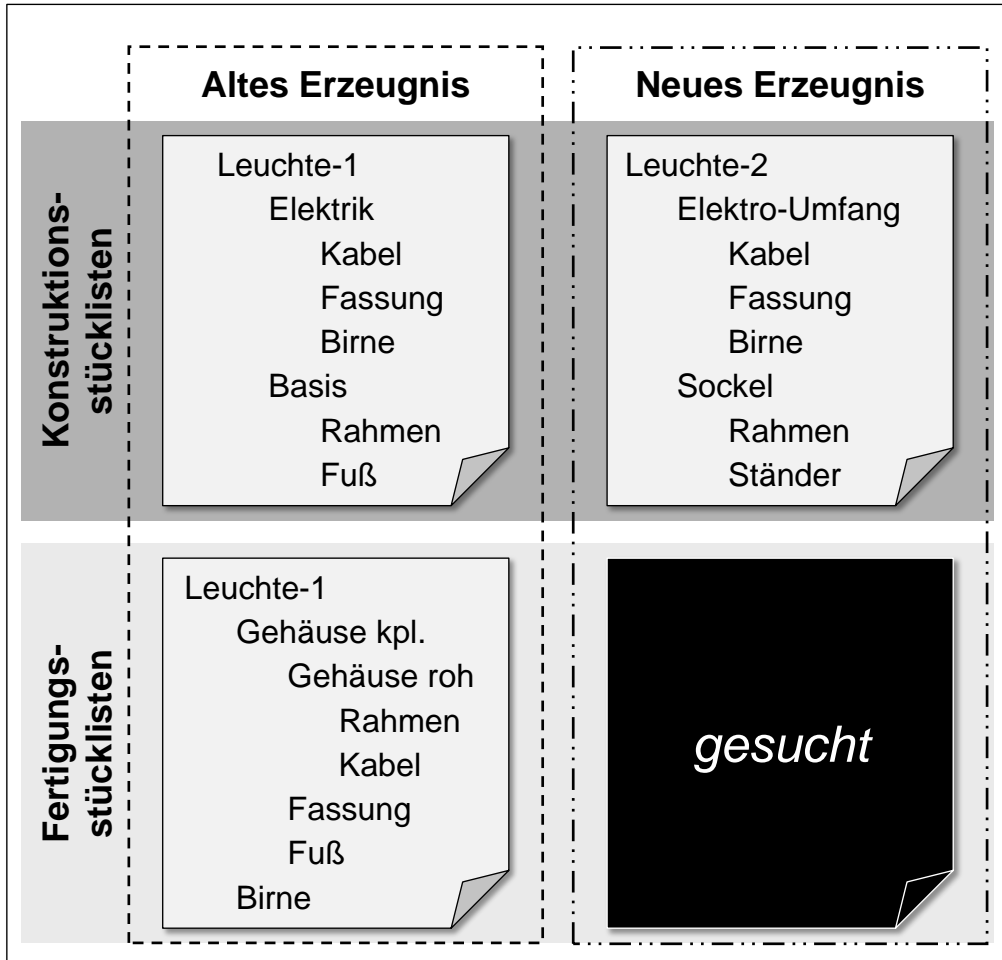


Abbildung 13: Ausgangssituation im einführenden Beispiel

Der Stücklisten-Adaptor arbeitet in zwei Schritten (siehe Abbildung 14). Im ersten Verfahrensschritt vergleicht er die Konstruktionsstücklisten von altem und neuem Erzeugnis. Dabei arbeitet der Stücklisten-Adaptor Zusammenhänge zwischen Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste explizit heraus. In einem zweiten Verfahrensschritt erstellt der Stücklisten-Adaptor die Fertigungsstückliste des neuen Erzeugnisses. Dazu schreibt er die Fertigungsstückliste des alten Erzeugnisses ab und ersetzt dabei die Baukomponenten des alten Erzeugnisses durch die des neuen Erzeugnisses.

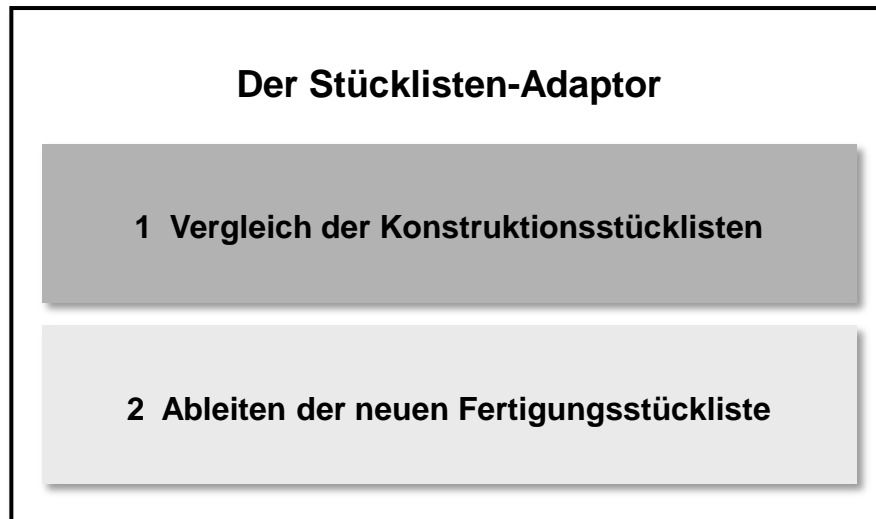


Abbildung 14: Der 2-stufige Aufbau des Stücklisten-Adaptors

5.4 Schritt 1: Vergleich der Konstruktionsstücklisten

5.4.1 Explizieren von Ähnlichkeitsrelationen mit Inferenzregeln

Eingangsdaten für den Vergleich der Konstruktionsstücklisten sind die Konstruktionsstücklisten von altem und neuem Erzeugnis⁴¹. Vor dem Vergleich der Konstruktionsstücklisten sind keine Informationen über Zusammenhänge zwischen altem und neuem Erzeugnis explizit bekannt, es sind also noch keine Ähnlichkeitsrelationen abgespeichert (Abbildung 14).

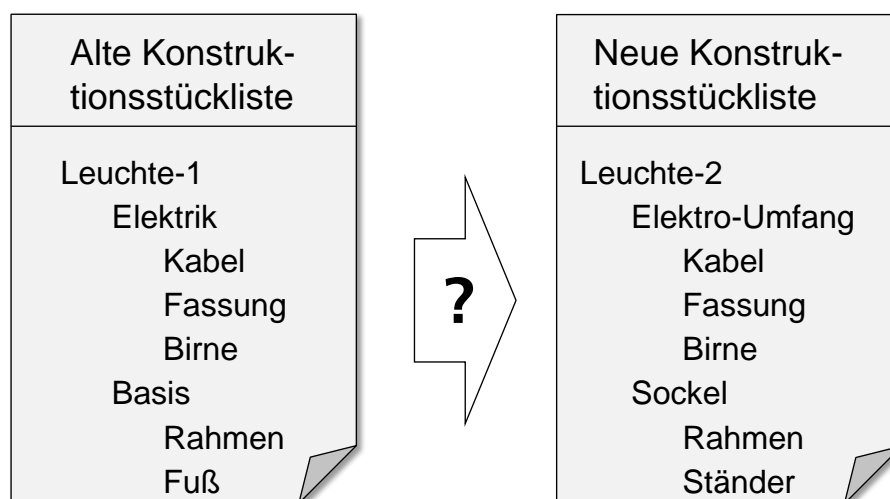


Abbildung 15: Konstruktionsstücklisten als Eingangsdaten für den Stücklisten-Adaptor

⁴¹ Das Verfahren nutzt zur Identifizierung von Baukomponenten die Sachnummer. Im Interesse einer leichten Lesbarkeit, werden in den Beispielen sprechende Bezeichnungen verwendet.

Implizit ist aber viel Wissen augenfällig. Klar ist etwa, dass die „Leuchte-1“ durch die „Leuchte-2“ ersetzt wird, denn der Planer hat diese beiden Erzeugnisse für die Anpassungsplanung ausgewählt. Dieser Zusammenhang zwischen den beiden Baukomponenten kann in einer Ähnlichkeitsrelation explizit gespeichert werden.

ä_bk_ersetzung (leuchte-1, leuchte-2, sicher, planer)

Ähnlichkeitsrelationen sind das Modell des Stücklisten-Adaptors zur Speicherung von Zusammenhängen zwischen Baukomponenten in den Erzeugnisstrukturen zweier Erzeugnisse. Der Ausdruck vor der Klammer beschreibt den Typ der Ähnlichkeit (ä_bk identifiziert eine Ähnlichkeitsrelation für Baukomponenten, hier wird eine Ersetzung dokumentiert). Das erste Attribut jeder Ähnlichkeitsrelation (in der Klammer) stellt den Bezug zu einer Baukomponente in der alten Konstruktionsstückliste her (hier Leuchte-1⁴²), das zweite Attribut zeigt auf die neue Baukomponente (hier Leuchte-2). Das vorletzte Attribut legt eine Sicherheit fest (hier ist sicher, dass die Leuchte-1 durch die Leuchte-2 ersetzt wird, sonst hätte der Planer diese Erzeugnisse nicht für die Anpassungsplanung benutzt). Das letzte Attribut beschreibt, wer diese Information erzeugt hat (hier der Planer, indem er die beiden Erzeugnisse für die Anpassungsplanung ausgewählt hat).

Eine Inferenzregel, die diese Ähnlichkeitsrelation automatisch ableiten kann, lautet in Textform⁴³:

Für die Wurzeln von alter und neuer Stückliste wird eine Ersetzung abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "sicher" vergeben und der Verantwortliche auf „planer“ gesetzt.
(Regel WURZEL-ERS)

Der generelle Bauplan von Erzeugnisstrukturen enthält zahlreiche weitere implizite Informationen, die ausgewertet werden können. Sehr ergiebig sind Baukomponenten, die mit gleicher Sachnummer in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste vorkommen.

Es kann vermutet werden, dass sich Baukomponenten, die mit gleicher Sachnummer in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste vorkommen, ersetzen. Auch diese Informationen werden in Ähnlichkeitsrelationen explizit gespeichert:

ä_bk_ersetzung (kabel, kabel, vermutlich, system)
ä_bk_ersetzung (fassung, fassung, vermutlich, system)
ä_bk_ersetzung (birne, birne, vermutlich, system)

⁴² Um zu verdeutlichen, dass es sich bei der Leuchte-1 um eine Konstante (also nicht um eine frei belegbare Variable) handelt, beginnt sie in der Ähnlichkeitsrelation mit einem Kleinbuchstaben. Diese Syntax wird in Kapitel 6.1.1 erläutert.

⁴³ Inferenzregeln werden in Kapitel 6.2 eindeutig und mathematisch exakt als prädikatenlogisches System beschrieben.

ä_bk_ersetzung (rahmen, rahmen, vermutlich, system)

Die entsprechende Inferenzregel lautet:

Wenn zwei Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste gleiche Sachnummern haben, so wird eine Ersetzung für diese Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben. Diese Ähnlichkeitsrelationen werden vom System abgeleitet⁴⁴. (Regel GLEICH-ERS-1)

Bereits mit den bisher eher trivialen Untersuchungen wurden vielfältige Informationen zu Ähnlichkeiten von alter und neuer Konstruktionsstückliste explizit herausgearbeitet. Abbildung 16 verdeutlicht den Zwischenstand der in Ähnlichkeitsrelationen gespeicherten Zusammenhänge.

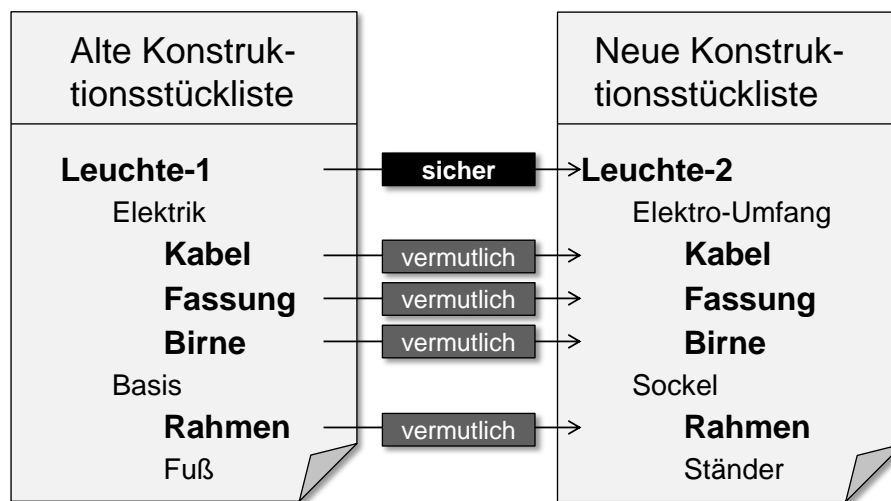


Abbildung 16: Explizit abgespeicherten Zusammenhänge (Zwischenstand 1)

Für die weiteren Untersuchungen werden außer dem Wissen um den generellen Bauplan von Erzeugnisstrukturen auch die bereits abgeleiteten Ähnlichkeitsrelationen benutzt. In Ähnlichkeitsrelationen ist inzwischen abgespeichert, dass eine Ersetzung für alle Baukomponenten, die in die Elektrik eingehen, bekannt ist. Daraus kann geschossen werden, dass die Elektrik vermutlich durch den Elektro-Umfang ersetzt wird.

ä_bk_ersetzung (kabel, kabel, vermutlich, system)
 ä_bk_ersetzung (fassung, fassung, vermutlich, system)
 ä_bk_ersetzung (birne, birne, vermutlich, system)



⁴⁴ Das Attribut Verantwortlicher wurde eingeführt, damit die Hoheit über das Verfahren beim Planer liegt. Er darf Ähnlichkeitsrelation, die das System abgeleitet hat, abändern – anders herum ist das nicht zulässig.

ä_bk_ersetzung (elektrik, elektro-umfang, vermutlich, system)

Die Inferenzregel dazu lautet:

Wenn für alle Kinder⁴⁵ einer alten und einer neuen Baukomponente eine Ersetzung bekannt ist, so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben. (Regel ERS-2-1)

Ein ähnlicher Schluss kann zu den Baugruppen Basis und Sockel gezogen werden. Da aber nicht für alle Kinder eine Ersetzung bekannt ist, sondern lediglich für den Rahmen, kann für die Ersetzung dieser beiden Baugruppen nur die Sicherheit vielleicht vergeben werden.

ä_bk_ersetzung (rahmen, rahmen, vermutlich, system)



ä_bk_ersetzung (basis, sockel, vielleicht, system)

Die Inferenzregel dazu lautet:

Wenn zwischen mindestens einem Kind einer alten Baukomponente und einem Kind einer neuen Baukomponente eine Ersetzung besteht, so wird eine Ersetzung für diese Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben. (Regel ERS-2-2)

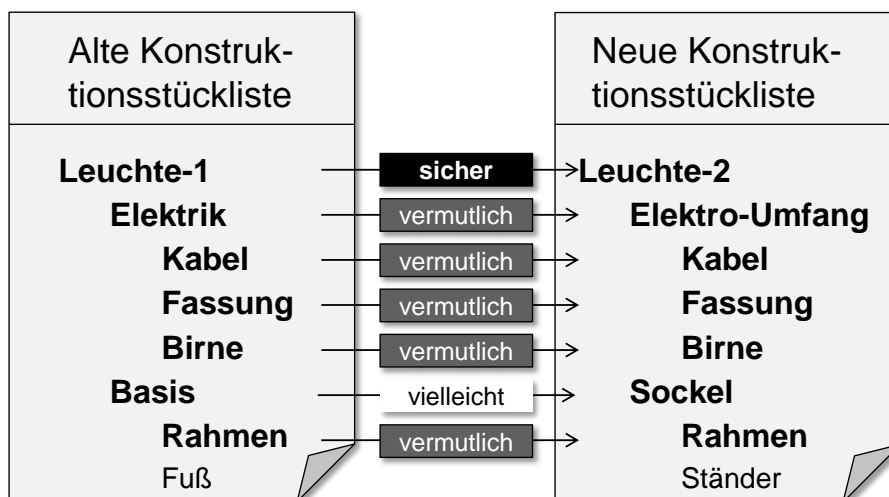


Abbildung 17: Explizit abgespeicherte Zusammenhänge (Zwischenstand 2)

Bis auf Fuß und Ständer sind damit Ersetzungen für alle Baukomponenten bekannt (siehe Abbildung 17).

⁴⁵ Ein Kind ist eine Baukomponente auf der nächst tieferen Stücklistenebene.

Bisher wurden lediglich Ähnlichkeitsrelationen vom Typ Ersetzung ermittelt. Um im Stücklistenvergleich weiter zu kommen, wird nun der Aufbau der Konstruktionsbaugruppen Basis und Sockel untersucht. Basis und Sockel haben ein Kind, für das eine Ersetzung bekannt ist, nämlich den Rahmen. Daraus kann geschlossen werden, dass Basis und Sockel vielleicht ähnlich aufgebaut sind.

ä_bk_ersetzung (basis, sockel, vielleicht, system)
 ä_bk_ersetzung (rahmen, rahmen, vermutlich, system)



ä_bk_hu_e (basis, sockel, ist_ähnlich, vielleicht, system)

Die Inferenzregel dazu lautet:

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen und sich mindestens eines ihrer Kinder ersetzt (nicht jedoch alle), so wird die Quantität des einstufigen Aufbaus der beiden Baukomponenten auf ist_ähnlich gesetzt. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben. (Regel HUE-a-2)

Mit ä_bk_hu_e () wird ein weiterer Typ von Ähnlichkeitsrelationen eingeführt. Er beschreibt Ähnlichkeiten zwischen Baukomponenten bezüglich des Aufbaus: hu steht für hierarchisch nach unten; e zeigt, dass hierbei nur eine Stücklistenstufe betrachtet wird⁴⁶. Ähnlichkeitsrelationen, die sich auf den Aufbau beziehen, beschreiben als drittes Attribut die Quantität der Ähnlichkeit (hier ist_ähnlich).

Als nächste Aktion kann aus dem ähnlichen Aufbau von Basis und Sockel auf eine ähnliche Verwendung der bisher unklaren Kinder „Fuß“ und „Ständer“ geschlossen werden.

ä_bk_hu_e (basis, sockel, ist_ähnlich, vielleicht, system):-



ä_bk_ho_e (fuß, ständer, ist_ähnlich, vielleicht, system):-

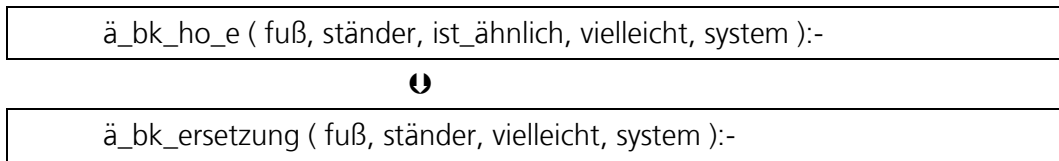
Die Inferenzregel dazu lautet:

Quantität und Sicherheit der einstufigen Verwendung von zwei sich ersetzenden Baugruppen werden aus dem einstufigen Aufbau ihres Vaters wie folgt abgeleitet: Aus einem ähnlichen einstufigen Aufbau der Väter folgt vielleicht eine ähnliche einstufige Verwendung der sich ersetzenden Baugruppen. (Regelgruppe HOE-c, Teil -3)

Die Relationstypen ä_bk_ho_e () und ä_bk_ho_m () beziehen sich auf die Verwendung der Baukomponenten, also den hierarchischen Aufbau nach oben über eine bzw. über mehrere Stücklistenstufen hinweg.

⁴⁶ Das Verfahren nutzt weitere Typen von Ähnlichkeitsrelationen. Beispielsweise betrachtet ä_bk_hu_m (...) mehrere Stücklistenstufen nach unten, also den gesamten Aufbau einer Baukomponente.

Wenn irgendeine Ähnlichkeitsrelation für zwei Baukomponenten bekannt ist, so kann daraus auf eine Ersetzung geschlossen werden.



Die Inferenzregel dazu lautet:

Wenn für eine alte und eine neue Baukomponente eine oder mehrere Ähnlichkeitsrelationen bekannt sind, so wird daraus eine Ersetzung abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit der stärksten zugrundeliegenden Ähnlichkeitsrelation vergeben.
(Regel ERS-5)

Damit sind im Beispiel Ersetzungen für alle Baukomponenten in alter und neuer Konstruktionsstückliste bekannt. Allerdings haben zwei Ersetzungen zunächst lediglich die Sicherheit vielleicht (Abbildung 18).

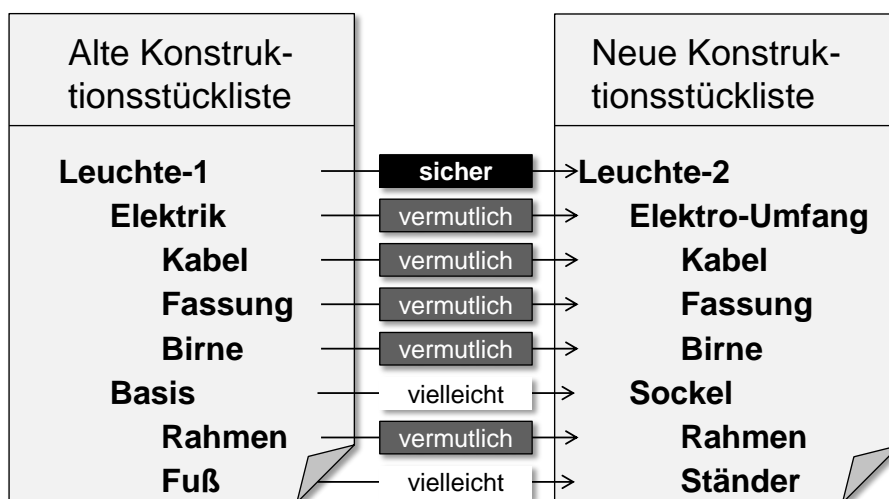


Abbildung 18: Explizit abgespeicherten Zusammenhänge (Zwischenstand 3)

Weitere Regeln werden angewendet, um die Sicherheit zu erhöhen. Die Sicherheit der Ersetzung von Fuß durch Ständer kann auf „vermutlich“ erhöht werden, da für alle Geschwister⁴⁷ dieser Baukomponenten Ersetzungen bekannt sind (in diesem einfachen Beispiel handelt es sich bei „alle Geschwister“ lediglich um eine einzige Baukomponente, nämlich den Rahmen).

⁴⁷ Als Geschwister werden Baukomponenten bezeichnet, die in die gleiche Baugruppe eingehen, also den gleichen Vater haben.

ä_bk_ersetzung (rahmen, rahmen, vermutlich, system)



ä_bk_ersetzung (fuß, ständer, vermutlich, system)

Die Inferenzregel dazu lautet:

Wenn alle Geschwister einer alten Baukomponente genau durch die Geschwister einer neuen Baukomponente ersetzt werden und diese Ersetzungen mindestens die Sicherheit "vermutlich" haben, so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben. (Regel ERS-1-1)

Mit dieser neuen Information zur Ersetzung von Fuß und Ständer kann auch die Sicherheit der Ersetzung der Basis durch den Sockel auf „vermutlich“ erhöht werden. Dazu wird eine bereits bekannte Regel auf diese Baugruppen erneut angewendet, mit der bereits die Ersetzung der Elektrik durch den Elektro-Umfang expliziert wurde.

ä_bk_ersetzung (rahmen, rahmen, vermutlich, system)

ä_bk_ersetzung (fuß, ständer, vermutlich, system)



ä_bk_ersetzung (basis, sockel, vermutlich, system)

Die Inferenzregel dazu lautet:

Wenn für alle Kinder einer alten und einer neuen Baukomponente eine Ersetzung bekannt ist, so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben. (Regel ERS-2-1)

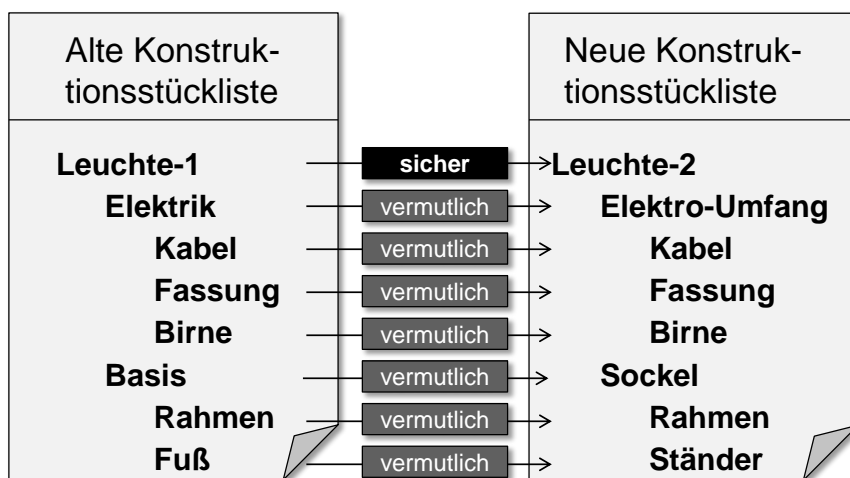


Abbildung 19: Explizit abgespeicherte Ersetzungen nach der automatischen Ableitung

Im einleitenden Beispiel wurden Ersetzungen für alle Baukomponenten von alter und neuer Konstruktionsstückliste explizit herausgearbeitet (Abbildung 19). Dies geschah automatisch, also ohne jeden Eingriff des Planers. Wenige einfache Regeln haben dazu ausgereicht.

Insgesamt nutzt der Stücklisten-Adaptor 48 Regeln (siehe Kapitel 6.2.2). Er ist damit in der Lage, auch umfangreiche, vielstufige Konstruktionsstücklisten zu vergleichen. Für jede Baukomponente ermittelt er bis zu 5 Ähnlichkeitsrelationen, neben der Ersetzung sind dies der einstufige und der mehrstufige Aufbau sowie die einstufige und die mehrstufige Verwendung (siehe Kapitel 6.4.1). Ähnlichkeitsrelationen zum Aufbau ermöglichen top-down-Analysen, die durch bottom-up-Analysen mit Ähnlichkeitsrelationen zur Verwendung ergänzt werden⁴⁸.

5.4.2 Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen

Im zweiten Planungsschritt des Stücklisten-Adaptors, der Erstellung der neuen Fertigungsstückliste, werden lediglich die Ähnlichkeitsrelationen vom Typ Ersetzung benutzt: ä_bk_ersetzung (). Folgende Ersetzungen sind nach dem automatischen Vergleich der Konstruktionsstücklisten des einleitenden Beispiels in der Datenbasis gespeichert.

```
ä_bk_ersetzung ( leuchte-1, leuchte-2, sicher, planer )
ä_bk_ersetzung ( elektrik, elektro-umfang, vermutlich, system)
ä_bk_ersetzung ( kabel, kabel, vermutlich, system )
ä_bk_ersetzung ( fassung, fassung, vermutlich, system )
ä_bk_ersetzung ( birne, birne, vermutlich, system )
ä_bk_ersetzung ( basis, sockel, vermutlich, system)
ä_bk_ersetzung ( rahmen, rahmen, vermutlich, system )
ä_bk_ersetzung ( fuß, ständer, vermutlich, system)
```

Ersetzungen, die nicht „sicher“ sind, müssen vom Planer überprüft werden. Dazu werden die alte und die neue Konstruktionsstückliste in Stücklistenbrowsern nebeneinander dargestellt (Abbildung 20). Die Ersetzungen werden dargestellt, dabei werden die Konstruktionsbaugruppen der obersten Stücklistenebene, deren Ersetzung nicht sicher ist, herausgehoben. In einem weiteren Fenster kann der Planer Ersetzungen bestätigen oder ablehnen.

⁴⁸ Wie top-down/bottom-up Analyse funktioniert, soll an dieser Stelle nur angedeutet werden. Es ist sicher, dass Leuchte-1 und Leuchte-2, also die Wurzeln der Stücklisten, ähnlich aufgebaut sind (top-down). Daraus wiederum kann der Stücklisten-Adaptor bottom-up schließen, dass die Verwendung von Basis und Sockel vermutlich gleich ist.

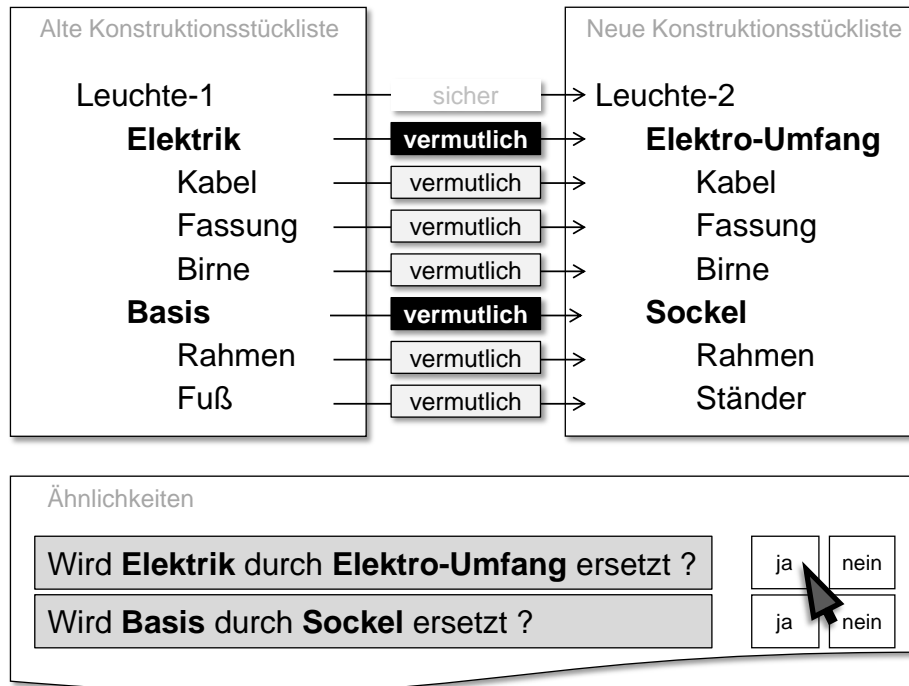


Abbildung 20: Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen (Ausgangszustand)

Im Beispiel bestätigt der Planer durch Klick auf den Ja-Button, dass die Elektrik durch den Elektro-Umfang ersetzt wird. Dadurch wird die entsprechende Ähnlichkeitsrelation auf „sicher“ gesetzt.

```
ä_bk_ersetzung ( elektrik, elektro-umfang, sicher, planer)
```

Mit dieser neuen Information kann der Stücklisten-Adaptor durch erneute Anwendung der Inferenzregeln auch die Ersetzungen von deren Kindern auf „sicher“ setzen.

```
ä_bk_ersetzung ( kabel, kabel, sicher, system )
ä_bk_ersetzung ( fassung, fassung, sicher, system )
ä_bk_ersetzung ( birne, birne, sicher, system )
```

Die entsprechende Inferenzregel lautet:

Wenn zwei Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste gleiche Sachnummern haben, und ihre Väter sich ersetzen, so wird eine Ersetzung für diese Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit der Väter vergeben.

Regel (GLEICH-ERS-2)

Nun besteht nur noch Entscheidungsbedarf durch den Planer bezüglich der vermuteten Ersetzung der Basis durch den Sockel (Abbildung 21).

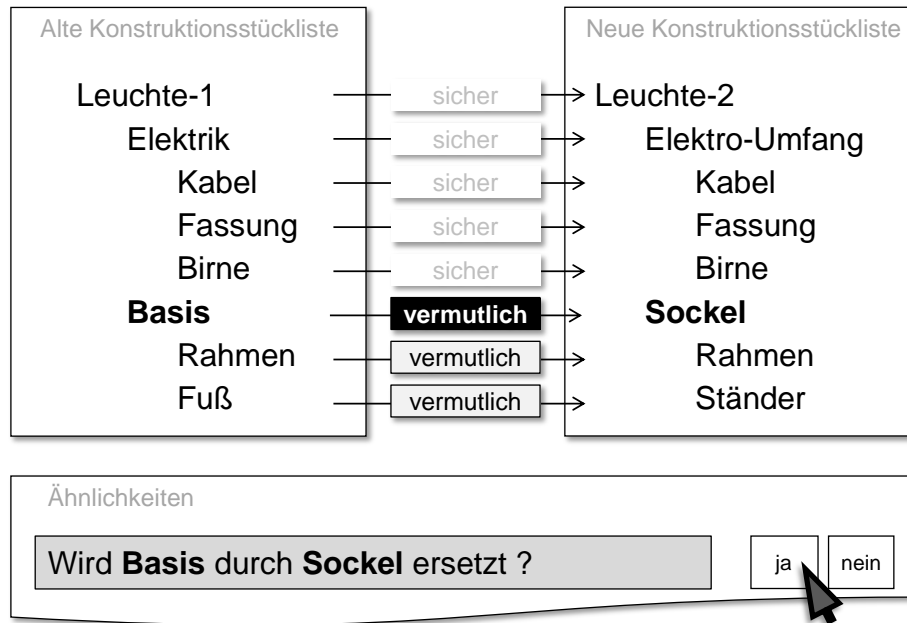


Abbildung 21: Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen (Zwischenzustand)

Im Beispiel kann der Planer auch diese Ersetzung bestätigen und das Regelwerk setzt die restlichen Ersetzungen mit der bereits bekannten Regel auf sicher. Damit ist der Vergleich der Konstruktionsstücklisten abgeschlossen. Der Stücklisten-Adaptor hat für alle Baukomponenten in alter und neuer Konstruktionsstückliste eine Ähnlichkeitsrelation vom Typ Ersetzung erzeugt.

5.5 Schritt 2: Erstellung der neuen Fertigungsstückliste

Ausgehend von den Ähnlichkeitsrelationen vom Typ Ersetzungen aus Schritt 1, leitet der Stücklisten-Adaptor in einem zweiten Verfahrensschritt die Fertigungsstückliste des neuen Erzeugnisses ab. Ähnlichkeitsrelationen mit Informationen zur Verwendung oder zum Aufbau der Konstruktionsstücklisten helfen dabei nicht weiter, denn es ist ja gerade diese funktionale Erzeugnisstruktur, die in eine fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur überführt werden soll.

Zur Generierung der Fertigungsstückliste könnte ein ähnliches Regelsystem benutzt werden, wie zum Vergleich der Konstruktionsstücklisten. Allerdings wären dann die Vorschläge, die das Verfahren dem Planer unterbreitet, nur schwer nachvollziehbar und eine aufwändige Erklärungskomponente wäre erforderlich. Für den 2. Schritt wurde deshalb eine andere Methode realisiert. Der Stücklisten-Adaptor versucht im 2. Schritt, die Montagestückliste des alten Erzeugnisses mit den Einzelteilen des neuen Erzeugnisses aufzubauen.

5.5.1 Kopieren von Baukomponenten in die neue Fertigungsstückliste

Als Eingangsdaten nutzt der Stücklisten-Adaptor im 2. Schritt die Ähnlichkeitsrelationen vom Typ Ersetzung und die Fertigungsstückliste des alten Erzeugnisses.

Der Aufbau der neuen Fertigungsstückliste kann am einfachsten bottom-up, also ausgehend von den Einzelteilen, erläutert werden. Das erste zu kopierende Einzelteil im Beispiel ist die Birne. Aus dem Vergleich der Konstruktionsstücklisten ist eine Ähnlichkeitsrelation vom Typ Ersetzung bekannt, die besagt, dass die Birne unverändert auch in der neuen Stückliste vorkommt. Die Birne wird somit mit gleicher Sachnummer in die neue Fertigungsstückliste kopiert (Abbildung 22).

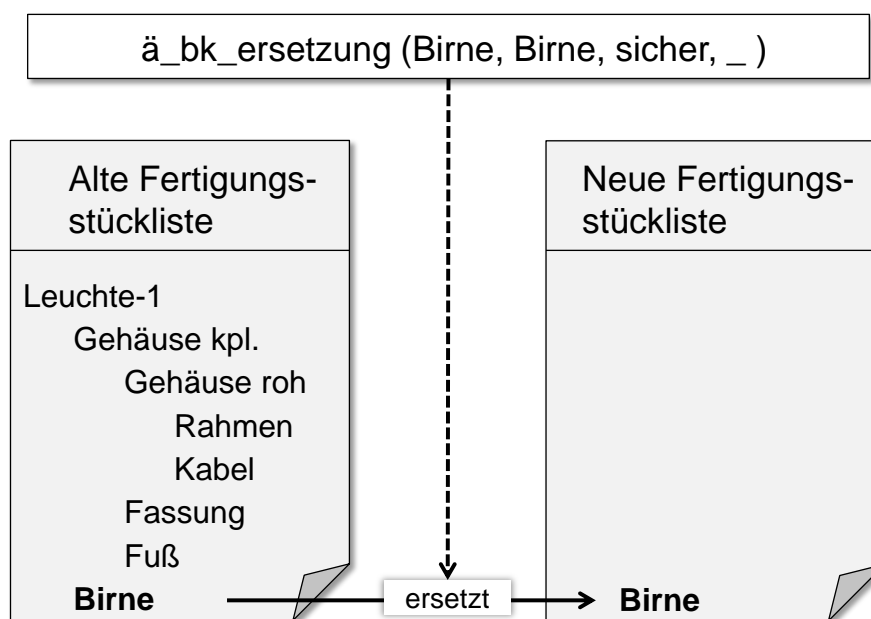


Abbildung 22: Kopieren einer unveränderten Baukomponente in die neue Fertigungsstückliste

Die nächste Baukomponente bottom-up ist der Fuß. In einer Ähnlichkeitsrelation ist gespeichert, dass er durch den Ständer ersetzt wird. Die Sachnummer Fuß wird also beim Kopieren in die neue Fertigungsstückliste durch den Ständer ausgetauscht (Abbildung 23).

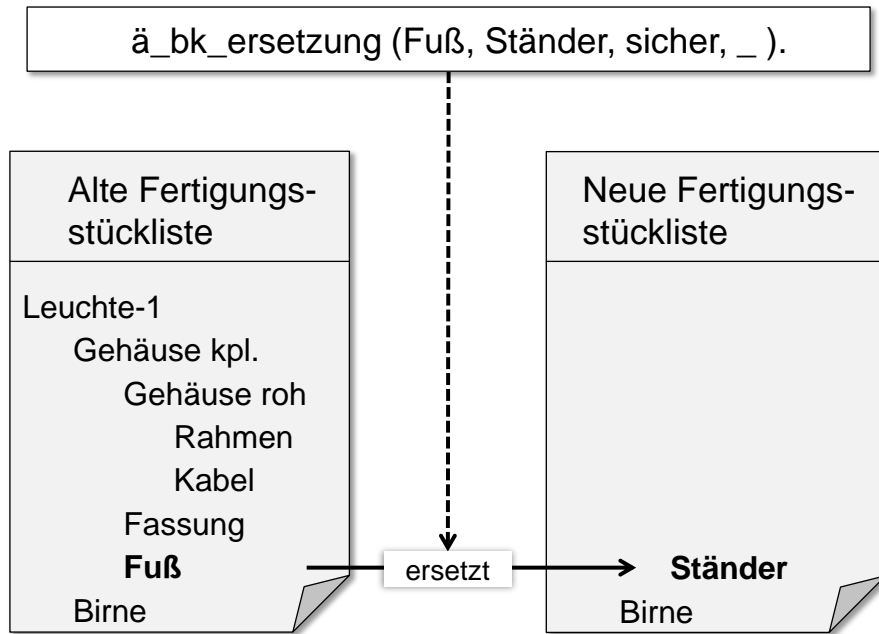


Abbildung 23: Kopieren einer veränderten Baukomponente in die neue Fertigungsstückliste

Der Stücklisten-Adaptor kopiert bottom-up alle Baukomponenten aus der alten in die neue Fertigungsstückliste bis eine Baukomponente erreicht wird, für die keine Ähnlichkeitsrelation gespeichert ist (hier Gehäuse roh), siehe Abbildung 24.

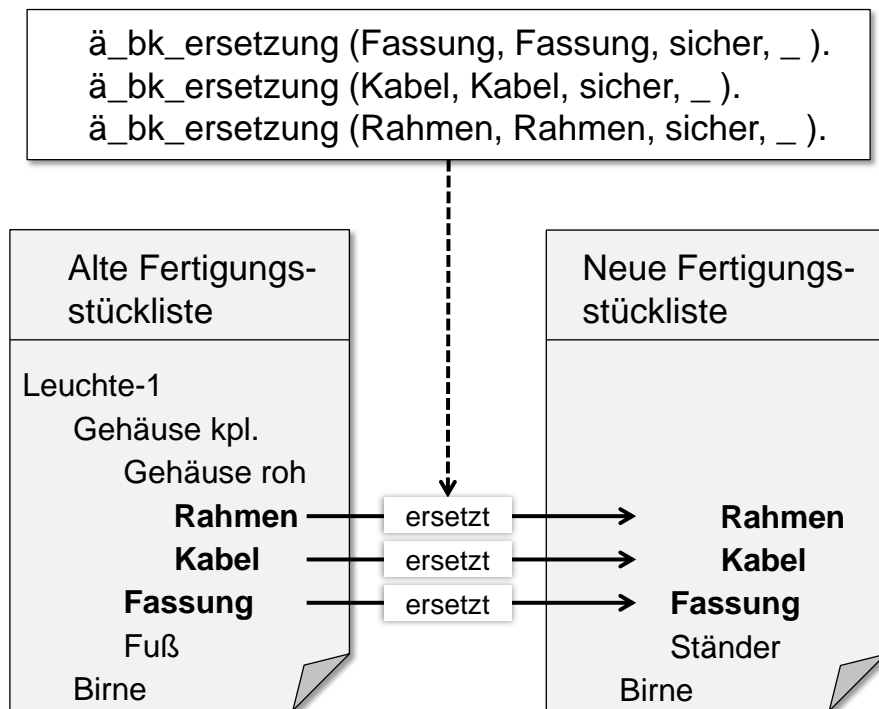


Abbildung 24: Kopieren weiterer Baukomponenten in die neue Fertigungsstückliste

Beim Gehäuse_roh handelt es sich um eine reine Fertigungsbaugruppe. Sie kommt in den Konstruktionsstücklisten nicht vor, deshalb ist keine Ähnlichkeitsrelation aus dem Vergleich der Konstruktionsstücklisten bekannt. Der Stücklisten-Adaptor versucht nun, die alte Fertigungs-Baugruppe mit den Einzelteilen des neuen Erzeugnisses aufzubauen. Das gelingt genau dann, wenn für alle Nachfahren der alten Fertigungs-Baugruppe eine Ersetzung bekannt ist (Abbildung 25).

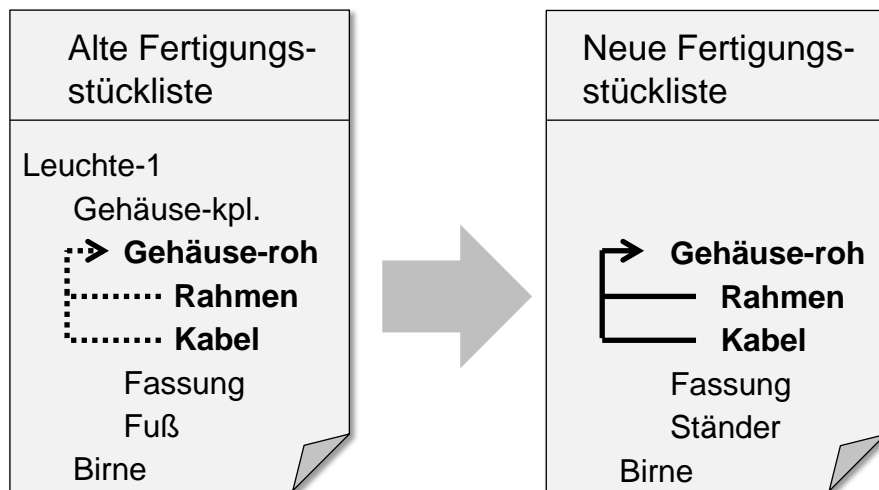


Abbildung 25: Generierung einer unveränderten Fertigungsbaugruppe aus ihren Kindern

Analog wird im nächsten Schritt das Gehäuse_kpl. kopiert. Da sich aber ein Kind verändert hat (Fuß wurde durch Ständer ersetzt), wird dabei eine neue Sachnummer vergeben (Abbildung 26).

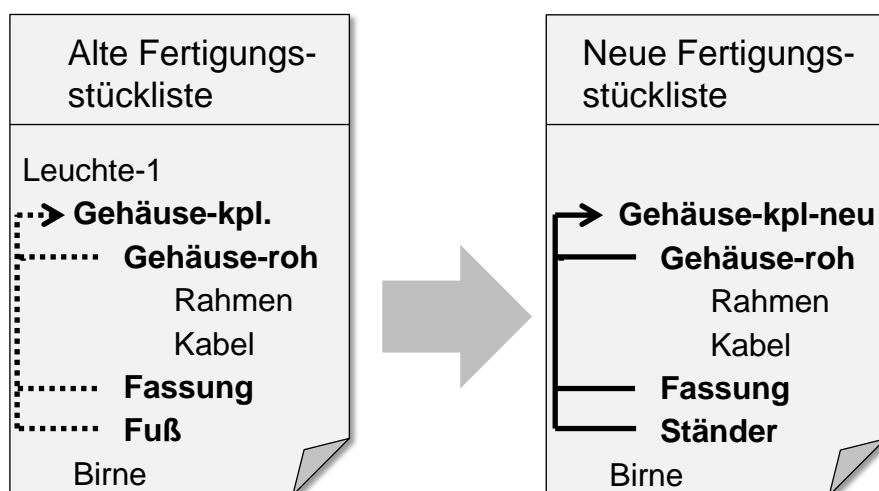


Abbildung 26: Generierung einer veränderten Fertigungsbaugruppe aus ihren Kindern

Als letzter Schritt wird die Wurzel kopiert. Hierfür ist aus dem Vergleich der Konstruktionsstücklisten ein Ähnlichkeitsprofil bekannt, in dem die neue Sachnummer bereits abgespeichert ist (Abbildung 27).

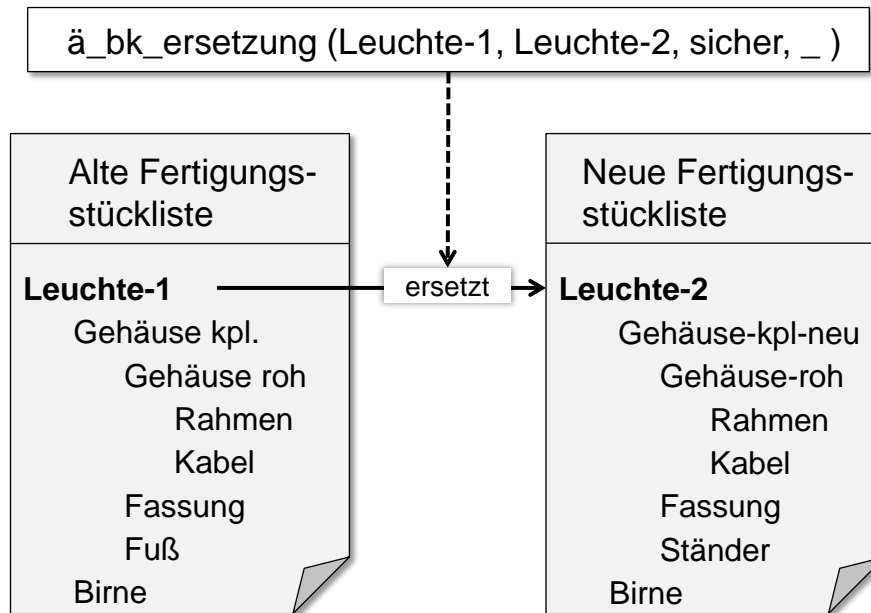


Abbildung 27: Fertigstellen der neuen Fertigungsstückliste

Damit ist die neue Fertigungsstückliste im einleitenden Beispiel fertig. Da im Beispiel keine grundlegend neu konstruierten Umfänge vorkamen, konnte der Stücklisten-Adaptor die neue Fertigungsstückliste vollständig automatisch aufbauen.

5.5.2 Manuelle Überarbeitung der neuen Fertigungsstückliste

Die neue Fertigungsstückliste wird dem Planer zur Überprüfung vorgelegt und von ihm freigegeben oder überarbeitet (Abbildung 28).

Im Beispiel bestätigt der Planer, dass das „Gehäuse-kpl.“ durch das „Gehäuse-kpl-neu“ ersetzt wird. Damit ist die neue Fertigungsstückliste vollständig aufgebaut, die Generierung der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur ist erfolgreich abgeschlossen.

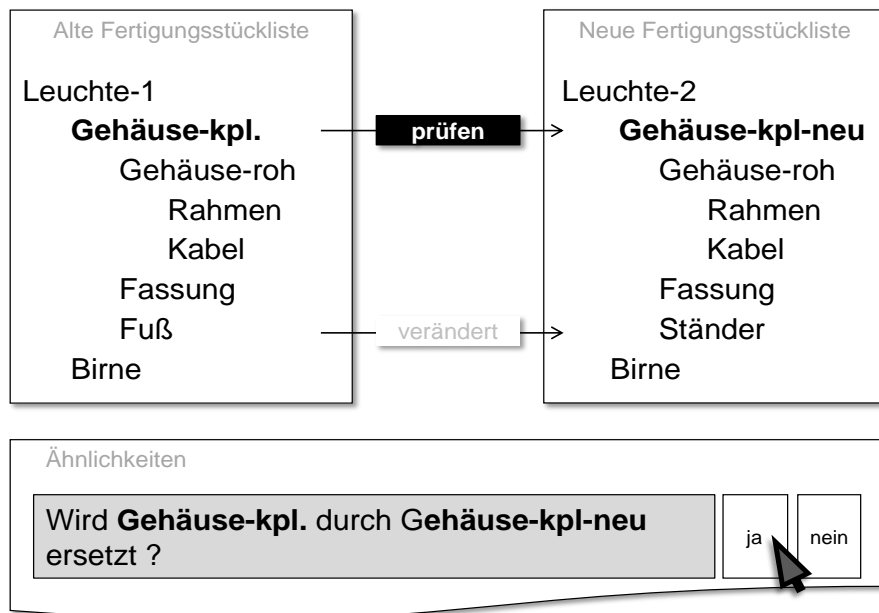


Abbildung 28: Manuelle Überarbeitung der neuen Fertigungsstückliste

Im einleitenden Beispiel kamen keine völlig neuen Umfänge vor, die im Rahmen einer partiellen Neuplanung durch den Planer einzuarbeiten wären. Durch die folgende Modifikation des Beispiels soll angedeutet werden, wie völlig neue Umfänge in die neue Fertigungsstückliste eingearbeitet werden.

Angenommen, die neue Leuchte-2 wäre um eine zusätzliche Konstruktionsbaugruppe „Notlicht“, bestehend aus „LED“ und „Batterie“, erweitert worden. Dieser neu konstruierte Umfang ist im alten Erzeugnis nicht vorhanden. Folglich würde der Stücklisten-Komparator beim Vergleich der Konstruktionsstücklisten Ähnlichkeitsrelationen mit der Information erzeugen, dass diese Baukomponenten neu hinzukommen (*nil* steht in der Informatik für einen Zustand, der das Fehlen eines Wertes anzeigt).

```

ä_bk_ersetzung ( nil, notlicht, sicher, system )
ä_bk_ersetzung ( nil, led, sicher, system )
ä_bk_ersetzung ( nil, batterie, sicher, system )

```

Beim Abschreiben der neuen Fertigungsstückliste kopiert der Stücklisten-Adaptor die neu hinzukommenden Baukomponenten aus der neuen Konstruktionsstückliste in einen speziellen Bereich der neuen Fertigungsstückliste (Abbildung 29).

Der Planer muss eine partielle Neuplanung durchführen. Dazu zieht er die neu hinzukommenden Baukomponenten mit der Maus an die richtige Stelle der neuen Fertigungsstückliste.

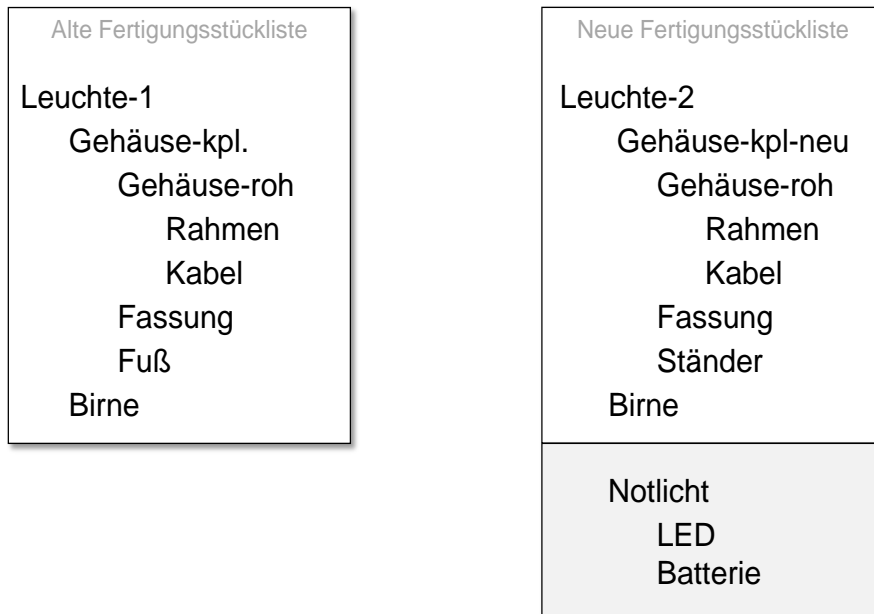


Abbildung 29: Partielle Neuplanung der neuen Fertigungsstückliste

5.5.3 Vier Wege in die neue Fertigungsstückliste

Insgesamt gibt es vier Wege, wie Baukomponenten in die neue Fertigungsstückliste eingearbeitet werden können.

- Baukomponente aus der alten Fertigungsstückliste kopieren (etwa die „Birne“ oder „Ständer/Fuß“).
- Baugruppe aus ihren Kindern aufbauen („Gehäuse-roh“ und „Gehäuse-kpl-neu“).
- Für Baukomponenten, die neu hinzukommen, muss eine partielle Neuplanung durch den Planer durchgeführt werden („Notlicht“ mit „LED“ und „Batterie“ in der Modifikation des einleitenden Beispiels).
- Eine Baukomponente, die nur im alten Erzeugnis vorkommt, also im neuen Erzeugnis nicht vorhanden ist, kann einfach ignoriert werden (dieser Fall trat im einleitenden Beispiel nicht auf).

Die Unterscheidung dieser vier Wege ist für den Stücklisten-Adaptor von Bedeutung, weil damit vier Teilmengen von Baukomponenten definiert werden können, die jeweils gleichartig behandelt werden. Der Stücklisten-Adaptor muss für jede Baukomponente ermitteln, welcher Teilmenge sie angehört. Damit ist die Methode, mit der sie in die neue Fertigungsstückliste eingearbeitet wird, festgelegt.

Betrachtet man eine Baukomponente, so kann sie einer von vier Teilmengen zugeordnet werden:

1. Ersetzte unspezifische Baukomponenten

Ein Teil der Baukomponenten (wie beispielsweise die Birne oder der Fuß), konnten direkt aus der alten in die neue Fertigungsstückliste kopiert werden. Dabei handelt es sich um unspezifische Baukomponenten, also solche, die sowohl in der Konstruktions- als auch in der Fertigungsstückliste vorkommen und für die gleichzeitig eine Ersetzung bekannt ist, die besagt, dass sie unverändert oder mit neuer Sachnummer in beiden Erzeugnissen vorkommen.

Eine ersetzte unspezifische Baukomponente kann der Stücklisten-Adaptor daran erkennen, dass sie in der Fertigungsstückliste des alten Erzeugnisses vorkommt und dass gleichzeitig eine Ersetzung für diese Baukomponente gespeichert ist. Aus der Tatsache, dass eine Ersetzung gespeichert ist, folgt zwangsläufig, dass sie in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste vorkommt.

2. Ersetzte fertigungsspezifische Baukomponenten

Fertigungsspezifische Baukomponenten sind reine Fertigungsbaugruppen, die in der Konstruktionsstückliste nicht vorhanden sind (etwa das Gehäuse roh). Folglich kann für eine fertigungsspezifische Baukomponente aus dem Vergleich der Konstruktionsstücklisten keine Ersetzung bekannt sein. Es kann aber geprüft werden, ob die Baukomponente auch in der neuen Fertigungsstückliste vorhanden sein muss, indem getestet wird, ob alle ihre Kinder in die neue Fertigungsstückliste kopiert wurden. Es wird also versucht, die alte Fertigungsbaugruppe mit den Einzelteilen des neuen Erzeugnisses aufzubauen.

Eine ersetzte fertigungsspezifische Baukomponente kann der Stücklisten-Adaptor daran erkennen, dass alle ihre Kinder in der neuen Fertigungsstückliste vorhanden sind.

3. Entfallende Baukomponenten

Dies sind Baukomponenten, die im neuen Erzeugnis nicht vorkommen (dieser Fall ist im einleitenden Beispiel nicht aufgetreten). Sie brauchen nicht in die neue Fertigungsstückliste kopiert zu werden.

Entfallende Baukomponenten können daran erkannt werden, dass sie in einer Stückliste des alten Erzeugnisses vorkommen, aber nicht zur Teilmenge 1 oder 2 gehören (eine ausführliche Begründung findet sich in Kapitel 6.3)

4. Neu hinzukommende Baukomponenten

Es gibt Baukomponenten, die in der neuen Fertigungsstückliste neu hinzukommen (dieser Fall wurde in der Modifikation des einleitenden Beispiels aufgezeigt). Da diese Baukomponenten in der alten Fertigungsstückliste nicht vorhanden sind, können sie nicht automatisch kopiert werden. Sie müssen im Rahmen einer partiellen Neuplanung manuell in die neue Fertigungsstückliste eingearbeitet werden.

Neu hinzukommende Baukomponenten kann der Stücklisten-Adaptor daran erkennen, dass sie in der Konstruktionsstückliste des neuen Erzeugnisses vorhanden sind, aber keine Ersetzung für sie bekannt ist.

In Kapitel 6.3 ist vollständig und eindeutig ausgeführt, wie Baukomponenten eindeutig einer der vier Teilmengen zugeordnet und in die neue Fertigungsstückliste eingearbeitet werden.

5.6 Gesamtablauf des Verfahrens

Beim Entwurf des Stücklisten-Adaptors anhand des einleitenden Beispiels lag der Schwerpunkt auf der Einführung von Ähnlichkeitsrelationen und Inferenzregeln. Hier wird der Ablauf herausgearbeitet⁴⁹.

Der Stücklisten-Adaptor arbeitet in zwei Schritten, nämlich dem Vergleich der Konstruktionsstücklisten und der Ableitung der neuen Fertigungsstückliste. Jeder dieser beiden Schritte ist unterteilt in die so genannte Initialisierung, die automatisch einen Entwurf erarbeitet und manuelle Überarbeitungen durch den Planer (Abbildung 30).

Im ersten Schritt vergleicht der Stücklisten-Adaptor die Konstruktionsstücklisten von altem und neuem Erzeugnis. Er ermittelt zunächst selbsttätig all diejenigen Ähnlichkeitsrelationen (siehe Kapitel 6.4), die automatisch aus den Erzeugnisstrukturen von alter und neuer Konstruktionsstückliste ableitbar sind. Dazu wendet der Stücklisten-Adaptor ein System von Inferenzregeln (siehe Kapitel 6.2) an.

Nach der Initialisierung kann der Planer zusätzliche Informationen im Stücklisten-Adaptor einbringen, indem er Ähnlichkeitsrelationen verändert, insbesondere deren Sicherheit erhöht. Dabei wird er vom Verfahren geführt. Durch erneute Anwendung der Inferenzregeln leitet der Stücklisten-Adaptor dann alle Ähnlichkeitsrelationen ab, die aus den bereits gespeicherten Ähnlichkeitsrelationen und den Eingaben des Planers ableitbar sind.

Als Ergebnis des Vergleichs der Konstruktionsstücklisten übernimmt der Stücklisten-Adaptor die Ähnlichkeitsrelationen vom Typ Ersetzung zur weiteren Bearbeitung in Schritt 2.

Die Ableitung der neuen Fertigungsstückliste erfolgt in drei Stufen. Zunächst leitet der Stücklisten-Adaptor die neue Fertigungsstückliste so weit wie möglich algorithmisch ab. Dazu schreibt er die Fertigungsstückliste des alten Erzeugnisses ab. Dabei ersetzt er, entsprechend den gespeicherten Ähnlichkeitsrelationen, automatisch die Baukomponenten des alten Erzeugnisses durch die des neuen Erzeugnisses.

⁴⁹ Der Stücklisten-Adaptor kann nicht durch die Geführte Synchronisierung in SAP [SAP13-2] (siehe Kapitel 2.5.) ersetzt werden. Bei der Geführten Synchronisierung muss der Planer die Quellstruktur (Konstruktionsstückliste) mit Editierfunktionen zur Zielstruktur (Fertigungsstückliste) umstrukturieren, damit eine Verbindung entsteht. Veränderungen in der Konstruktionsstückliste, die später durchgeführt werden, kann SAP dann in die Fertigungsstückliste nachziehen. Die Geführte Synchronisierung bietet keine methodische Unterstützung beim erstmaligen Generieren der Fertigungsstückliste. Prinzipiell könnte hierfür der Stücklisten-Adaptor angewendet werden.

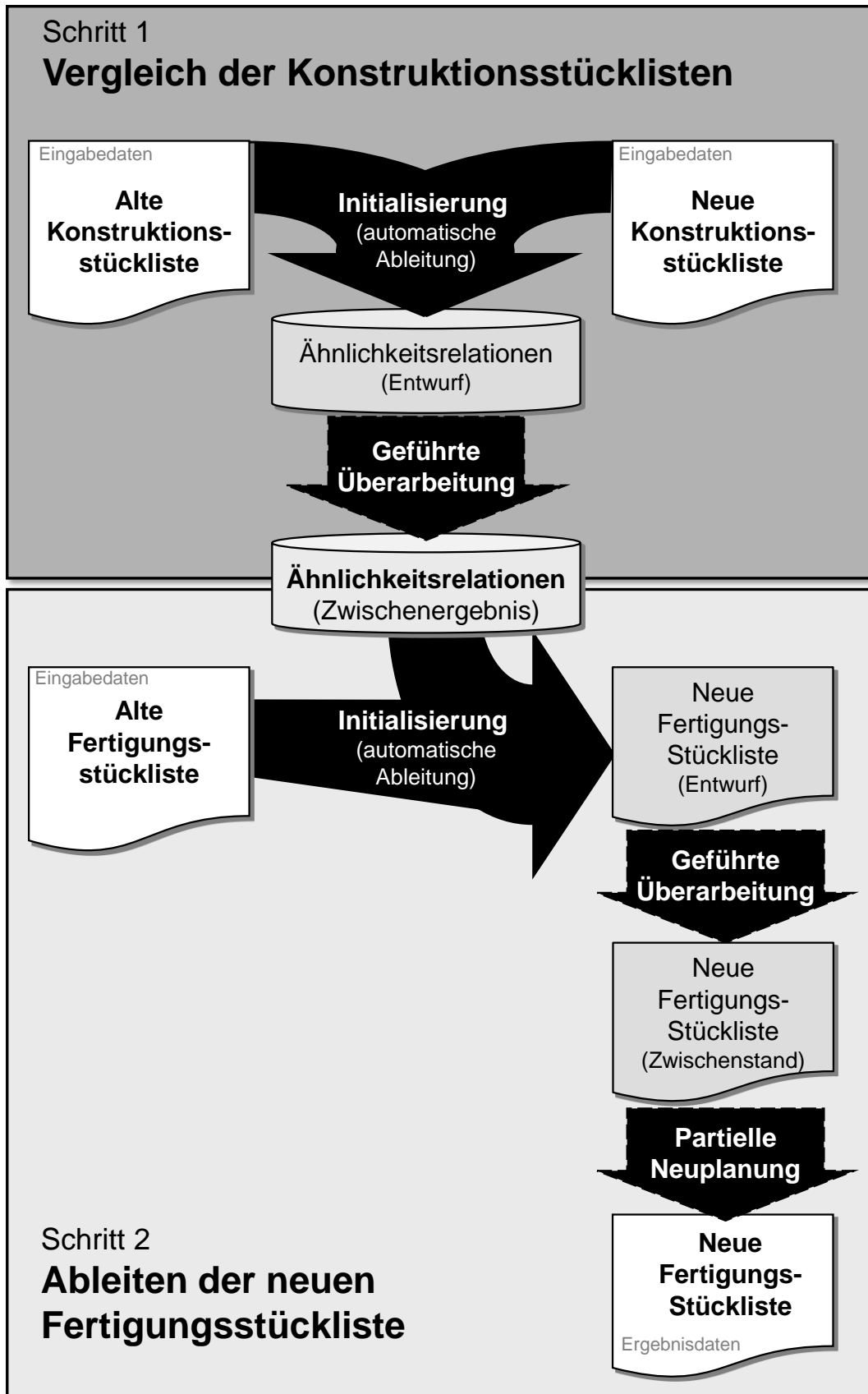


Abbildung 30: Ablauf und Bausteine des Stücklisten-Adaptors

Anschließend kann der Planer den automatisch abgeleiteten Entwurf der neuen Fertigungsstückliste manuell überarbeiten. Er wird vom Verfahren dabei geführt, veränderte Fertigungsbaugruppen zu überprüfen und entweder zu bestätigen oder umzustrukturieren.

Baukomponenten, für die keine Ersetzungen bekannt sind, muss der Planer im Rahmen einer partiellen Neuplanung in die neue Fertigungsstückliste einarbeiten.

6 Eindeutige, prädikatenlogische Beschreibung der Modelle und Methoden

Im vorigen Kapitel wurden Ähnlichkeitsrelationen eingeführt. Außerdem wurde skizziert, wie der Stücklisten-Adaptor die Konstruktionsstücklisten vergleicht und die neue Fertigungsstückliste erstellt. Für eine Algorithmierung reichen diese Beschreibungen in Textform nicht aus. Deshalb erfolgt in diesem Kapitel eine vollständige und eindeutige Konkretisierung, dokumentiert durch eine mathematisch exakte Prädikatenlogik.

- Zunächst wird aufgezeigt, wie prädikatenlogische Systeme exakt beschrieben und ausgewertet werden können.
- Im Anschluss daran wird das Modell der Ähnlichkeitsrelationen ausgeführt.
- Dann wird die Methode, mit der Ähnlichkeitsrelationen beim Vergleich der Konstruktionsstücklisten abgeleitet werden, beschrieben. Kern dieser Methode sind Inferenzregeln, die in prädikatenlogischer Darstellung ausgeführt werden.
- Abschließend wird die Methode zur Generierung der neuen Fertigungsstückliste durch Teilmengenbildung exakt dargestellt.

6.1 Einführung in die Prädikatenlogik mit Prolog

Damit das Verfahren algorithmiert werden kann, müssen Stücklisten, Ähnlichkeitsrelationen und Inferenzregeln eindeutig beschrieben werden. Dafür wird eine bewährte prädikatenlogische Schreibweise verwendet. Die Prädikatenlogik ist ein Teilgebiet der mathematischen Logik [Cla11], [Sta07]. Als konkrete Syntax zur Beschreibung des Verfahrens wird in dieser Arbeit die Notation der Programmiersprache Prolog („programming in logic“) [Clo03] verwendet. Um die Beschreibung nachvollziehen zu können, sind wenige grundlegende Kenntnisse über Prolog erforderlich. Prolog kennt Fakten, Regeln und Anfragen. Außerdem besitzt Prolog einen Inferenzmechanismus, der Anfragen auswerten kann und dazu logische Schlüsse auf Basis der gespeicherten Fakten und Regeln ziehen kann. Diese Elemente von Prolog werden kurz vorgestellt.

6.1.1 Fakten, Regeln, Anfragen und Inferenzmechanismus

Ein Fakt ist in Prolog definiert als grundlegende Aussage, die ohne Vorbedingungen gilt und die nicht weiter aufgespalten werden kann. Im Verfahren werden unter anderem Stücklisten als Fakten abgebildet. Dazu wird die Stückliste in so genannte Verbauungsrelationen aufgeteilt (Abbildung 31 verdeutlicht dies am Beispiel der alten Konstruktionsstückliste).



Abbildung 31: Möglichkeiten zur Abbildung von Stücklisten⁵⁰

Eine Abbildung von Stücklisten durch Verbaunungsrelationen kann mit Prolog-Fakten einfach realisiert werden, die entsprechende Notation lautet:

Stüli (Bk_Vater, Bk_Kind).

Auch Ähnlichkeitsrelationen werden als Prolog-Fakten abgebildet (sie wurden bereits beim Entwurf des Stücklisten-Adaptors in Kapitel 5.4 in Prolog-Notation eingeführt), beispielsweise:

ä_bk_ho_m (kabel, kabel, ist_gleich, vermutlich, system).

In Prolog können Anfragen gestellt werden, etwa „Welche Kinder hat die Elektrik“. Diese Anfrage lautet in Prolog-Notation:

?- k-stüli_alt (elektrik, X).

Konstanten beginnen in Prolog mit einem Kleinbuchstaben und Variablen mit Großbuchstaben. „elektrik“ ist also eine Konstante, X ist eine Variable.

Prolog versucht diese Anfrage zu beantworten. Dazu setzt ein Inferenzmechanismus, der in Prolog eingebaut ist, nacheinander alle Fakten, die in der Datenbasis gespeichert sind, in die Anfrage ein. Die erste gespeicherte Verbaunungsrelation (siehe Abbildung 31) passt nicht, da die Konstante „elektrik“ nicht mit „leuchte-1“ belegt werden kann. Die zweite Verbaunungs-Relation kann der Inferenzmechanismus einsetzen, dabei wird die Variable X mit „kabel“

⁵⁰ Als Relation wird ein Zusammenhang zwischen Objekten bezeichnet. Stücklisten werden in den relationalen Datenbanken der gängigen IT-Systeme durch Relationen redundanzfrei abgespeichert [Dan09]. Dieses bewährte Modell wird für das Verfahren übernommen. Auf diese Weise werden Baukastenstücklisten gespeichert. Eine Baukastenstückliste enthält nur die Baugruppen bzw. Einzelteile der nächsttieferen Ebene, die unmittelbar für ihren Zusammenbau benötigt werden. Im Fabrikbetrieb werden Stücklisten dagegen oft als Strukturstücklisten dargestellt. Eine Strukturstückliste enthält die Baugruppen und Einzelteile aller niedrigeren Ebenen in strukturierter Form, wobei jede Baugruppe jeweils bis zu ihrer niedrigsten Stufe aufgegliedert ist. Struktur- und Baukastenstücklisten können einfach ineinander überführt werden [REF93], [Dan09],[Bic10].

belegt. Als Antwort auf die Anfrage liefert Prolog eine Belegung der Variable X, mit der die Anfrage korrekt beantwortet ist.

```
k-stüli_alt ( elektrik, kabel )
```

Diese systematische Variablenbelegung nennt man Unifikation. Zur Unifikation durchsucht der Inferenzmechanismus von Prolog seine Datenbasis nach einer Antwort, die die Anfrage logisch wahr macht.

Weist man Prolog an, weiter zu suchen, so findet der Inferenzmechanismus alle möglichen Antworten, also außer dem Kabel auch:

```
k-stüli_alt ( elektrik, fassung )  
k-stüli_alt ( elektrik, birne )
```

Durch Regeln können neue Fakten, die bisher nur implizit in der Datenbasis stehen, explizit herausgearbeitet werden. Regeln in Prolog haben einen Regelkopf und einen Regelrumpf, die durch den Regeloperator „:-“ verknüpft sind. Der Regeloperator kann als „wenn“ gelesen werden. Er besagt, dass der Regelkopf wahr ist, wenn der Regelrumpf wahr ist (unifiziert werden kann).

Regelkopf :-
Regelrumpf.

Eine einfache Regel könnte lauten, dass eine Baukomponente in der alten Stückliste vorhanden ist, wenn für diese Baukomponente eine Verbauungsrelation bekannt ist.

```
in_stueli_alt ( Bk ) :-  
    k-stüli_alt ( _ , Bk ).
```

Die neue Regel kann beispielsweise zur Anfrage benutzt werden, ob das „kabel“ in der alten Stückliste vorhanden ist:

```
?- in_stueli_alt ( kabel ).
```

Die entsprechende Unifizierung erfolgt für den Anwender unsichtbar im Hintergrund. Mit der Anfrage wird die Variable Bk mit „kabel“ belegt – und zwar überall in der Regel⁵¹. In Prolog ist der Unterstrich „_“ die so genannte anonyme Variable. Da hier jeder Wert zugelassen wird, wird sie bei der Auswertung ignoriert. Der Versuch, nacheinander die in der Datenbasis gespeicherten Fakten in die Bedingung des Regelrumpfes einzusetzen, gelingt mit „k-stüli_alt (elektrik, kabel).“ Die Regel wird also wie folgt unifiziert:

⁵¹ Der Gültigkeitsbereich einer Variablen ist die gesamte Regel. Wenn also eine Variable im Regelkopf mit einem Wert belegt wird, so ist sie auch im Regelrumpf mit diesem Wert belegt.

```
in_stueli_alt ( kabel ) :-  
    k-stueli_alt ( _ , kabel ).
```

Die vorher nur implizit bekannte Information, dass das „kabel“ in der alten Stückliste vorhanden ist, kann nun explizit als Fakt neu abgespeichert werden.

Die Regel arbeitet aber noch nicht so, wie gewünscht. Denn die Anfrage, ob „leuchte1“ in der alten Stückliste vorhanden ist, würde zur Antwort nein führen, weil die bisherige Regel nur prüft, ob die „leuchte-1“ als zweites Attribut in einer Aufbau-Relation vorkommt. Eine weitere Regel prüft auf das erste Attribut und behebt damit den logischen Fehler.

```
in_stueli_alt ( Bk ) :-  
    k-stueli_alt ( Bk , _ ).
```

Jetzt existieren zwei Regeln in der Datenbasis, die die Anfrage beantworten könnten. Prolog verwendet zunächst die erste Regel und versucht eine Unifizierung. Wenn das nicht gelingt, nimmt Prolog die zweite Regel und versucht hiermit ebenfalls eine Unifizierung. Falls also mehrere Regeln existieren, so wirkt das wie eine ODER-Verknüpfung (Disjunktion) dieser Regeln.

Die beiden Regeln können zu einer einzigen Regel zusammengefasst werden. Der Regelrumpf besteht dann aus mehreren Vorbedingungen. Um eine ODER-Verknüpfung zu realisieren werden die Vorbedingungen mit einem Strichpunkt, dem Operator für ein logisches ODER, verknüpft. Der Regelkopf ist wahr, wenn mindestens eine der Vorbedingungen unifiziert wurde. Die Zusammenfassung zu einer einzigen Regel lautet:

```
in_stueli_alt ( Bk ) :-  
    k-stueli_alt ( _ , Bk );  
    k-stueli_alt ( Bk , _ ).
```

Für eine UND-Verknüpfung werden die Vorbedingungen mit einem Komma verknüpft. Beispielsweise könnte mit einer UND-Verknüpfung ermittelt werden, ob zwei Baukomponenten in die gleiche Baugruppe eingehen.

```
geschwister ( Bk_1 , Bk_2 ) :-  
    k-stueli_alt ( Vater , Bk_1 ),  
    k-stueli_alt ( Vater , Bk_2 ).
```

6.1.2 Auswertung eines prädikatenlogischen Regelsystems

Damit sind die grundlegenden Elemente der Prädikatenlogik mit Prolog, nämlich Fakten, Regeln, Anfragen und der Inferenzmechanismus bekannt. Zum Verständnis des Verfahrens, das aus zahlreichen Regeln besteht, muss noch verdeutlicht werden, wie die Regeln in einem

prädikatenlogischen System zusammenwirken. Wann wendet der Inferenzmechanismus welche Regel an?

Regeln in Prolog können nicht nur Fakten nutzen, sondern auch weitere Regeln aufrufen. Wie dies geschieht, zeigen die Regeln, die unveränderte Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste identifizieren (das ist die erste Aktion beim Vergleich der Konstruktionsstücklisten). Die Regel, die den Sachnummernvergleich startet, wurde in Textform bereits vorgestellt.

Regel 30: Wenn zwei Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste gleiche Sachnummern haben, so wird eine Ersetzung für diese Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben.

```

ä_bk_ersetzung ( Bk, Bk, vermutlich, system ) :-
    in_stueli_alt ( Bk ),
    in_stueli_neu ( Bk ).
    
```

Abbildung 32 verdeutlicht, was bei einer entsprechenden Anfrage geschieht:

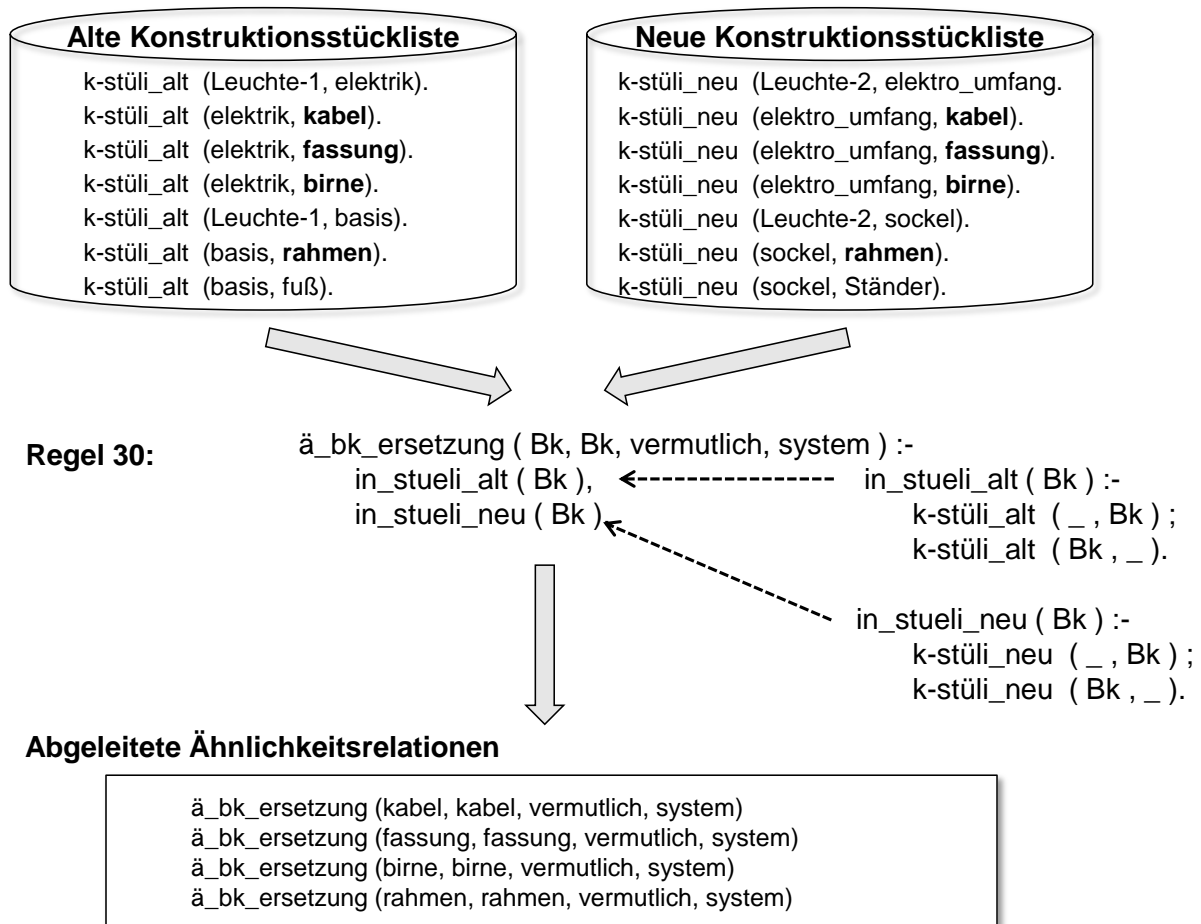


Abbildung 32: Anwendung der Regel 30 im einleitenden Beispiel

Der Inferenzmechanismus von Prolog versucht diese Anfrage zu unifizieren. Zunächst sucht er, ob passende Ähnlichkeitsrelationen als Fakten in der Datenbasis gespeichert sind. Zu Beginn des Stücklistenvergleichs ist das aber noch nicht der Fall. Bei der weiteren Suche in der Datenbasis findet der Inferenzmechanismus die Regel 30. Am Relationstyp⁵² „ä_bk_ersetzung (...)“ erkennt er, dass diese Regel die Anfrage eventuell beantworten kann. Der Inferenzmechanismus wendet diese Regel an und besetzt damit die Variablen „Sicherheit“ und „Verantwortlicher“ der Anfrage durch die Konstanten „sicher“ und „system“ in der Regel.

Die Variable Bk bleibt zunächst unbelegt, zur Unifizierung muss der Inferenzmechanismus den Regelrumpf, also die Vorbedingungen der Regel untersuchen. Zunächst wird er die erste Vorbedingung, „in_stüli_alt (Bk)“ (die zweite Zeile in der Regel) anwenden. Beim Durchsuchen der Datenbasis findet der Inferenzmechanismus die passende Regel mit gleichem Name „in_stüli_alt (Bk)“ (wie diese Regel funktioniert, wurde oben bereits dargestellt). Beim Auswerten belegt der Inferenzmechanismus die Variable Bk mit der Baukomponente „elektro_umfang“, damit ist die erste Vorbedingung der ursprünglichen Regel „ä_bk_ersetzung (...)“ erfüllt.

Da beide Vorbedingungen erfüllt sein müssen (sie sind mit einem Komma, dem UND-Operator, verknüpft) wird nun die zweite Vorbedingung, also die Regel „in_stüli_neu (Bk)“ ausgewertet. Die Variable Bk ist aber bereits mit „elektro_umfang“ belegt, so dass der Inferenzmechanismus keine passende Baugruppe in der alten Stückliste findet. Er kann die zweite Vorbedingung nicht so belegen, dass sie wahr wird.

Deshalb führt der Inferenzmechanismus ein so genanntes Backtracking durch und wendet erneut die erste Vorbedingung an. Diese erneute Anwendung der Regel „in_stüli_neu (BK)“ wird die Variable Bk mit „kabel“ belegen. Mit dieser Belegung kann auch die zweite Vorbedingung erfüllt werden, da das „kabel“ auch in der alten Stückliste vorhanden ist. Die Anfrage ist nun unifiziert:

```
ä_bk_ersetzung ( kabel, kabel, vermutlich, system )
```

Dieses Ergebnis wird als neue Ähnlichkeitsrelation explizit in der Datenbasis abgespeichert. Durch wiederholte Anwendung der Regel 30 findet der Prolog-Interpreter auch alle weiteren unveränderten Baukomponenten.

Das Beispiel zeigt, wie der Inferenzmechanismus von Prolog geeignete Regeln in der Datenbasis sucht und anwendet. Jede Regel kann weitere Regeln aufrufen, die Aufrufe können beliebig tief geschachtelt werden, Rekursionen, das meint, dass sich Regeln direkt oder indirekt selber wieder aufrufen, sind zulässig. Schlussendlich baut der Inferenzmechanismus einen Entscheidungsbaum auf und probiert alle Lösungen aus, die die in der Datenbasis gespeicherten Regeln und Fakten zulassen.

⁵² In Prolog wird der Ausdruck vor der Klammer Funktor genannt.

Die gesamte Auswertung des Regelwerks erledigt der Inferenzmechanismus von Prolog selbständig. Für die Entwicklung des Stücklisten-Adaptors hat die Verwendung von Prolog einen Vorteil. Im Prinzip muss der Verfahrensentwickler lediglich ein logisch korrektes Regelsystem aufbauen, das den generellen Bauplan von Erzeugnisstrukturen abbildet. Weder er, noch der spätere Anwender brauchen sich darum zu kümmern, wann welche Inferenzregel anzuwenden ist.

6.2 Die Methode zum Vergleich der Konstruktionsstücklisten

6.2.1 Inferenzregeln erzeugen neue Ähnlichkeitsrelationen

Im vorangegangenen Kapitel wurde, anhand des einleitenden Beispiels, ein Eindruck der Wirkungsweise des Regelwerks vermittelt. Dabei wurden mehrere Regeln eingeführt und in ihrer Wirkungsweise beschrieben. Im Folgenden werden die Regeln des Verfahrens in Prolog-Notation mathematisch exakt dargestellt.

Als erste Aktion beim Vergleich der Konstruktionsstücklisten leitete der Stücklisten-Adaptor eine Ähnlichkeitsrelation vom Typ Ersetzung für die Leuchte-1 und die Leuchte-2 ab (siehe Kapitel 5.4). Die angewendete Regel lautete in Textform:

Für die Wurzeln von alter und neuer Stückliste wird eine Ersetzung abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "sicher" vergeben und der Verantwortliche auf „planer“ gesetzt. (Regel WURZEL-ERS)

In Prolog-Notation lautet diese Regel.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, sicher, planer ):-  
    produkt ( Bk_neu ),  
    produkt ( Bk_alt ).
```

Die Hilfsregel `Produkt (Bk_x):-` im Regelrumpf ist erfüllt, wenn `Bk_x` ein Produkt ist (also keinen Vater hat). Bei der Anwendung der Regel im einleitenden Beispiel wurde `Bk_neu` mit `Leuchte-1` und `Bk_alt` mit `Leuchte-2` unifiziert. Die erste Zeile der Regel (Regelkopf) wurde als neue Ähnlichkeitsrelation abgespeichert.

```
ä_bk_ersetzung ( leuchte-2 , leuchte-1 , sicher, planer ):-  
    produkt (leuchte-2 ),  
    produkt (leuchte-1 ).
```

Als zweite Aktion ermittelte der Stücklisten-Adaptor im einleitenden Beispiel Ersetzungen für diejenigen Baukomponenten, die mit gleicher Teilenummer im alten und neuen Erzeugnis vorkommen.

Wenn zwei Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste gleiche Sachnummern haben, so wird eine Ersetzung für diese Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben. Diese Ähnlichkeitsrelationen werden vom System abgeleitet⁵³. (Regel GLEICH-ERS-1)

```
ä_bk_ersetzung ( Bk, Bk, vermutlich, system ):-  
    in_stueli_neu ( Bk ),  
    in_stueli_alt ( Bk ).
```

Die Hilfsregel `in_stueli_alt (Bk):-` wurde in Kapitel 6.1.1 entwickelt. Sie ist erfüllt, wenn Bk in der alten Stückliste vorkommt. Die zweite Hilfsregel `in_stueli_neu (Bk):-` wirkt entsprechend. Die Unifizierung dieser Regeln leitete im Beispiel Ersetzungen für Kabel, Fassung, Birne und Rahmen.

Die dritte Aktion ermittelte, dass die Elektrik vermutlich durch den Elektro-Umfang ersetzt wird. Sie schloss das aus der Tatsache, dass für alle Kinder der Elektrik inzwischen Ersetzungen als Ähnlichkeitsrelationen abgespeichert sind.

Wenn für alle Kinder einer alten und einer neuen Baukomponente eine Ersetzung bekannt ist, so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben. (Regel ERS-2-1)

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, vermutlich, system ):-  
    kind ( Bk_neu, Kind_neu ),  
    ä_bk_ersetzung ( Kind_neu, Kind_alt, _, _ ),  
    kind ( Bk_alt, Kind_alt ),  
    kinder ( Bk_neu, Kinder_neu ),  
    kinder ( Bk_alt, Kinder_alt ),  
    alle_ersetzt ( Kinder_neu, Kinder_alt ).
```

- `Kind (Bk, Kind):-` ist erfüllt, wenn Kind ein Kind der Bk ist.
- `Kinder (Bk, Kinder):-` ist erfüllt, wenn die Kinder Kinder der Bk sind.
- `alle_ersetzt (Kinder_neu, Kinder_alt):-` ist erfüllt, wenn es eine eindeutige Zuordnung zwischen den neuen und den alten Kindern gibt.

Bislang wurden lediglich Regeln, die Ähnlichkeitsrelationen vom Typ Ersetzung ermitteln, in Prolog-Notation vorgestellt. An dieser Stelle soll beispielhaft noch eine Regel vorgestellt werden, die einen anderen Typ von Ähnlichkeitsrelationen ermittelt. Als vorletzte Aktion im einleitenden Beispiel hat der Stücklisten-Adaptor aus dem ähnlichen Aufbau von Basis und Sockel geschlossen, dass der Fuß und der Ständer vielleicht ähnlich verwendet werden (siehe Kapitel 5.4).

⁵³ Das Attribut Verantwortlicher wurde eingeführt, damit die Hoheit über das Verfahren beim Planer liegt. Er darf Ähnlichkeitsrelation, die das System abgeleitet hat, abändern – anders herum ist das nicht zulässig.

Quantität und Sicherheit der einstufigen Verwendung von zwei sich ersetzenden Baugruppen werden aus dem einstufigen Aufbau ihres Vaters wie folgt abgeleitet: Aus einem ähnlichen einstufigen Aufbau der Väter folgt vielleicht eine ähnliche einstufige Verwendung der sich ersetzenden Baugruppen. (Regelgruppe HOE-c, Teil-3)

```
ä_bk_ho_e ( Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, vielleicht, system ):-  
  kind (Vater_neu, Bk_neu),  
  ä_bk_hu_e ( Vater_neu, Vater_alt, ist_ähnlich, _, _ ),  
  kind (Vater_alt, BK_alt),  
  ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, _, _ ).
```

6.2.2 Das Regelwerk

Der Vergleich der Konstruktionsstücklisten mit dem Stücklisten-Adaptor ist der methodische Kern des Verfahrens zur Generierung von fertigungsgerechten Erzeugnisstrukturen im Rahmen von Anpassungsplanungen. Die Methode wird durch ein System von Inferenzregeln eindeutig und vollständig dokumentiert. Die Beschreibung erfolgt ausführlich im Anhang (Kapitel 10). Das Regelwerk besteht aus:

- 12 Regeln zur Ermittlung der einstufigen Verwendung (Regelgruppe HOE, Kapitel 10.1)
- 7 Regeln zur Ermittlung des einstufigen Aufbaus (Regelgruppe HUE, Kapitel 10.2),
- 5 Regeln zur Ermittlung der mehrstufigen Verwendung (Regelgruppe HOM, Kapitel 10.3),
- 4 Regeln zur Ermittlung des mehrstufigen Aufbaus (Regelgruppe HUE, Kapitel 10.4),
- 12 Regeln zur Ermittlung der Ersetzung (Regelgruppe ERS, Kapitel 10.5),
- 3 Regeln bezüglich gleicher Sachnummer (Regelgruppe GLEICH, Kapitel 10.6),
- 3 Regeln bezüglich der Wurzel (Regelgruppe WURZEL, Kapitel 10.7),
- 2 Regeln bezüglich der Blätter (Regelgruppe Blatt, Kapitel 10.8),
- Hilfsregeln (Kapitel 10.9).

Das System der Inferenzregeln ist überbestimmt, es sind also mehr Regeln vorhanden, als unbedingt notwendig. Diese Eigenschaft macht das Verfahren sehr flexibel. Falls eine weitere Integritätsbedingung des generellen Bauplans von Erzeugnisstrukturen ausfindig gemacht wird, so kann das Regelsystem um die entsprechende Inferenzregel erweitert werden. Andererseits können auch Regeln entfernt werden, falls eine zugrunde gelegte Integritätsbedingung nicht passen sollte. Der Stücklisten-Adaptor funktioniert weiterhin, wird aber weniger Ähnlichkeiten finden.

6.3 Die Methode zur Generierung der neuen Fertigungsstückliste

Sind die Ähnlichkeitsrelationen aus dem Vergleich der Konstruktionsstücklisten bekannt, gestaltet sich die Generierung der neuen Fertigungsstückliste recht einfach. Der Stücklisten-Adaptor schreibt im zweiten Schritt die Fertigungsstückliste des alten Erzeugnisses ab und ersetzt dabei die Baukomponenten des alten Erzeugnisses durch die des neuen Erzeugnisses. Im Detail gibt es dabei vier unterschiedliche Wege (siehe Kapitel 5.5.3). Um den geeigneten Weg für eine Baukomponente zu finden, wird sie einer von vier Teilmengen zugeordnet. Im Folgenden wird aufgezeigt,

- welche Teilmengen von Baukomponenten für das Verfahren gebildet werden,
- nach welchen Kriterien die Baukomponenten den Teilmengen zugeordnet werden und
- welche Aktion bei der Generierung der neuen Fertigungsstückliste für jede Teilmenge durchgeführt wird.

6.3.1 Definition von Teilmengen

Bei der Anpassungskonstruktion wird nur eine Teilmenge der Einzelteile und Konstruktionsbaugruppen konstruktiv stark verändert. Dadurch verändert sich normalerweise auch nur eine Teilmenge der Montagebaugruppen. Die restlichen Montagebaugruppen können aus der alten Fertigungsstückliste in die gesuchte neue Fertigungsstückliste übernommen werden. Entsprechend erfolgt eine erste Einteilung in die Teilmengen ersetzte, entfallende und hinzukommende Baukomponenten (Abbildung 33).

Von Bedeutung sind vor allem die ersetzten Baukomponenten, weil diese einen Zusammenhang zwischen altem und neuem Erzeugnis herstellen. Im alten und im neuen Erzeugnis handelt es sich um die gleiche Teilmenge (in Abbildung 33 sind die ersetzten Baukomponenten zur Verdeutlichung in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste mit dem gleichen Muster hinterlegt).

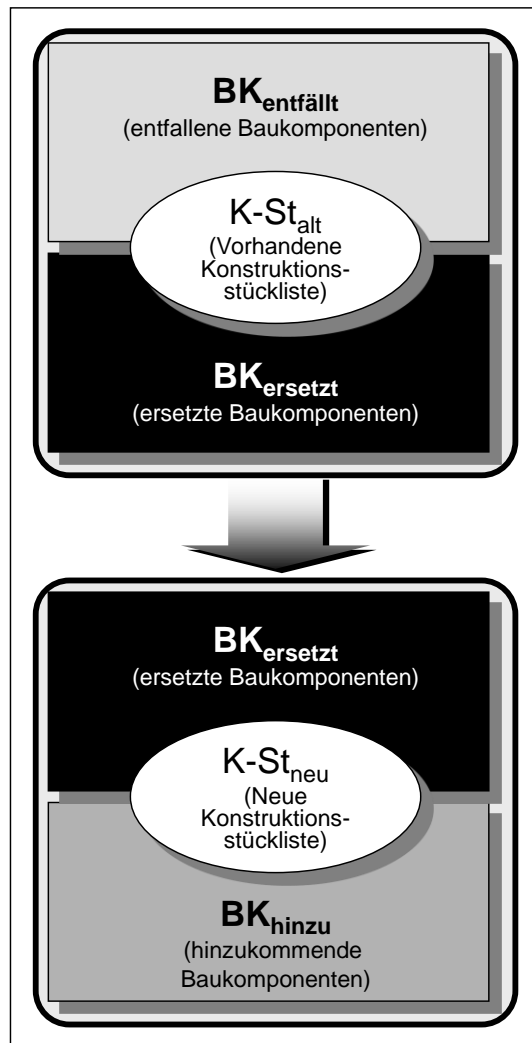


Abbildung 33: Entfallende, ersetzte und hinzukommende Baukomponenten

- *Ersetzte Baukomponenten* (BK_{ersetzt}) sind Baukomponenten, die sowohl in der Konstruktionssückliste des alten Erzeugnisses als auch in der Konstruktionssückliste des neuen Erzeugnisses vorkommen.
- *Entfallende Baukomponenten* ($BK_{\text{entfällt}}$) kommen lediglich in der Konstruktionssückliste des alten Erzeugnisses, nicht jedoch in der des neuen Erzeugnisses vor. Da eine entfallende Baukomponente im neuen Erzeugnis nicht mehr vorkommt, braucht sie bei der Erstellung der Fertigungssückliste nicht berücksichtigt zu werden.
- *Hinzukommende Baukomponenten* (BK_{hinzu}) Baukomponenten, die hinzukommen, tauchen lediglich in den Stücklisten des neuen Erzeugnisses auf. Eine hinzukommende Baukomponente muss im Rahmen einer partiellen Neuplanung in die neue fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur eingearbeitet werden.

Die funktions- und die fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur eines Erzeugnisses unterscheiden sich meist nicht in allen Baugruppen. Eine Teilmenge der Baugruppen ist unspezifisch, es gilt: Konstruktionsbaugruppe = Montagebaugruppe. Auch alle Einzelteile sind unspezifisch, sie sind sowohl in der Konstruktions- als auch in der Fertigungsstückliste eines Erzeugnisses vorhanden. Die Teilmenge der unspezifischen Baukomponenten kann aus der neuen Konstruktionsstückliste in die gesuchte neue Fertigungsstückliste kopiert werden. Entsprechend erfolgt eine weitere Einteilung in konstruktionspezifische, fertigungsspezifische und unspezifische Baukomponenten (Abbildung 34). Die Bedeutung für das Verfahren liegt darin, dass es sich bei den unspezifischen Baukomponenten in der Konstruktions- und der Fertigungsstückliste um die gleiche Teilmenge handelt (um die Gleichheit zu verdeutlichen sind in Abbildung 34 die unspezifischen Baukomponenten in beiden Stücklisten mit dem gleichen Muster hinterlegt). Die unspezifischen Baukomponenten stellen somit die Zusammenhänge zwischen der Konstruktions- und der Fertigungsstückliste eines Erzeugnisses her.

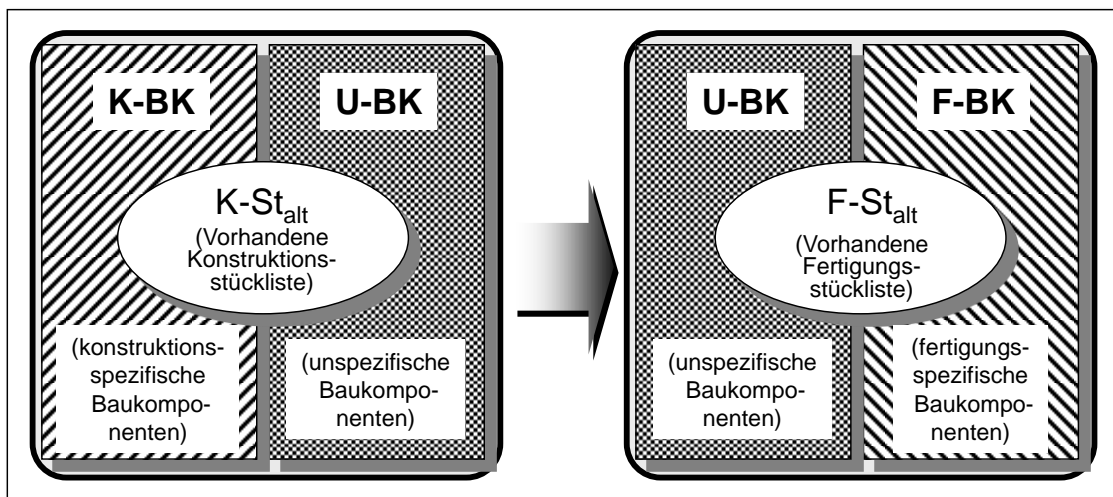


Abbildung 34: Un-, konstruktions- und fertigungsspezifische Baukomponenten

- *Unspezifische Baukomponenten (U-BK)*
Baukomponenten, die sowohl in der Konstruktionsstückliste als auch in der zugehörigen Fertigungsstückliste vorhanden sind, werden den unspezifischen Baukomponenten zugeordnet. Die weitaus größte Zahl der Baukomponenten einer Stückliste ist unspezifisch. Unspezifisch sind immer das Erzeugnis (Wurzel) sowie alle Einzelteile (Blätter). Üblicherweise ist auch ein großer Teil der Baugruppen unspezifisch, nämlich immer dann, wenn die Baugruppe gleichzeitig eine Konstruktions- und eine Montagebaugruppe darstellt. Unspezifische Baugruppen können aus der Konstruktionsstückliste in die Fertigungsstückliste kopiert werden.
- *Fertigungsspezifische Baukomponenten (F-BK)*
Bei diesen Baukomponenten handelt es sich um reine Montagebaugruppen bzw. Fertigungsstufen. Sie sind in Fertigungsstücklisten, nicht aber in Konstruktionsstücklisten

vorhanden. Es ist die Kernaufgabe des Verfahrens, die fertigungsspezifischen Baukomponenten des neuen Erzeugnisses zu generieren und in die neue Fertigungsstückliste einzuarbeiten.

- *Konstruktionsspezifische Baukomponenten (K-BK)*
Konstruktionsspezifische Baukomponenten sind nur in Konstruktionsstücklisten vorhanden, nicht aber in den Fertigungsstücklisten. Es handelt sich um reine Konstruktionsbaugruppen, die in der neuen Fertigungsstückliste nicht berücksichtigt werden müssen.

Die Einteilung in ersetzte, entfallende und hinzukommende Baukomponenten auf der einen Seite und in unspezifische, konstruktionsspezifische und fertigungsspezifische Baukomponenten andererseits werden miteinander kombiniert (Abbildung 35). Jede Baukomponente innerhalb einer Teilmenge wird in gleicher Weise weiter verarbeitet. Die Baukomponenten der Teilmenge "ersetzte unspezifische Baukomponenten" beispielsweise können direkt aus der Konstruktionsstückliste des alten Erzeugnisses in die gesuchte neue Fertigungsstückliste übernommen werden.

Aus der Kombination entstehen folgende Teilmengen von Baukomponenten (gleiche Teilmengen sind in Abbildung 35 jeweils gleich benannt und mit dem gleichen Muster hinterlegt):

- *Kombinierte Teilmenge U-BK_{ersetzt}:*
In allen vier Stücklisten sind dieselben ersetzten unspezifischen Baukomponenten enthalten:

$$\begin{aligned} \text{U-BK}_{\text{ersetzt}}(\text{K-St}_{\text{alt}}) &= \text{U-BK}_{\text{ersetzt}}(\text{F-St}_{\text{alt}}) \\ &= \text{U-BK}_{\text{ersetzt}}(\text{K-St}_{\text{neu}}) = \text{U-BK}_{\text{ersetzt}}(\text{F-St}_{\text{neu}}) \end{aligned}$$

- *Kombinierte Teilmenge K-BK_{ersetzt}:*
In den beiden Konstruktionsstücklisten sind dieselben ersetzten konstruktionsspezifischen Baukomponenten enthalten:

$$\text{K-BK}_{\text{ersetzt}}(\text{K-St}_{\text{alt}}) = \text{K-BK}_{\text{ersetzt}}(\text{K-St}_{\text{neu}})$$

- *Kombinierte Teilmenge F-BK_{ersetzt}:*
In den beiden Fertigungsstücklisten sind dieselben ersetzten fertigungsspezifischen Baukomponenten enthalten:

$$\text{F-BK}_{\text{ersetzt}}(\text{F-St}_{\text{alt}}) = \text{F-BK}_{\text{ersetzt}}(\text{F-St}_{\text{neu}})$$

- *Kombinierte Teilmenge U-BK_{entfällt}:*
In der Konstruktions- und der Fertigungsstückliste des vorhandenen Erzeugnisses entfallen dieselben unspezifischen Baukomponenten:

$$\text{U-BK}_{\text{entfällt}}(\text{K-St}_{\text{alt}}) = \text{U-BK}_{\text{entfällt}}(\text{F-St}_{\text{alt}})$$

- *Kombinierte Teilmenge $U-BK_{hinzu}$:*
In der Konstruktions- und der Fertigungsstückliste des neuen Erzeugnisses kommen dieselben unspezifischen Baukomponenten hinzu:

$$U-BK_{hinzu}(K-St_{neu}) = U-BK_{hinzu}(F-St_{neu})$$

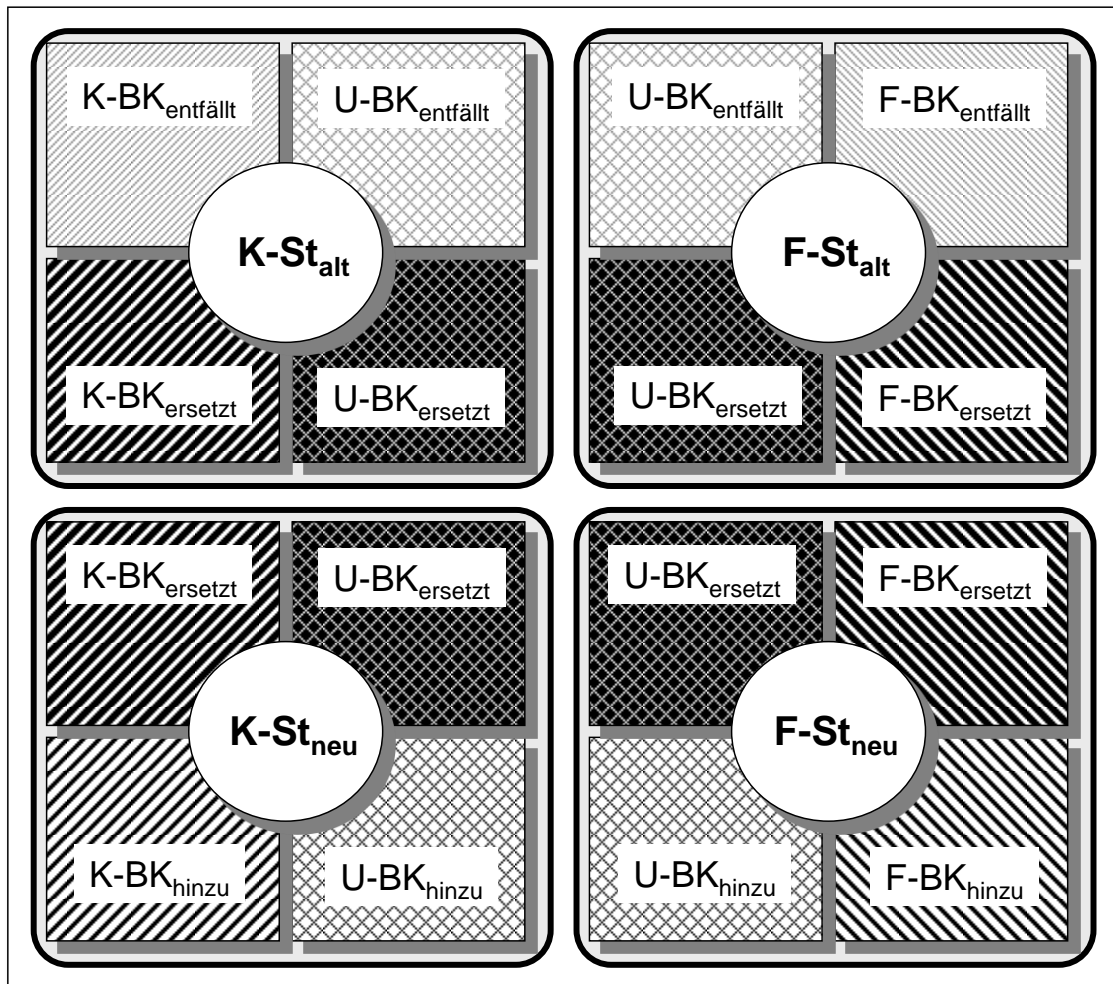


Abbildung 35: Kombination der Relationen

6.3.2 Zuordnungskriterien und Aktionen

Jede Konstruktions-Baukomponente wird einer der definierten Teilmengen nach Abbildung 35 zugeordnet. Die Zuordnung zu entfallenden, ersetzten und hinzukommenden Baukomponenten erfolgt durch Auswertung der Ähnlichkeitsrelation vom Typ "Ersetzung", die für jede Baukomponente in alter und neuer Konstruktionsstückliste beim Vergleich der Konstruktions-

stücklisten ermittelt wurde⁵⁴. Diese Ähnlichkeitsrelation beschreibt, ob eine Baukomponente nur in der alten Konstruktionsstückliste vorkommt ($BK_{entfällt}$), ob sie nur in der neuen Konstruktionsstückliste vorkommt (BK_{hinzu}) oder ob sie in beiden Konstruktionsstücklisten enthalten ist ($BK_{ersetzt}$). Es ist allerdings noch nicht bekannt, ob eine Baukomponente unspezifisch, konstruktionsspezifisch oder fertigungsspezifisch ist.

Im Folgenden wird beschrieben, wie ermittelt wird, welcher der kombinierten Teilmengen eine Baukomponente angehört und wie sie in die neue fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur eingearbeitet werden kann.

Dazu wird die alte Fertigungsstückliste abgearbeitet. Die Abarbeitung erfolgt bottom-up, also ausgehend von den Einzelteilen. Nacheinander wird jede Baukomponente der alten Fertigungsstückliste zur aktuellen BK_{alt} gemacht. Für jede Baukomponente BK_{alt} wird bestimmt, zu welcher Teilmenge sie gehört.

1) U- $BK_{ersetzt}$

Zunächst wird untersucht, ob es sich bei der aktuellen Fertigungs-Baukomponente BK_{alt} in der alten Fertigungsstückliste um eine – gegenüber der neuen Konstruktionsstückliste – ersetzte unspezifische Baukomponente handelt. Dazu wird geprüft, ob eine Ersetzung für die Baukomponente bekannt ist:

$\ddot{a}_{bk_ersetzung} (BK_{alt}, BK_{neu}, Sicherheit, Verantwortlicher)$

Wenn für eine Fertigungs-Baukomponente BK_{alt} eine derartige Ähnlichkeitsrelation bekannt ist, so ist sie unspezifisch. Dieses Erkenntnis ergibt sich aus folgender Überlegung: Eigentlich ist die Ähnlichkeitsrelation nur für Konstruktions-Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste gültig. Wenn für eine Fertigungs-Baukomponente BK_{alt} , die bei der Abarbeitung der alten Fertigungsstückliste überprüft wird, trotzdem eine Ähnlichkeitsrelation vorhanden ist, so ist sie identisch mit einer Baukomponente in der alten Konstruktionsstückliste. Die Baukomponente ist in beiden Stücklistenarten enthalten, also unspezifisch.

Diese Überlegung lässt sich fortführen und zur Ableitung der neuen fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur nutzen. Die alte Konstruktions-Baukomponente BK_{alt} wurde durch die neue Konstruktions-Baukomponente BK_{neu} ersetzt, auf welche die Ähnlichkeitsrelation hinweist⁵⁵.

⁵⁴ Zur Generierung der Fertigungsstückliste werden lediglich die Ähnlichkeitsrelationen vom Typ "Ersetzung" herangezogen. Ähnlichkeitsrelationen der Typen "ein- und mehrstufige Verwendung" sowie "ein- und mehrstufiger Aufbau" helfen bei der Ableitung der neuen fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur nicht weiter, weil die Erzeugnisstrukturen in Konstruktions- und Fertigungsstückliste völlig unterschiedlich sein können.

⁵⁵ Wenn die Baukomponente unverändert übernommen wurde, gilt: $BK_{alt} = BK_{neu}$

Da BK_{alt} unspezifisch ist, ist auch BK_{neu} unspezifisch, und BK_{neu} kann aus der neuen Konstruktionsstückliste in die neue fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur übernommen werden.

2) F- $BK_{ersetzt}$

Wenn es sich bei der untersuchten Baukomponente nicht um eine ersetzte, unspezifische Baukomponente handelt, so wird geprüft, ob sie zur Teilmenge der ersetzten, fertigungsspezifischen Baukomponenten gehört. Die Prüfungen auf Spezifität und Ersetzung erfolgen nacheinander.

Zunächst wird ermittelt, ob die Baukomponente BK_{alt} fertigungsspezifisch ist. Das ist genau dann der Fall, wenn keine Ähnlichkeitsrelation für sie abgespeichert ist. Denn fertigungsspezifisch bedeutet, dass die Baukomponente nur in den Fertigungsstücklisten, nicht aber in den Konstruktionsstücklisten vorkommt. Folglich wurden fertigungsspezifische Baukomponenten beim Vergleich der Konstruktionsstücklisten nicht analysiert, so dass keine Ähnlichkeitsrelationen für sie angelegt wurden. Nur Montagebaugruppen können fertigungsspezifisch sein. Einzelteile sind immer unspezifisch, denn Konstruktions- und Fertigungsstückliste unterscheiden sich durch die Baugruppenstruktur.

Falls die Montagebaugruppe BK_{alt} als fertigungsspezifisch erkannt wurde, wird geprüft, ob sie ersetzt auch in der neuen Fertigungsstückliste vorkommt. Ein Vergleich mit der neuen Montagebaugruppe BK_{neu} scheidet jedoch aus, weil diese noch nicht bekannt ist - sie zu generieren, ist die Aufgabe des Verfahrens. Zur Ermittlung, ob die fertigungsspezifische Montagebaugruppe BK_{alt} durch eine neue Montagebaugruppe BK_{neu} ersetzt werden kann, wird versucht, die alte Montagebaugruppe BK_{alt} mit den Einzelteilen des neuen Erzeugnisses aufzubauen. Das gelingt genau dann, wenn für alle Nachfahren der alten Montagebaugruppe BK_{alt} Ersetzungen bekannt sind. Dann handelt es sich um eine ersetzte fertigungsspezifische Baugruppe und die Montagebaugruppe wird aus der alten Fertigungsstückliste in die neue kopiert. Sind nur für einzelne Nachfahren Ersetzungen bekannt, so handelt es sich eventuell ebenfalls um eine ersetzte fertigungsspezifische Baugruppe. Die Baugruppe wird dann ebenfalls in die neue fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur kopiert, aber dem Planer später zur Überprüfung vorgelegt. Die Sachnummer einer Fertigungsbaugruppe wird beim Kopieren in die neue Stückliste nur dann beibehalten, wenn all ihre Nachfahren unverändert sind. Falls einzelne Nachfahren verändert wurden oder nicht für alle Nachfahren Ersetzungen bekannt sind, wird eine neue Sachnummer vergeben.

3) F- $BK_{entfällt}$, U- $BK_{entfällt}$ und K- $BK_{entfällt}$

Wurde die aktuell untersuchte Baukomponente BK_{alt} bei den Prüfungen 1) und 2) weder in die Teilmenge der unspezifischen, ersetzten, noch in die Teilmenge der fertigungsspezifischen, ersetzten Baukomponenten zugeordnet, so handelt es sich um eine entfallene Bau-

komponente. Entfallene Baukomponenten sind nur im alten Erzeugnis vorhanden, sie brauchen deshalb bei der Generierung der neuen Fertigungsstückliste nicht berücksichtigt zu werden.

4) U-BK_{hinzu}

Nachdem die alte Fertigungsstückliste Baukomponente für Baukomponente abgearbeitet wurde, wird die neue Konstruktionsstückliste abgearbeitet. Dazu werden die Baukomponenten der neuen Konstruktionsstückliste nacheinander zur aktuellen BK_{neu} gemacht.

Bei der Abarbeitung der neuen Konstruktionsstückliste müssen nur noch die hinzukommenden Baukomponenten berücksichtigt werden. Denn ersetzte Baukomponenten sind bereits bearbeitet und entfallende sind im neuen Erzeugnis nicht vorhanden. Die hinzukommenden Baukomponenten sind eindeutig an den Ähnlichkeitsrelationen zu erkennen. Entweder es existiert zwar eine neue Baukomponente in der neuen Konstruktionsstückliste, für diese ist aber keine Ähnlichkeitsrelation vom Typ "Ersetzung" bekannt, oder eine Ähnlichkeitsrelation ist bekannt, die explizit aussagt, dass die Baukomponente BK_{neu} lediglich in der neuen Konstruktionsstückliste vorkommt (das Attribut BK_{alt} ist nicht gesetzt, also „nil“):

ä_bk_ersetzung (nil, BKneu, Sicherheit, Verantwortlicher)

Hinzukommende Baukomponenten werden darauf geprüft, ob es sich um ein Einzelteil handelt. Einzelteile sind immer unspezifisch, sie können in die neue Fertigungsstückliste übernommen werden. Das Einzelteil wird in die neue Fertigungsstückliste kopiert, der Planer braucht lediglich anzugeben, an welche Montagebaugruppe es angehängt werden soll. Wenn noch keine passende Montagebaugruppe existiert, wird es an eine Pseudobaugruppe „Partielle Neuplanung“ angehängt.

Für hinzukommende Konstruktionsbaugruppen kann nicht algorithmisch entschieden werden, ob sie gleichzeitig auch Montagebaugruppen sind und in die neue Fertigungsstückliste übernommen werden sollen. Der Planer muss entscheiden, ob sie unspezifisch oder konstruktionspezifisch ist. Die hinzukommenden unspezifischen Montagebaugruppen werden in die neue Fertigungsstückliste kopiert, der Planer gibt an, an welche Stelle.

5) K-BK_{hinzu}

Hat der Planer entschieden, dass die hinzukommende Baugruppe konstruktionspezifisch ist, also eine reine Konstruktionsbaugruppe, so ist sie für die Generierung der neuen Fertigungsstückliste ohne Bedeutung und wird verworfen.

6) F-BK_{hinzu}

Damit sind die Möglichkeiten zur Anpassungsplanung abgearbeitet. Die neue fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur ist weitgehend komplett. Da alle Einzelteile unspezifisch sind, sind diese bereits vollständig in der neuen fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur vorhanden, es fehlen lediglich die hinzukommenden fertigungsspezifischen Montagebaugruppen.

Die hinzukommenden Montagebaugruppen werden vom Planer im Rahmen einer partiellen Neuplanung manuell angelegt. Dazu strukturiert er die Baukomponenten in der Pseudobaugruppe „Partielle Neuplanung“ neu.

6.4 Das Modell zur Abbildung von Zusammenhängen zwischen Erzeugnissen

Für das Verfahren neu zu entwickeln war das Modell der Ähnlichkeitsrelation. Denn Zusammenhänge bestehen nicht nur innerhalb einer Stückliste. Auch zwischen den Baukomponenten eines bestehenden „alten“ Erzeugnisses, das der Anpassungsplanung zugrunde gelegt wird, und den Baukomponenten des zu planenden „neuen“ Erzeugnisses gibt es Zusammenhänge. Beispielsweise kann eine Baukomponente im alten Erzeugnis im neuen Erzeugnis durch eine konstruktiv veränderte Baugruppe „ersetzt“ werden. Zur Abbildung derartiger Erzeugnis übergreifender Zusammenhänge standen bisher keine allgemein verbreiteten Modelle zur Verfügung. Deshalb werden, zweckspezifisch für das neue Verfahren, die sogenannten Ähnlichkeitsrelationen definiert.

Jede Ähnlichkeitsrelation beschreibt einen Zusammenhang zwischen jeweils einer Baukomponente in der alten und der neuen Erzeugnisstruktur. Beispielsweise bildet die Ähnlichkeitsrelation

ä_bk_hu_m (BG_{alt}, BG_{neu}, ist_gleich, sicher, system)

folgenden Sachverhalt ab: "Der *mehrstufige Aufbau*⁵⁶ der Baugruppe BG_{alt} in der alten Konstruktionsstückliste *ist_gleich* dem Aufbau der Baugruppe BG_{neu} in der neuen Konstruktionsstückliste. Dieser Sachverhalt ist *sicher*, er wurde vom *System* algorithmisch abgeleitet".

6.4.1 Relationstypen

Jede Ähnlichkeitsrelation setzt sich aus Relationstyp und Relationsattributen zusammen. Die Attribute sind der Teilausdruck in der Klammer.

⁵⁶ ä_bk identifiziert eine Ähnlichkeitsrelation für Baukomponenten, hu_m dokumentiert den hierarchischen Aufbau nach unten über mehrere Stücklistenstufen, also den mehrstufigen Aufbau.

RELATIONSTYP (BK_{alt}, BK_{neu},
Quantität,⁵⁷
Sicherheit,
Verantwortlicher)

Der Relationstyp charakterisiert die Art der Ähnlichkeit. Für das Verfahren werden mehrere Relationstypen definiert:

- einstufige Verwendung ä_bk_ho_e (...)
- mehrstufige Verwendung ä_bk_ho_m (...)
- einstufiger Aufbau ä_bk_hu_e (...)
- mehrstufiger Aufbau ä_bk_hu_m (...)
- Ersetzung ä_bk_ersetzung (...)

Diese Relationstypen werden mit eindeutigen, formal gebildeten Kürzeln bezeichnet:

ä_bk_ identifiziert eine Ähnlichkeitsrelation für Baukomponenten

ho_ kennzeichnet die Hierarchiebeziehung nach oben (Verwendung)

hu_ kennzeichnet die Hierarchiebeziehung nach unten (Aufbau)

e betrachtet wird nur eine Hierarchiestufe

m es werden mehrere Hierarchiestufen betrachtet

ä_bk_ersetzung (...) diese Relation beschreibt eine Ersetzung.

Die Relationstypen für Verwendung und Aufbau werden lediglich im Rahmen des Vergleichs der Konstruktionsstücklisten benötigt. Schlussendlich werden alle Erkenntnisse, die in diesen Ähnlichkeitsrelationen gespeichert sind, im Relationstyp Ersetzung zusammengeführt. Der Relationstyp Ersetzung stellt die Verbindung zwischen dem Verfahrensschritt 1 (Vergleich der Konstruktionsstücklisten) und dem Verfahrensschritt 2 (Ableitung der neuen Fertigungsstückliste) her.

- Ersetzung bedeutet, dass sich zwei Baukomponenten sowohl in den Konstruktions-, als auch in den Fertigungsstücklisten von altem und neuem Erzeugnis ersetzen⁵⁸.

⁵⁷ Der Relationstyp Ersetzung (...) besitzt das Relationsattribut Quantität nicht.

⁵⁸ Um eine Betrachtung unterschiedlicher Stücklistenarten herauszuheben, könnte der Relationstyp „Ersetzung“ in zwei Relationstypen aufgespalten werden, nämlich in einen Relationstyp „K-Ersetzung“, der sich auf die Konstruktionsstückliste bezieht, und eine „F-Ersetzung“, die sich auf die Fertigungsstücklisten bezieht. Die „K-Ersetzungen“ werden dann beim Vergleich der Konstruktions-

Die Ähnlichkeitsrelationen werden durch Attribute näher beschrieben. Sie definieren eindeutig die Objekte, auf die sich die Ähnlichkeit bezieht (BK_{alt} , BK_{neu}). Des Weiteren quantifizieren sie den Grad der Ähnlichkeit (Quantität) und qualifizieren, wie verlässlich die Information ist (Sicherheit, Verantwortlicher). Abbildung 36 gibt eine Übersicht über die möglichen Ausprägungen von Relationstypen und Attributen.

Relationstypen	Bezug	Quantität	Sicherheit	Verantw.
ä_bk_ho_e ä_bk_ho_m ä_bk_hu_e ä_bk_hu_m ä_bk_ersetzung	BK_{alt}, BK_{neu}	ist_gleich ist_ähnlich ist_ungleich ist_unbekannt mind_ähnlich höchst_ähnlich	sicher vermutlich vielleicht unbekannt	System Planer

Abbildung 36: Mögliche Ausprägungen der Ähnlichkeitsrelationen

6.4.2 Attribute, die den Bezug zu Stücklisten und Baukomponenten herstellen

Die Attribute BK_{alt} und BK_{neu} definieren die beiden Baukomponenten, zwischen denen eine Ähnlichkeit beschrieben wird⁵⁹.

Der Wert „nil“ für BK_{alt} oder BK_{neu} bedeutet, dass diese Baukomponente nicht vorhanden ist. Entsprechend würde die vereinfacht dargestellte Relation „Ersetzung (BK_{alt}, nil)“ bedeuten dass die Baukomponente BK_{alt} entfällt, also im neuen Erzeugnis nicht vorkommt und die Relation „Ersetzung (nil, BK_{neu})“, dass die Baukomponente BK_{neu} neu hinzukommt. Sind BK_{alt} und BK_{neu} mit dem gleichen Wert belegt, so hat die Baukomponente in beiden Stücklisten die gleiche Sachnummer, wurde also unverändert übernommen.

stücklisten (Verfahrensschritt 1) erzeugt, dazu können die Inferenzregeln so abgeändert werden, dass eindeutige Zusammenhänge zwischen den Konstruktionsstücklisten mit der Sicherheit „sicher“ abgeleitet werden. Vor der Ableitung der Fertigungsstückliste werden die „K-Ersetzungen“ als erster Wurf in die „F-Ersetzungen“ kopiert, dabei wird die Sicherheit veränderter Baukomponenten auf „vermutlich“ reduziert.

⁵⁹ Um Mehrfachverwendungen abzubilden, werden BK_{alt} und BK_{neu} nicht nur durch ihre Sachnummer, sondern zusätzlich durch eine eindeutige Positionsnummer beschrieben (im Beispiel nicht umgesetzt).

6.4.3 Das Attribut "Verantwortlicher"

Das Attribut "Verantwortlicher" beschreibt, wer die Ähnlichkeitsrelation anlegt. Ähnlichkeitsrelationen können entweder vom *Planer* eingegeben oder durch das *DV-System* mit Hilfe der Ableitungsregeln des Verfahrens algorithmisch abgeleitet werden. Mögliche Ausprägungen des Verantwortlichen sind somit

System / Planer.

Ähnlichkeitsrelationen, die vom Planer eingegeben oder verändert werden, erhalten das Attribut "Verantwortlicher = Planer". Die restlichen Ähnlichkeitsrelationen werden algorithmisch auf Grundlage von Regeln abgeleitet, sie erhalten die Ausprägung "System". Der Planer besitzt die Hoheit. Ähnlichkeitsrelationen, die der Planer eingegeben hat, sind für das System bindend. Dagegen kann der Planer die Ähnlichkeitsrelationen mit der Ausprägung "System" abändern.

6.4.4 Das Attribut "Sicherheit"

Das Attribut Sicherheit beschreibt den Grad der Sicherheit einer Ähnlichkeitsrelation. Unterschieden werden die Sicherheiten

sicher / vermutlich / vielleicht / unbekannt.

Die Sicherheit einer Ähnlichkeitsrelation hängt von der Mächtigkeit der benutzten Ableitungsregeln ab. Diese ist für jede einzelne Ableitungsregel definiert.

- Das Attribut Sicherheit einer Ähnlichkeitsrelation kann nur auf "sicher" gesetzt werden, wenn bei dessen Ableitung nur Regeln verwendet wurden, die das Attribut Sicherheit "sicher" setzen können. Im einführenden Beispiel kann beispielsweise mit der Sicherheit "sicher" abgeleitet werden, dass die Wurzeln "Nabe alt" und "Nabe neu" einen ähnlichen Aufbau haben (andernfalls wären die beiden Stücklisten nicht zur Anpassungsplanung benutzt worden).
- Die Aussage einer Ähnlichkeitsrelation gilt mit der Sicherheit "vermutlich", wenn bei der Ableitung alles dafür spricht, eine sichere Ableitung aber nicht möglich ist.
- Die Sicherheit "vielleicht" ergibt sich aus schwachen Regeln.
- Die Sicherheit von Ähnlichkeitsrelationen kann auf "unbekannt" gesetzt werden, wenn sich die Aussagen von zwei Ähnlichkeitsrelationen bezüglich des Attributs Quantität widersprechen. Besagt beispielsweise eine Ähnlichkeitsrelation, dass die Verwendung von zwei Baukomponenten "vielleicht gleich" sei und eine andere Ähnlichkeitsrelation besagt, dass die Verwendung dieser Baukomponenten "vielleicht ungleich" sei, so wird die Sicherheit dieser Ähnlichkeitsrelationen auf "unbekannt" gesetzt.

Wenn nichts anderes angegeben ist, gilt das Prinzip der schwächsten Sicherheit. Es besagt, dass die Sicherheit einer abgeleiteten Ähnlichkeitsrelation nicht höher sein kann, als die schwächste Sicherheit der Ähnlichkeitsrelationen, die der Ableitung zugrunde gelegt wurden. Werden beispielsweise zur Ableitung einer neuen Ähnlichkeitsrelation von einer Regel zwei vorhandene Ähnlichkeitsrelationen benutzt, von denen das eine die Sicherheit "sicher" hat und das andere lediglich die Sicherheit "vielleicht", so kann nach dem Prinzip der schwächsten Sicherheit die Sicherheit der neuen Ähnlichkeitsrelation nur auf "vielleicht" gesetzt werden, selbst wenn die benutzte Regel die Sicherheit "sicher" vergeben könnte.

6.4.5 Das Attribut "Quantität"

Das Attribut Quantität quantifiziert die Ähnlichkeit zwischen zwei Baukomponenten. Definiert wurden die Ähnlichkeitsgrade⁶⁰:

- ist_gleich
- ist_ähnlich
- ist_ungleich
- ist_unbekannt
- mind_ähnlich (ist_gleich oder ist_ähnlich)
- höchst_ähnlich (ist_ähnlich oder ist_ungleich)

Die konkrete Bedeutung des Attributs Quantität bei den einzelnen Relationstypen stellt sich wie folgt dar.

einstufige Verwendung (... , ist_gleich, ...)

Eine alte und eine neue Baugruppe haben genau dann gleiche einstufige Verwendung, wenn ihre Väter unverändert oder ersetzt, jedenfalls aber auf derselben Hierarchieebene vorhanden sind.

mehrstufige Verwendung (... , ist_gleich, ...)

Eine alte und eine neue Baugruppe haben genau dann gleiche mehrstufige Verwendung, wenn alle ihre Vorfahren unverändert oder ersetzt, jedenfalls aber auf derselben Hierarchieebene vorhanden sind.

einstufige Verwendung (... , ist_ungleich, ...)

Die einstufige Verwendung ist ungleich, wenn die Väter nicht übereinstimmen.

mehrstufige Verwendung (... , ist_ungleich, ...)

Die mehrstufige Verwendung ist ungleich, wenn keine Vorfahren übereinstimmen.

⁶⁰ Warum genau diese Quantitäten ausgewählt wurden, beschreibt Anhang 11.1.

mehrstufige Verwendung (... , ist_ähnlich, ...)

Ähnlichkeit ist nur für die mehrstufige Verwendung definiert. Sie besteht dann, wenn nur ein Teilumfang der Vorfahren übereinstimmt. Eine ähnliche mehrstufige Verwendung entsteht, wenn Stücklistenstufen eingeschoben bzw. entfernt werden, oder wenn eine Baukomponente zwar in die gleiche Baugruppe eingebaut wird, diese dann aber anders (ungleich) verwendet wird.

einstufiger Aufbau (... , ist_gleich, ...)

mehrstufiger Aufbau (... , ist_gleich, ...)

Ein gleicher einstufiger/mehrstufiger Aufbau von alter und neuer Konstruktionsbaugruppe bedeutet, dass alle Kinder/Nachfahren unverändert oder ersetzt, jedenfalls aber auf derselben Hierarchieebene vorhanden sind.

einstufiger Aufbau (... , ist_ungleich, ...)

mehrstufiger Aufbau (... , ist_ungleich, ...)

Der Aufbau ist ungleich, wenn keine Übereinstimmung in der strukturellen Zusammensetzung von alter und neuer Konstruktionsbaugruppe besteht.

einstufiger Aufbau (... , ist_ähnlich, ...)

mehrstufiger Aufbau (... , ist_ähnlich, ...)

Ein ähnlicher einstufiger/mehrstufiger Aufbau besteht, wenn einzelne Kinder/Nachfahren unverändert oder ersetzt vorhanden sind.

ersetzung (...)

Der Relationstyp Ersetzung besitzt das Attribut Quantität nicht.

6.4.6 Abspeicherung neuer Ähnlichkeitsrelationen

Bei der Anwendung des Regelwerkes entstehen ständig neue Ähnlichkeitsrelationen. Neue Ähnlichkeitsrelationen brauchen nur dann gespeichert zu werden, wenn sie zusätzliche Informationen enthalten, die in keiner anderen Ähnlichkeitsrelation enthalten sind. Einige der neuen Ähnlichkeitsrelationen enthalten lediglich Informationen, die bereits in einer anderen Ähnlichkeitsrelation enthalten sind, sie können ignoriert bzw. gelöscht werden. Für jede neue Ähnlichkeitsrelation muss der zusätzliche Informationsgehalt ermittelt und abgespeichert werden. Die Methodik zum logischen Vergleich einer neuen Ähnlichkeitsrelation mit bereits vorhandenen wird in Anhang 11.2 exakt beschrieben.

Durch manuelle Eingaben des Planers kann es vorkommen, dass eine neue Ähnlichkeitsrelation Informationen enthält, die in Widerspruch zu bereits bekannten Ähnlichkeitsrelationen stehen. Widersprüche müssen ermittelt und aufgelöst werden, beispielsweise indem Ähnlichkeitsrelationen gelöscht oder als aktuell ungültig markiert werden. Die entsprechende Vorgehensweise wird im Anhang 11.3 beschrieben.

7 Evaluierung

Ob das Verfahren die Ziele Effizienz, Effektivität und Universalität erfüllt, wird durch eine theoretische Evaluierung sowie durch praktische Anwendungen des Verfahrens überprüft. Wenn es alle Ziele erfüllt, kann ein Stücklisten-Generator als EDV-System für das Tagesgeschäft des Stücklistenwesens realisiert und die Erstellung von Fertigungsstücklisten im Rahmen von Anpassungsplanungen weitgehend automatisiert werden.

7.1 Theoretische Evaluierung: Das Verfahren ist universell

Die theoretische Evaluierung untersucht die Universalität des Verfahrens. Außerdem wird eine Prognose für die Grenzen der erreichbaren Effizienz abgesteckt.

7.1.1 Nachweis der Universalität

Ein System von Inferenzregeln bildet den generellen Bauplan von Erzeugnisstrukturen allgemeingültig ab. Dadurch erfolgen das Schließen auf neue Ähnlichkeitsrelationen sowie die Ableitung der neuen Fertigungsstückliste rein syntaktisch, ein Stücklisten-Adaptor kann ohne Bezug zu realen produktionstechnischen Bedeutungen realisiert werden. Die Inferenzregeln sind Bestandteil des Verfahrens und brauchen vom Anwender nicht gepflegt zu werden. Eine spezifische Daten- oder Wissensbasis für jede Fertigungstechnologie ist nicht erforderlich, umfassendes Ingenieurwissen, etwa das Produktionswissen erfahrener Planer, muss nicht abgebildet werden. Bei neuen Produktionsabläufen oder Technologien fällt somit kein Training und keine Erweiterung der Wissensbasis an.

Fazit:

Das Verfahren ist auch für komplexe Erzeugnisse, die vielfältige Fertigungstechnologien benötigen, anwendbar. Es kann ohne aufwändige Vorbereitung und ohne Training für verschiedenartige Montagefälle eingesetzt werden.

7.1.2 Prognose der Effizienz

Um die die Anpassungsplanung so weit wie möglich zu automatisieren wurde ein Algorithmus entwickelt. Er beschreibt das Verfahren umfassend und durchgängig indem er alle erforderlichen Planungsschritte abbildet. Die prädikatenlogische Beschreibung ist mathematisch exakt und damit eindeutig. Die Möglichkeit zur Umsetzung des Verfahrens in ein EDV-Programm wurde prototypisch nachgewiesen.

Außer den Tätigkeiten zur Durchführung der Anpassungsplanung sind für den Planer keine zusätzlichen Aufwände erforderlich. Es wurde gezeigt, dass als Eingabedaten nur Konstrukti-

ons- und Fertigungsstücklisten benutzt werden, die üblicherweise in den ERP- oder CAD-Systemen der Unternehmen gespeichert sind.

Schlussendlich kann die Effizienz des Verfahrens nur durch die praktische Anwendung evaluiert werden. Trotzdem sind Prognosen auf theoretischer Basis möglich und sinnvoll. Falls diese bei der praktischen Anwendung nicht erreicht werden, deutet dies auf Fehler bei der Konzeption oder der Umsetzung hin.

Der Stücklisten-Adaptor soll die Fertigungsstückliste des neuen Erzeugnisses so ableiten, dass sie der alten Fertigungsstückliste möglichst weit entspricht. Welcher Anteil der Erzeugnisstruktur durch eine Anpassungsplanung automatisch erzeugt werden kann, hängt dabei vom Grad der Ähnlichkeit zwischen neuem und altem Erzeugnis ab. Eine ausreichende Ähnlichkeit ist Voraussetzung für Anpassungsplanungen.

Im Folgenden wird gezeigt, dass der Anteil an Montagebaugruppen des neuen Erzeugnisses, die das Verfahren automatisch ableitet, mindestens dem Wiederverwendungsgrad unveränderter Einzelteile entspricht. Beispielsweise kann das Verfahren bei einem Wiederverwendungsgrad von 80% der Einzelteile mindestens 80% der neuen Montagebaugruppen automatisch ableiten. Somit ist lediglich für maximal 20% der Montagebaugruppen eine partielle Neuplanung erforderlich. Zur Verdeutlichung werden zwei Extremfälle theoretisch untersucht.

Extremfall Konzentration: Konzentrieren sich die Veränderungen auf wenige Montagebaugruppen, so bleibt im Umkehrschluss der Großteil der Baugruppen unverändert. Unveränderte Montagebaugruppen sind bottom-up einfach daran zu erkennen, dass alle Einzelteile, aus denen sie bestehen, im neuen und alten Erzeugnis vorhanden sind. Das Verfahren kopiert sie automatisch aus der alten in die neue Erzeugnisstruktur. Schon ein Verfahren, das allein auf dem Vergleich der Einzelteile beruht, würde einen Anteil an Montagebaugruppen automatisch ableiten, der dem Wiederverwendungsgrad unveränderter Einzelteile entspricht (beispielsweise 80%). Für die veränderten Baugruppen (beispielsweise 20%) ist eine partielle Neuplanung erforderlich. Da das Verfahren die bottom-up-Ableitungen durch top-down-Analysen ergänzt, kann es eine bessere Ableitungsquote haben.

Extremfall Verteilung: Der andere Extremfall ist, dass sich die Änderungen über alle Baugruppen verteilen, so dass keine einzige Montagebaugruppe unverändert bleibt. Allerdings besteht dann im Umkehrschluss jede neu zu generierende Montagebaugruppe überwiegend aus unveränderten Einzelteilen (beispielsweise zu 80% aus unveränderten und nur zu 20% aus neuen Teilen). Aufgrund dieses hohen Anteils an unveränderten Einzelteilen kann das Verfahren dem Planer einen recht zuverlässigen Vorschlag bezüglich der Montagebaugruppen unterbreiten. Die neuen Baugruppen sind bereits zu 80% definiert, es ist lediglich eine Vervollständigung erforderlich. Allerdings muss der Planer in diesem Extremfall jede einzelne

Baugruppe überprüfen, denn auch wenn sich nur wenige Teile einer Baugruppe ändern, könnten daraus neue Montageabläufe resultieren.

Es steht also zu erwarten, dass der Gewinn an Effizienz durch eine Anwendung des Stücklisten-Adaptors im Tagesgeschäft des Stücklistenwesens etwa so hoch ist, wie der Wiederverwendungsgrad unveränderter Einzelteile.

7.2 Praktische Anwendung 1: Das Verfahren ist effizient

Im Folgenden wird eine prototypische Anwendung des Stücklisten-Adaptors ausgewertet. Zur Entwicklung und Evaluierung des Verfahrens wurden drei Testdatensätze aus realen Stücklisten abgeleitet⁶¹. Dazu kamen mehrere theoretisch entwickelte Testdatensätze, in die spezielle Herausforderungen eingebaut wurden⁶². Beispiel 1 beschreibt die Anwendung eines Testdatensatzes, der aus einer realen Stückliste abgeleitet wurde. Dieses erste Anwendungsbeispiel fokussiert auf die Evaluierung des Ziels Effizienz.

Es wird gezeigt, dass der Aufwand für die Anwendung des Verfahrens geringer ist als bei einer manuellen Erstellung der Fertigungsstückliste. Der Planer muss weniger Planungsaufgaben ausführen. Umfangreiche Dateneingaben fallen nicht an.

Dazu wird der Verfahrensablauf konkret und durchgängig beschrieben. Es wird dargelegt, dass der Lösungsweg vollständig aufgezeigt wird und dass jeder einzelne Planungsschritt eindeutig beschrieben ist, so dass keine unvorhergesehenen Eingriffe durch den Planer erforderlich sind. Des Weiteren wird erläutert, welche Eingabedaten anfallen, insbesondere dass, über Stücklisten hinaus, keine Notwendigkeit zur Beschaffung zusätzlicher Informationen entsteht.

7.2.1 Ausgangssituation für das Praxisbeispiel 1

Im Zuge eines Generationenwechsels bei 3-Gang-Nabenschaltungen wurden detaillierte Untersuchungen zur Vereinfachung der Montage durchgeführt. Die Untersuchungen führten zu einer tiefgreifenden und zwei geringfügigen konstruktiven Überarbeitungen (Abbildung 37).

⁶¹ Diese Testdatensätze wurden im Teileumfang reduziert, insbesondere wurden typische C-Teile, etwa Schrauben, entfernt.

⁶² Eine dieser speziellen Herausforderungen ist es, dass eine Konstruktionsbaugruppe konstruktiv abgeändert und gleichzeitig auf mehrere Stücklistenstufen verteilt wurde.



Abbildung 37: Ausgangssituation im Praxisbeispiel 1

Die vier Einzelteile "Staubdeckel", "Sechskantmutter", "Deckel" und "Festkonus" wurden zu einem einzigen Einzelteil, dem "Festkonus integriert" zusammengefasst⁶³. Dadurch veränderte sich auch die alte Fertigungsbaugruppe „K-BG Kugelhalter“. Diese tiefgreifende Konstruktionsänderung betrifft 23% der Baukomponenten in der alten Konstruktionsstückliste.

Zum zweiten wurde die "Frikionsfeder" im neuen Erzeugnis gebondert ausgeführt, so dass bei der Montage der Vorgang Fetten entfallen kann. Als dritte Neuerung wurde die "Anlaufscheibe" in kostengünstigerem Kunststoff ausgeführt. Die Baugruppe „BG Bremskonus“, in die diese Teile eingingen, erhielt eine neue Teilenummer („BG Bremskonus fettfrei“). Geringfügig verändert wurden somit weitere 13% der Baukomponenten. Der Anteil der unveränderten Baukomponenten, der Wiederverwendungsgrad, beträgt 64%.

Abbildung 37 verdeutlicht die Ausgangssituation bei der Erstellung der neuen Fertigungsstückliste. Für die alte Nabe existieren Konstruktions- und Fertigungsstückliste. Für die neue Nabe gibt es zunächst lediglich die Konstruktionsstückliste. Die Fertigungsstückliste der neuen Nabe soll im Rahmen einer Anpassungsplanung abgeleitet werden.

7.2.2 Automatische Ableitung von Ähnlichkeitsrelationen

Im ersten Schritt des Verfahrens werden die alte und die neue Konstruktionsstückliste miteinander verglichen. Dabei werden sogenannte Ähnlichkeitsrelationen abgeleitet. Außer der alten und der neuen Konstruktionsstückliste sind keine Eingabedaten erforderlich.

Zahlreiche Zusammenhänge von altem und neuem Erzeugnis können durch einen formalen Vergleich der Strukturen von alter und neuer Konstruktionsstückliste automatisch abgeleitet werden (Abbildung 38). Die Ergebnisse des formalen Vergleichs der Strukturen von alter und neuer Konstruktionsstückliste werden in Ähnlichkeitsrelationen gespeichert (Abbildung 38).

- Unverändert übernommene Einzelteile und Konstruktionsbaugruppen⁶⁴ werden anhand der gleichen Teilenummer erkannt. Sie sind in Abbildung 38 mit „=“ gekennzeichnet.
- Veränderte Konstruktionsbaugruppen erkennt das Verfahren daran, dass sie teilweise unveränderte Kinder⁶⁵ haben. Sie sind mit „K“ gekennzeichnet.

⁶³ Die vier Einzelteile, die zum neuen "Festkonus integriert" zusammengefasst werden, sind in der alten Konstruktionsstückliste auf mehrere Baugruppen verteilt.

⁶⁴ Im Beispiel 1 handelt es sich nur um Einzelteile. Unveränderte Konstruktionsbaugruppen kommen hier nicht vor.

⁶⁵ Als Kinder werden die Baukomponenten, die in einer Baugruppe verbaut werden, bezeichnet.

- Veränderte Einzelteile sind mit „V“ (wie Vater) gekennzeichnet. Sie sind daran zu erkennen, dass sie in einer Baugruppe verbaut werden, die unverändert geblieben ist oder für die eine Ersetzung bekannt ist.

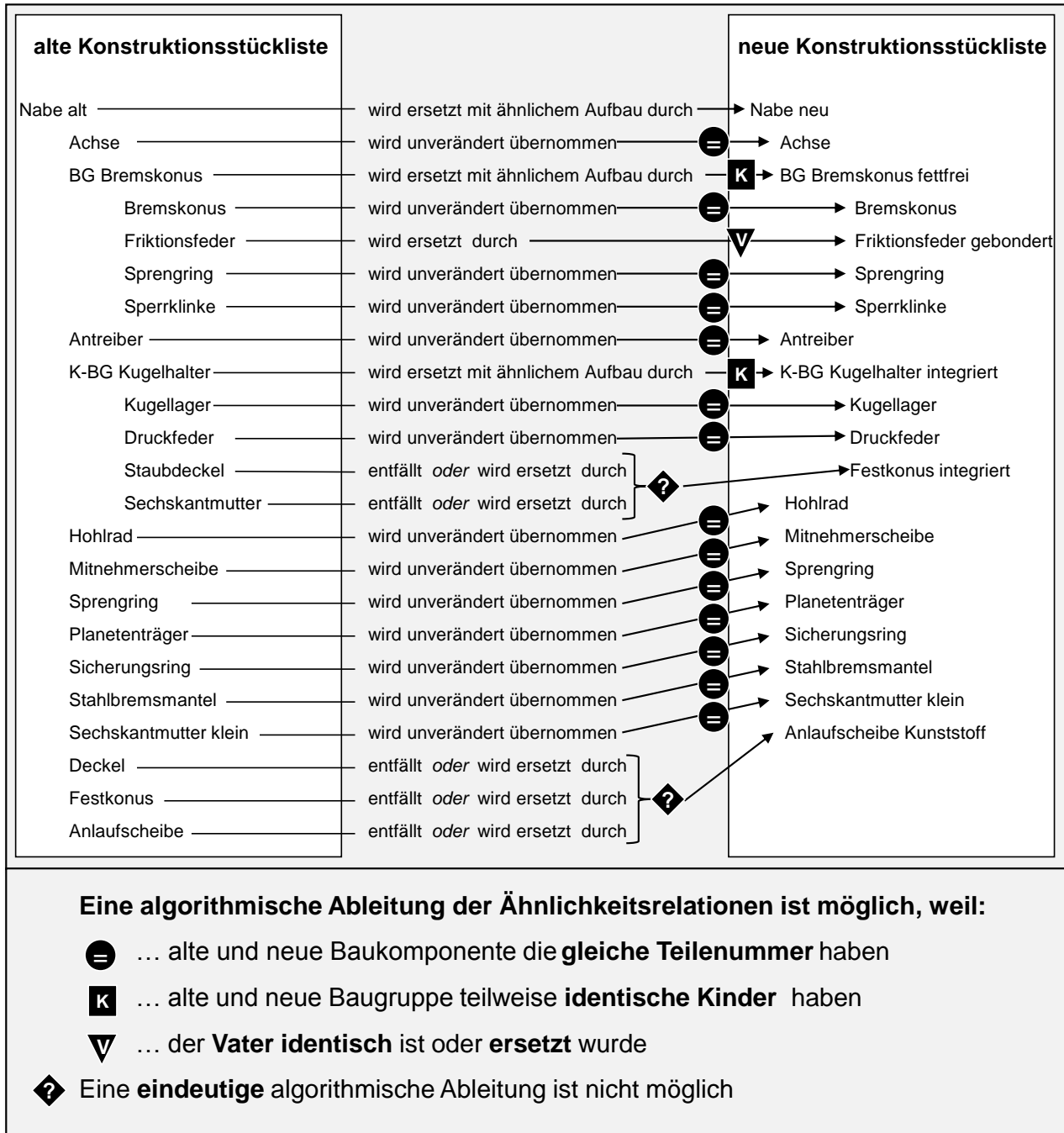


Abbildung 38: Formaler Vergleich der Konstruktionsstücklisten im Praxisbeispiel 1

Für die Baukomponenten, die in Abbildung 38 mit einer geschweiften Klammer und einem „?“ gekennzeichnet sind (23%), konnte das Verfahren die Veränderung zwar eng eingren-

zen, aber nicht exakt lokalisieren. Es entstanden sogenannte kombinatorische Mehrdeutigkeiten (siehe Kapitel 7.2.3), beispielsweise drückt die obere geschweifte Klammer aus:

- ersetzt (Staubdeckel, _ , vielleicht)
- ersetzt (Staubdeckel, Festkonus integriert, vielleicht)
- ersetzt (Sechskantmutter, _ , vielleicht)
- ersetzt (Sechskantmutter, Festkonus integriert, vielleicht)

Zwischenfazit 1:

Das Verfahren hat beim automatischen Vergleich der Konstruktionsstücklisten alle unveränderten und geringfügig veränderten Umfänge automatisch erkannt. Bezüglich der tiefgreifenden Veränderungen konnte es die betroffenen Baukomponenten eingrenzen. Damit entspricht die Effizienz beim Vergleich der Konstruktionsstücklisten der theoretisch abgeleiteten Prognose.

Bei den tiefgreifenden Veränderungen wurden die Zusammenhänge zwischen alter und neuer Konstruktionsstückliste nicht eindeutig geklärt, es kam zu kombinatorischen Mehrdeutigkeiten. Der Planer muss eingeben, ob die alten Einzelteile entfallen oder durch welche neuen sie ersetzt werden. Bevor das Fallbeispiel mit der manuellen Überarbeitung der Ähnlichkeitsrelationen weitergeführt wird, werden kurz die Problematik der kombinatorischen Mehrdeutigkeiten sowie ein Lösungsumsatz verdeutlicht.

7.2.3 Kombinatorische Mehrdeutigkeiten

Bei der Initialisierung können sogenannte "kombinatorische Mehrdeutigkeiten" entstehen. Die Entstehung kombinatorischer Mehrdeutigkeiten verdeutlicht Abbildung 39.

Bei einer kombinatorischen Mehrdeutigkeit kann das Verfahren die Ersetzung zwar wirkungsvoll eingrenzen, aber nicht eindeutig bestimmen. Da eine kombinatorische Mehrdeutigkeit aus einer Top-Down-Analyse, ausgehend von einer Konstruktionsbaugruppe, entsteht, ist die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten einer Baukomponente höchstens so groß, wie die Anzahl der Baukomponenten, aus denen die übergeordnete Baugruppe besteht (in Abbildung 39 beispielsweise zwei).

Auch wenn eine eindeutige Bestimmung der Ersetzung durch das System nicht möglich ist, stellt diese Eingrenzung der Lösungen eine Vereinfachung für den Planer dar. In Form der Ähnlichkeitsrelationen wird ihm die Liste der Mehrfachersetzungen für eine Baukomponente angezeigt, er braucht lediglich die richtige Relation auszuwählen und auf "sicher" zu setzen. Bei der nächsten Anwendung des Regelwerkes entfernt der Stücklisten-Adaptor die nun als falsch erkennbaren Mehrfachersetzungen.

Ein guter Teil der kombinatorischen Mehrdeutigkeiten könnte durch einen Zugriff auf die Stammdaten der Baukomponenten geklärt werden, etwa durch Auswertung von Sachmerkmalelisten oder klassifizierenden Schlüsselwörtern. Damit könnten die erforderlichen Eingriffe des Planers noch weiter reduziert und damit die Effizienz noch einmal erhöht werden.

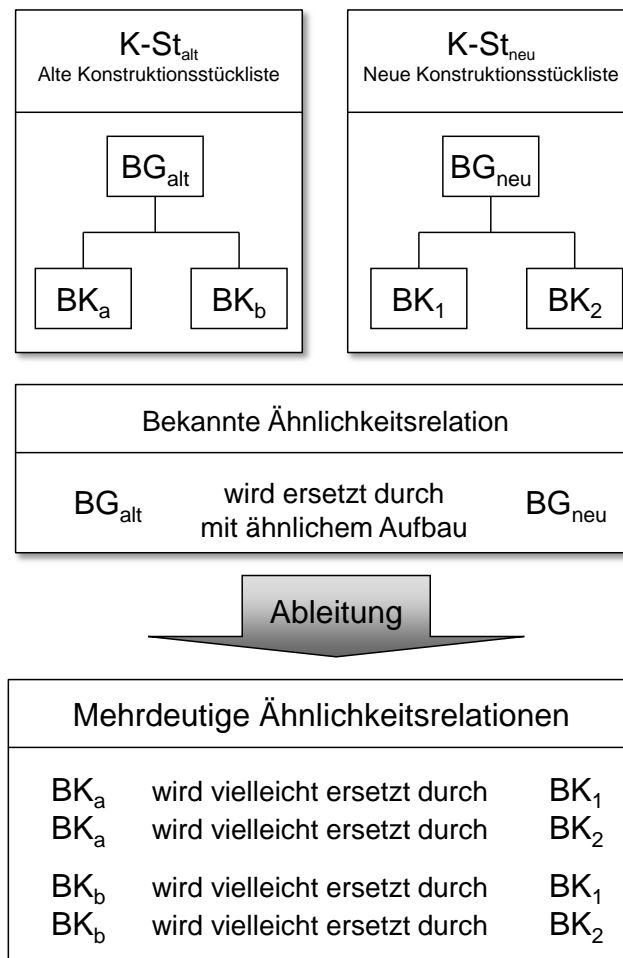


Abbildung 39: Entstehung kombinatorischer Mehrdeutigkeiten

7.2.4 Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen

Die formal abgeleiteten Ähnlichkeitsrelationen werden dem Produktionsplaner zur Überarbeitung vorgelegt. Da die neue Funktion des "Festkonus integriert" nicht eindeutig einem der entfallenden Teile zugeordnet werden kann, wird der Planer die formal abgeleiteten Ähnlichkeitsrelationen bezüglich "Staubdeckel" bzw. "Sechskantmutter" und "Festkonus integriert" manuell korrigieren.

ä_bk_ersetzung (nil, festkonus-integriert, sicher, planer)

Des Weiteren löst der Planer die kombinatorische Mehrdeutigkeit bezüglich der unteren drei Baukomponenten auf, indem er die passende Ähnlichkeitsrelation auf „sicher“ setzt.

ä_bk_ersetzung (anlaufscheibe, anlaufscheibe -kunststoff, sicher, planer)

Mit diesen neuen Informationen vervollständigt das Verfahren die bisher unklaren Ähnlichkeitsrelationen. In Abbildung 40 wurden die neuen, formal abgeleiteten Ähnlichkeitsrelationen zur Verdeutlichung unterstrichen.



Abbildung 40: Manuelle Überarbeitung von Ähnlichkeitsrelationen im Praxisbeispiel 1

Zwischenfazit 2:

Mit nur zwei Eingaben des Planers wurde der Stücklistenvergleich im Beispiel überarbeitet. Bezogen auf die Anzahl der Baukomponenten entspricht das 9 %.

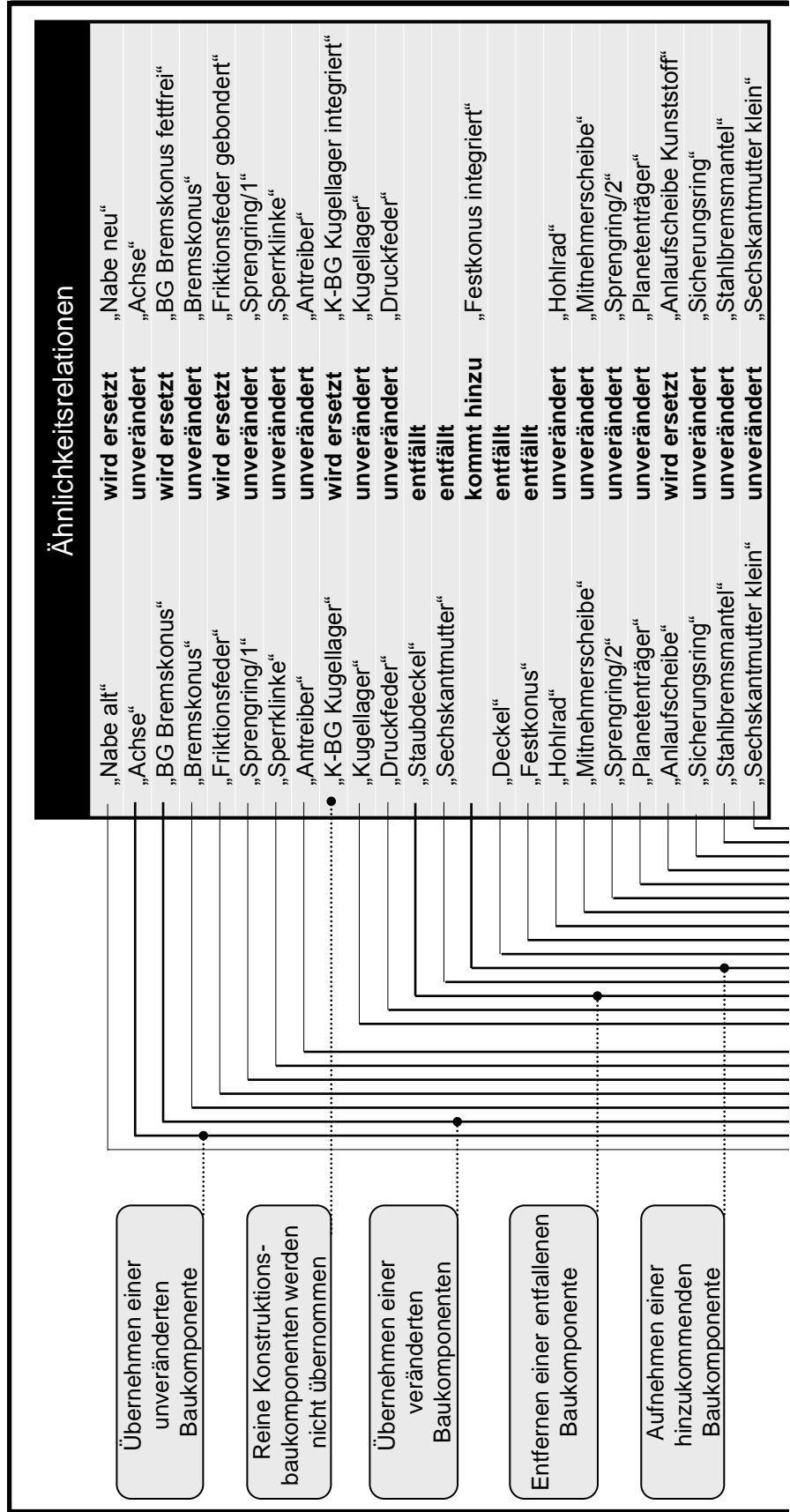
7.2.5 Automatische Ableitung der neuen Fertigungsstückliste

Auf Grundlage der beim Vergleich erstellten Ähnlichkeitsrelationen und der alten Fertigungsstückliste wird im zweiten Verfahrensschritt die neue Fertigungsstückliste abgeleitet.

Die Ähnlichkeitsrelationen wurden zwar für die Konstruktionsstücklisten erstellt. Trotzdem sind sie zum großen Teil auch für die Fertigungsstücklisten gültig, da die überwiegende Zahl aller Baukomponenten unspezifisch ist, also sowohl in der Konstruktionsstückliste als auch in der zugehörigen Fertigungsstückliste vorkommt. Unspezifisch sind immer alle Einzelteile. Auch verschiedene Baugruppen sind gleichzeitig Konstruktions- und Montagebaugruppen und somit unspezifisch. Ähnlichkeitsrelationen für unspezifische Baukomponenten, die beim Vergleich der Konstruktionsstücklisten abgeleitet wurden, sind auch für die Fertigungsstücklisten gültig. Beispielsweise wurde im einleitenden Beispiel ermittelt, dass die Achse unverändert aus der alten in die neue Konstruktionsstückliste übernommen wurde. Diese Information wurde in einer Ähnlichkeitsrelation gespeichert. Da die Achse ein Einzelteil ist, ist sie unspezifisch, die Ähnlichkeitsrelation ist deshalb auch für die Fertigungsstückliste gültig. Die Achse muss somit auch in der neu zu erstellenden Fertigungsstückliste vorhanden sein und wird aus der alten in die neue Fertigungsstückliste übernommen.

Zur Ableitung der neuen Fertigungsstückliste wird die alte Fertigungsstückliste Baukomponente für Baukomponente abgearbeitet (Abbildung 41). Das Verfahren schreibt die Fertigungsstückliste des alten Erzeugnisses ab und ersetzt dabei Baukomponenten, für die eine Ähnlichkeitsrelation bekannt ist, durch die Baukomponenten des neuen Erzeugnisses.

- Für die erste Baukomponente der alten Fertigungsstückliste, "Nabe alt", ist die Ersetzung "Nabe neu" bekannt. Deshalb wird "Nabe neu" in die neue Fertigungsstückliste eingetragen.
- Für die zweite Baukomponente, "Achse", ist bekannt, dass sie unverändert blieb. Sie wird somit übernommen. Im der ersten praktischen Anwendung können auf diese Weise die ersten zehn Baukomponenten (bis zur "Druckfeder") einschließlich ihrer Baugruppenstruktur in die neue Fertigungsstückliste übernommen werden.
- Für die nächsten vier Baukomponenten der alten Fertigungsstückliste, "Staubdeckel", "Sechskantmutter", "Deckel" und "Festkonus" ist bekannt, dass sie entfallen. In die neue Fertigungsstückliste wird demzufolge nichts eingetragen.
- Die nächste Baukomponente der alten Fertigungsstückliste, "M-BG Hohlrad", ist eine spezifische Montagebaugruppe. Sie ist in der Konstruktionsstückliste nicht vorhanden, deshalb ist keine Ähnlichkeitsrelation bekannt. Allerdings kommen alle Kinder der Montagebaugruppe "M-BG Hohlrad" unverändert auch in der neuen Konstruktionsstückliste vor. Dies spricht dafür, dass die Montagebaugruppe "M-BG Hohlrad" und ihre Kinder unverändert in die neue Fertigungsstückliste übernommen werden können.



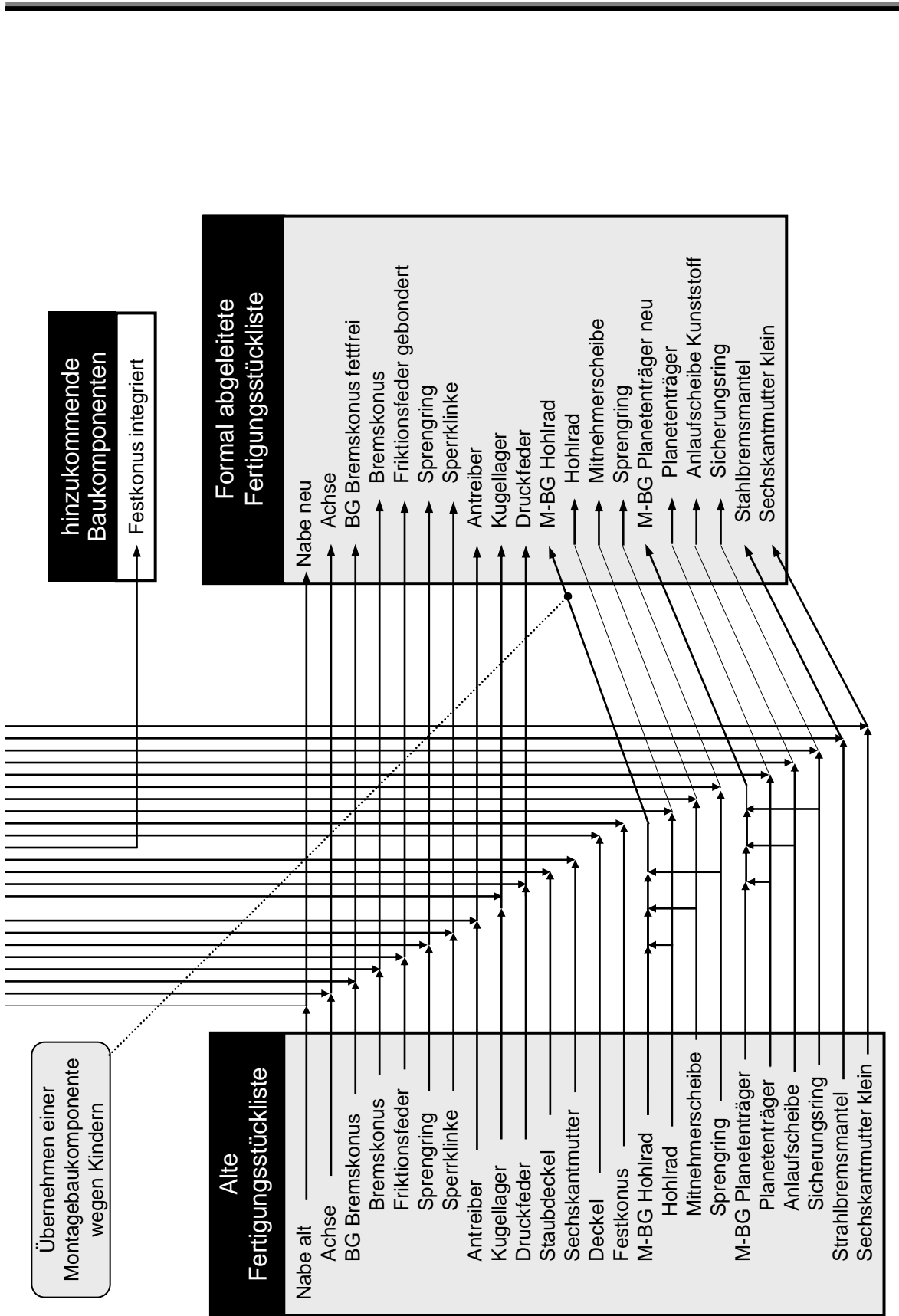


Abbildung 41: Formale Ableitung der neuen Fertigungsstückliste im Praxisbeispiel 1

- Entsprechend wird auch die spezifische Montagebaugruppe "M-BG Planetenträger" übernommen. Da aber eines ihrer Kinder, die "Anlaufscheibe", verändert wurde, wird bei der Einarbeitung in die neue Fertigungsstückliste eine neue Sachnummer vergeben.
- Für die letzten beiden Baukomponenten der alten Fertigungsstückliste, "Stahlbremsmantel" und "Sechskantmutter" ist wieder bekannt, dass sie unverändert blieben, sie werden somit in die neue Fertigungsstückliste übernommen.

Zwischenfazit 3:

Im Beispiel 1 wurde, mit Ausnahme des neu hinzugekommenen Einzelteiles "Festkonus integriert", die komplette neue Fertigungsstückliste automatisch, also ohne Eingriffe des Planers, abgeleitet. Das entspricht 95% des Gesamtumfangs und stimmt mit der Prognose zur Effizienz überein.

7.2.6 Manuelle Überarbeitung der neuen Fertigungsstückliste

Bei der Ableitung der neuen Fertigungsstückliste werden alle Baukomponenten, die sich von der alten Fertigungsstückliste unterscheiden, gekennzeichnet, so dass sie vom Produktionsplaner gezielt überprüft werden können. Im Beispiel wird der Produktionsplaner die formal abgeleitete Stückliste weitgehend bestätigen. Lediglich bei der Einarbeitung des hinzugekommenen Einzelteils "Festkonus integriert" in die neue Fertigungsstückliste wird eine partielle Neuplanung, d. h. die Bildung einer neuen Montagebaugruppe, erforderlich, da sich die Integration mehrerer Funktionen in ein einziges Teil auf den Montageablauf auswirkt (Abbildung 42).

Zwischenfazit 4:

Der Umfang der partiellen Neuplanung beträgt 5%. Die partielle Neuplanung muss vom Planer manuell bearbeitet werden. Damit ist die neue Fertigungsstückliste komplett.

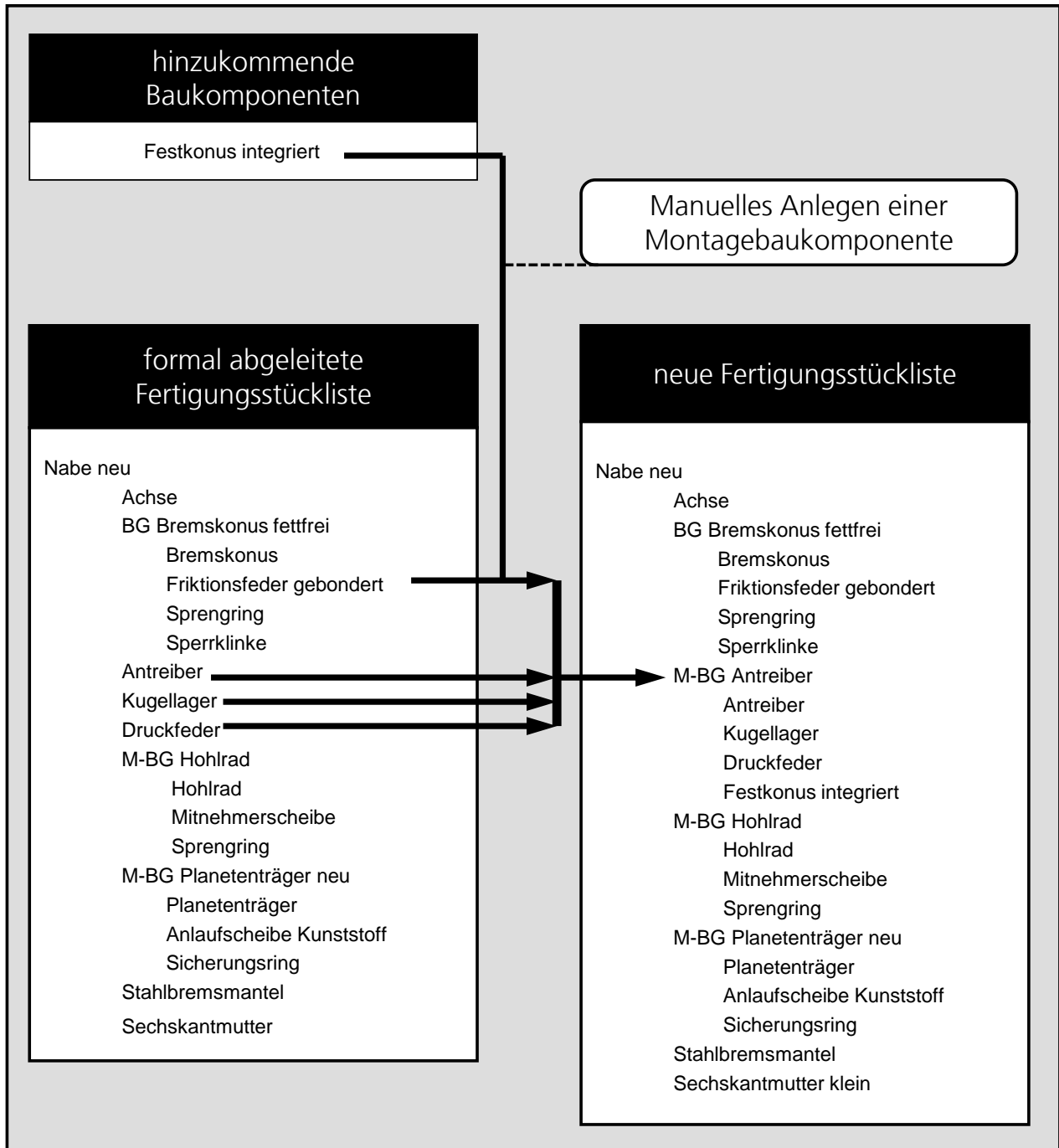


Abbildung 42: Manuelle Überarbeitung der neuen Fertigungsstückliste im Praxisbeispiel 1

Fazit der ersten praktischen Anwendung:

Das Verfahren ist effizient. Die Prognosen der theoretischen Evaluierung wurden erreicht. Durch die Beschreibung von Vorgehensweise und Zwischenergebnissen wurden außerdem die Effektivität und die Universalität des Verfahrens nachvollziehbar aufgezeigt.

7.3 Praktische Anwendung 2: Das Verfahren ist effektiv

Das zweite Fallbeispiel konzentriert sich auf die Evaluierung auf der Effektivität. Zur Planung wird die prototypisch realisierte Software verwendet – womit auch nachgewiesen wird, dass der Konkretisierungsgrad der Verfahrensbeschreibungen für eine Algorithmmierung ausreicht.

Effektivität bedeutet, dass die definierten Montagebaugruppen wirtschaftlich produziert werden können. Dazu ist es notwendig, dass die relevanten Produktionsaspekte angemessen berücksichtigt werden, so dass die generierten Montagebaugruppen beispielsweise montier-, prüf- und lagerbar sind.

Allerdings kann Effektivität durch eine Anpassungsplanung Prinzip bedingt nicht umfassend gewährleistet werden, denn die neue Fertigungsstückliste kann nur so gut sein, wie die alte Fertigungsstückliste (siehe Kapitel 4.4.2). Effektivität bei Anpassungsplanungen bedeutet, dass die neue Fertigungsstückliste der alten Fertigungsstückliste möglichst weit entspricht. Der Stücklisten-Adaptor wird daran gemessen, wie gut er Ähnlichkeiten findet und auf die neue Fertigungsstückliste überträgt.

Zur Evaluierung wird gezeigt, dass das Verfahren Gleichheit identifiziert, Veränderungen ermittelt, Neuerungen erkennt und Fehler vermeidet.

7.3.1 Ausgangssituation für das Praxisbeispiel 2

Im Rahmen eines Modellwechsels wurden Anpassungsplanungen für einen KFZ-Saugmotor durchgeführt. Umfangreiche Veränderungen betrafen den Zylinderkopf mit Schwerpunkt auf der Ventilsteuerung, deshalb wurde dieser zur Anwendung des Stücklisten-Adaptors ausgewählt. Details zum Motor oder gar Stücklisten oder Zeichnungen des Zylinderkopfes sind nicht zur Veröffentlichung frei gegeben.

Zunächst wurde die neue Fertigungsstückliste in üblicher Weise manuell als Anpassungsplanung erstellt. Im Anschluss daran wurde die Planung für den Zylinderkopf mit dem Stücklisten-Adaptor wiederholt. Die Ergebnisse der beiden Planungen wurden miteinander verglichen.

Begleitend zur Anwendung des Stücklisten-Adaptors Verfahrens wurden die Konstruktionsstücklisten des alten und des neuen Zylinderkopfes manuell ausgewertet. Der manuelle Vergleich ergab einen Wiederverwendungsgrad von 72% an unveränderten Baukomponenten⁶⁶.

⁶⁶ Daraus kann nicht auf typische Veränderungsumfänge des gesamten Motors oder gar des Fahrzeugs beim Modellwechsel geschlossen werden. Denn der Zylinderkopf wurde für die Evaluierung deshalb ausgewählt, weil sich Veränderungen dort konzentrierten.

Entsprechend der subjektiven⁶⁷ Einschätzung des Planers wurden 13% der Baukomponenten konstruktiv geringfügig überarbeitet, weitere 15% vollständig neu entwickelt.

7.3.2 Schritt 1: Vergleich der Konstruktionsstücklisten

Wie zu erwarten, wurden bei der prototypischen Anwendung des Verfahrens alle unveränderten Einzelteile und Konstruktionsbaugruppen (72%) bereits bei der Initialisierung des Vergleichs der Konstruktionsstücklisten identifiziert. Das Effektivitätskriterium der Identifikation von Gleichheit wurde somit erfüllt.

Die Effektivität des Verfahrens muss sich somit an den ermittelten Veränderungen beweisen. Es gilt, die veränderten und die neuen Baukomponenten zuverlässig zu lokalisieren und dem Planer zur manuellen Überarbeitung vorzulegen. Auch diese Effektivitätskriterien wurden erfüllt. Das Verfahren leitete für 12% der Baukomponenten bei der Initialisierung eine eindeutige und fundierte Mutmaßung ab, wie sie sich ersetzen oder ob sie entfallen bzw. hinzukommen⁶⁸. Alle diese Mutmaßungen konnten bei der manuellen Überarbeitung vom Planer bestätigt werden (dazu genügte ein Mausklick). Für die restlichen 16%⁶⁹ der Baukomponenten leitete das Verfahren eine kombinatorisch mehrdeutige Mutmaßung ab (Baukomponente X wird ersetzt durch Baukomponente A, B oder C oder entfällt)⁷⁰.

Nach der manuellen Überarbeitung in Rahmen des Stücklistenvergleichs waren alle Zusammenhänge zwischen den Baukomponenten des alten und des neuen Zylinderkopfes bekannt und dokumentiert.

Zwischenfazit 1:

Die Güte der Zwischenergebnisse beim Vergleich der Konstruktionsstücklisten erwies sich somit als so gut, wie prognostiziert. 72% der Zusammenhänge zwischen den Baukomponenten in alter und neuer Konstruktionsstückliste wurden vom Stücklisten-Adaptor automatisch erkannt. Daraus resultiert eine wirkungsvolle Unterstützung und Entlastung des Planers, denn diese Umfänge braucht der Planer nicht zu beachten, er muss sie weder überprüfen, noch manuell überarbeiten. Weitere 12% der Ersetzungen wurden vom Stücklisten-Adaptor automatisch erkannt, allerdings nicht mit 100%er Sicherheit. In den meisten Fällen genügt eine Bestätigung des Planers mit einem Mausklick. Lediglich bei den restlichen 16% kommt es zu kombinatorischen Mehrdeutigkeiten (siehe Kapitel 7.2.3). Selbst hier braucht der Planer

⁶⁷ Diese Einschätzung ist deshalb subjektiv, weil Änderung und Neuentwicklung nicht allgemeingültig voneinander abgegrenzt werden können.

⁶⁸ Bezüglich ähnlicher Baukomponenten lag die (subjektive) Einschätzung des Planers bei 13%.

⁶⁹ Bezüglich neuen Umfängen lag die (subjektive) Einschätzung des Planers bei 15%.

⁷⁰ Die Ursache von kombinatorisch mehrdeutigen Mutmaßungen ist in Kapitel 7.2.3 ausgeführt. Dort werden auch Lösungsansätze aufgezeigt, um Mehrdeutigkeiten mit Standardverfahren stark zu reduzieren.

lediglich eine Entscheidung durch Auswahl in einer zu Liste treffen. In den meisten Fällen war die Entscheidung für den Planer mit einem Blick klar, bei einzelnen Baukomponenten musste er sich kurz in die Konstruktionsstücklisten eindenken. Zusätzliche Aufwände zur Informationsbeschaffung oder gar zur Eingabe weiterer Daten waren nicht erforderlich. Fehler traten beim Stücklistenvergleich nicht auf. Das Verfahren markierte alle veränderten und alle neuen Baukomponenten zur Überprüfung durch den Planer⁷¹.

Für den Planer bewirkt diese Güte der Zwischenergebnisse eine beträchtliche Erleichterung.

7.3.3 Schritt 2: Erstellung der neuen Fertigungsstückliste

Die begleitende manuelle Planung der neuen Fertigungsstückliste (Verfahrensschritt 2) ergab, dass ziemlich genau 50% der Montagebaugruppen unverändert übernommen werden konnten. Sie alle wurden, wie prognostiziert, bei der Initialisierung der Ableitung der neuen Fertigungsstückliste vom Verfahren automatisch und mit der Sicherheit „sicher“ abgeleitet.

Auf den ersten Blick überraschend war, dass das Verfahren auch alle veränderten Montagebaugruppen des alten Zylinderkopfs für die neue Fertigungsstückliste vorschlug – richtigerweise nur mit der Sicherheit „vielleicht“. Offensichtlich gab es keine Montagebaugruppe im alten Zylinderkopf, von der nicht mindestens ein einziges Teil wiederverwendet wurde (diese Baugruppe wäre vom Verfahren nicht vorgeschlagen worden). Der Planer bestätigte 2/3 der vorgeschlagenen veränderten Montagebaugruppen und übernahm sie mit neuer Sachnummer in die neue Fertigungsstückliste. Nur für 1/3 der vorgeschlagenen veränderten Montagebaugruppen (das sind 15% aller Montagebaugruppen in der neuen Fertigungsstückliste) führte der Planer eine partielle Neuplanung durch.

Zwischenfazit 2:

Das Ziel der Effektivität wird auch bei der Erstellung der neuen Fertigungsstückliste erreicht.

- a) Gleichheit identifizieren: Die 50% unveränderte Umfänge wurden zuverlässig ermittelt und mit ihren untergeordneten Baugruppen bzw. Einzelteilen automatisch in die neue Fertigungsstückliste übernommen. Für den Planer bewirkt es eine beträchtliche Erleichterung, wenn die Hälfte der neuen Fertigungsliste automatisch aufgebaut wird und nicht überprüft werden muss.
- b) Ähnlichkeiten ermitteln: Alle veränderten Umfänge (die restlichen 50%) wurden lokalisiert. Es wurden geeignete Montagebaugruppen vorgeschlagen und dem Planer zur Überprüfung vorgelegt. 2/3 der vorgeschlagenen Montagebaugruppen konnte der Planer durch Mausklick bestätigen und der Stücklisten-Adaptor übernahm sie mit neuer Sachnummer in die neue Fertigungsstückliste. Das restliche Drittel der vorgeschla-

⁷¹ Dazu wird in der Ähnlichkeitsrelation eine Sicherheit kleiner als „sicher“ vergeben.

genen Montagebaugruppen übernahm der Planer nicht in die neue Fertigungsstückliste, sondern führte eine partielle Neuplanung durch.

- c) Neuerungen erkennen: Grundlegend neue Montagebaugruppen erkennt das Verfahren daran, dass kein einziges unverändertes oder ersetztes Teil eingeht - dann schlägt es eine partielle Neuplanung vor. Dieser Fall kam im Beispiel 2 nicht vor. Wenn teilweise alte Einzelteile in einer Montagebaugruppe verbaut werden, kann das Verfahren Veränderungen (Fall b) und Neuerungen (Fall c) nicht voneinander abgrenzen. Diese Abgrenzung kann allein durch eine Auswertung von Erzeugnisstrukturen kaum gelingen. Es bleibt Aufgabe des Planers festzustellen, ob eine veränderte Montagebaugruppe, die der Stücklisten-Adaptor vorschlägt, übernommen werden kann oder neu geplant werden muss.
- d) Fehlerfreie Identifikation: Ergebnisse, die dem Planer nicht zur Prüfung vorgelegt werden, waren zuverlässig fehlerfrei. Das Verfahren wurde im Laufe der Entwicklung und Optimierung mit zahlreichen Datensätzen angewendet und getestet⁷², mit keinem Datensatz wurden „falsche“ Montagebaugruppen angelegt, die dem Planer nicht zur Überprüfung vorgelegt wurden. Für den Planer bewirkt diese Güte eine beträchtliche Erleichterung, da er unverändert übernommene Baukomponenten beim Vergleich der Konstruktionsstücklisten nicht manuell überprüfen oder überarbeiten muss.

Auch im zweiten Fallbeispiel fielen keine Zusatzaufwände, etwa für Informationsbeschaffung oder Eingabe weiterer Daten, an. Es hat sich gezeigt, dass das Verfahren effizient, effektiv und universell ist und den Planer bei der Generierung neuer Fertigungsstücklisten wirkungsvoll unterstützen und entlasten kann.

7.4 Zusammenfassung der Evaluierungen

Die Evaluierungen zeigen, dass alle an das Verfahren gestellten Ziele erreicht wurden (ausführliche Bewertungen siehe Kapitel 7.1, 7.2 und 7.3).

1. Das Verfahren ist effizient.

Der Stücklisten-Adaptor kann den Planer bei der Anpassungsplanung wirkungsvoll entlasten, so dass er sich auf die partiellen Neuplanungen, die aus konstruktiven Veränderungen resultieren, konzentrieren kann. Der Zusatzaufwand zur Anwendung des Verfahrens ist minimal. Insbesondere brauchen keine zusätzlichen Eingabedaten erstellt

⁷² Drei Testdatensätze wurden aus realen Stücklisten abgeleitet. Zwei davon, nämlich die 3-Gang-Nabenschaltung und der Zylinderkopf, wurden im Rahmen der Evaluierung vorgestellt. Der dritte Testdatensatz, der aus realen Stücklisten abgeleitet wurde, beschreibt ein Fahrrad. Dazu kamen mehrere theoretisch aufgebaute Testdatensätze, in die spezielle Herausforderungen eingebaut wurden.

und gepflegt zu werden. Das Verfahren ist vollständig und in einem Konkretisierungsgrad beschrieben, dass auf dieser Basis eine Algorithmierung erfolgen kann. Dies wurde durch eine prototypische Realisierung nachgewiesen. Die Komplexität des Verfahrens ist beherrschbar, so dass eine Realisierung mit aktuell verfügbaren DV-Hilfsmitteln problemlos möglich ist⁷³.

2. Das Verfahren ist effektiv.

Der Stücklisten-Adaptor wird daran gemessen, wie gut er Ähnlichkeiten findet und auf die neue Fertigungsstückliste überträgt. Die theoretisch vorhergesagten Erkennungsraten haben sich eingestellt. Der Vergleich mit manuellen Parallelplanungen zeigt, dass das Verfahren zuverlässig Gleichheiten identifiziert, Veränderungen ermittelt und Neuerungen erkennt. Fehler traten nicht auf, das Verfahren markierte alle unsicheren Vorschläge zur Überprüfung durch den Planer.

Das Verfahren ist universell.

Eine spezifische Daten- oder Wissensbasis für jede Fertigungstechnologie ist nicht erforderlich, umfassendes Ingenieurwissen, etwa das Produktionswissen erfahrener Planer, muss nicht abgebildet werden. Bei neuen Produktionsabläufen oder Technologien fällt somit kein Training an. Eine Veränderung des Systems aus Inferenzregeln oder eine zusätzliche Wissensbasis ist nicht erforderlich. Es traten keine unvorhergesehenen Stücklistenkonstellationen oder sonstige Probleme auf, die das Verfahren nicht bewältigte.

Durch die Realisierung und Anwendung des Verfahrens wurde auch die wissenschaftliche Hypothese verifiziert, die dem Lösungsansatz zugrunde liegt (siehe Kapitel 4.2). Der generelle Bauplan von Erzeugnisstrukturen enthält genügend Informationen in impliziter Form, um eine Anpassungsplanung durchzuführen.

⁷³ Nennenswerte Rechenzeiten traten bei der Anwendung des Prototyps nicht auf. Prolog verwendet als Inferenzmechanismus eine Tiefensuche mit Backtracking. Trotzdem wurden eventuelle Grenzen von Prolog bei der prototypischen Anwendung des Verfahrens nicht erreicht. Die Informatik kennt weitere Programmiersprachen für wissensbasierte Systeme, etwa LISP [Hau00]. Bei Programmierung eines auf das Verfahren zugeschnittenen Inferenzmechanismus ist nicht zu erwarten, dass eine Skalierung auf Erzeugnisse mit vielen Teilen, etwa Automobile oder Flugzeuge, untragbar lange Laufzeiten bewirkt.

8 Zusammenfassung

Der Stücklisten-Adaptor ist ein Verfahren zur Generierung von Fertigungsstücklisten im Rahmen von Anpassungsplanungen. Er hat das Potenzial, den Aufwand im Stücklistenwesen von Produktionsunternehmen signifikant zu reduzieren, indem er eine hohe EDV-Unterstützung bei minimalen Zusatzaufwänden ermöglicht.

Die Fertigungsstückliste ist eine wichtige Grundlage zur wettbewerbsfähigen Produktion komplexer Erzeugnisse. Aber der Aufwand zu ihrer Erstellung ist hoch. Probleme bereitet insbesondere die Überführung der Konstruktionsstückliste in eine Fertigungsstückliste, weil Konstruktions- und Fertigungsbaugruppen teilweise unterschiedlich aufgebaut sind. Da dieser Planungsschritt bisher nicht als durchgängiges und eindeutiges Verfahren ausgestaltet werden konnte, mussten Fertigungsstücklisten ohne wirkungsvolle EDV-Unterstützung erstellt werden.

Anpassungsplanungen sind Vorgehensweisen, die zur Erstellung einer neuen Fertigungsstückliste auf vorhandene Stücklisten zurückgreifen. Das ist in der Praxis der weitaus häufigste Planungsfall, eine Anpassungsplanung kann für mindestens die Hälfte der zu planenden Erzeugnisse durchgeführt werden.

Der Stücklisten-Adaptor vergleicht eine neue Konstruktionsstückliste mit der Konstruktionsstückliste eines bereits geplanten Erzeugnisses und ermittelt dabei, welche Umfänge unverändert, verändert oder neu sind. Auf dieser Basis generiert er einen Vorschlag für die neue Fertigungsstückliste, der möglichst ähnlich zur bestehenden Fertigungsstückliste des bereits geplanten Erzeugnisses ist. Das Verfahren ist wirkungsvoll und robust. Es leitet Umfänge, die nicht oder nur wenig verändert wurden, weitgehend automatisch ab. Für stark veränderte Umfänge lokalisiert es den Bedarf an partiellen Neuplanungen zuverlässig.

Mit dem Stücklisten-Adaptor wurde ein Verfahren zur Generierung von Fertigungsstücklisten im Rahmen von Anpassungsplanungen entwickelt, das im Tagesgeschäft des Stücklistenwesens anwendbar ist. Die Evaluierung anhand von zwei Praxisbeispielen zeigt, dass über 80% der Montagebaugruppen in der neuen Fertigungsstückliste automatisch korrekt ermittelt werden konnten. Eine ergänzende theoretische Evaluierung verdeutlicht, dass die Erkennungsleistung nur von der Ähnlichkeit zwischen altem und neuem Erzeugnis abhängt und mindestens dem Wiederverwendungsgrad unveränderter Einzelteile entspricht. Damit kann ein Stücklisten-Adaptor den Planer im Stücklistenwesen wirkungsvoll von Routineaufgaben entlasten.

Außer Stücklisten⁷⁴ sind keine weiteren Daten erforderlich, eine verfahrensspezifische Datenbasis muss also nicht erstellt und gepflegt werden⁷⁵. Zur optimalen Nutzung in Industriebetrieben ist es erforderlich, das bisher nur prototypisch realisierte Verfahren in die Unternehmenssoftware, etwa in ERP- oder PDM-Systeme, einzubauen. Eine professionelle EDV-Umsetzung ist problemlos möglich, denn das Verfahren ist eindeutig und vollständig beschrieben und es ist einfach genug, um mit aktuell verfügbarer IT-Technologie programmiert zu werden.

Anwendbar ist der Stücklisten-Adaptor für Erzeugnisse mit strukturierten Stücklisten⁷⁶, denn er verarbeitet die Erzeugnisstrukturen der Konstruktions- und Fertigungsstücklisten. Eine weitere Beschränkung auf Erzeugnisse, Branchen oder Produktionstechnologien besteht nicht. Strukturierte Stücklisten sind typisch für die komplexen Erzeugnisse der Metall- und Elektroindustrie.

Mit dem Stücklisten-Adaptor können nun auch Anpassungsplanungen bei der Erstellung von Fertigungsstücklisten wirkungsvoll unterstützt werden. Die Variantenplanung wird bereits durch Stücklistengeneratoren abgedeckt. Bestehen bleibt ein Bedarf an einer wirkungsvollen EDV-Unterstützung von Neuplanungen, dieser betrifft circa 20% aller Planungsfälle.

⁷⁴ Benötigt werden die Konstruktions- und die Fertigungsstückliste des ähnlichen Erzeugnisses und die Konstruktionsstückliste des neuen, zu planenden Erzeugnisses. Ergebnis ist die Fertigungsstückliste des neuen, zu planenden Erzeugnisses.

⁷⁵ Anders als bei der Konfigurierung, bei der vorab eine konfigurierbare Variantenstückliste erarbeitet werden muss, fallen bei der Anpassungsplanung mit dem Stücklisten-Adaptor keine aufwändigen Tätigkeiten zur Vorbereitung an.

⁷⁶ Bei einfachen Erzeugnissen ohne Baugruppen gibt es keinen Unterschied zwischen funktions- und fertigungsgerechter Erzeugnisstruktur, die das Verfahren auswerten könnte.

9 Ausblick

Die wissenschaftliche Bedeutung der Arbeit geht über Verbesserungen bei der Generierung von Fertigungsstücklisten, also Fragestellungen der Arbeitswirtschaft, hinaus. Ein Stücklisten-Adaptor zur automatischen Anpassungsplanung kann auch weitere Forschungsfelder voran bringen, in denen seit Jahrzehnten intensiv an Verfahren zur Festlegung von Montagebaugruppen geforscht wird. Eine Integration des Stücklistenadaptors in die jeweiligen Konzepte, etwa in Konstruktionsmethodiken oder in Vorgehensweisen des Variantenmanagements, ist sollte geprüft werden.

Durch eine Anpassungsplanung im Rahmen der Fabrikplanung kann die fertigungsgerechte Erzeugnisstruktur eines neuen Erzeugnisses so gegliedert werden, dass dessen Einzelteile und Montagebaugruppen optimal in einem vorhandenen Produktionssystem hergestellt werden können. Dazu wird für die Anpassungsplanung ein Erzeugnis herangezogen, das bereits im Produktionssystem gefertigt wird.

Die Verlagerung eines Erzeugnisses im Rahmen der Globalisierung bedingt eine Anpassung der Montagebaugruppen, sofern an den Standorten unterschiedliche Fertigungsabläufe realisiert sind. Eine Anpassungsplanung der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur kann diese Aufgabe erleichtern, als Basis wird ein Erzeugnis benutzt, das bereits am neuen Standort produziert wird.

Die Generierung fertigungsgerechter Erzeugnisstrukturen ist eine grundlegende Aufgabenstellung beim Variantenmanagement, denn Baukästen und Module sind Montagebaugruppen mit hohem Wiederverwendungsgrad und definierten Schnittstellen. Durch eine Anpassungsplanung der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur können neue Erzeugnisse in bestehende Baukasten- bzw. Modulsysteme eingeordnet werden. Ebenfalls denkbar ist die Einordnung neuer Erzeugnisse in eine Variantenstückliste, selbst wenn die neuen Erzeugnisse nicht im Rahmen einer systematischen Variantenkonstruktion entwickelt wurden. Des Weiteren kann eine Suche nach ähnlichen Erzeugnissen auf Basis der Erzeugnisstrukturen das Risiko der Neuentwicklung von bereits bestehenden Erzeugnissen reduzieren [Cae91].

Konstruktionsmethodiken systematisieren den Konstruktionsprozess. Eine Stücklisten-Adaptor kann den Konstrukteur beim frühzeitigen Generieren der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur bei Anpassungskonstruktionen unterstützen. Dies bewirkt eine Reduktion des Aufwandes und eine Erhöhung der Qualität. Wenn als Basis der Anpassungsplanung ein ausreichend ähnliches Erzeugnis, das bereits optimiert wurde, benutzt wird, kann bei der Festlegung von Montagebaugruppen im Konstruktionsprozess auf ein vertieftes Produktionswissen und auf die Abstimmung mit Produktionsexperten weitgehend verzichtet werden.

In der Digitalen Fabrik müssen vielfältige Produktdaten über den gesamten Lebenszyklus hinweg konsistent verwaltet werden. Durch Gliederung der Produktionssicht entsprechend

der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur können Fertigungs- und Montageinformationen strukturiert Erzeugnissen zugeordnet werden. Eine Anpassungsplanung kann den Aufwand reduzieren, die Qualität erhöhen und bereits durchgeführte Optimierungen übernehmen. Da das vorgestellte Verfahren Erzeugnisstrukturen ohne ihre reale Bedeutung nutzt, sollte es nicht nur für die Generierung der fertigungsgerechten Erzeugnisstruktur, sondern auch für weitere Sichten, etwa die Demontage anwendbar sein.

Wissenschaftlich lohnenswert wären des Weiteren Untersuchungen, ob eine Anpassungsplanung auf Basis von Integritätsbedingungen genereller Baupläne auch für weitere Aufgabenstellungen anwendbar ist. Naheliegend ist die Erstellung von Arbeitsplänen, aber auch die Generierung anderer strukturierter Pläne und Daten scheint aussichtsreich.

10 Anhang 1: Inferenzregeln

Die Inferenzregeln beschreiben den methodischen Kern des Verfahrens in mathematisch exakter Form. Mit Hilfe eines Systems von Inferenzregeln werden neue Ähnlichkeitsrelationen aus den Informationen, die jeweils aktuell bekannt sind, abgeleitet. In Ähnlichkeitsrelationen werden Erkenntnisse aus dem Vergleich der Konstruktionsstücklisten abgespeichert.

Zur Beschreibung der Inferenzregeln wird die prädikatenlogische Prolog-Notation („programming in logic“) [Clo03] benutzt (siehe Kapitel 6.1). Sie ermöglicht eine eindeutige und vollständige – und damit algorithmierbare - Beschreibung des Regelwerks als Voraussetzung zur Umsetzung des Verfahrens in EDV-Programme.

Für eine schnelle Übersicht werden die Inferenzregeln zusätzlich in Textform beschrieben. Dabei gelten folgende Vereinbarungen, die in der natürlich sprachlichen Beschreibung nicht bei jeder einzelnen Regel explizit angegeben werden:

- Bei Ähnlichkeitsrelationen, die algorithmisch mit Hilfe von Ableitungsregeln abgeleitet wurden, wird das Attribut "Verantwortlicher" immer auf "System" gesetzt.
- Wenn bei der textuellen Beschreibung einer Regel in Bezug auf das Attribut "Sicherheit" nichts anderes angegeben ist, so gilt das Prinzip der schwächsten Sicherheit. Es besagt, dass die Sicherheit einer abgeleiteten Ähnlichkeitsrelation nicht höher sein kann, als die schwächste Sicherheit der Ähnlichkeitsrelationen, die der Ableitung zugrunde gelegt wurden (siehe Kapitel 6.4.4).

10.1 Regeln zur Ermittlung der einstufigen Verwendungen (Regelgruppe HOE)

Regel HOE-a-1

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen und sich auch deren Väter ersetzen, so wird die Quantität der einstufigen Verwendung der beiden Baukomponenten auf `ist_gleich` gesetzt.

```
ä_bk_ho_e ( Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherh, system ):-  
  ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk, _ ),  
  kind (Vater_neu, Bk_neu),  
  kind (Vater_alt, Bk_alt),  
  ä_bk_ersetzung ( Vater_neu, Vater_alt, SicherhV, _ ),  
  schwächste ( ( SicherhBk, SicherhV ), Sicherh ).
```

Regel HOE-a-2

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen, deren Väter jedoch nicht, so wird die Quantität der einstufigen Verwendung der beiden Baukomponenten auf `ist_ungleich` gesetzt.

$\ddot{a}_{bk_ho_e} (Bk_neu, Bk_alt, ist_ungleich, SicherhBk, system):-$
 $\ddot{a}_{bk_ersetzung} (Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk, _),$
 $kind (Vater_neu, Bk_neu),$
 $kind (Vater_alt, BK_alt),$
 $nicht (\ddot{a}_{bk_ersetzung} (Vater_neu, Vater_alt, _, _)).$

Regel HOE-a-3

Wenn für eine Baukomponente keine Ersetzung bekannt ist, so wird die Quantität der einstufigen Verwendung der Baukomponente auf *ist_ungleich* gesetzt.

$\ddot{a}_{bk_ho_e} (Bk_neu, nil, ist_ungleich, SicherhBk, system):-$
 $\ddot{a}_{bk_ersetzung} (Bk_neu, nil, SicherhBk, _).$

Regelgruppe HOE-b (-1 bis -5)

Quantität und Sicherheit der einstufigen Verwendung von zwei sich ersetzenden Baukomponenten werden aus der mehrstufigen Verwendung dieser Baugruppe wie folgt abgeleitet (Sm sei die Sicherheit der Ähnlichkeitsrelation m)⁷⁷:

Ausgangsrelation		Abgeleitete Relation	
einstufiger Aufbau		einstufige Verwendung	
Quantität	Sicherheit	Quantität	Sicherheit
ist_gleich	sicher	ist_gleich	sicher
ist_gleich	< sicher	ist_gleich	<i>schwächste Sicherheit</i>
ist_ähnlich	für alle	ist_ähnlich	vielleicht
ist_ungleich	für alle	ist_ungleich	<i>schwächste Sicherheit</i>

$\ddot{a}_{bk_ho_e} (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherhm, system):-$
 $\ddot{a}_{bk_ho_m} (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherhm, _).$

⁷⁷ Beispielsweise drückt die erste Zeile der Tabelle folgenden Sachverhalt aus: Gilt für eine alte und eine neue Baukomponente

mehrstufige Verwendung (... , BK_ alt, BK_ neu, ist_ gleich, vermutlich, ...)

so wird folgende Ähnlichkeitsrelation (ebenfalls mit der Sicherheit Sm=vermutlich) abgeleitet, also:

einstufige Verwendung (... , BK_ alt, BK_ neu, ist_ gleich, vermutlich, ...).

ä_bk_ho_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, vielleicht, system):-
 ä_bk_ho_m (Bk_neu, Bk_alt, ist_ähnlich, _ , _).

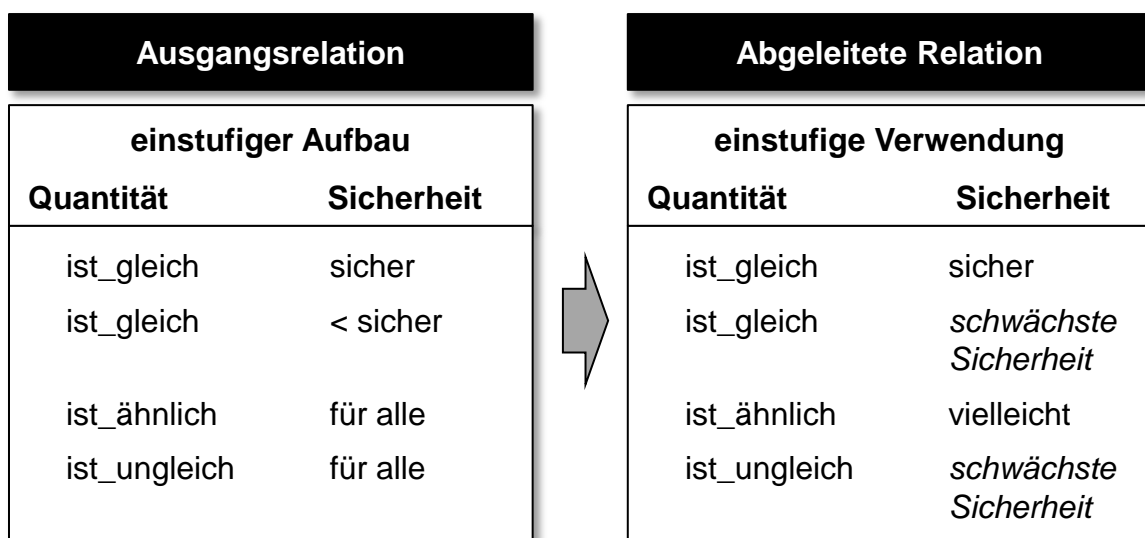
ä_bk_ho_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_ungleich, Sicherhm, system):-
 ä_bk_ho_m (Bk_neu, Bk_alt, ist_ungleich, Sicherhm, _).

ä_bk_ho_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, vielleicht, system):-
 ä_bk_ho_m (Bk_neu, Bk_alt, mind_ähnlich, _ , _).

ä_bk_ho_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_ungleich, Sicherhm, system):-
 ä_bk_ho_m (Bk_neu, Bk_alt, höchst_ähnlich, Sicherhm, _).

Regelgruppe HOE-c (-1 bis -4)

Quantität und Sicherheit der einstufigen Verwendung von zwei sich ersetzenden Baugruppen werden aus dem einstufigen Aufbau ihres Vaters wie folgt abgeleitet:



ä_bk_ho_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, sicher, system):-
 kind (Vater_neu, Bk_neu),
 ä_bk_hu_e (Vater_neu, Vater_alt, ist_gleich, sicher, _),
 kind (Vater_alt, BK_alt),
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, _ , _).

ä_bk_ho_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherh, system):-
 kind (Vater_neu, Bk_neu),
 ä_bk_hu_e (Vater_neu, Vater_alt, ist_gleich, SicherhV, _),
 kind (Vater_alt, BK_alt),
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk, _),
 schwächste ((SicherhV, SicherhBk), Sicherh).

ä_bk_ho_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, vielleicht, system):-
 kind (Vater_neu, Bk_neu),
 ä_bk_hu_e (Vater_neu, Vater_alt, ist_ähnlich, _, _),
 kind (Vater_alt, Bk_alt),
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, _, _).

ä_bk_ho_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_ungleich, Sicherh, system):-
 kind (Vater_neu, Bk_neu),
 ä_bk_hu_e (Vater_neu, Vater_alt, ist_ungleich, SicherhV, _),
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk, _),
 schwächste ((SicherhV, SicherhBk), Sicherh).

10.2 Regeln zur Ermittlung des einstufigen Aufbaus (Regelgruppe HUE)

Regel HUE-a-1

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen und sich auch alle ihre Kinder ersetzen, so wird die Quantität des einstufigen Aufbaus der beiden Baukomponenten auf ist_gleich gesetzt.

ä_bk_hu_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherh, system):-
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk, _),
 kinder (Bk_neu, Kinder_neu),
 kinder (Bk_alt, Kinder_alt),
 alle_ersetzt (Kinder_neu, Kinder_alt, SicherhK),
 schwächste ((SicherhBk, SicherhK), Sicherh).

Regel HUE-a-2

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen und sich mindestens eines ihrer Kinder ersetzt (nicht jedoch alle), so wird die Quantität des einstufigen Aufbaus der beiden Baukomponenten auf ist_ähnlich gesetzt. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben.

ä_bk_hu_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_ähnlich, vielleicht, system):-
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, _, _),
 kinder (Bk_neu, Kinder_neu),
 kinder (Bk_alt, Kinder_alt),
 mind_eins_ersetzt (Kinder_neu, Kinder_alt).

Regel HUE-a-3

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen, jedoch keines ihrer Kinder, so wird die Quantität des einstufigen Aufbaus der beiden Baukomponenten auf ist_ungleich gesetzt.

```

ä_bk_hu_e ( Bk_neu, Bk_alt, ist_ungleich, SicherhBk, system ):-
  ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk, _),
  kinder (Bk_neu, Kinder_neu),
  kinder (Bk_alt, Kinder_alt),
  not ( mind_eins_ersetzt (Kinder_neu, Kinder_alt ) ).

```

Regel HUE-a-4

Wenn sich zwei Baukomponenten nicht ersetzen, so wird die Quantität des einstufigen Aufbaus der beiden Baukomponenten auf *ist_ungleich* gesetzt.

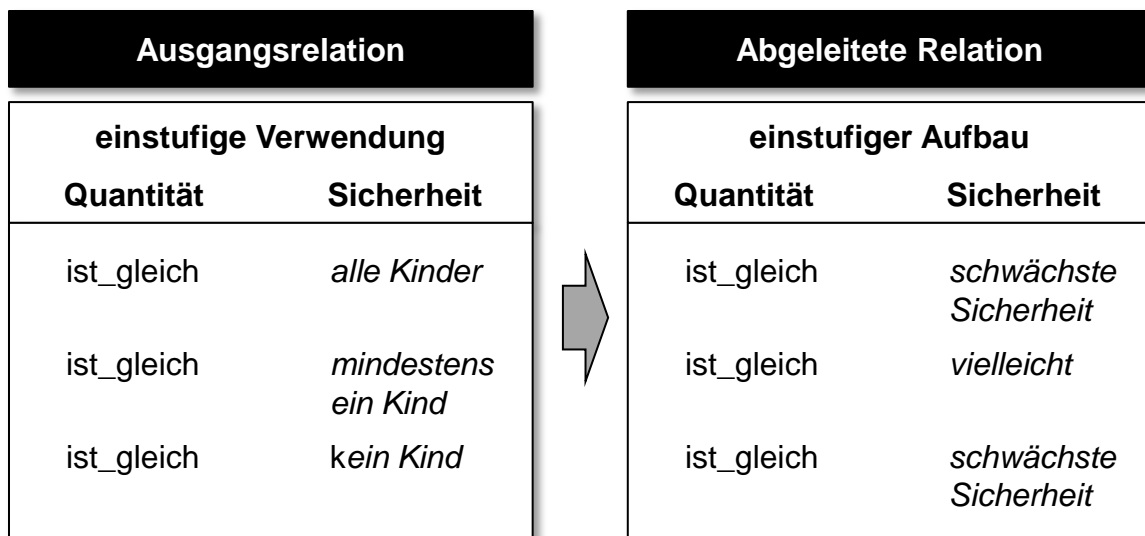
```

ä_bk_hu_e ( Bk_neu, nil, ist_ungleich, SicherhBk, system ):-
  ä_bk_ersetzung (Bk_neu, nil, SicherhBk, _).

```

Regelgruppe HUE-b (-1 bis -3)

Der einstufige Aufbau von zwei sich ersetzenden Baugruppen wird aus der einstufigen Verwendungen ihrer Kinder wie folgt abgeleitet:



```

ä_bk_hu_e ( Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherh, system ):-
  ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk, _),
  kinder (Bk_neu, Kinder_neu),
  kinder (Bk_alt, Kinder_alt),
  gleich_einst_verwend (Kinder_neu, Kinder_alt, SicherhK ),
  schwächste ( ( SicherhBk, SicherhK ), Sicherh ).

```

ä_bk_hu_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_ähnlich, vielleicht, system):-
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, _, _),
 kinder (Bk_neu, Kinder_neu),
 kinder (Bk_alt, Kinder_alt),
 ähnl_einst_verwend (Kinder_neu, Kinder_alt).

ä_bk_hu_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_ungleich, SicherhBk, system):-
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk, _),
 kinder (Bk_neu, Kinder_neu),
 kinder (Bk_alt, Kinder_alt),
 ungleich_einst_verwend (Kinder_neu, Kinder_alt).

10.3 Regeln zur Ermittlung der mehrstufigen Verwendung (Regelgruppe HOM)

Regel HOM-1

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen und ihre Väter eine gleiche mehrstufige Verwendung haben, so wird die Quantität der mehrstufigen Verwendung der Baukomponente auf ist_gleich gesetzt.

ä_bk_ho_m (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherh, system):-
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk, _),
 kind (Vater_neu, Bk_neu),
 kind (Vater_alt, Bk_alt),
 ä_bk_ho_m (Vater_neu, Vater_alt, ist_gleich, SicherhV, _),
 schwächste ((SicherhBk, SicherhV),Sicherh).

Regel HOM-2-a

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen aber ihre Väter keine gleiche mehrstufige Verwendung haben, so wird die Quantität der mehrstufigen Verwendung der Baukomponenten auf ist_ähnlich gesetzt. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben.

ä_bk_ho_m (Bk_neu, Bk_alt, ist_ähnlich, vielleicht, system):-
 ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, _, _),
 kind (Vater_neu, Bk_neu),
 kind (Vater_alt, Bk_alt),
 ä_bk_ho_m (Vater_neu, Vater_alt, QuantV, _, _),
 QuantV \= ist_gleich.

Regel HOM-2-b

Wenn eine alte Baukomponente durch eine neue ersetzt wird und der Vater der alten Baukomponente von einem Vorfahren der neuen Baukomponente auf anderer Hierarchieebenen ersetzt wird, so wird die Quantität der mehrstufigen Verwendung der Baukomponenten auf ist_ähnlich gesetzt. Dabei wird

die Sicherheit "vielleicht" vergeben. Dasselbe gilt, wenn der Vater der neuen Baukomponente von einem Vorfahren der alten Baukomponente auf einer anderen Hierarchieebene ersetzt wird.

```
ä_bk_ho_m ( Bk_neu, Bk_alt, ist_ähnlich, vielleicht, system ):-  
  ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, _ ),  
  ( ( nachkomme ( Vorfahr_neu, Bk_neu ),  
      kind ( Vorfahr_alt, Bk_alt ) )  
    ;  
    ( kind ( Vorfahr_neu, Bk_neu ),  
      nachkomme ( Vorfahr_alt, Bk_alt ) )  
  ),  
  ä_bk_ersetzung (Vorfahr_neu, Vorfahr_alt, _, _, _, _)  
).
```

Regel HOM-3

Wenn eine alte Baukomponente durch eine neue ersetzt wird, aber der Vater der alten Baukomponente nicht von einem Vorfahren der neuen Baukomponente auf anderen Hierarchieebenen ersetzt wird, so wird die Quantität der mehrstufigen Verwendung der Baukomponenten auf `ist_ungleich` gesetzt. Dasselbe gilt, wenn kein Vorfahr der alten Baukomponente vom Vater der neuen Baukomponente ersetzt wird.

```
ä_bk_ho_m ( Bk_neu, Bk_alt, ist_ungleich, vielleicht, system ):-  
  ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, _ ),  
  not ( nachkomme ( Vorfahr_neu, Bk_neu )  
    ;  
    kind ( Vorfahr_neu, Bk_neu )  
  ),  
  ä_bk_ersetzung (Vorfahr_neu, Vorfahr_alt, _, _, _, _),  
  not ( nachkomme ( Vorfahr_alt, Bk_alt )  
    ;  
    kind ( Vorfahr_alt, Bk_alt )  
  ).
```

Regel HOM-4

Wenn für eine Baukomponente keine Ersetzung bekannt ist, so wird die Quantität der mehrstufigen Verwendung der Baukomponente auf `ist_ungleich` gesetzt.

```
ä_bk_ho_m ( Bk_neu, nil, ist_ungleich, SicherhBk, system ):-  
  ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, nil, SicherhBk, _ ).
```

10.4 Regeln zur Ermittlung des mehrstufigen Aufbaus (Regelgruppe HUM)

Regel HUM-1

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen und der mehrstufige Aufbau aller ihrer Kinder gleich ist, so wird die Quantität des mehrstufigen Aufbaus der Baukomponenten auf `ist_gleich` gesetzt.

```
ä_bk_hu_m ( Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherh, system ):-  
  ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk ),  
  kinder ( Bk_neu, Kinder_neu ),  
  kinder ( Bk_alt, Kinder_alt ),  
  gleich_mehrst_aufbau ( Kinder_neu, Kinder_alt, SicherhK ),  
  schwächste (( SicherhBk, SicherhK), Sicherh ).
```

Regel HUM-2

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen, so wird die Quantität des mehrstufigen Aufbaus der Baukomponenten auf `ist_ähnlich` gesetzt, wenn

- der mehrstufige Aufbau von mindestens einem ihrer Kinder ähnlich ist oder
- der mehrstufige Aufbau von mindestens einem aber nicht allen Kindern ungleich ist.

```
ä_bk_hu_m ( Bk_neu, Bk_alt, ist_ähnlich, Sicherh, system ):-  
  ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk ),  
  kinder ( Bk_neu, Kinder_neu ),  
  kinder ( Bk_alt, Kinder_alt ),  
  ähnl_mehrst_aufbau ( Kinder_neu, Kinder_alt, SicherhK ),  
  schwächste (( SicherhBk, SicherhK), Sicherh ).
```

Regel HUM-3

Wenn sich zwei Baukomponenten ersetzen und der mehrstufige Aufbau aller ihrer Kinder ungleich ist, so wird die Quantität des mehrstufigen Aufbaus der Baukomponenten auf `ist_ungleich` gesetzt.

```
ä_bk_hu_m ( Bk_neu, Bk_alt, ist_ungleich, Sicherh, system ):-  
  ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, SicherhBk ),  
  kinder ( Bk_neu, Kinder_neu ),  
  kinder ( Bk_alt, Kinder_alt ),  
  ungleich_mehrst_aufbau ( Kinder_neu, Kinder_alt, SicherhK ),  
  schwächste (( SicherhBk, SicherhK), Sicherh ).
```

Regel HUM-4

Wenn für eine Baukomponente keine Ersetzung bekannt ist, so wird die Quantität des mehrstufigen Aufbaus der Baukomponente auf `ist_ungleich` gesetzt.

```
ä_bk_hu_m ( Bk_neu, nil, ist_ungleich, SicherhBk, system ):-  
  ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, nil, SicherhBk ).
```

10.5 Regeln zur Ermittlung der Ersetzung (Regelgruppe ERS)

Regel ERS-1-1

Wenn alle Geschwister⁷⁸ einer alten Baukomponente genau durch die Geschwister einer neuen Baukomponente ersetzt werden und diese Ersetzungen mindestens die Sicherheit "vermutlich" haben, so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, vermutlich, system ):-  
  kind ( Vater_neu, Bk_neu ),  
  ä_bk_ersetzung ( Vater_neu, Vater_alt, SicherhV, _ ),  
  SicherhV \= vielleicht,  
  kind ( Vater_alt, Bk_alt ),  
  not ( ä_bk_ersetzung ( _, Bk_alt, sicher, _ ) ),  
  eindeut_zuord ( Bk_neu, Bk_alt ).
```

Regel ERS-1-2

Wenn gilt:

- der Vater einer alten Baukomponente wird durch den Vater einer neuen Baukomponente ersetzt und
- alte und neue Baukomponenten haben Nachfahren, für die Ersetzungen bekannt sind und
- für alte und neue Baukomponenten sind keine Ersetzungen bekannt,
so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, vielleicht, system ):-  
  kind ( Vater_neu, Bk_neu ),  
  ä_bk_ersetzung ( Vater_neu, Vater_alt, _, _ ),  
  kind ( Vater_alt, Bk_alt ),  
  not ( ä_bk_ersetzung ( _, Bk_alt, Sicherh, _ ) ),  
  Sicherh \= vielleicht,  
  gemeins_nachk ( Bk_neu, Bk_alt ).
```

Regel ERS-1-3

Wenn gilt:

- der Vater einer alten Baukomponente wird durch den Vater einer neuen Baukomponente ersetzt und
- keiner der Brüder der alten Baukomponente hat Nachfahren, für die Ersetzungen mit Nachfahren der neuen Baukomponente bekannt sind und
- für alte und neue Baukomponente sind keine Ersetzungen bekannt,

⁷⁸ Als Geschwister werden Baukomponenten bezeichnet, die in die gleiche Baugruppe eingehen, also den gleichen Vater haben.

so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, vielleicht, system ):-  
  kind ( Vater_neu, Bk_neu ),  
  ä_bk_ersetzung ( Vater_neu, Vater_alt, _, _ ),  
  kind ( Vater_alt, Bk_alt ),  
  bruder ( Bk_neu, Bruder_neu ),  
  not ( gemeins_nachk ( Bruder_neu, Bk_alt ) ),  
  not ( ä_bk_ersetzung ( _, Bk_alt, Sicherh, _ ) ),  
  Sicherh \= vielleicht.
```

Regel ERS-2-1

Wenn für alle Kinder einer alten und einer neuen Baukomponente eine Ersetzung bekannt ist, so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, vermutlich, system ):-  
  kind ( Bk_neu, Kind_neu ),  
  ä_bk_ersetzung ( Kind_neu, Kind_alt, _, _ ),  
  kind ( Bk_alt, Kind_alt ),  
  kinder ( Bk_neu, Kinder_neu ),  
  kinder ( Bk_alt, Kinder_alt ),  
  alle_ersetzt ( Kinder_neu, Kinder_alt ).
```

Regel ERS-2-2

Wenn zwischen mindestens einem Kind einer alten Baukomponente und einem Kind einer neuen Baukomponente eine Ersetzung besteht, so wird eine Ersetzung für diese Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben, falls noch keine Zusammenhänge mit anderen Baukomponenten bekannt sind.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, vielleicht, system ):-  
  kind ( Bk_neu, Kind_neu ),  
  ä_bk_ersetzung ( Kind_neu, Kind_alt, Sicherh_Kind, _ ),  
  Sicherh_Kind \= vielleicht,  
  kind ( Bk_alt, Kind_alt ),  
  not( ä_bk_ersetzung( Bk, Bk_alt, Sicherh, _ ) ),  
  Sicherh \= vielleicht.
```

Regel ERS-2-3⁷⁹

Wenn sich mindestens ein Kind einer alten und einer neuen Baukomponente ersetzen, der Vater des alten Kindes jedoch eine andere Baukomponente ersetzt als die neue Baukomponente, so wird eine Nicht-Ersetzung für diese Baukomponente abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, nil, vielleicht, system ):-  
  kind ( Bk_neu, Kind_neu ),  
  ä_bk_ersetzung ( Kind_neu, Kind_alt, Sicherh_Kind, _ ),  
  Sicherh_Kind \= vielleicht,  
  kind ( Bk_alt, Kind_alt ),  
  ä_bk_ersetzung( Bk, Bk_alt, Sicherh, _ ),  
  Sicherh \= vielleicht,  
  Bk_neu \= Bk.
```

Regel ERS-2-4⁸⁰

Wenn ein Bruder einer neuen Baukomponente von einer alten Baukomponente ersetzt wird und diese alte Baukomponente ersetzt eine neue Baukomponente, die nicht Bruder der neuen Baukomponente ist, so wird eine Nicht-Ersetzung für die alte und neue Baukomponente abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, nil, vielleicht, system ):-  
  bruder ( Bk_neu, Bruder_neu ),  
  ä_bk_ersetzung ( Bruder_neu, Bk_alt, Sicherh_Bruder, _ ),  
  Sicherh_Bruder \= vielleicht,  
  bruder( Bk_alt, Bruder_alt ),  
  ä_bk_ersetzung ( BK, Bruder_alt, Sicherh, _ ),  
  Sicherh \= vielleicht,  
  not( bruder ( Bk_neu, Bk ).
```

Regel ERS-3-1

Wenn mindestens ein Kind einer neuen Baukomponente und ein Kind einer alten Baukomponente die gleiche einstufige Verwendung haben, so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die stärkste Sicherheit der einstufigen Verwendungen aller Kinder vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, Sicherhstärkste, system ):-  
  kind ( Bk_neu, Kind_neu ),  
  ä_bk_ho_e ( Kind_neu, Kind_alt, ist_gleich, Sicherhstärkste, _ ),  
  kind ( Bk_alt, Kind_alt ).
```

⁷⁹ Diese Regel ist im Prototypen nicht realisiert.

⁸⁰ Diese Regel ist im Prototypen nicht realisiert.

Regel ERS-3-2

Wenn mindestens ein Kind einer neuen Baukomponente und ein Kind einer alten Baukomponente gleiche mehrstufige Verwendung haben, so wird eine Ersetzung für die beiden Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die stärkste Sicherheit der mehrstufigen Verwendungen aller Kinder vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, Sicherhstärkste, system ):-  
    kind ( Bk_neu, Kind_neu ),  
    ä_bk_ho_m ( Kind_neu, Kind_alt, ist_gleich, Sicherhstärkste, _ ),  
    kind ( Bk_alt, Kind_alt ).
```

Regel ERS-4

Wenn der Vater einer neuen Baukomponente einen ungleichen einstufigen Aufbau hat, so wird eine Nicht-Ersetzung für die neue Baukomponente abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, nil, vielleicht, system ):-  
    kind ( Vater_neu, Bk_neu ),  
    ä_bk_hu_e ( Vater_neu, Vater_alt, ist_ungleich, _, _ ).
```

Regel ERS-5

Wenn für eine alte und eine neue Baukomponente eine oder mehrere Ähnlichkeitsrelationen bekannt sind, so wird daraus eine Ersetzung abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit der stärksten zugrundeliegenden Ähnlichkeitsrelation vergeben. Dabei gehen die Sicherheiten der Ähnlichkeitsrelationen ä_bk_hu_e und ä_bk_hu_m maximal mit der Sicherheit „vermutlich“ ein, denn ein gleicher Aufbau bedeutet nicht zwangsläufig eine sichere Ersetzung.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, Bk_alt, Sicherh, system ):-  
    ä_bk_hu_e ( Bk_neu, Bk_alt, _, Sicherhhu-e, _ ),  
    ( Sicherhhu-e \= sicher  
      ;  
      ( Sicherhhu-e = sicher,  
        Sicherhhu-e is vermutlich )  
    ),  
    ä_bk_hu_m ( Bk_neu, Bk_alt, _, Sicherhhu-m, _ ),  
    ( Sicherhhu-m \= sicher  
      ;  
      ( Sicherhhu-m = sicher,  
        Sicherhhu-m is vermutlich )  
    ),  
  
    ä_bk_ho_e ( Bk_neu, Bk_alt, _, Sicherhho-e, _ ),  
    ä_bk_ho_m ( Bk_neu, Bk_alt, _, Sicherhho-m, _ ),  
  
    stärkste ( ( Sicherhhu-e,Sicherhhu-m,Sicherhho-e,Sicherhho-m ), Sicherh ).
```

Regel ERS-6

Wenn für eine neue Baukomponente gilt: ein Vorfahr der neuen Baukomponente (dieser Vorfahr hat zwangsläufig Kinder) ersetzt irgendeine alte Baukomponente und die alte Baukomponente ist ein Einzelteil, so wird eine Nicht-Ersetzung für die neue Baukomponente abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vielleicht" vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk_neu, nil, vielleicht, system ):-  
  ( kind ( Vorfahr_neu, Bk_neu )  
    ;  
    enkel ( Vorfahr_neu, Bk_neu )  
  ),  
  ä_bk_ersetzung ( Vorfahr_neu, Vorfahr_alt, _, _, _ ),  
  einzelteil ( Vorfahr_alt ).
```

10.6 Regeln bezüglich gleicher Sachnummer (Regelgruppe GLEICH)

Regel GLEICH-HUM

Wenn zwei Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste gleiche Sachnummern haben, so wird die Quantität des mehrstufigen Aufbaus der beiden Baukomponenten auf „ist_gleich“ gesetzt. Dabei wird die Sicherheit "sicher" vergeben.

```
ä_bk_hu_m ( Bk, Bk, ist_gleich, sicher, system ):-  
  in_stueeli_neu ( Bk ),  
  in_stueeli_alt ( Bk ).
```

Regel GLEICH-ERS-1

Wenn zwei Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste gleiche Sachnummern haben, so wird eine Ersetzung für diese Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "vermutlich" vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk, Bk, vermutlich, system ):-  
  in_stueeli_neu ( Bk ),  
  in_stueeli_alt ( Bk ).
```

Regel GLEICH-ERS-2

Wenn zwei Baukomponenten in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste gleiche Sachnummern haben und ihre Väter sich ersetzen, so wird eine Ersetzung für diese Baukomponenten abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit der Väter vergeben.

```
ä_bk_ersetzung ( Bk, Bk, Sicherh, system ):-  
  in_stueeli_neu ( Bk ),  
  in_stueeli_alt ( Bk ),  
  kind ( Vater_neu, Bk ),
```

kind (Vater_alt, Bk),
ä_bk_ersetzung (Vater_neu, Vater_alt, Sicherh, _),

10.7 Regeln für das Erzeugnis (Regelgruppe WURZEL)

Regel WURZEL-ERS

Für die Wurzeln von alter und neuer Stückliste wird eine Ersetzung abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "sicher" vergeben (die beiden Stücklisten wären sonst nicht zur Anpassungsplanung benutzt worden).

ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, sicher, planer):-
produkt (Bk_neu),
produkt (Bk_alt).

Regel WURZEL-HuE

Für die Wurzeln von alter und neuer Stückliste wird ähnlicher einstufiger Aufbau abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "sicher" vergeben (die beiden Stücklisten wären sonst nicht zur Anpassungsplanung benutzt worden).

ä_bk_hu_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, sicher, system):-
produkt (Bk_neu),
produkt (Bk_alt).

Regel WURZEL-HUM

Für die Wurzeln von alter und neuer Stückliste wird ähnlicher mehrstufiger Aufbau abgeleitet. Dabei wird die Sicherheit "sicher" vergeben (die beiden Stücklisten wären sonst nicht zur Anpassungsplanung benutzt worden).

ä_bk_hu_m (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, sicher, system):-
produkt (Bk_neu),
produkt (Bk_alt).

Die Wurzel einer Stückliste (das Erzeugnis) hat keine Vorfahren. Um am oberen Ende der Stückliste keine aufwändige Sonderbehandlung durchführen zu müssen, werden weitere Hilfsregeln vereinbart.

Regel WURZEL-HOE

Die Quantität der einstufigen Verwendung der Wurzeln (Erzeugnisse) von alter und neuer Stückliste wird auf ist_gleich gesetzt. Dabei wird die Sicherheit "sicher" vergeben.

ä_bk_ho_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, sicher, system):-
produkt (Bk_neu),
produkt (Bk_alt).

Regel WURZEL-HOM

Die Quantität der mehrstufigen Verwendung der Wurzeln von alter und neuer Stückliste wird auf ist_gleich gesetzt. Dabei wird die Sicherheit "sicher" vergeben.

ä_bk_ho_m (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, sicher, system):-
produkt (Bk_neu),
produkt (Bk_alt).

10.8 Regeln für Einzelteile (Regelgruppe BLATT)

Die Blätter einer Stückliste (Einzelteile) haben keine Nachfahren. Um am unteren Ende der Stückliste keine aufwändige Sonderbehandlung durchführen zu müssen, werden Hilfsregeln vereinbart.

Regel BLATT-HUE

Die Quantität des einstufigen Aufbaus von sich ersetzenden Blättern (Einzelteilen) wird auf ist_gleich gesetzt. Dabei wird die Sicherheit der Ersetzung dieser Blätter vergeben.

ä_bk_hu_e (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherh, system):-
ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, Sicherh, _),
einzeil (Bk_neu),
einzeil (Bk_alt).

Regel BLATT-HUM

Die Quantität des mehrstufigen Aufbaus von zwei sich ersetzenden Blättern wird auf ist_gleich gesetzt. Dabei wird die Sicherheit der Ersetzung dieser Blätter vergeben.

ä_bk_hu_m (Bk_neu, Bk_alt, ist_gleich, Sicherh, system):-
ä_bk_ersetzung (Bk_neu, Bk_alt, Sicherh, _),
einzeil (Bk_neu),
einzeil (Bk_alt).

10.9 Hilfsregeln

bruder (Bk, Bruder):-

ist erfüllt, wenn Bruder-Bk ein Bruder/Geschwister der Bk ist.

Einzelteil (Bk):-

ist erfüllt, wenn die Bk ein Einzelteil ist.

Kind (Bk, Kind):-

ist erfüllt, wenn Kind-Bk ein Kind der Bk ist.

Kinder (Bk, Kinder):-

ist erfüllt, wenn die Kinder-Bk-en Kinder der Bk sind.

Nachkomme (Bk, Nachkomme):-

ist erfüllt, wenn die Nachkomme-Bk ein Nachkomme der Bk ist.

Produkt (Bk):-

ist erfüllt, wenn die Bk das Produkt ist.

Schwächste (Liste_Sicherheiten, Sicherheiten, Sicherheit-schwächste):-

Ist erfüllt, wenn die Sicherheit aus der Liste der Sicherheiten die schwächste ist.

alle_ersetzt (Kinder_neu, Kinder_alt, Sicherheit-schwächste):-

ist erfüllt, wenn es eine eindeutige Zuordnung zwischen den neuen und den alten Kindern gibt.

mind_eins_ersetzt (Kinder_neu, Kinder_alt):-

ist erfüllt, wenn es mindestens eine Zuordnung zwischen den neuen und den alten Kindern gibt.

gleich_einst_verwend (Kinder_neu, Kinder_alt, Sicherheit-schwächste):-

ist erfüllt, wenn die einstufige Verwendung aller eineindeutig zugeordneter Kinder der neuen Bk gleich ist.

ähnl_einst_verwend (Kinder_neu, Kinder_alt):-

ist erfüllt, wenn gilt: es gibt ein Kind (jedoch nicht alle Kinder) der neuen oder der alten Bk, dessen einstufige Verwendung ungleich ist.

ungleich_einst_verwend (Kinder_neu, Kinder_alt):-

ist erfüllt, wenn alle Kinder einer neuen Bk ungleiche einstufige Verwendung besitzen.

gleich_mehrst_aufbau (Kinder_neu, Kinder_alt, Sicherheit-schwächste):-

ist erfüllt, wenn der mehrstufige Aufbau aller zugeordneten Kindern der neuen Bk gleich ist.

ähnl_mehrst_aufbau (Kinder_neu, Kinder_alt, Sicherheit-schwächste):-

ist erfüllt, wenn mindestens ein Kind einer neuen BK ähnlichen Aufbau, oder mindestens ein Kind, jedoch nicht alle Kinder ungleichen mehrstufigen Aufbau besitzen.

ungleich_mehrst_aufbau (Kinder_neu, Kinder_alt, Sicherheit-schwächste):-

ist erfüllt, wenn alle Kinder einer neuen Bk ungleichen mehrstufigen Aufbau besitzen.

11 Anhang 2: Ähnlichkeitsrelationen

Ähnlichkeitsrelation beschreiben einen Zusammenhang zwischen jeweils einer Baukomponente in der alten und der neuen Konstruktionsstückliste (siehe Kapitel 6.4).

11.1 Auswahl sinnvoller Ausprägungen des Attributs "Quantität"

Das Attribut Quantität quantifiziert die Ähnlichkeit zwischen zwei Baukomponenten. Für das Verfahren wurden folgende Ähnlichkeitsgrade definiert (siehe Kapitel 6.4.5):

- ist_gleich
- ist_ähnlich
- ist_ungleich
- ist_unbekannt
- mind_ähnlich (ist_gleich oder ist_ähnlich)
- höchst_ähnlich (ist_ähnlich oder ist_ungleich)

Dieser Anhang begründet die Definition.

Das Attribut Quantität quantifiziert die Ähnlichkeit zwischen zwei Baukomponenten durch die Ähnlichkeitsgrade "gleich", "ähnlich" und "ungleich" in Verbindung mit den Operatoren "ist", "nicht", "mind(estens)", "höchst(ens)".

Formal lassen sich somit folgende Quantitäten bilden:

- ist_gleich,
- ist_ähnlich,
- ist_ungleich
- mind_gleich
- mind_ähnlich
- mind_ungleich
- höchst_gleich
- höchst_ähnlich
- höchst_ungleich
- nicht_gleich
- nicht_ähnlich
- nicht_ungleich

Das Attribut Quantität beschreibt somit eine Lösungsmenge, die eine oder mehrere Ausprägungen des Ähnlichkeitsgrades enthält. Beispielsweise enthält die Quantität "nicht_gleich" die Ähnlichkeitsgrade "ähnlich" und "ungleich". Dadurch ist es teilweise möglich, eine Ausprägung des Attributs Quantität durch eine andere zu ersetzen, die genau die gleiche Lösungsmenge beschreibt (Abbildung 43).

Quantität	Lösungsmenge	entspricht
ist_gleich ist_ähnlich ist_ungleich	gleich ähnlich ungleich	mind_gleich höchst_ungleich
mind_gleich mind_ähnlich mind_ungleich	gleich gleich,ähnlich gleich,ähnlich,ungleich	ist_gleich nicht_ungleich höchst_gleich = ist unbekannt
höchst_gleich höchst_ähnlich höchst_ungleich	gleich,ähnlich,ungleich gleich,ähnlich ungleich	mind_ungleich = ist unbekannt nicht_gleich ist_ungleich
nicht_gleich <i>nicht_ähnlich</i> nicht_ungleich	ähnlich,ungleich <i>gleich,ungleich</i> gleich,ähnlich	höchst_ähnlich <i>Im Verfahren nicht möglich</i> mind_ähnlich

Abbildung 43: Ersetzbarkeit von Ausprägungen der Quantität

Wenige Ausprägungen reichen aus, um die relevanten Lösungsmengen zu beschreiben - für das Verfahren werden die Ausprägungen nach Abbildung 44 benutzt⁸¹.

Quantität	Lösungsmenge
ist_gleich ist_ähnlich ist_ungleich ist_unbekannt	gleich ähnlich ungleich ?
mind_ähnlich	gleich,ähnlich
höchst_ähnlich	ähnlich,ungleich

Abbildung 44: Die relevanten Ausprägungen des Attributs Quantität

11.2 Vergleich und Speicherung neuer Ähnlichkeitsrelationen

Bei der Anwendung des Regelwerkes entstehen ständig neue Ähnlichkeitsrelationen (siehe Kapitel 6.4.6). Für jede neue Ähnlichkeitsrelation muss entschieden werden, was damit

⁸¹ Die Quantität "nicht_ähnlich" kann bei der Anwendung des Verfahrens nicht vorkommen, sie wird deshalb ebenfalls nicht benutzt.

geschehen soll. Einige der neuen Ähnlichkeitsrelationen enthalten lediglich Informationen, die bereits in einer anderen Ähnlichkeitsrelation enthalten sind, sie können ignoriert bzw. gelöscht werden. Neue Ähnlichkeitsrelationen brauchen nur dann gespeichert zu werden, wenn sie zusätzliche Informationen enthalten, die in keiner anderen Ähnlichkeitsrelation enthalten sind.

Zur Entscheidung, ob eine neue Ähnlichkeitsrelation zusätzliche Informationen enthält oder nicht, bzw. ob ein Widerspruch besteht, wird sie mit allen bereits vorhandenen und als gültig markierten Ähnlichkeitsrelationen verglichen. Grob läuft der Vergleich folgendermaßen ab:

- Es werden jeweils zwei Ähnlichkeitsrelationen miteinander verglichen, die:
 - vom gleichen Relationstyp (siehe Kapitel 6.4.1) sind und
 - sich auf die gleichen Stücklisten beziehen
 - und sich auf die gleichen Baukomponenten beziehen⁸²
- Der Vergleich zweier Ähnlichkeitsrelationen erfolgt durch voneinander unabhängige Einzelvergleiche der Attribute "Quantität", "Sicherheit" und "Verantwortlicher".
- Es wird jeweils ermittelt, wie sich der Informationsgehalt, den das Attribut beschreibt, in der neuen Ähnlichkeitsrelation im Verhältnis zur bereits vorhandenen Ähnlichkeitsrelation darstellt. Möglich sind zunächst die Vergleichsrelationen "Widerspruch" und "Verträglichkeit". Verträglichkeit kann weiter unterschieden werden in "Verschärfung", "Abschwächung", "Gleichheit" und "Überlappung".

Der Vergleich wird im Folgenden präzisiert. Dazu werden die Vergleichsrelationen exakt definiert und die Vergleichsbedingungen der einzelnen Attribute konkret festgelegt. Im Anschluss daran wird ausgeführt, welche Aktionen als Ergebnis des Vergleiches erfolgen.

11.2.1 Definition von Typen des Informationsgehalts

Für beliebige Informationen X und Y seien Typen des Informationsgehalts definiert (Abbildung 45):

- Widerspruch \setminus
 $X \setminus Y$ (X und Y stehen zueinander in Widerspruch)
- Verträglichkeit \sim
 $X \sim Y$ (X ist mit Y verträglich, d.h. sie stehen nicht in Widerspruch)

⁸² Unterschiedliche Relationstypen brauchen nicht miteinander verglichen zu werden, da sie immer einen vollständig unterschiedlichen Informationsgehalt haben und auch nicht zueinander im Widerspruch stehen können. Das gleiche gilt für Ähnlichkeitsrelationen, die sich auf andere Stücklisten oder auf andere Baukomponenten beziehen.

- Verschärfung $<$
 $X < Y$ (X ist eine Verschärfung von Y, d.h. X enthält genauere Informationen)
- Abschwächung $>$
 $X > Y$ (X ist eine Abschwächung von Y, d.h. Y enthält genauere Informationen)
- Gleichheit $=$
 $X = Y$ (Der Informationsgehalt von X und Y ist gleich)
- Überlappung \wedge
 $X \wedge Y$ (X und Y überlappen sich, d.h. sie haben eine gemeinsame Teilinformation)

1. Widerspruch	$Q_{\text{neu}} \setminus Q_{\text{gül}}$	wenn gilt	$L_{\text{neu}} \cap L_{\text{gül}} = f$
2. Verträglichkeit	$Q_{\text{neu}} \sim Q_{\text{gül}}$	wenn gilt	$L_{\text{neu}} \cap L_{\text{gül}} \neq f$
	und zudem		
• Verschärfung	$Q_{\text{neu}} < Q_{\text{gül}}$	wenn gilt	$L_{\text{neu}} \subset L_{\text{gül}}$
• Gleichheit	$Q_{\text{neu}} = Q_{\text{gül}}$	wenn gilt	$L_{\text{neu}} = L_{\text{gül}}$
• Überlappung	$Q_{\text{neu}} \wedge Q_{\text{gül}}$	wenn gilt	$L_{\text{neu}} \not\subset L_{\text{gül}}$ und $L_{\text{neu}} \not\supset L_{\text{gül}}$
• Abschwächung	$Q_{\text{neu}} > Q_{\text{gül}}$	wenn gilt	$L_{\text{neu}} \supset L_{\text{gül}}$

Legende

Q_{neu} = Ausprägung des Attributs Quantität eines neuen Profils

$Q_{\text{gül}}$ = Ausprägung des Attributs Quantität eines bestehenden Profils

L_{neu} = Lösungsmenge der Quantität eines neuen Profils

$L_{\text{gül}}$ = Lösungsmenge der Quantität eines bereits bestehenden Profils

\cap Durchschnitt

\subset Teilmenge

\supset Obermenge

f Leere Menge

$\not\subset$ Nicht Teilmenge

$\not\supset$ Nicht Obermenge

Abbildung 45: Definition der Typen des Informationsgehalts

Besteht zwischen zwei Informationen X und Y eine Verschärfung, eine Abschwächung, eine Überlappung oder Gleichheit, dann sind sie auch miteinander verträglich.

Der Vergleich von zwei Ähnlichkeitsrelationen erfolgt durch Vergleich der einzelnen Attribute, wie im Folgenden näher ausgeführt wird.

11.2.2 Vergleich der Quantitäten

Durch Vergleich der Ausprägungen des Attributs Quantität einer neuen Ähnlichkeitsrelation (Q_{neu}) mit der einer bereits bestehenden, gültigen Ähnlichkeitsrelation ($Q_{gül}$) werden Typen des Informationsgehalts entsprechend Abbildung 46 abgeleitet.

$Q_{neu} \backslash Q_{gül}$	ist_gleich	ist_ähnlich	ist_ungleich	mind_ähnlich	höchst_ähnlich
ist_gleich	=	\	\	<	\
ist_ähnlich	\	=	\	<	<
ist_ungleich	\	\	=	\	<
mind_ähnlich	>	>	\	=	^
höchst_ähnlich	\	>	>	^	=

Legende:	
Widerspruch	\
Verträglichkeit	~
Verschärfung	<
Gleichheit	=
Überlappung	^
Abschwächung	>

Abbildung 46: Ableiten einer Vergleichsrelation durch Vergleich der Ausprägungen des Attributs Quantität

11.2.3 Vergleich der Sicherheit

Zwischen den Ausprägungen des Attributs "Sicherheit" einer neuen Ähnlichkeitsrelation (S_{neu}) und einer bereits bestehenden, gültigen Ähnlichkeitsrelation ($S_{gül}$) bestehen folgende Typen des Informationsgehalts⁸³:

- eine Verschärfung ($S_{neu} < S_{gül}$), wenn die Bedingung nicht verletzt wird:
sicher < vermutlich < vielleicht < unbekannt ;

⁸³ Das Attribut "Sicherheit" stellt keine Lösungsmenge dar, deshalb wird der Vergleichsoperator "Überlappung" (^) nicht definiert. Es kann auch kein "Widerspruch" auftreten, so dass auch dieser Vergleichsoperator (\) nicht definiert wird.

-
- eine Abschwächung ($S_{\text{neu}} > S_{\text{güt}}$), wenn die Bedingung nicht verletzt wird:
unbekannt > vielleicht > vermutlich > sicher ;
 - sonst Gleichheit ($S_{\text{neu}} = S_{\text{güt}}$).

11.2.4 Vergleich des Verantwortlichen

Zwischen den Ausprägungen des Attributs "Verantwortlicher" einer neuen Ähnlichkeitsrelation (V_{neu}) und einer bereits bestehenden, gültigen Ähnlichkeitsrelation ($V_{\text{güt}}$) besteht⁸⁴:

- eine Verschärfung ($V_{\text{neu}} < V_{\text{güt}}$), wenn die Bedingung nicht verletzt wird
Planer < System
- eine Abschwächung ($V_{\text{neu}} > V_{\text{güt}}$), wenn die Bedingung nicht verletzt wird
System > Planer
- sonst Gleichheit ($V_{\text{neu}} = V_{\text{güt}}$).

11.2.5 Aktionen als Folge des Vergleichs der Ähnlichkeitsrelationen

In Abhängigkeit des Typen des Informationsgehalts, der beim Vergleich einer neuen Ähnlichkeitsrelation mit einer vorhandenen, gültigen Ähnlichkeitsrelation ermittelt wurde, wird festgelegt welche Aktionen durchzuführen sind (Abbildung 47).

Mögliche Aktionen sind: Ersetzung, Erhaltung, Hinzunahme, Ableitung sowie die Bearbeitung von Widersprüchen.

- Ersetzung (:=)
Die vorhandene Ähnlichkeitsrelation wird durch die neu ermittelte Ähnlichkeitsrelation ersetzt, d. h. die neu ermittelte Ähnlichkeitsrelation wird gespeichert und als gültig markiert, die vorhandene Ähnlichkeitsrelation wird gelöscht. Eine Ersetzung erfolgt, wenn in der neuen Ähnlichkeitsrelation alle Informationen der vorhandenen Ähnlichkeitsrelation und darüber hinaus noch zusätzliche Informationen enthalten sind. Dies ist genau dann der Fall, wenn mindestens eine Ausprägung der Attribute "Quantität", "Sicherheit" und "Verantwortlicher" in der neuen Ähnlichkeitsrelation schärfer ist und alle anderen Ausprägungen mindestens gleich sind.
- Erhaltung (-)
Die vorhandene Ähnlichkeitsrelation bleibt erhalten, die neu ermittelte Ähnlichkeitsrelation wird nicht gespeichert. Eine Erhaltung erfolgt, wenn in der neuen Ähnlichkeits-

⁸⁴ Auch für das Attribut "Verantwortlicher" werden die Vergleichsoperatoren "Überlappung" (\wedge) und "Widerspruch" (\vee) nicht definiert.

relation keine zusätzlichen Informationen enthalten sind. Dies ist genau dann der Fall, wenn jedes der Attribute "Qualität", "Sicherheit" und "Verantwortlicher" in der neuen Ähnlichkeitsrelation schwächer oder gleich ist, wie in der vorhandenen Ähnlichkeitsrelation.

Zustand				Aktion	
Sicherheit		Quantität			
S_{neu}	$S_{gül}$	Q_{neu}	$Q_{gül}$		
<	<	<	<	(:=)	Ersetzung
<	<	=	=	(:=)	Ersetzung
<	<	>	>	(+)	Hinzunahme
=	=	<	<	(:=)	Ersetzung
=	=	=	=	(-)	Erhaltung
=	=	>	>	(-)	Erhaltung
^	^	<	<	(->)	Ableitung
^	^	=	=	(->)	Ableitung
^	^	>	>	(->)	Ableitung
>	>	<	<	(+)	Hinzunahme
>	>	=	=	(-)	Erhaltung
>	>	>	>	(-)	Erhaltung
\	\	<	<	(:=)	Ersetzung
\	\	=	=	(->)	Ableitung
\	\	>	>	(-)	Erhaltung

Abbildung 47: Aktionen als Folge des Vergleichs von Ähnlichkeitsrelationen

- Hinzunahme (+)
 Die neu ermittelte Ähnlichkeitsrelation wird hinzugenommen, d. h. sie wird gespeichert, ohne dass die vorhandene Ähnlichkeitsrelation gelöscht wird. Eine Hinzunahme erfolgt, wenn die neue Ähnlichkeitsrelation Informationen enthält, die in der vorhandenen nicht enthalten sind, aber auch die vorhandene Ähnlichkeitsrelation Informationen enthält, die im neuen nicht enthalten sind. Das ist genau dann der Fall, wenn mindestens eine Ausprägung bei den Attributen "Qualität", "Sicherheit" und "Ver-

antwortlicher" in mindestens einer neuen Ähnlichkeitsrelation schärfer ist, mindestens eine andere dagegen schwächer.

Ableitung (->)

Aus der vorhandenen Ähnlichkeitsrelation und der neu ermittelten Ähnlichkeitsrelation wird eine zusätzliche Ähnlichkeitsrelation abgeleitet. Das Attribut "Quantität" beschreibt eine Lösungsmenge (die Quantität "mind_ähnlich" enthält beispielsweise die Ähnlichkeitsgrade "ähnlich" und "gleich"). Dadurch kann zwischen der Quantität einer vorhandenen und einer neuen Ähnlichkeitsrelation eine Überlappung auftreten. Aus dieser Überlappung wird eine zusätzliche Ähnlichkeitsrelation abgeleitet, wobei sich deren Quantität als Durchschnitt aus den Quantitäten der alten und der neuen Ähnlichkeitsrelation ergibt. Beispielsweise kann aus den Quantitäten "mind_ähnlich" in der vorhandenen Ähnlichkeitsrelation und "höchst_ähnlich" in der neuen Ähnlichkeitsrelation eine zusätzliche Ähnlichkeitsrelation mit der Quantität "ist_ähnlich" abgeleitet werden.

11.3 Aktionen zur Behandlung von Widersprüchen

Bei der Anwendung des Regelwerkes entstehen ständig neue Ähnlichkeitsrelationen. Durch manuelle Eingaben des Planers kann es vorkommen, dass eine neue Ähnlichkeitsrelation Informationen enthält, die in Widerspruch zu bereits bekannten Ähnlichkeitsrelationen stehen. Diese Widersprüche müssen ermittelt und aufgelöst werden, beispielsweise indem Ähnlichkeitsrelationen gelöscht oder als aktuell ungültig markiert werden.

Ein Widerspruch zwischen zwei Ähnlichkeitsrelationen tritt dann auf, wenn die beiden Lösungsmengen des Attributs Quantität keine gemeinsame Schnittmenge haben (z. B. ist_gleich und höchst_ähnlich). Zur Auflösung von Widersprüchen sind die Aktionen "gültig/ungültig"-markieren und zurücksetzen möglich.

- Gültig/ungültig markieren (g/u):
Eine Ähnlichkeitsrelation in der Datenbasis wird als aktuell gültig bzw. ungültig markiert. Aktuell ungültige Ähnlichkeitsrelationen sind für das Regelwerk unsichtbar, sie werden nicht zur Ableitung weiterer Ähnlichkeitsrelationen benutzt. Solange kein Widerspruch auftritt, werden alle Ähnlichkeitsrelationen als gültig markiert. Die Aktion "ungültig markieren" wird ausgeführt, wenn zwischen zwei vom System abgeleiteten Ähnlichkeitsrelationen, die eine Sicherheit schwächer als "sicher" haben, ein Widerspruch auftritt. Dann bleibt die Ähnlichkeitsrelation mit der schärferen Sicherheit gültig, die andere Ähnlichkeitsrelation wird als aktuell ungültig markiert, sie bleibt jedoch erhalten. Sollte sich im Verlauf der weiteren Planung herausstellen, dass die gültig markierte Ähnlichkeitsrelation falsch war, kann auf der aktuell ungültig markierten Ähnlichkeitsrelation wieder aufgesetzt werden.

- Zurücksetzen (<-):

Zurücksetzen ist das gezielte Löschen einer Ähnlichkeitsrelation und aller daraus abgeleiteten Ähnlichkeitsrelationen. Ein Zurücksetzen wird erforderlich, wenn sich zwei Ähnlichkeitsrelationen widersprechen, die beide die Sicherheit "sicher" haben. Ähnlichkeitsrelation mit der Sicherheit "sicher" werden Ergebnisrelationen genannt, da sie dem Planer nicht mehr zur Überprüfung bzw. Überarbeitung vorgelegt werden. Ein Widerspruch zwischen Ergebnisrelationen würde zu falschen Ergebnissen führen, die Datenbasis muss deshalb auf einen Stand zurückgesetzt werden, der sich eingestellt hätte, wenn die falsche Ähnlichkeitsrelation nie existiert hätte. Dazu muss die falsche Ähnlichkeitsrelation gelöscht werden, außerdem müssen alle aus der falschen Ähnlichkeitsrelation abgeleiteten Ähnlichkeitsrelationen gelöscht werden. Um die Datenbasis zurücksetzen zu können, muss zunächst ermittelt werden, welche Ähnlichkeitsrelation falsch ist. Dabei sind folgende Fallunterscheidungen erforderlich:

- Es stehen zwei vom Planer eingegebene Ergebnisrelationen⁸⁵ zueinander im Widerspruch. Diese beiden Ähnlichkeitsrelationen werden dem Planer angezeigt und er nimmt mindestens eine dieser Ähnlichkeitsrelation zurück.
- Eine vom Planer eingegebene Ergebnisrelation steht im Widerspruch zu einer vom System abgeleiteten Ergebnisrelation. Dies kann (vorausgesetzt das Regelsystem ist korrekt) nur auftreten, wenn der Planer irgendwann im Verlauf des Stücklistenvergleichs eine falsche Ergebnisrelation eingegeben hat. Diese falsche Ähnlichkeitsrelation muss vom Planer ermittelt und zurückgenommen werden.
- Es stehen zwei vom System abgeleitete Ergebnisrelationen zueinander im Widerspruch. Auch dies kann nur auftreten, wenn der Planer irgendwann eine falsche Ergebnisrelation eingegeben hat. Diese muss vom Planer ermittelt und zurückgenommen werden.

Nachdem der Planer eine falsche Ergebnisrelation zurückgenommen hat, muss das System alle aus dieser Ergebnisrelation direkt oder indirekt abgeleiteten Ähnlichkeitsrelationen (Folgeänderungen) löschen. Falls aus abgeleiteten Ähnlichkeitsrelationen weitere Ähnlichkeitsrelation abgeleitet wurden (Folge-Folgeänderungen), so müssen auch diese gelöscht werden. Es ist jedoch nicht möglich, abzuspeichern, welche Ähnlichkeitsrelationen als Folgeänderungen aus welcher Eingabe des Planers abgeleitet wurden. Die vielfältigen Abhängigkeiten würden zu riesigen Datenmengen führen. Ohne Speicherung ist aber das Lokalisieren und gezielte Löschen der Folgeänderungen einer zurückgenommenen Ähnlichkeitsrelation nicht möglich. Deshalb musste ein grundsätzlich anderes Vorgehen zum Zurücksetzen der Datenbasis entwickelt werden.

⁸⁵ Ergebnisrelationen sind Ähnlichkeitsrelation mit der Sicherheit "sicher". Sie werden dem Planer nicht mehr zur Überprüfung bzw. Überarbeitung vorgelegt.

Dazu wurde eine besondere Eigenschaft des Regelwerkes ausgenutzt. Dieses ist so gestaltet, dass die Reihenfolge, in der Ähnlichkeitsrelationen eingegeben oder abgeleitet werden, ohne Bedeutung ist. Würde ein Planer mehrfach zwei identischen Stücklisten vergleichen und dabei zwar jeweils die gleichen Ähnlichkeitsrelationen eingeben, jedoch in völlig unterschiedlicher Reihenfolge, so wären die Ähnlichkeitsrelationen, die am Ende in der Datenbasis gespeichert sind, immer identisch. Zwar wären der Ablauf der Ursprungs- und Folgeänderungen sowie temporäre Zwischenstände völlig anders, das Endergebnis ist jedoch nicht von der Reihenfolge der Eingabe bzw. der Erzeugung abhängig. Ein bestimmter Satz an Ähnlichkeitsrelationen, die ein Planer eingibt, erzeugt immer genau das gleiche Ergebnis.

Dadurch konnte folgendes Vorgehen entwickelt werden, das in seiner Wirkung genau dem Lokalisieren und Löschen aller Folgeänderungen einer zurückgenommenen Ähnlichkeitsrelation entspricht: Zum Zurücksetzen werden alle Ähnlichkeitsrelationen, die vom System abgeleitet wurden⁸⁶, gelöscht. In der Datenbasis stehen dann nur noch diejenigen Ähnlichkeitsrelationen, die der Planer eingegeben hat. Würde man nun eine Initialisierung starten und anschließend die gespeicherten Ähnlichkeitsrelationen wie eine Eingabe behandeln, so würde der soeben gelöschte Zustand wieder entstehen. Der Planer nimmt jedoch zunächst diejenigen Ähnlichkeitsrelationen zurück, die er inzwischen als falsch erkannt hat. Erst dann führt das System eine Initialisierung durch und arbeitet die gespeicherten Ähnlichkeitsrelationen ein. Als Ergebnis entsteht ein Zustand, als ob die zurückgenommenen Eingaben nie existiert hätten, der Widerspruch ist aufgelöst.

11.4 Das Prinzip der Ursprungs- und Folgeänderungen

Alle Informationen über Ähnlichkeiten zwischen alter und neuer Konstruktionsstückliste sind in den Ähnlichkeitsrelationen dokumentiert. Jede Eingabe zusätzlicher Informationen erzeugt mindestens eine neue Ähnlichkeitsrelation. Diese neue Ähnlichkeitsrelation steht dem Regelwerk zur Verfügung und wird für die Ableitung weiterer Ähnlichkeitsrelationen benutzt. Die Veränderung einer Ähnlichkeitsrelation (Ursprungsänderung) kann so zur Ableitung und Speicherung weiterer Ähnlichkeitsrelationen führen (Folgeänderungen). Jede dieser weiteren Ähnlichkeitsrelationen kann wiederum zur Ableitung von Ähnlichkeitsrelationen führen usw. (Folgeänderungen höheren Grades).

Zur Beherrschung der dadurch entstehenden Komplexität wurde das Prinzip der Ursprungs- und Folgeänderungen entwickelt. Aufgabe dieses Prinzips ist es, die Ableitung von Ähnlichkeitsrelationen in eine beherrschbare Sequenz von Ursprungs- und Folgeänderungen aufzulösen. Eine Sequenz wird durch die Eingabe von Ähnlichkeitsrelationen durch den Planer bzw.

⁸⁶ Bei Ähnlichkeitsrelationen, die vom System abgeleitet wurden, hat das Attribut "Verantwortlicher" die Ausprägung "System".

bei der Initialisierung ausgelöst. Die eingegebenen Ähnlichkeitsrelationen werden in der Datenbasis gespeichert, anschließend wird die erste eingegebene Ähnlichkeitsrelation zur (ersten) Ursprungsänderung gemacht. Ausgehend von dieser Ursprungsänderung werden alle Folgeänderungen ersten Grades durch das Regelwerk abgeleitet. Folgeänderungen ersten Grades werden neue Ähnlichkeitsrelationen genannt, die direkt aus der Ursprungsänderung abgeleitet werden. Folgeänderungen zweiten Grades, die aus Folgeänderungen ersten Grades entwickelt werden könnten, werden also zunächst nicht abgeleitet. Im zweiten Schritt der Sequenz wird die zweite eingegebene Ähnlichkeitsrelation zur Ursprungsänderung gemacht und es werden ebenfalls alle Folgeänderungen ersten Grades abgeleitet. Entsprechend werden nacheinander alle Eingaben zu Ursprungsänderungen gemacht und abgearbeitet.

Sind alle Eingaben abgearbeitet, so wird die erste Folgeänderung ersten Grades zur Ursprungsänderung gemacht und abgearbeitet (in Bezug auf die Eingabe stellen die Folgeänderungen, die bei dieser Abarbeitung entstehen, bereits Folgeänderungen zweiten Grades dar). Nacheinander werden alle Folgeänderungen zu Ursprungsänderungen gemacht und abgearbeitet. Dabei wird eine festgelegte Reihenfolge eingehalten, bei deren Ermittlung jeweils die aktuelle Gesamtmenge aller Folgeänderungen über alle Grade herangezogen wird:

- 1 Zunächst werden Folgeänderungen, die sich auf die Baukomponenten der tiefsten Stücklistenebene beziehen, berücksichtigt⁸⁷.
- 2 Neue Ähnlichkeitsrelationen werden in Abhängigkeit ihres Typs in der Reihenfolge "Aufbau vor Verwendung vor Ersetzung" zu Ursprungsänderungen gemacht.

Nicht jede Ursprungsänderung bewirkt Folgeänderungen. Eine Folgeänderung tritt nur dann auf, wenn eine neue Ähnlichkeitsrelation abgespeichert wird. Wird keine neue Ähnlichkeitsrelation abgespeichert, zieht eine Ursprungsänderung also keine Folgeänderungen mehr nach sich. Die Sequenz aus Ursprungs- und Folgeänderungen ist beendet, wenn die letzte Folgeänderung irgend eines Grades zur Ursprungsänderung gemacht wurde, diese aber keine weitere Folgeänderung mehr bewirkte.

⁸⁷ Diese Auswahl bewirkt eine Bottom-Up Abarbeitung der Eingaben. Bei der Baumstruktur Stückliste bietet eine Bottom-Up Abarbeitung Vorteile. Ausgehend von einem beliebigen Knoten führt in Richtung der Wurzel immer nur ein Weg; dagegen kann unterhalb des Knotens ein ganzer Teilbaum mit Verzweigungen und einer großen Anzahl Nachfahren hängen.

12 Literatur

- Abe09 ABELE, E.; BRUNGS, F.; HUESKE, B.: Produktionsgerecht modularisieren. Eine Weiterentwicklung des Modular Function Deployment. In: wt-online, (2009), Heft 9, S. 598-605.
- Ald09 ALDINGER, L. A.: Methode zur strategischen Leistungsplanung in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen des Mittelstandes. Stuttgart, Univ., Dissertation, 2009.
- Arn04 ARNOLD, D.; ISERMANN, H.; KUHN, A.; TEMPELMEIER, H.: Logistik. 2. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2004.
- Bäc10 BÄCHLE, M.; LEHMANN, F. R.: E-Business: Grundlagen elektronischer Geschäftsprozesse im Web 2.0. München: Oldenbourg, 2010.
- Bau07 BAUMBERGER, G. C.: Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten. München, TU, Dissertation, 2007.
- Bau05 BAUMGART, I. M.: Modularisierung von Produkten im Anlagenbau. Aachen: Mainz, 2005.
- Ben11 BENZ, J.; HÖFLINGER, M.: Logistikprozesse mit SAP®. Eine anwendungsbezogene Einführung. 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- Bic10 BICHLER, K.; KROHN, R.; RIEDEL, G.; SCHÖPPACH, F.: Beschaffungs- und Lagerwirtschaft: Praxisorientierte Darstellung der Grundlagen, Technologien und Verfahren. 9. Auflage, Wiesbaden: Gabler, 2010.
- Bin10 BINZ, H.; KRATZER, M.: ProKon – Ein Unterstützungssystem für Konstrukteure. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Ausgabe 12/2010. Berlin: Hanser, S. 1037ff.
- Bin13 BINZ, H.; MAIER, T.; BEIER, F.: Mit Konstruktion und Design zu einer neuen Form der Kooperation. In: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP, Ausgabe 2/2013, S. 5-6.
- Ble07 BLEY, H.; BOSSMANN, M.; WEYAND, L.; SCHMITT, B.: Feature-Technologie in der integrierten Produktentstehung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb Ausgabe 10/2007. Berlin: Hanser, S. 681-685.
- Ble11 BLEES, C.: Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. TU Hamburg-Harburg, Dissertation, 2011.

-
- Bon02 BONGULIELMI, L.: Die Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zur Darstellung konfigurationsrelevanter Aspekte im Produktentstehungsprozess. Zürich, TH, Dissertation, 2002.
- Bos07 BOSSMANN, M.: Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung. Saarbrücken, Universität des Saarlands, Dissertation, 2007.
- Bra11 BRACHT,U.; Wenzel, X.; Geckler, D.: Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele, Berlin [u.a.]: Springer, 2011.
- Bul00 BULLINGER, H.-J.; Korge, A.: KUR - Ein neues Unternehmensmodell für produzierende Unternehmen. In: Wojda, F. (Hrsg.): Innovative Organisationsformen - Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation, Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2000, S. 115-136.
- Cae91: CAESAR, C. (Hrsg.): Kostenorientierte Gestaltungsmethodik für variantenreiche Serienprodukte: Variant mode and effects analysis, VMEA. Düsseldorf: VDI, 1991. Aachen, TH, Dissertation, 1991.
- Cl a11 CLAUSING, A.: Programmiersprachen. Konzepte, Strukturen und Implementierung in Java. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- Clo03 CLOCKSIN, F.; MELLISH, S.: Programming in Prolog: Using the ISO Standard. Fifth Edition, Berlin [u.a.]: Springer, 2003.
- Dan09 DANGELMAIER, W.: Theorie der Produktionsplanung und –Steuerung. Im Sommer keine Kirschpralinen? Berlin [u.a.]: Springer, 2009.
- Dec02 DECKERT, C.: Wissensorientiertes Projektmanagement in der Produktentwicklung. Aachen: Shaker, 2002. Aachen, TH., Dissertation, 2002.
- DIN199 Norm DIN 199-1. Technische Produktdokumentation: CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten. Teil 1: Begriffe. 03.2002.
- DIN6789 Norm DIN 6789-1. Dokumentationssystematik: Aufbau technischer Produktdokumentationen. 09.1990.
- Ehr09 EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4., überarb. Auflage, München [u.a.]: Hanser, 2009.
- Eig09 EIGNER, M.; STELZER, R.: Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2., bearb. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2009.

-
- Eri98: ERXON, G.: Modular function deployment: A method for product modularisation. Stockholm: The Royal Institute of Technologie, Dissertation, 1998.
- Eve05: EVERSHEIM, W.; SCHUH, G. (Hrsg.): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin [u.a.]: Springer, 2005.
- Eve02: EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik: Arbeitsvorbereitung. Berlin [u.a.]: Springer, 2002.
- Fel08: FELDHUSEN, J.; GEBHARDT, B.: Product Lifecycle Management für die Praxis. Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung. Berlin [u.a.]: Springer, 2008.
- Fis08: FISCHER, J. O.: Kostenbewusstes Konstruieren: Praxisbewährte Methoden und Informationssysteme für den Konstruktionsprozess. Berlin [u.a.]: Springer, 2008.
- Fra03: FRANKE, C.: Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik. Saarbrücken, Univ. des Saarlandes, Dissertation, 2003.
- Fri89: FRIEDMANN, T.: Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue, rechnergestützte Verfahren. Karlsruhe, Univ., Dissertation, 1989.
- Gai81: GAIROLA, A.: Montagegerechtes Konstruieren: ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik. Darmstadt, TH, Dissertation, 1981.
- Gei06: GEIGER, D.: Wissen und Narration. Berlin, Erich Schmidt, 2006. Berlin, Freie Univ., Dissertation, 2005.
- Göp98: GÖPFERT, J.: Modulare Produktentwicklung: Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 1998.
- Göp00: GÖPFERT, J.; STEINBRECHER, M.: Modulare Produktentwicklung leistet mehr. Warum Produktarchitektur und Projektorganisation gemeinsam gestaltet werden müssen. In: Harvard Business Manager, Heft 3/2000.
- Göp09: GÖPFERT, J.: Modulare Produktentwicklung: Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Theorie, Methodik, Praxis. Norderstedt, Books on Demand, 2009.
- Gro04: GRONAU, N.: Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. München: Oldenbourg, 2004.
- Gro06: GROSSE-HEITMEYER, V.: Globalisierungsgerechte Produktstrukturierung auf Basis technologischer Kernkompetenzen. Hannover, Uni, Dissertation, 2006.

-
- Gro11 GROTHE, K.-H.; FELDHUSEN, J.: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. 23. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2011.
- Grü94 GRÜNEWALD, C.; SCHOTTEN, M.: Marktspiegel-PPS-Systeme auf dem Prüfstand: Überprüfte Leistungsprofile von Standard-EDV-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Unter Mitwirkung von M. Dirk, C. Hannen u.a. 5., überarb. Auflage, Köln: TÜV Rheinland, 1994.
- Gru71 GRUPP, B.: Elektronische Stücklisten- und Arbeitsplanorganisation. Wiesbaden: Forkel, 1971.
- Gru85 GRUPP, B.: Stücklisten- und Arbeitsplanorganisation mit Bildschirmeinsatz. 4., überarb. Auflage, Wiesbaden. Forkel, 1985.
- Gru03 GRUPP, B.: Materialwirtschaft mit EDV im Klein- und Mittelbetrieb. 6. Auflage, Renningen: expert, 2003.
- Gru09 GRUNDIG, C.-G.: Fabrikplanung: Planungssystematik – Methoden - Anwendungen. München, Hanser, 2009.
- Gun11 GUNDLACH, O.: Globale Produktionsnetzwerke: Erreicht die Globalisierung einen Wendepunkt? Hamburg: Diplomica, 2011.
- Hau00 HAUN, M.: Wissensbasierte Systeme. Eine praxisorientierte Einführung. Renningen: expert, 2000.
- Hel10 HELBING, K. W.: Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin [u.a.]: Springer, 2010.
- Hen01 HENNIG, H.: Konzept für den Aufbau von Bauteil- und Baugruppeninformationen für komplexe Produkte auf Basis eines funktionsorientierten Strukturmodells. Erlangen-Nürnberg, Univ., Dissertation, 2000.
- Her96 HERSTATT, C.: Stücklisten - wenig beachtete Einsparpotentiale. In: IO Management 65 (1996) Nr.12, S. 71-74.
- IKDT13 INSTITUT FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK UND TECHNISCHES DESIGN: Proaktive Unterstützung von Konstruktionsprozessen durch Softwareagentensysteme (ProKon). © 06.02.2014, <http://www.iktd.uni-stuttgart.de/forschung/mpe/ProKon/>, 6.2.2014.
- Kin07 KINKEL, S.; ZANKER, C.: Globale Produktionsstrategien in der Automobilzulieferindustrie. Berlin [u.a.]: Springer, 2007.
- Kin09 KINKEL, S.: Erfolgsfaktor Standortplanung: In- und ausländische Standorte richtig bewerten. 2. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2009.

-
- Kle08 KLETTE, G.; EL-HUSSEIN, T.; VAJNA, S. (Hrsg.): TEAMCENTER EXPRESS - kurz und bündig. EDM/PDM Grundlagen und Funktionen sicher erlernen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- Klu11 KLUGE, S.-J.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Stuttgart, Univ., Dissertation, 2011.
- Köh89 KÖHLER, F.: Montagearbeitsplanerstellung mit Expertensystemen. Köln: TÜV Rheinland, 1989. Dortmund, Univ., Dissertation, 1988.
- Köh02 KÖHLER, P. Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau. Würzburg: Vogel, 2002.
- Kom98 KOMOREK, C.: Integrierte Produktentwicklung. Berlin: Steuer- und Wirtschaftsverlag, 1998. Duisburg, Univ., Dissertation, 1997.
- Kon09 KONOLD, P.; REGER, H. (Hrsg.): Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2., erweiterte Auflage, Wiesbaden: Vieweg, 2009.
- Kor97 KORGE, A.: Kundenorientierte Unternehmens-Reorganisation (KUR): Integration beginnt bei der Aufbauorganisation. In: Industrie Management 13 (1997) Nr.3.
- Kor09 KORGE, A.; LENTES, H.-P.: Ganzheitliche Produktionssysteme. Konzepte, Methoden, Erfolgsfaktoren. In: Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. 3., neu bearb. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2009.
- Kor10 KORGE, A.: „Simple Organization“ – Fabriken einfach organisieren: Damit den Managern nicht die Herrschaft über die Unternehmensprozesse entgleitet. In: wt-online, 1/2 2010.
- Kry02 KRYSTEK, U.; ZUR, E.: Handbuch Internationalisierung: Globalisierung – eine Herausforderung für die Unternehmensführung. 2. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2002.
- Küh06 KÜHN, W.: Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner, München [u.a.]: Hanser, 2006.
- Kur09 KURZ, U.; HINTZEN, H.; LAUFENBERG, H.: Konstruieren, Gestalten, Entwerfen: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik. 4., erweiterte Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- Las09 LASI, H.: Aufbau eines IT-basierten Integrationskonzepts zur Unterstützung von Produktentwicklungs- und Produktionsprozessen. Lohmar-Köln, Josef Eul Verlag, 2003. Stuttgart, Univ., Dissertation, 2008.

-
- Ley06 LEYKAUF, G.: Modularität und vertikale Desintegration: Güterarchitektur als Determinante der Wertschöpfungstiefe. Erlangen-Nürnberg, Univ., Dissertation, 2006.
- Lin06 LINDEMANN, U.; REICHWALD, R.; ZÄH, M. F. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin [u.a.]: Springer, 2006.
- Lip67 LIPKA, A.: Organisation der Datenverarbeitung für die Fertigung: Eine systematische Darstellung der Verfahren, München: Oldenbourg, 1967.
- Lof02 LOFERER, U.: Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen. Forschungsberichte iw 162, München: Herbert Utz, 2002. München, TU, Dissertation, 2001.
- Mei08 MEIER, A., STORMER, H.: eBusiness & eCommerce: Management der digitalen Wertschöpfungskette. 2. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2008.
- Mei11 MEIER, G.: Prozessintegration des Target Costing in der Fertigungsindustrie am Beispiel Sondermaschinenbau. Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe Band 2 – 2011. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2011.
- Mut00 MUTH, M.: CAD-M (Computer Aided Design using Multimedia): Repräsentation und Nutzung von Konstruktionswissen in verteilten Entwicklungsumgebungen, Schriftenreihe Produktionstechnik 19, Universität des Saarlandes, Saarbrücken: 2000, Saarbrücken, Univ., Habil.-Schr., 2000.
- Nae12 NAEFE, P.: Einführung in das Methodische Konstruieren: Für Studium und Praxis. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2012.
- Neu01 NEUHAUSEN, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Aachen, TH, Dissertation, 2001.
- Pah07 PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. 7. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2007.
- Paw07 PAWELLEK, G.: Produktionslogistik: Planung-Steuerung-Controlling. München [u.a.]: Hanser, 2007.
- Pil06 PILLER, F. T.: Mass Customation: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. 4. Auflage, Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2001.

-
- Pon11 PONN, J.; Lindemann, U. (Hrsg.): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungsformen. 2. Auflage, Berlin [u.a.]: Springer, 2011.
- Pos13 POSNER, B.; BINZ, H.; ROTH, D.: Grundlagen zur Berücksichtigung von Design for X bei Funktionsstrukturen am Beispiel des Design for Lightweight. In: Spath, D.; Bertsche, B.; Binz, H. (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013. Stuttgart, 2013.
- Rap99 RAPP, T.: Produktstrukturierung: Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und –plattformen. 2. Auflage. Norderstedt: Books on Demand, 2010, St. Gallen, Univ., Dissertation, 1999.
- REFA91 REFA, VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Steuerung, Teil 3., München [u.a.]: Hanser, 1991.
- Ric91 RICHTER, R.: Wissensbasierte CAD-Systemkomponente zum Entwurf montagegerechter Produkte, Berlin: Springer, Stuttgart, Univ., Dis., 1991
- SAP13-1 SAP HELP PORTAL: Stücklisten (PP-BD-BOM), Stücklistenvergleich. © 6.2.2014, http://help.sap.com/erp2005_ehp_06/helpdata/de/ea/e9bee24c7211d189520000e829fbbd/content.htm?frameset=/de/ea/e9bf164c7211d189520000e829fbbd/frameset.htm, 6.2.2014.
- SAP13-2 SAP HELP PORTAL: Geführte Struktursynchronisierung (PLM-WUI-GSS), Synchronisieren einer Konstruktions- mit einer Fertigungsstückliste. © 6.2.2014, http://help.sap.com/erp2005_ehp_05/helpdata/de/ab/4e0ece70ca412cad07d8f5b79c55f8/content.htm?frameset=/de/7d/8e1b99ee5e4515b06102c1f3ae3ee3/frameset.htm, 6.2.2014.
- Sch08 SCHONERT, T.: Interorganisationale Wertschöpfungsnetzwerke in der deutschen Automobilindustrie: Ausgestaltung von Geschäftsbeziehungen am Beispiel internationaler Standortentscheidungen. Wiesbaden: Gabler, 2008, Lüneburg, Univ., Dissertation, 2007.
- Sch06 SCHUH, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und –Steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin [u.a.]: Springer, 2006.
- Sche06 SCHEER, A.; BOCZANSKI, M.; MUTH, M., SCHMITZ W.-G.; SEGELBACHER, U.: Prozessorientiertes Product Lifecycle Management. Berlin [u.a.]: Springer, 2006.

-
- Sch05 SCHUH, G. (Hrsg.): Produktkomplexität managen: Strategien, Methoden, Tools. 2., erweiterte Auflage, München [u.a.]: Hanser, 2005.
- Sch01 SCHÖNSLEBEN, P.: Integrales Informationsmanagement: Informationssysteme für Geschäftsprozesse - Management, Modellierung, Lebenszyklus und Technologie. Berlin [u.a.]: Springer, 2001.
- Schö11 SCHÖNSLEBEN, P.: Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. Berlin [u.a.]: Springer, 2011.
- Schw11 SCHWEITZER, M.; KÜPPER, H.-U.: Systeme der Kosten- und Erlösrechnung. 10. Auflage, München, Vahlen, 2011.
- Sei02 SEIFERT, L.: Methodik zum Aufbau von Informationsmodellen für Elektronik Business in der Produktentwicklung. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst., 2002. Paderborn, Univ., Dissertation, 2001.
- Sen08 SENDLER, U.; WAWER, V.: CAD und PDM. Prozessoptimierung durch Integration. 2., erweiterte Auflage, München [u.a.]: Hanser, 2008.
- Spa01 SPATH, D.; BARRHO, T.; DILL, C.; KLINKEL, S.: Quo vadis, PPS? Erfolgsfaktoren von Auftragssteuerungssystemen in dezentralen Strukturen im turbulenten Umfeld. Stuttgart: LOG_X, 2001.
- Spa03 SPATH, D. (Hrsg.): Ganzheitlich produzieren: Innovative Organisation und Führung. Stuttgart: LOG_X, 2003.
- Spa07 SPATH, D.; KLETT, H.; MUCHA, M.; (Hrsg.): Stuttgarter E-Business-Tage 2007. Anwenderforum. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2007.
- Spa08 SPATH, D.; HIRSCH-KREINSEN, H.; KINKEL, S.: Organisatorische Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen. Unternehmenserfahrungen, Forschungs- und Transferbedarfe. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008.
- Spa11-1 SPATH, D.; LINDER, C; SEIDENSTICKER, S.: Technologiemanagement. Grundlagen, Konzepte, Methoden. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2011.
- Spa11-2 SPATH, D.; BINZ, H; BERTSCHE, B.: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2011. Konvergenz und Divergenz – Produktentwicklung im Wandel. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2011.
- Spi97 SPIES, J.: Montagegerechte Produktgestaltung am Beispiel des komplexen Gross-Serienproduktes Automobil. Zürich, ETH, Dissertation, 1997.

-
- Spu97 Spur, G.; Krause, F.L.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Techniken. München [u.a.]: Hanser, 1998.
- Sta07 STAAB, F.: Logik und Algebra. Eine praxisbezogene Einführung für Informatiker und Wirtschaftsinformatiker. München: Oldenbourg, 2007.
- Ste07 STEFFEN, D.: Ein Verfahren zur Produktstrukturierung für fortgeschrittene mechatronische Systeme. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst., 2007. Paderborn, Univ., Dissertation, 2006.
- STE14 STANDARD FOR THE EXCHANGE OF PRODUCT MODEL DATA. © 11.9.2013, http://de.wikipedia.org/wiki/Standard_for_the_exchange_of_product_model_data, 10.3.2014.
- Sti07 STICH, C.: Produktionsplanung in der Automobilindustrie. Optimierung des Ressourceneinsatzes im Serienanlauf. Köln: Kölner Wiss.-Verl., 2007. Köln, Univ., Dissertation, 2007.
- Sti11 STIEFEL, P.: Eine dezentrale Informations- und Kollaborationsarchitektur für die unternehmensübergreifende Produktentwicklung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011. Clausthal, TU, Dissertation, 2010.
- Thi08 THIEL, K.; MEYER, H.; FUCHS, F.: MES - Grundlage der Produktion von morgen: Effektive Wertschöpfung durch die Einführung von Manufacturing Execution Systems. München, Oldenbourg, 2008.
- Ung86 UNGEHEUER, U.: Produkt- und Montagestrukturierung: Methodik zur Planung einer anforderungsgerechten Produkt- und Montagestruktur für komplexe Erzeugnisse der Einzel- und Kleinserienproduktion. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986. Aachen, TH, Dissertation, 1985.
- Vah08 VAHRENKAMP, R.: Produktionsmanagement. 6., überarb. Auflage, München: Oldenbourg, 2008.
- Vaj98 Vajna, S.; Podehl, G.: Durchgängige Produktmodellierung mit Features. In: CAD-CAM REPORT Nr. 3, 1998.
- Vaj09 VAJNA, S.; WEBER, C.; BLEY, H.; ZEMAN, K.: CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung. 2. Auflage, München ; Berlin [u.a.]: Springer, 2009.
- VDI2221 VDI-Richtlinie VDI 2221. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. 05.1993.
- VDI2222 VDI-Richtlinie VDI 2222, Blatt 1. Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. 06.1997.

-
- VDI4499 Norm VDI 4499, Blatt1. Digitale Fabrik – Grundlagen. 02.2008.
- Wat08 WATTY, R. ; BINZ, H.: Herausforderungen der multidisziplinären Produktentwicklung. In: 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008. Aachen, 2008.
- Wes01 WESTKÄMPER, E.; BULLINGER H.-J.; HORVÁTH, P.; ZAHN,E.: Montageplanung – effizient und marktgerecht. Berlin [u.a.]: Springer, 2001.
- Wes06 WESTKÄMPER, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin [u.a.]: Springer, 2006.
- Wes09 WESTKÄMPER, E.; ZAHN, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin [u.a.]: Springer, 2009.
- Wes12 WESTKÄMPER, E.: Mit digitalen Werkzeugen den Wachstumsbremsen begegnen. In: wt online, 3/2012.
- Wie08 WIENDAHL, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 6., akt. Auflage, München [u.a.]: Hanser, 2008.
- Zag06 ZAGEL, M.: Übergreifendes Konzept zur Strukturierung variantenreicher Produkte und Vorgehensweisen zur iterativen Produktstruktur-Optimierung, Kaiserslautern, TU, Dissertation, 2006.

In dieser »Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement« werden die Dissertationen, die im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart und am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO entstanden sind, veröffentlicht.

Die beiden Institute verknüpfen universitäre Grundlagenforschung mit angewandter Auftragsforschung und setzen diese erfolgreich in zahlreichen Projekten praxisgerecht um.

Technologiemanagement umfasst dabei die integrierte Planung, Gestaltung, Optimierung, Bewertung und den Einsatz von technischen Produkten und Prozessen aus der Perspektive von Mensch, Organisation, Technik und Umwelt. Dabei werden neue anthropozentrische Konzepte für die Arbeitsorganisation und -gestaltung erforscht und erprobt. Die Arbeitswissenschaft mit ihrer Systematik der Analyse, Ordnung und Gestaltung der technischen, organisatorischen und sozialen Bedingungen von Arbeitsprozessen sowie ihren humanen und wirtschaftlichen Zielen ist dabei zentral in die Aufgabe des Technologiemanagements eingebunden.

ISBN 978-3-8396-0867-8



ISSN 2195-3414

Fraunhofer Verlag