

# **Ein Beitrag zur Leistungsabstimmung von Demontagesystemen**

Zur Erlangung des akademischen Grades

## **Doktor der Ingenieurwissenschaften**

der Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

eingereichte und genehmigte

**Dissertation**  
von

Dipl.-Ing. Rainer Schwarz

aus Mannheim

Tag der mündlichen Prüfung: 26.09.2016  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.  
Gert Zülch  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung –  
Nicht kommerziell – Keine Bearbeitung 4.0 International Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0 DE):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

# Inhaltsverzeichnis

	Seite		
1. Defizite bei der Demontageplanung	4	4. Zeitwirtschaftliche Betrachtung der Demontage	48
1.1 Entwicklungen in der Demontageplanung	4	4.1 Zeitbegriffe nach REFA	48
1.2 Ausgangssituation und Problemstellung	5	4.2 REFA-Zeitaufnahme	52
1.3 Zielsetzung der Arbeit	8	4.3 Multimomentaufnahme	55
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	9	4.4 Systeme vorbestimmter Zeiten	57
2. Grundlagen der Demontageplanung	12	4.5 Einflussgrößen der Demontage	59
2.1 Zielsetzungen der Demontage	12	4.6 Demontagezeitbausteine	62
2.2 Begriffe der Demontage	13	4.7 Leistungsabstimmung einer Demontagelinie	65
2.2.1 Demontagevorgang	13	4.7.1 Anzahl Demontagestationen	66
2.2.2 Demontageablauf	14	4.7.2 Auslastung der Demontagestationen	67
2.2.3 Demontageverfahren	15	4.7.3 Bestimmung der Taktzeit	67
2.2.4 Demontageplanung	17	4.7.4 Abtaktung bei partitionierten Demontagepfaden	71
2.2.5 Arbeitsorganisatorische Betrachtung von Demontageprozessen	18	5. Bewertung von Planungsalternativen	74
2.3 Leistungsabstimmung manueller Demontagesysteme	21	5.1 Zielkriterien der Demontage	74
2.4 Beschaffungslogistik	23	5.1.1 Festlegung von Zielkriterien	74
2.4.1 Planungsprozesse der Beschaffungslogistik	23	5.1.2 Bewertung mittels Zielkriterien	76
2.4.2 Primärbedarfsplanung in der Demontage	24	5.1.3 Gewichtung von Zielkriterien	79
2.4.3 Sekundärbedarfsplanung in der Demontage	25	5.2 Zielerreichungsgrade	82
2.5 Planungsverfahren im Demontagebereich	26	5.2.1 Zielkriterium Anzahl Demontagestationen	83
3. Modellierung von Demontageprozessen	32	5.2.2 Zielkriterium Auslastung	84
3.1 Recyclinggraph	32	5.2.3 Zielkriterium Durchlaufzeit	85
3.2 Verbindungsgraph	35	5.2.4 Zielkriterium variable Demontagestückkosten	87
3.3 Zerlegungsgraph	38	5.3 Multikriterielle Bewertung	90
3.4 Demontagevorranggraph	40	5.3.1 Matrix der Zielerreichungsgrade	90
3.4.1 Vorgangsfolgerestriktionen	41	5.3.2 Normierte Zielerreichungsgrade	91
3.4.2 Definition von Demontagepfaden	43	5.3.3 Gewichtete normierte Zielerreichungsgrade	93
3.4.3 Bildung disjunkter Teilgraphen	45	5.4 Beurteilung von Arbeitsbedingungen	95
		5.4.1 Leitmerkalmethode für Ziehen und Schieben	96
		5.4.2 Leitmerkalmethode für Heben, Halten, Tragen	99
		6. Entwicklung eines Verfahrens zur Planung von Demontagesystemen	101
		6.1 Aufbau des Verfahrens <i>TANJA</i>	101
		6.2 Abbildung von Demontagevorgängen	104
		6.3 Entwicklung des Demontagevorranggraphen	108
		6.3.1 Priorisierung von Demontagevorgängen	109

6.3.2	Prioritätsstufen	110
6.4	Leistungsabstimmung von priorisierten Demontagevorgängen	112
6.5	Produktionslogistische Planungsbewertung	113
6.6	Ergonomische Bewertung von Demontagevorgängen	116
6.7	Arbeitsplatzgestaltung im Demontagesystem	119
7.	Anwendung des Verfahrens <i>TANJA</i>	122
7.1	Schwierigkeiten bei der Datenerhebung	122
7.2	Anwendung des Verfahrens bei der Motorrad demontage	123
7.2.1	Analyse des bestehenden Komplettdemontearbeitsplatzes	124
7.2.2	Planung einer Demontagelinie	125
7.2.3	Verifikation und Umsetzung der Demontagelinie	128
8.	Zusammenfassung und Ausblick	130
8.1	Erreichte Ziele der vorliegenden Arbeit	130
8.2	Möglichkeiten der Fortführung und Weiterentwicklungen	132
9.	Literaturverzeichnis	135
9.1	Quellen	135
9.2	Verwendete Software	148
10.	Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	149
10.1	Formelzeichen	149
10.2	Abkürzungen	155

# 1. Defizite bei der Demontageplanung

## 1.1 Entwicklungen in der Demontageplanung

Die Erkenntnis für die zwingende Notwendigkeit der Ressourcenschonung ist inzwischen, in unterschiedlicher Ausprägung, weltweit im Bewusstsein von Gesellschaft und Industrie verankert. Daraus resultierend ergeben sich in vielen Bereichen starke Bestrebungen, nicht nur bei der Herstellung von Erzeugnissen mit Rohstoffen sorgsam und sparsam umzugehen, sondern auch die Nutzungsphase der Erzeugnisse zu verlängern und nach Ende der Nutzungsphase die Alterzeugnisse in unterschiedlicher Weise, ganz oder teilweise, weiterhin als Ressource zu nutzen. Die Behandlung von Erzeugnissen während und nach der Nutzungsphase erfolgt in Verwertungsunternehmen, in Reparaturbetrieben oder allgemein im Recyclingbereich. Die Auflösung der Erzeugnisstruktur erfolgt, abgesehen von verfahrenstechnischen Vorgehensweisen, immer durch Demontage.

Demontagevorgänge sind ein wesentlicher Bestandteil von Prozessen im Bereich des Recyclings von Alterzeugnissen sowie in der Wartung, Inspektion und Instandsetzung (DIN 31051:2012-03, 2012) während der Erzeugnisnutzung. Das Aufkommen von Alterzeugnissen, die dem Recycling zugeführt werden bzw. hinsichtlich der Wieder- und Weiterverwendung geprüft werden, nimmt seit Jahren aufgrund der fortwährenden Entwicklung und Nutzung von hochtechnisierten Erzeugnissen ständig zu (TRITSCH 1996, S. 1). Daraus resultiert zwangsläufig eine signifikante Verknappung der Rohstoffe für die Fertigung neuer Erzeugnisse.

Insbesondere manuell durchgeführte, zerstörungsfreie Demontagevorgängen sind aufgrund der hohen Vielfalt von Erzeugnissen und stochastischen Einflüssen häufig durch eine geringe Wertschöpfung und durch hohen Personaleinsatz gekennzeichnet (SPUR 1996, S. 428). Auch aus diesem Grund ist vor allem im Bereich des

Recyclings die Planung von Demontageprozessen ein wichtiger Bestandteil für eine effiziente, wirtschaftliche Durchführung (MÜLLER, WESSELMANN 2000, S. 159 ff.). Wichtige Bestandteile in der Demontageplanung sind die Ablauf- und Kapazitätsplanung unter Berücksichtigung gesicherter Demontagezeiten, für deren Durchführung rechnerunterstützte Planungsverfahren entwickelt wurden.

Bereits in den Neunziger-Jahren gab es erste Ansätze zur Demontageplanung (KURBEL, RAUTENSTRAUCH 1997, S. 299 ff.). Die Entwicklung von Demontageplanungsverfahren wurde nicht nur aufgrund ökonomischer und ökologischer Gründe vorangetrieben, sondern sie wurde auch aufgrund der auf europäischer Ebene erlassenen Richtlinien notwendig (KURBEL 2005, S. 387 ff.), um den immer anspruchsvolleren Vorgaben der Gesetzgebung, wie z.B. das gerade aktualisierte Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2016), entsprechen zu können.

Erste rechnerunterstützte Verfahren für die Demontage stellten beispielsweise KURBEL, SCHNEIDER und ZYADEH (1996) sowie SCHILLER (1998) vor. Mit diesen Verfahren konnten die erforderlichen Grunddaten (bzgl. Komponenten, Verbindungselemente, Stoffe, Aufbaustruktur usw.) eines zu demontierenden Erzeugnisses erfasst werden, um es Demontageplanern zu ermöglichen, Demontageprozesse den unterschiedlichen Zielsetzungen entsprechend zu gestalten. In der Folge wurden weitere Konzepte und rechnerunterstützte Verfahren zur Demontageplanung entwickelt, wie diejenigen von HUBER (2001), NAVE (2003) und OHLENDORF (2006). Auf diese Verfahren wird in Kapitel 2 näher eingegangen.

## 1.2 Ausgangssituation und Problemstellung

Die weltweite Verknappung von Materialressourcen zwingt Industrieunternehmen immer mehr dazu, in der Produktion verstärkt Sekundärrohstoffe einzusetzen (HERRMANN 2010, S. 35 ff.). Sekundärrohstoffe sind Rohstoffe, welche aus Alterzeugnissen nach einer gewissen

Nutzungsdauer durch verschiedene Verfahren zurückgewonnen werden. Durch eine die Wertschöpfung des Alterzeugnisses zerstörende, verfahrenstechnische Aufbereitung können zwar Sekundärrohstoffe für die Produktion zur Verfügung gestellt werden. Die Demontage von Alterzeugnissen hat darüber hinaus aber die Zielsetzung, neben Sekundärrohstoffen, die aus nicht wieder verwendbaren Komponenten des Alterzeugnisses gewonnen werden, auch in geeigneter Weise aufbereitete Sekundärerzeugnisse für den erneuten Einsatz zu gewinnen (SCHÄFER 2004, S. 10; NAVE 2003, S. 8). Sekundärerzeugnisse sind in geeigneter Weise für eine erneute Nutzung im Lebenszyklus aufbereitete Teile und Komponenten oder ggf. auch komplette Erzeugnisse. Die Wiederverwendung solcher Komponenten ist insbesondere aus ökologischer Sicht dem Materialrecycling vorzuziehen, da hierbei die in der Produktion des Erzeugnisses erfolgte Wertschöpfung erhalten bleibt (KURBEL 2005, S. 385).

Durch gesetzliche Vorgaben, wie z.B. das erstmals 1994 eingeführte Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG 2011), im Jahr 2012 abgelöst durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2016), gewinnen die Demontage- und Recyclingaktivitäten der Industrieunternehmen seit Jahren auch aus ökonomischer Sicht an Bedeutung (MÖNIG, SCHWARZ 2002, S.15).

Mit der Einführung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ElektroG) im Jahr 2005 wurden die Zielsetzungen der europäischen Richtlinie 2002/96/EG (2003), Stoffkreisläufe zu schließen, Ressourcen zu schonen und Belastungen der Umwelt durch Schadstoffe zu vermeiden, in Deutschland in nationales Recht umgesetzt. Das ElektroG verpflichtet die Hersteller von Elektro(nik)geräten zur Rücknahme der von ihnen produzierten Geräte nach der Gebrauchsphase und deren Rückführung in den Stoffkreislauf (ElektroG 2013, § 10). Nach der Rückgabe von Alterzeugnissen an die Hersteller soll, bevor eine stoffliche Verwertung der Alterzeugnisse in Betracht gezogen wird, insbesondere die Möglichkeit zur Wiederverwendung von einzelnen Komponenten oder des gesamten Alterzeugnisses geprüft und bevorzugt werden (ebd., § 11).

Die Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV) besagt, dass innerhalb der Europäischen Union seit 2006 die Kfz-Hersteller alle von ihnen

hergestellten und in Europa zugelassenen Fahrzeuge zurücknehmen und dem fachgerechten Recycling zuführen müssen (AltfahrzeugV 2015, § 3). Die Zielvorgabe für die Entsorgung aller in einem Jahr abgegebenen Altfahrzeuge beträgt hierbei für die Wiederverwendung und Verwertung seit dem Jahr 2015 mindestens 95 Gewichtsprozent, bezogen auf das durchschnittliche Fahrzeugleergewicht, sowie eine Wiederverwendung und stoffliche Verwertung von mindestens 85 Gewichtsprozent (ebd., § 5).

Die zurzeit aktuellste Entwicklung für alle privat und gewerblich genutzten Elektro- und Elektronikgeräte auf europäischer Ebene ist die im Jahr 2012 in Kraft gesetzte Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte der Europäischen Union. In dieser Richtlinie sind konkrete Vorgaben festgelegt, beginnend mit der Sammlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten bis hin zu deren Recycling. Die Wiederverwendung von Altgeräten soll nicht nur dem Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit dienen, sondern hat aus ökonomischer Sicht auch die Erhaltung von Rohstoffen und somit eine verbesserte Versorgung der Hersteller mit Rohstoffen im Fokus. Der Wiederverwendung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten und deren Komponenten wird jedoch der Vorrang eingeräumt (2012/19/EU, S. 40, Punkt 20). Diese Richtlinie musste in allen EU-Mitgliedsländern bis im Februar 2014 in ein nationales Gesetz umgesetzt werden. In Deutschland wurde diese Auflage jedoch erst Ende 2015 durch die Verabschiedung und Inkraftsetzung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes erfüllt (ElektroG2, 2015).

Die Vorgabe durch die Gesetzgeber und das stark ansteigende Aufkommen von Alterzeugnissen erfordert von den Herstellern, die Demontage von Altgeräten weiterhin zu verbessern. Die Zielsetzung ist hierbei nicht nur die bei der Fertigung verwendeten Rohstoffe in wirtschaftlich sinnvoller Weise als Sekundärrohstoffe oder Sekundärerzeugnisse in den Produktionskreislauf zurückzuführen bzw. die bei der Fertigung eingesetzten Materialien umweltgerecht zu entsorgen, sondern insbesondere auch die gewonnenen Sekundärerzeugnisse dem Lebenszyklus erneut zuzuführen. Zukünftig sollte daher die Demontage von Erzeugnissen in noch stärkerem Ausmaß als bisher einen

industriellen Charakter erhalten, wobei die Planung und Steuerung von wirtschaftlichen Demontageprozessen im Vordergrund stehen muss.

### 1.3 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Planungsverfahren zur Verfügung zu stellen, das auf Basis zeitwirtschaftlicher Daten die Durchführung einer Leistungsabstimmung von arbeitsteiligen Demontagesystemen ermöglicht und die dabei entwickelten Planungslösungen aus wirtschaftlicher Sicht anhand definierter Kriterien miteinander vergleicht und bewertet. Dazu soll unter Berücksichtigung der spezifischen Demontagerestriktionen eine rechnerunterstützte Vorgehensweise für zu planende Demontagesysteme entwickelt werden.

Ausgangspunkt einer solchen Planung ist die detaillierte Beschreibung der Demontageaufgabe, bei der die Demontageablaufstruktur für das zu demontierende Alterzeugnis festgelegt wird. Für die Abbildung der Demontageablaufstruktur wird nachfolgend ein Demontagevorranggraph analog eines Montagevorranggraphen verwendet (ZÜLCH, MÜLLER 2001, S. 338 ff.).

Dieses Demontageziel wird unter Berücksichtigung von Demontagevorgangszeiten, Demontagetiefe, Auslastung von Demontagestationen und insbesondere auch durch die bei der Demontage erzielte Wertschöpfung zu erreichen versucht. Hierzu werden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich manuelle Demontagesysteme betrachtet.

Für eine detaillierte Planung eines Demontagesystems und um festgelegte Demontageziele zu erreichen, werden die unterschiedlichen Vorgaben in eine Planungsmethodik integriert, um so ein effizientes Demontagesystem zu entwickeln. Das Planungsverfahren soll dabei für klein- und mittelständische Unternehmen ein flexibel einsetzbares Instrument sein, das für unterschiedliche, durch den Planer gestaltbare Zielsetzungen in der Demontageplanung anwendbar ist.

Durch diese Arbeit entsteht ein Verfahren, mit dessen Hilfe Unternehmen, insbesondere Recyclingunternehmen und Verwertungs-

betriebe, anstehende Demontageaufgaben planen und bewerten können. Mit diesem Verfahren kann auch prospektiv geprüft werden, ob sich beabsichtigte Demontagevorhaben mit den in dem Unternehmen verfügbaren Ressourcen in wirtschaftlicher Weise bewältigen lassen.

Mit Hilfe des Verfahrens lassen sich für spezifische Demontageaufgaben mehrere Planungsalternativen entwickeln und vollständig oder teilweise in einem Datenbanksystem ablegen. Dazu können spezifische Demontagedaten für typische Demontagevorgänge oder auch für konkrete Alterzeugnisse im Verfahren gespeichert werden. Auf diese Weise lässt sich im Laufe der Zeit ein Katalog mit Good-Practice-Beispielen entwickeln, der beispielsweise auch online einer größeren Nutzergruppe zur Verfügung gestellt werden kann. Die so hinterlegten Beispiele und Daten können dann auch als Basis für die Planung neuer Demontagevorhaben verwendet werden.

#### 1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Um die in Kapitel 1.3 genannten Ziele zu erreichen, wird in dieser Arbeit in mehreren Schritten vorgegangen (Abb. 1-1). Zunächst werden einige für das Verständnis dieser Arbeit hilfreiche Grundlagen der Demontage, insbesondere auch der Demontageplanung, vorgestellt (Kap. 2). Dabei werden auch die Modellierung der Demontageaufgabe und unterschiedliche Planungsmethoden zur Entwicklung von Demontagesystemen betrachtet.

In Kapitel 3 wird das Konzept des Demontagevorranggraphen vorgestellt, mit dem sich Demontageprozesse für die gesetzte Aufgabenteilung in beliebig detaillierter Weise modellieren lassen, sodass gesetzte oder demontagespezifische Restriktionen im Rahmen der Demontageplanung berücksichtigt werden können.

Zusätzlich zu den modellierten Restriktionen sollen als zentrale Erweiterung des Demontagevorranggraphen auf Basis einer Datenaufnahme entwickelte Zeitbausteine für Demontageteilvorgänge im Demontagevorranggraph abbildbar sein (Kap. 4).

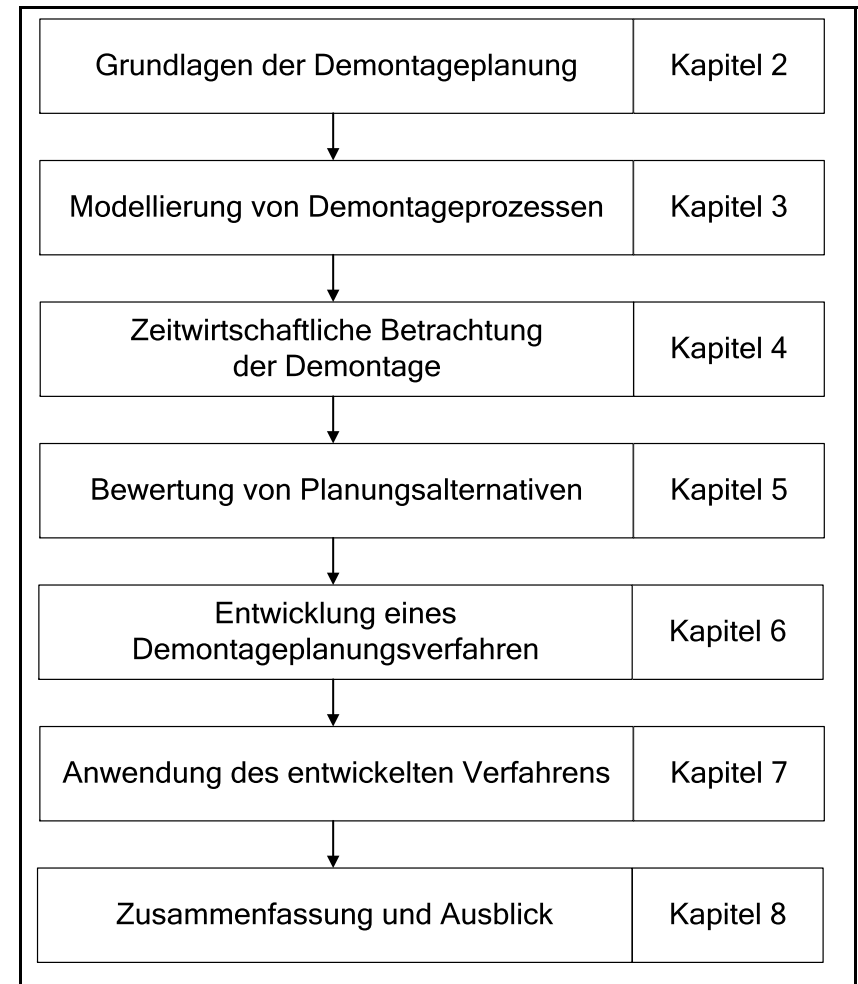


Abb. 1-1: Aufbau der Arbeit

Für die Planung eines Demontagesystems, in dem ein definiertes Demontageprogramm für einen bestimmten Typ von Alterzeugnissen durchgeführt werden soll, wird auf der Grundlage eines Demontagevorranggraphen ein hierauf abgestimmter Planungsalgorithmus entwickelt, der unter Vorgabe von definierten Zielkriterien eine hin-

reichend gute Planungslösung anbietet. Durch iteratives Vorgehen können so auch verschiedene Lösungen entwickelt und bewertet werden.

Die verschiedenen Planungslösungen eines Demontagesystems werden dazu anhand des Zielerreichungsgrades von spezifischen Kriterien bewertet und in eine definierte Ordnung gebracht. Auf diese Weise erhält der Planer eine konkrete Empfehlung für eine zu favorisierende Planungslösung (Kap. 5).

Der Planungsalgorithmus wird in einem hier entwickelten rechnerunterstützten Planungsverfahren implementiert. In Kapitel 6 wird die Konzeption dieses Verfahrens beschrieben.

Im Anschluss wird mithilfe eines in der Demontageabteilung eines Betriebes realen Falls die Anwendbarkeit des Demontageplanungsverfahrens untersucht. Dabei wird dann auch ein Nachweis der Funktionalität der Planungslösung erbracht (Kap. 7).

Abschließend werden in Kapitel 8 die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst. Dazu werden resümierend die Einsatzmöglichkeiten und auch die Grenzen des Planungsverfahrens dargestellt sowie der weitere Forschungsbedarf diskutiert.

## **2. Grundlagen der Demontageplanung**

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen, Begriffe und Definitionen dargelegt sowie beispielhaft einige vorhandene Verfahren der Demontageplanung vorgestellt.

### **2.1 Zielsetzungen der Demontage**

Die Demontage hat grundsätzlich zum Ziel, ein Erzeugnis in seine einzelnen Komponenten zu zerlegen (SCHILLER 1998, S. 25). Gründe hierfür sind beispielsweise die Instandhaltung oder das Recycling des Erzeugnisses.

Bei der Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen von sich in der Nutzungsphase befindlichen Erzeugnissen erfolgt die Demontage in der Regel zerstörungsfrei, d.h. ohne das Erzeugnis zu beschädigen. Beim Recycling von Alterzeugnissen können diese je nach Zielsetzung sowohl durch zerstörende, teilzerstörende als auch zerstörungsfreie Trennverfahren in ihre Komponenten zerlegt werden (TRITSCH 1996, S. 18 ff.). Dabei ist stets eine der Zielsetzungen bzw. eine gesetzliche Vorgabe, einzelne Teile des Alterzeugnisses der Wiederverwendung zuzuführen (STEINHILPER, HUDELMAIER 1993, S. 10 ff; ElektroG2 2015, § 1; KrWG 2016, § 3). Hierbei können einzelne Teile oder Baugruppen zerstörend oder teilzerstörend aus dem Alterzeugnis ausgelöst werden, um andere, wiederverwendbare Komponenten zu gewinnen oder diese im Falle der Entsorgung in so genannte Fraktionen sortiert der stofflichen oder energetischen Verwertung oder der Abfallbeseitigung zuzuführen.

Stoffliche Verwertung zur Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen ist aus ökonomischer Sicht sinnvoll bei Alterzeugnissen, die einen hohen Anteil leicht zu extrahierender homogener Stoffe besitzen, wie z.B. Kunststoffgehäuse bei Elektrogeräten. Eine energetische Verwer-

tung ist dann zu bevorzugen, wenn die Trennung in sortenreine Anteile bauartbedingt zu aufwändig ist oder sortenreine Anteile nicht eindeutig zu identifizieren sind (CRONE, ROSEMANN, MÖRTL 2012, S. 488 ff.).

## 2.2 Begriffe der Demontage

Die Beschreibung von Demontageprozessen basiert im Wesentlichen auf Begriffen der Fertigungstechnik oder leitet sich daraus ab. Maßgeblich definiert werden diese Begriffe durch verschiedene DIN-Normen sowie durch den REFA-Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigsten Begriffe für den Bereich der Demontage beschrieben.

### 2.2.1 Demontevorgang

In DIN 8580:2003-09 (2003) wird der Zustand eines festen Körpers durch seine geometrische Form und seine Stoffeigenschaften definiert. Die innerhalb der Fertigung durchgeführten Veränderungen und Tätigkeiten, welche die Form oder den Stoff eines Körpers von einem definierten Ausgangszustand durch schrittweise Veränderung in einen neuen Zustand (Endzustand) überführen, werden Arbeitsvorgänge genannt (ebd., Abschn. 4.1).

In analoger Weise wird der Begriff Demontevorgang verwendet, hier für das Zerlegen, das Trennen bzw. das Auslösen einer Komponente aus einem Erzeugnis. Die bei einer Demontage notwendigen und am häufigsten vorkommenden Trennvorgänge werden in Kapitel 2.2.3 beschrieben.

### 2.2.2 Demontageablauf

Nach REFA lassen sich in einem Arbeitssystem die wesentlichen Abläufe bei der Arbeitsausführung grundsätzlich in Ablaufarten und Ablaufabschnitte gliedern. Bei der Arbeitsausführung wird durch die im Arbeitssystem tätige Person der Arbeitsgegenstand im Sinne der Arbeitsaufgabe verändert. Die Ablaufarten lassen sich aus der Sicht des Menschen, des Betriebsmittels und des Arbeitsgegenstands betrachten (REFA 1992, S. 20 ff.).

Die Gliederung der Ablaufarten in unterschiedlich große Ablaufabschnitte lässt sich mit einer zeitlichen Betrachtung verbinden und für eine Kapazitätsplanung nutzen, im Weiteren auch für die Steuerung des Arbeitssystems. Ablaufarten aus der Sicht des Menschen sind beispielsweise Haupt- und Nebentätigkeiten, aus der Sicht des Betriebsmittels Haupt- und Nebennutzung sowie für den Arbeitsgegenstand Einwirken, Handhaben, Transportieren usw. (ebd., S. 36 ff.). Die für die geplante Durchführung von Demontagetätigkeiten vorgesehenen Zeiten sind nach REFA Soll-Zeiten. Werden zu diesen Grundzeiten weitere Zeitanteile hinzugerechnet, wie beispielsweise

- Erholungs- und Verteilzeiten für den Menschen sowie
- Verteilzeiten für das Betriebsmittel,

so werden diese nach REFA als Vorgabezeiten bezeichnet (ebd., S. 41 ff.). Bei der zeitlichen Bestimmung von Demontageabläufen lassen sich im Gegensatz zur Montageplanung die Vorgabezeiten nicht rein deterministisch bestimmen, da während der Demontagedurchführung stochastisch auftretende Einflussgrößen zu deutlichen Veränderungen bei der Demontage führen können (SCHILLER 1998, S. 28). Daher empfiehlt sich bei der Demontageplanung die Verwendung von hierfür speziell entwickelten Zeitbausteinen (SCHWARZ, ZÜLCH 2006, S. 442).

Die Gesamtheit aller in einem Demontagesystem durchzuführenden Demontevorgänge lässt sich unter Berücksichtigung der Demontageabläufe aus arbeitsorganisatorischer Sicht in unterschiedlicher Weise strukturieren. Im Fertigungsbereich sind insbesondere in Kleinbetrieben häufig sowohl nach dem Werkstatt- als auch nach dem



Flussprinzip (REFA, 1994, S. 180 ff.) sinnvoll anwendbar und daher entscheidungsrelevant.

### 2.2.3 Demontageverfahren

Die bei der Herstellung eines Erzeugnisses verwendeten Fertigungsverfahren beschreiben die Art und Weise, in welcher der Zusammenhalt eines Erzeugnisses

- geschaffen (Urformen),
- beibehalten (Umformen),
- vermindert (Trennen, Aussondern von Stoffteilchen) oder
- vermehrt (Fügen, Beschichten, Einbringen von Stoffteilchen)

wird (DIN 8580:2003-09, 2003). Das Fertigungsverfahren Trennen enthält Ausprägungen in unterschiedlicher Form, die selbst wiederum in einzelnen DIN-Normen definiert sind:

- Zerteilen (DIN 8588:2013-08, 2013),
- Spanen (DIN 8589-0:2003-09, 2003),
- Abtragen (DIN 8590:2003-09, 2003; DIN 8590:2004-02, 2004),
- Zerlegen (DIN 8591:2003-09, 2003) und
- Reinigen (DIN 8592:2003-09, 2003).

Den Trennverfahren in der Demontage stehen die in der Montage zur Anwendung kommenden Fügeverfahren (DIN 8593:2003-09, 2003) gegenüber. Wie SCHILLER (1998, S. 153 ff.) beschreibt, ist jedoch eine eindeutige Gegenüberstellung von Trenn- und Fügevorgängen nicht möglich, da eine bestimmte Fügeverbindung ggf. durch unterschiedliche Trennvorgänge gelöst werden kann. So können z.B. Schraubverbindungen zerstörungsfrei durch Zerlegen oder durch zerstörende Verfahren getrennt werden, z.B. durch Spanen mit geometrisch bestimmter oder unbestimmter Schneide (SCHILLER 1998, S. 153). Durch Trennverfahren können die Form und Gestalt einzelner Komponenten verändert oder aber vollkommen unbeschädigt getrennt

werden. Sie lassen sich daher grob in drei Verfahren klassifizieren (TRITSCH 1996, S. 18):

- zerstörungsfreie,
- partiell zerstörende und
- zerstörende Verfahren.

Die Demontage ist keine einfache Umkehr der Montage (ZÜLCH, HRDINA, SCHWARZ 2010, S. 543 ff.). Im Gegensatz zur Montage gibt es bei der Demontage von Alterzeugnissen aufgrund der unterschiedlichen Erzeugnisnutzung keinen einheitlichen, definierten Erzeugniszustand. Durch den individuellen Gebrauch eines Erzeugnisses und die unterschiedlichen Einsatzbedingungen während seiner Nutzung ergibt sich, selbst bei identischen Erzeugnissen, eine Vielzahl von möglichen Erzeugniszuständen, die ein deterministisches Vorgehen bei der Demontage erschweren bzw. unmöglich machen (SCHILLER 1998, S. 16 ff.). Die Durchführung einer Demontage, d.h. die Auswahl des anzuwendenden Trennverfahrens, die Auswahl der Demontagehilfsmittel usw., hängt somit immer auch vom Zustand des Alterzeugnisses und dessen Verbindungselementen ab. Dieser Zustand lässt sich mit Hilfe von Einflussgrößen (Verschleiß, Korrosion, Beschädigungen usw.) beschreiben (TRITSCH 1996, S. 18; SCHILLER 1998, S. 28 ff.; ZÜLCH, SCHWARZ 2003, S. 349 ff.).

Resultierend aus den Veränderungen der einzelnen Erzeugnis Komponenten und der sie zusammenhaltenden Verbindungselemente während der Nutzungsdauer ist eine automatisierte und gleichzeitig zerstörungsfreie Erzeugnisdemontage vielfach kaum realisierbar. Insbesondere Verformungen oder Korrosion von Verbindungselementen können dazu führen, dass ursprünglich zerstörungsfrei trennbare Verbindungen nicht mehr oder nur schwer lösbar werden (SCHILLER 1998, S. 17 ff.). In solchen Fällen kommen bei der Demontage spezifische Vorgehensweisen zur Anwendung (z.B. notwendige Hilfsvorgänge, welche das Lösen von Verbindungen vorbereiten), die aber zumeist nur innerhalb einer manuellen Demontage wirtschaftlich sinnvoll umsetzbar sind.

## 2.2.4 Demontageplanung

Unter Planung wird allgemein das systematische Vorgehen bei der Suche und dem Festlegen von Zielen sowie der hierzu notwendigen Aufgaben und einzusetzenden Mitteln verstanden. Hierfür sind aus betrieblicher Sicht wirtschaftliche und organisatorische Ziele zu definieren, aus ablauforganisatorischer Sicht sind die hierzu erforderlichen Aufgaben und deren Reihenfolge festzulegen und im Rahmen der Mittelplanung die für die Durchführung notwendigen Betriebsmittel und Werkzeuge zu bestimmen (REFA 1993a, S. 21).

Die Planungssystematik nach REFA eignet sich allgemein für die Planung komplexer Arbeitssysteme und gliedert sich in sechs Stufen (REFA 1991b, S. 34; BRAUN 1995, S. 26). Die einzelnen Planungsstufen beinhalten diverse Analyse- und Planungsaufgaben, deren Ergebnisse nach jeder Stufe hinsichtlich der Zielsetzung analysiert und bewertet werden können (siehe auch HARTEL, LOTTER 2012, S. 365):

- Ausgangssituation analysieren,
- Ziele festlegen, Aufgaben abgrenzen,
- Arbeitssystem konzipieren (Grobplanung),
- Arbeitssystem detaillieren (Feinplanung),
- Arbeitssystem einführen sowie
- Arbeitssystem einsetzen.

In Bezug auf die Zielsetzung der Demontageplanung wird in dieser Arbeit insbesondere die Grobplanung, untergliedert in Ablauf- und Mittelplanung, betrachtet (vgl. REFA 1991a, S. 25 ff.). Bei der Demontageablaufplanung werden die zu demontierenden Alterzeugnisse zunächst in geeigneter Weise formal dargestellt (BULLINGER, RIETH, EULER 1993, S. 23 ff.) und dabei in Baugruppen und Teile mittels eines Demontagevorranggraphen strukturiert (vgl. Kap. 3). Hierbei werden den einzelnen Komponenten Vorgangsfolgen und Zeitdaten zugeordnet, sodass die logischen und zeitlichen Abläufe der Demontage beschrieben werden können.

Als Nächstes wird das Ablaufprinzip festgelegt, beispielsweise nach dem Flussprinzip, bei dem die Arbeitsplätze oder Stationen in unterschiedlicher Weise ablauforganisatorisch gekoppelt sind (REFA 1994, S. 180). Aus arbeitsorganisatorischen Gründen lässt sich eine Demontageaufgabe grob in Vor-, Haupt- und Enddemontagebereiche untergliedern, um die einzelnen Demontevorgänge ablauforganisatorisch zu entkoppeln (BRAUN 1995, S. 27). Im nächsten Schritt werden die im Demontevorranggraph beschriebenen Demontevorgänge den im System geplanten Arbeitsplätzen zugeordnet und dabei eine Leistungsabstimmung durchgeführt (MÜLLER 2002, S. 105 ff.).

Bei der Mittelplanung werden innerhalb einer Kapazitätsplanung die Betriebsmittel bestimmt, also die Einrichtungen, Anlagen und Geräte, die bei der Demontage zum Einsatz kommen (vgl. EVERSHEIM 1996, S. 7-107 ff.). Weiterhin wird der Personaleinsatzbedarf bestimmt (REFA 1993a, S. 31).

## 2.2.5 Arbeitsorganisatorische Betrachtung von Demontageprozessen

Wie auch in der Ablauforganisation im Fertigungsbereich lassen sich Demontevorgänge i.d.R. ablauforganisatorisch in unterschiedlicher Weise anordnen und so in einzelne Demontageprozesse oder –ablaufabschnitte gliedern. Für die Planung von Demontageprozessen ist aus betriebsorganisatorischer Sicht eine Kapazitätsplanung des Demontagesystems notwendig. In einem Demontagesystem lassen sich hinsichtlich der Durchführung von Demontevorgängen zwei wesentliche Hierarchieebenen definieren (REFA 1991b, S. 180):

- gesamter Demontagebereich (Makro-Arbeitssystem) sowie
- einzelner Demontearbeitsplatz (Mikro-Arbeitssystem).

Beispielsweise wird im Recyclingbereich aus ökonomischen Gründen bei kleinen oder relativ einfach strukturierten Alterzeugnissen die manuelle Demontage häufig vollständig an einem einzelnen Arbeitsplatz durchgeführt.

Bei komplexeren und insbesondere größeren Demontageobjekten oder bei der Demontage von Varianten eines Alterzeugnisses, die in großer Anzahl demontiert werden sollen, empfiehlt sich eine arbeitsteilige Strukturierung des Demontagesystems. Hierbei werden die Alterzeugnisse nicht an einem einzelnen Arbeitsplatz demontiert, sondern über mehrere parallel oder sequenziell angeordnete Demontagestationen in arbeitsteiliger Weise demontiert. Bei dieser Vorgehensweise wird die Demontevorgangsfolge pro Demontagestation festgelegt. In manuellen Demontagesystemen ist dabei anzustreben, den relativ kostenintensiven Personaleinsatz möglichst gering zu halten, d.h. die Anzahl der Demontearbeitsplätze zu minimieren.

Für die graphische Beschreibung der Zuordnung von Demontevorgängen und Mitarbeitern zu Demontearbeitsplätzen in einem gekoppelten Demontagesystem eignet sich das so genannte Kapazitätsfeld (DITTMAYER 1981, S. 37 ff.; BRAUN 1995, S. 36 ff.; MÜLLER 2002, S. 90). In einem Kapazitätsfeld lassen sich die verschiedenen Formen der Arbeitsteilung darstellen (Abb. 2-1).

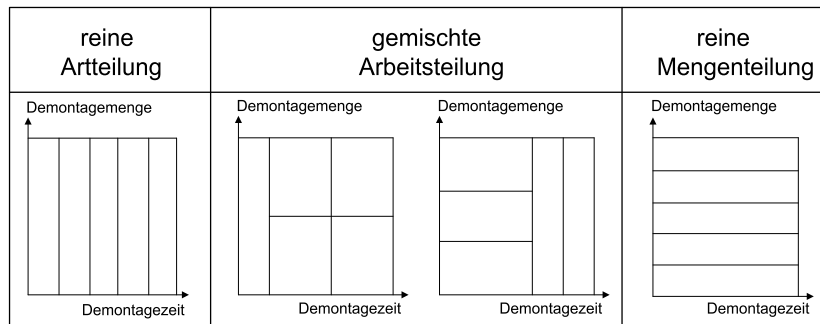


Abb. 2-1: Formen der Arbeitsteilung in einem Demontagesystem (i.A.a. BULLINGER, RIETH, EULER 1993, S. 62; BRAUN 1995, S. 37)

In Abbildung 2-1 sind die Möglichkeiten der Arbeitsteilung beispielhaft für fünf eingesetzte Mitarbeiter dargestellt:

- als reine Artteilung,

- zwei Möglichkeiten für eine gemischte Arbeitsteilung und
- als reine Mengenteilung.

Bei der reinen Artteilung werden Alterzeugnisse an sequenziell angeordneten, miteinander gekoppelten Demontearbeitsplätzen nach einem vorgegebenen Demontageplan demontiert (DOMSCHKE, SCHOLL, VOß 1997, S. 171). Die hierbei durchzuführenden Arbeitstätigkeiten sind für die Mitarbeiter nahezu immer gleichbleibend und daher relativ monoton in ihrer Durchführung. Je nach Qualifikation der Mitarbeiter empfiehlt sich zur Reduktion der sich im Laufe der Zeit möglicherweise einstellenden Monotonie ein planmäßiger oder ein weitgehend selbst organisierter Arbeitsplatzwechsel (REFA 1994, S. 38 ff.; WIENDAHL 1997, S. 44; ZÜLCH, SCHWARZ 2001, S. 359; REPPAHN 2014, S. 83).

Die reine Mengenteilung bietet sich an, wenn in einfacher Weise zu demontierende Alterzeugnisse in großen Mengen in ihre einzelnen Komponenten zerlegt werden sollen. Handelt es sich hierbei um vollständig voneinander entkoppelte Arbeitsplätze, lassen sich aus stochastisch auftretenden Demontagehemmnissen die resultierenden zeitlichen Verzögerungen bei der Demontage eher über den Arbeitstag verteilt ausgleichen.

In gekoppelten Demontagesystemen, in denen beispielsweise ein Förderband als Materialflusssystem verwendet wird, können durch eine geeignete Anordnung der Demontearbeitsplätze oder durch Verzweigungen des Förderbandes mehrere Mitarbeiter parallel die gleichen Demontevorgänge durchführen. In nicht verzweigten Fördersystemen, wie sie für komplexere Alterzeugnisse (wie z.B. Altfahrzeuge) sinnvoll sind, können an einzelnen Demontagestationen auch mehrere Mitarbeiter mit unterschiedlichen Demontageaufgaben eingesetzt werden.

### 2.3 Leistungsabstimmung manueller Demontage-systeme

In einem artteiligen Demontagesystem, in dem die durchzuführenden Demontagevorgänge auf mehrere, sequenziell angeordnete Demontagearbeitsplätzen verteilt werden, müssen die Demontagevorgänge den einzelnen Demontagearbeitsplätzen in zeitlicher Abstimmung, d.h. in Abhängigkeit von den einzelnen Demontagevorgangszeiten und entsprechend der vorhandenen Vorgangsfolgerestriktionen, zugeordnet werden. Diese Vorgehensweise wird als Leistungsabstimmung bezeichnet (LUTZ 1974, S. 18 ff.; BRAUN 1995, S. 28). Das grundsätzliche Ziel der Leistungsabstimmung, auch Abtaktung oder Taktabstimmung genannt, ist es, die den Demontagestationen zugeordneten Arbeitsvorgängen in der Weise aufeinander abzustimmen, dass die einzelnen Demontagestationen möglichst gleichmäßig ausgelastet sind (HACKSTEIN 1989, S. 195; REFA 1994, S. 185).

Für jede der miteinander gekoppelten Demontagearbeitsplätzen steht die jeweils gleiche Arbeitszeit für die jeweils durchzuführenden Arbeitsvorgänge zur Verfügung, die so genannte Taktzeit (DOMSCHKE, SCHOLL, VOß 1997, S. 172). Die Taktzeit ist die benötigte Zeit, um in einer arbeitsteiligen Fertigungslinie (Flussprinzip) eine Mengeneinheit zu erstellen (REFA 1985, S. 282). Die Taktzeit lässt sich in unterschiedlicher Weise ermitteln; formal wird dies in Kapitel 4.7 beschrieben.

Es wird zunächst die Vorgehensweise in Abhängigkeit von einer möglichen Stückzahl von Alterzeugnissen für eine einzelne zur Verfügung stehende Demontagelinie betrachtet. Soll eine bestimmte Stückzahl pro Tag abgearbeitet werden, so ergibt sich die Taktzeit der Demontagelinie aus der Anzahl der insgesamt zu demontierenden Alterzeugnisse geteilt durch die zur Verfügung stehende Betriebszeit. Sollen beispielsweise 420 Alterzeugnisse in einer Arbeitsschicht bei einer effektiv zur Verfügung stehenden Arbeitszeit von 7 Stunden zerlegt werden, beträgt die Taktzeit 60 Sekunden. Diese Taktzeit lässt sich jedoch nur dann realisieren, wenn die Vorgabezeit für den zeitlich größten Demontagevorgang nicht mehr als 60 Sekunden beträgt.

Eine alternative Vorgehensweise bei der Festlegung der Taktzeit ist von den räumlichen Gegebenheiten abhängig. Häufig ist die Anzahl der maximal zur Verfügung stehenden Demontagestationen begrenzt, d.h. die Taktzeit ergibt sich dann aus der für die Demontage insgesamt notwendigen Demontagezeit dividiert durch die Anzahl Demontagestationen. Die relativ kürzeste Taktzeit ergibt sich zwangsläufig, wenn die maximal mögliche Anzahl Demontagestationen bei der Planung berücksichtigt wird. Beispielsweise ergibt sich bei 5 Demontagestationen und einer gesamten Demontagezeit von 10 Minuten rechnerisch eine theoretische Taktzeit von 120 Sekunden und somit pro Arbeitsschicht mit 7 Stunden effektiver Betriebszeit eine Tagesleistung von 210 demontierbaren Alterzeugnissen.

Die bisher beschriebene Berechnungsweise bei der Taktzeitermittlung ist nur unter der Voraussetzung möglich, dass in allen Demontagestationen die Arbeitsvorgänge so zugeordnet werden können, dass jede Demontagestation maximal ausgelastet ist, d.h. wenn sich alle Arbeitsvorgänge in Abhängigkeit von der Erzeugnisstruktur und den Demontagevorgangszeiten ideal auf die Demontagestationen aufteilen lassen. Dies ist in der Praxis erfahrungsgemäß nicht möglich, da die Demontagevorgänge in den einzelnen Demontagestationen inhaltlich nicht beliebig teilbar sind. Aus diesem Grund muss in aller Regel die Taktzeit größer gewählt werden als die theoretisch mögliche Taktzeit. Die Ausbringung pro Arbeitsschicht wird somit geringer und es entstehen in den einzelnen Demontagestationen nicht wertschöpfende Leerzeiten. Durch eine erzeugnisabhängige, eventuell mögliche Umverteilung der Demontagevorgänge zwischen einzelnen Demontagestationen können unter Berücksichtigung der Vorgangsfolgerestriktionen diese Leerzeiten insgesamt minimiert werden (HACKSTEIN 1989, S. 196).

Eine Möglichkeit, um eine Leistungsabstimmung effizienter zu gestalten, ist die Verwendung von Puffern zwischen den miteinander verketteten Demontagestationen. Die Puffer dienen hierbei als Vorrats- oder Ausgleichspuffer und sind ein Mittel zur Entkopplung der einzelnen Demontagestationen (BULLINGER, RIETH, EULER 1993, S. 62). Kurzzeitige Störungen können außerdem durch Puffer

ausgeglichen werden, ohne dass Demontagevorgänge angehalten werden müssen (REFA 1994, S. 185).

## **2.4 Beschaffungslogistik**

Bei der Planung eines Demontagesystems ist eine der Zielsetzungen, ein möglichst hohes Demontagenvolumen bei einer möglichst hohen Kapazitätsauslastung abarbeiten zu können. Hierfür ist es wichtig, für einen definierten Zeitraum das zu erwartende Demontageaufkommen zu prognostizieren bzw. bestimmen zu können (WIENDAHL 1997, S. 94 ff.; HUBER 2001, S. 162 ff.; DEUSE, BUSCH 2012, S. 90). Die Beschaffungslogistik hat zur Aufgabe, die Bereitstellung von Alt-erzeugnissen zu gewährleisten (vgl. STICH, HERING, BROSZE 2013, S. 77).

### **2.4.1 Planungsprozesse der Beschaffungslogistik**

Der Planungsprozess in der Beschaffungslogistik lässt sich in drei wesentliche Bereiche unterteilen (MEYER, SANDERS 2009, S. 59):

- Bedarfs-,
- Bestands- und
- Beschaffungsplanung.

In der Bedarfsplanung wird allgemein der Bedarf für ein Erzeugnis deterministisch bestimmt oder aufgrund empirisch ermittelter Daten prognostiziert. Die Bestandsplanung hat zum Ziel, den Bestand für dieses Erzeugnis festzulegen (SCHUH, BRANDENBURG, CUBER 2012, S. 66). Die Ermittlung der entstehenden Beschaffungskosten (z.B. für Einkauf, Lager, Transport usw.) ist Aufgabe der Beschaffungsplanung (STICH, HERING, BROSZE 2013, S. 78).

In der Fertigung besteht aus wirtschaftlicher Sicht i.d.R. die Zielsetzung, den Betriebsgewinn zu maximieren. Ein Aspekt hierbei sind die Kosten für die in der Produktion benötigten Rohstoffe, deren

Beschaffungskosten stark schwanken können. Ein Beispiel hierfür ist die Stahlproduktion: bei der Herstellung von Stahl wird ein beträchtlicher Anteil aus Recyclingprozessen gewonnener Stahlschrott zugeführt, dessen Preise stark schwankend sind (WV-Stahl 2015). Die bei der Herstellung eines Erzeugnisses benötigte Rohstoffmenge kann auf unterschiedliche Weise festgelegt werden. Eine Möglichkeit hierbei besteht darin, mit Hilfe von Prognoseverfahren die in der Vergangenheit erzielten Produktions- und Absatzzahlen als Maßstab für künftige Entwicklungen am Markt zu nutzen (FANDEL, FISTEK, STÜTZ 2011, S. 95).

Im Recyclingbereich lassen sich solche Marktentwicklungen nur schwer deterministisch bestimmen. Es ist daher schwierig, das Aufkommen bzw. den Rücklauf von Alterzeugnissen und somit die Deckung z.B. des am Markt nachgefragten Materialbedarfs für Sekundärrohstoffe vorherzusagen.

Seit Mitte des Zwanzigsten Jahrhunderts wurden im angelsächsischen Raum rechnerunterstützte Systeme für die Materialbedarfsplanung entwickelt, die Systeme zum so genannten Material Requirement Planning (MRP). Die Materialbedarfsplanung wird hierbei unterschieden in Primär- und Sekundärbedarfsplanung, d.h. es wird der Bedarf an Rohmaterial (Sekundärbedarf) geplant, der notwendig ist, um ein Erzeugnis (Primärbedarf) in einer bestimmten Menge herzustellen. Weiterentwicklungen und Erweiterungen von MRP-Systemen sind die Systeme zum Manufacturing Resource Planning (MRP II) und zum Enterprise Resource Planning (ERP). ERP-Systeme berücksichtigen alle Ressourcen, die bei der Planung eines Erzeugnisses einbezogen werden müssen (KURBEL 2005, S. 135 ff.).

### **2.4.2 Primärbedarfsplanung in der Demontage**

Einige Hersteller stellen nach Markteinführung eines Erzeugnisses zeitnah Ersatzteile für den Austausch defekter Komponenten zur Verfügung. Die hierbei eingesetzte Ersatzteillogistik soll den Bedarf an Ersatzteilen hinsichtlich der zu erwartenden Menge und in einer dabei vom Kunden akzeptierten zeitlichen Verfügbarkeit gewährleisten.

Parallel hierzu entwickelt sich zumeist mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung ein Ersatzteilmarkt für Fremdersatzteile (Ident- und Nachbauteile), Recyclingteile (Austausch- und Aufarbeitungsteile) und Gebraucht-Ersatzteile (Reparatur- und Altteile). Die Unterscheidung zwischen den Originalteilen der Hersteller und den (von außen dem Original fast identisch aussehenden) Nachbauteilen von Zulieferunternehmen ist hierbei häufig sehr schwierig (vgl. SCHUH, STICH, WIENHOLDT 2013, S. 176 ff.).

Die Beschaffung von Ersatzkomponenten erfolgt häufig aufgrund von individuellen Kundenaufträgen. Vor Annahme der Kundenaufträge muss durch das Demontageunternehmen überprüft werden, ob die beauftragte Anzahl Alterzeugnisse für die Beschaffung der Ersatzkomponenten in der notwendigen Anzahl beschafft, demontiert und geliefert werden kann. Dies entspricht einer Primärbedarfsplanung. Die zu klärenden zentralen Fragestellungen sind hierbei u.a. die technische Machbarkeit, die Liefertreue in Abhängigkeit der Durchlaufzeit, die vorliegende Kapazitätsauslastung sowie die mögliche Beschaffungsfrist (KURBEL 2005, S. 208 ff.).

Aufgrund von politischen Initiativen, wie der Einführung der so genannten Abwrackprämie, bei der für die Verschrottung von Altfahrzeugen bei gleichzeitigem Kauf eines Neuwagens eine Prämie bezahlt wurde (HORN 2016), kann es kurz- oder mittelfristig zu einem Überangebot an Alterzeugnissen kommen und daraus resultierend zu Überlastungen von Demontageunternehmen führen. In solchen Fällen sind Zielvorgaben in der Primärbedarfsplanung, z.B. hinsichtlich der Absatzprognose von Sekundärerzeugnissen, nur schwer zu kalkulieren bzw. einzuhalten (HUBER 2002, S. 106 ff.).

### **2.4.3 Sekundärbedarfsplanung in der Demontage**

Die Demontage im Recyclingbereich hat im Wesentlichen zwei Zielsetzungen: zum einen die Erfüllung der gesetzlich vorgeschriebenen Recyclingquoten, zum anderen die Aussicht auf wirtschaftlichen Gewinn. Hierbei existieren zwei wesentliche Märkte: Push- und Pull-Märkte (KURBEL 2005, S. 334 ff.).

Unter einem Push-Markt versteht man einen Verkäufermarkt, in dem Sekundärerzeugnisse auf dem Markt angeboten werden und die Kunden die angebotenen Erzeugnisse zum Kauf auswählen können. Bei einem Pull-Markt gibt der Kunde vor, welche Erzeugnisse er in welcher Qualität haben möchte; die Recyclingunternehmen orientieren sich in diesem Fall an der Nachfrage.

Als ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung auf dem Stahlmarkt zu sehen. Die Preise für Eisen- und Stahlschrott schwankten im Jahr 2004/2005 je nach saisonaler Nachfrage zwischen 127 €/t und 270 €/t. Grund hierfür war die sehr starke Nachfrage nach diesem für die Stahlindustrie wichtigen Sekundärrohstoff in Amerika und Asien (insbesondere in China) sowie der geringer werdende Schrottanfall (THYSSENKRUPP 2006, S. 41). Im Jahr 2010 lag der durchschnittliche Stahlschrottpreis der Sorte 2 bei 289 €/t, am Jahresende 2011 bei 345 €/t. Seitdem sank der durchschnittliche Preis für Stahlschrott kontinuierlich bis auf 245 €/t im Jahr 2014 (WV-STAHL 2015). Dem steht der durchschnittliche Stahlpreis gegenüber, der aus dem Durchschnittspreis verschiedenener Stähle (Baustahl, hochlegierte Stähle usw.) ermittelt wird. Nach einer kurzen Hochpreisphase von ca. 1100 €/t im Sommer 2008 sank der Stahlpreis im Herbst 2008 aufgrund der beginnenden Weltwirtschaftskrise auf ca. 600 €/t, stieg in der Folgezeit wieder kontinuierlich an und lag Ende 2011 bei ungefähr 800 €/t (STAHLBROKER 2011).

Alle Stahlsorten haben als Rohstoff neben Eisenerz einen unterschiedlich hohen Anteil an Stahlschrott. Bei einer jährlichen Stahlproduktion in Deutschland von über 40 Mio. Tonnen mit einem Schrottanteil von über 30 % (WV STAHL 2015) wird die Bedeutung des Recyclings von Stahlschrott und das damit einhergehende wirtschaftliche Interesse von Demontageunternehmen sehr deutlich.

### **2.5 Planungsverfahren im Demontagebereich**

Bereits Mitte der Neunzigerjahre des letzten Jahrhunderts haben KURBEL, SCHNEIDER und ZYADEH (1996) ein rechnerunter-

stütztes Verfahren für den Recyclingbereich vorgestellt, mit dem die für die Planung und Steuerung von Recyclingprozessen erforderlichen Grunddaten erfasst und zur Verfügung gestellt werden sollten. Das von ihnen entwickelte Verfahren *ooRIS* (Objektorientiertes Recycling-Informationssystem) sollte alle für die Demontageplanung notwendigen Informationen bereitstellen, wobei die Planung und Steuerung allerdings auch weiterhin manuell erfolgen sollte. Mit dem vorgestellten Verfahren können Recyclingstrukturen bzw. -graphen für Erzeugnisse erfasst werden; zusätzlich wird vom Verfahren die Entwicklung von sequenziellen Demontearbeitsplänen unterstützt. Ein Modul zur zeitwirtschaftlichen Analyse auf Basis zeitwirtschaftlicher Daten als Voraussetzung für die Demontageplanung ist jedoch nicht vorhanden; auch die Durchführung einer Leistungsabstimmung von Demontagesystemen ist in *ooRIS* nicht vorgesehen.

Von SCHILLER (1998, S. 201 ff.) wurde das *Demontage-Informationssystem DAISY* für manuelle Demontagesysteme entwickelt. Zentrales Element dieses Verfahrens ist die Generierung adaptiver Demontearbeitspläne auf der Basis von stochastischen Demontagenetzwerken (vgl. Kap. 3.2). Ein Demontagenetzwerk beschreibt die Demontage eines Alterzeugnisses einschließlich möglicher Demontageablaufalternativen, die stochastisch durch den Zustand des Alterzeugnisses und die Erfolgswahrscheinlichkeit von Demontevorgängen beeinflusst werden (ZÜLCH, SCHILLER, MÜLLER 1997, S. 386 ff.; SCHILLER 1998, S. 228 ff.).

Die Analyse und Auswertung eines solchen anhand von Probemontagen erstellten Demontagenetzwerks ermöglicht es, unter Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen den erforderlichen Demontagekosten und dem zu erwartender Ertrag der aus dem Alterzeugnis ausgelösten Komponente eine optimierte Demontagesequenz auf Basis des Deckungsbeitrags zu bestimmen (SCHILLER 1998, S. 111 ff.; ZÜLCH, SCHWARZ 2003, S. 348 ff.; HRDINA 2014, S. 67).

Das Informationssystem *IDIS* (International Dismantling Information System) wurde mit Unterstützung der Automobilindustrie zur Erfüllung der mit der Altautoverordnung eingeführten gesetzlichen Auflagen entwickelt, in dem die Fahrzeughersteller den Verwertungs-

betrieben Informationen zur sicheren, wirtschaftlichen und umweltgerechten Entsorgung von Altautos an die Hand geben. Die Entwicklung und Weiterentwicklung des Systems wird vom *IDIS*-Konsortium überwacht und gesteuert, in dem Automobilhersteller aus Europa, Japan, Malaysia, Süd-Korea und den USA vertreten sind.

*IDIS* ist ein für Entsorgungsunternehmen von Altfahrzeugen kostenlos zur Verfügung gestelltes Informationssystem zur Demontage von Altfahrzeugen (HERRMANN 2010, S. 205; MARTENS, GOLDMANN 2016, S. 410). Es stellt in der Version *IDIS 5.36* Fahrzeugdaten für insgesamt 976 Modelle (in 2077 Varianten) von 71 Automarken in 39 Ländern zur Verfügung (IDIS 2015). Diese Fahrzeugdaten werden hinsichtlich der Modelle und Varianten kontinuierlich erweitert. Angeboten werden beispielsweise konkrete Anleitungen, wie einzelne Komponenten ausgelöst werden können, sowie Hinweise, welche Teile und Baugruppen in Anlehnung an die EU-Altautoverordnung eventuell wieder verwertbar sind (wie Quecksilber und Blei in Batterien, elektronische Bauelemente usw.). Die Gliederung in einzelne Bereiche eines Fahrzeugs erleichtert den Zugriff auf die verfügbaren Daten. Diese Bereiche sind beispielsweise:

- Batterie,
- Pyrotechnik,
- Kraftstoffe,
- Klimaanlage,
- Flüssigkeiten,
- Katalysatoren,
- Reifen,
- Zerlegen usw.

Jeder dieser Bereiche enthält eine Übersicht der entsprechenden Komponenten eines bestimmten Fahrzeugs (*IDIS 2015*). Die Durchführung einer Demontageplanung mit integrierter Leistungsabstimmung ist mit diesem Informationssystem allerdings nicht möglich.

Zur Durchführung einer wirtschaftlichen Demontageplanung und -steuerung kommt der Einsatz von ERP-Systemen in Betracht. Grundsätzlich werden beim Einsatz von ERP-Systemen (z.B. das ERP-System *SAP R/3*) die Logistik der Rückführung (Sammlung, Zwischenlagerung usw.) und die Bereitstellung von Alterzeugnissen zur Demontage unter vorwiegend betriebswirtschaftlichen Aspekten geplant. Die für eine optimierte Leistungsabstimmung von Demontagelinien notwendige Bestimmung der Demontagetrennverfahren und -methoden, der Demontagetiefe sowie eine genaue zeitwirtschaftliche Betrachtung von Demontagevorgängen aufgrund gesicherter Demontagevorgangszeiten wird bei der Demontageplanung mit ERP-Systemen jedoch nicht durchgeführt (KURBEL 2006, S. 2 ff.).

Der Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik der Europa-Universität Viadrina in Frankfurt/O. hat ein Informationssystem zur Entscheidungsunterstützung für Entsorgungsunternehmen (*efeu*) entwickelt (KURBEL, SCHOOFF 1998). In erster Linie wird durch dieses Informationssystem die Lösung von spezifischen Planungs- und Entscheidungsaufgaben in spezialisierten Entsorgungsunternehmen unterstützt. Die Zielsetzung der Demontageplanung unter Verwendung von *efeu* ist eine schnelle Bewertung von Demontageaufgaben mit der Zielsetzung der Gewinnung von Ersatzteilen zur Aufbereitung und Wiederverwendung bzw. von Fraktionen zur Rückführung in den Produktionskreislauf. Das Zerlegen eines Alterzeugnisses wird in einer Demontagestruktur abgebildet, in der nicht nur der entsprechende Demontearbeitsplan hinterlegt ist, sondern auch der Anteil einzelner Fraktionen. Eine zeitwirtschaftliche Bewertung von Demontagevorgängen bzw. eine Leistungsabstimmung des Demontagesystems kann mit Hilfe von *efeu* nicht durchgeführt werden, da in diesem Informationssystem überwiegend betriebswirtschaftliche Entscheidungskriterien vorliegen und die für eine Leistungsabstimmung notwendigen Demontagezeiten nicht hinterlegt sind.

In den letzten Jahren bestehen große Anstrengungen, Demontageunternehmen mit Hilfe von Demontageplanungs- und -steuerungssystemen (DPS-Systeme) zu planen und zu steuern. DPS-Systeme lehnen sich hinsichtlich ihrer Terminologie und Funktion im Wesent-

lichen an die konventionellen Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (PPS-Systeme) der Teilefertigung und Montage an.

Im Rahmen eines Ansatzes zur On-Demand-orientierten Demontageplanung auf Basis konventioneller PPS-Systeme betrachtet HUBER die Demontage vorwiegend in organisatorisch-dispositiver Hinsicht (HUBER 2002, S. 1 ff.). Zielsetzung der On-Demand-orientierten Demontageplanung ist die Beschaffung von Alterzeugnissen in einer ausreichenden Menge, welche die zu erwartenden Kundenaufträge, Absatzprognosen und Entsorgungsverpflichtungen erfüllen. Ähnlich wie bei der Demontageplanung mit Hilfe von ERP-Systemen wird die Demontage aufgrund von Erwartungswerten und Vergleichskoeffizienten geplant und nicht aufgrund gesicherter Demontagevorgangszeiten (HUBER 2001, S. 3 ff.).

Von NAVE (2003) wird die Realisierbarkeit eines Verfahrens zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen analysiert. Hierbei werden für die automatisierte Demontage von Bildschirmgeräten durch eine REFA-Zeitaufnahme die Sollzeiten für Demontagevorgänge durch Aufnahme von Ist-Zeiten ermittelt. Diese Ermittlung von Prozesszeiten für automatisierte Demontagevorgänge erfolgt durch die einmalige Zeitaufnahme in einer Demontagezelle. Die zum Vergleich herangezogenen Demontagezeiten einer manuellen Demontage werden mit REFA-Zeitaufnahmebögen (REFA 1994, S. 231) durchgeführt. Vorausgesetzt wird hierbei, dass bei den Alterzeugnissen keine nennenswerten Veränderungen durch die Nutzungsphase vorliegen, sodass stochastische Einflüsse in der Demontageplanung ausgeschlossen werden (NAVE 2003, S. 26 ff.). Bei den von NAVE verwendeten Demontagezeiten für Ausschraubvorgänge werden nutzungs- und alterungsbedingte Einflüsse aufgrund des relativ geringen Aufkommens vernachlässigt, die Zeit für das Ausschrauben wird maßgeblich über die Schraubenlänge definiert (NAVE 2003, S. 63) und berücksichtigt somit nicht die in der Demontage spezifischen Einflussgrößen aus der Nutzungsphase (Korrosion, Verschmutzung usw.) mit ihren spezifischen Auftretenswahrscheinlichkeiten (ZÜLCH, SCHWARZ 2003, S. 350).



Mit den aufgeführten Planungsverfahren ist eine zeitwirtschaftliche Bewertung von Demontagevorgängen bzw. eine Leistungsabstimmung von manuellen Demontagesystemen nicht möglich, zumal überwiegend betriebswirtschaftliche Kennzahlen zugrunde gelegt werden, um definierte Demontagezustände zu erreichen. Somit sind Demontageplaner mit diesem Verfahren nicht in der Lage, eine hinsichtlich der Zeitwirtschaft belastbare Leistungsabstimmung durchzuführen.

Das von OHLENDORF (2006) entwickelte Verfahren *SiDDatAS* (*Simulation Disassembly Data Administration Software*) zur simulationsunterstützten Planung und Bewertung von Demontagesystemen hat zur Zielsetzung, bestehenden Demontagesysteme im Bereich der Elektro(nik)-Alterzeugnisse zu verbessern. Die bei diesem Simulationsverfahren verwendeten Demontagezeiten basieren auf einer Analyse mittels des MTM-2-Verfahrens (REFA 1992, S. 76), das allerdings die spezifischen Einflussgrößen bei der Demontage nicht berücksichtigt. Die mit Hilfe des Verfahrens *SiDDatAS* betrachteten manuellen Demontagesysteme sind zeitlich entkoppelt. Eine mögliche Gliederung in die Bereiche Vor-, Haupt- und Enddemontage wird nicht berücksichtigt (OHLENDORF 2006, S. 134 ff.).

Nicht alle Recycling- bzw. Verwertungsunternehmen sind auf das Recycling von einem bestimmten Typ Alterzeugnis (z.B. Kfz) oder auf eine konkrete Sparte (z.B. Elektroartikel) spezialisiert. Sollte die Aufgabe eines Unternehmens darin bestehen, branchenübergreifend bzw. beliebige Alterzeugnisse zu recyceln, sind die zuvor genannten Verfahren für die Durchführung einer detaillierten Leistungsabstimmung von manuellen Demontagesystemen nicht in gleicher Weise geeignet, wie es mit dem in der hier vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahren vorgestellt wird.

### 3. Modellierung von Demontageprozessen

Für die Planung von Demontageprozessen und insbesondere für die Beschreibung der für die Zerlegung eines Alterzeugnisses notwendigen Demontagevorgänge sind grundlegende Kenntnisse über die Erzeugnisstruktur und Detailinformationen über dessen Komponenten sowie über die vorhandenen Verbindungsarten notwendig. Zur vorgangsorientierten Analyse und Darstellung der voneinander abhängigen Demontageprozesse eignen sich in besonderer Weise Graphen (BRAUN 1995, S. 29 ff.). Die in Abhängigkeit von der Zielsetzung der Demontageplanung entwickelten Graphen werden im Folgenden beschrieben, außerdem die Vorgehensweise bei der Zuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen.

#### 3.1 Recyclinggraph

Im Bereich des Erzeugnisrecyclings gibt es in Analogie zu Planungs- und Steuerungssystemen in der Produktion Ansätze zur Entwicklung von rechnerunterstützten Recyclingplanungs- und -steuerungssystemen (RPS-Systeme). Zur Darstellung der Erzeugnisstruktur verwenden KURBEL, SCHNEIDER und SCHOOF (1995, S. 160 ff.) auf Basis von Informationen über stoffliche und technische Daten eines Alterzeugnisses einen so genannten Recyclinggraphen.

Die Elemente eines Recyclinggraphen sind im Wesentlichen Teile- und Verbindungsknoten. Die im Alterzeugnis vorhandenen Teile werden als Teileknoten dargestellt, die beim Fügen eingesetzten Verbindungselemente als Verbindungsknoten. Diese Beschreibung dient zu einer groben Strukturierung des Alterzeugnisses hinsichtlich seiner Komponenten. Anhand von Konstruktionsplänen, vorhandenem

Erfahrungswissen von Mitarbeitern und durchgeführten Probedemonstrationen wird dabei die Alterzeugnisstruktur unter Verwendung der in Abbildung 3-1 dargestellten Elemente in einem Recyclinggraphen abgebildet (Abb. 3-2).

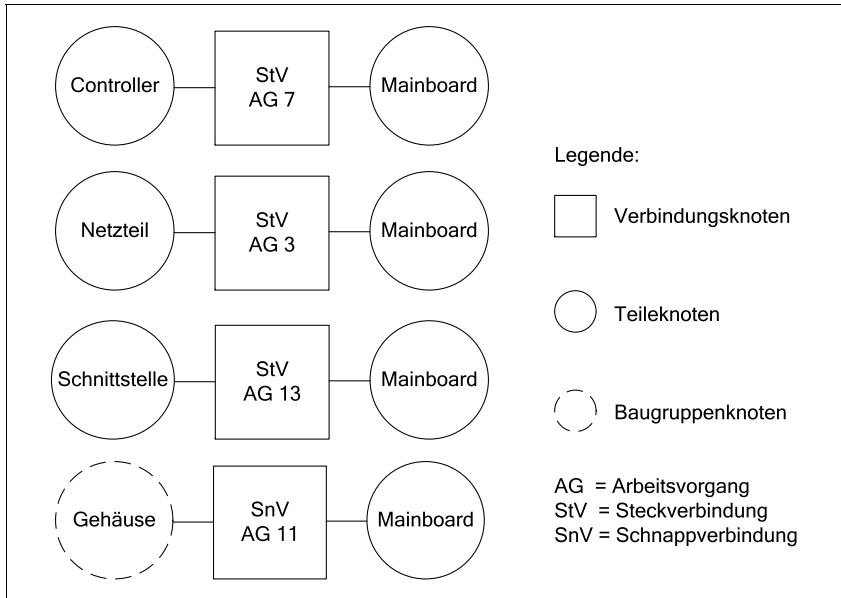


Abb. 3-1: Ausschnitt aus einem Recyclinggraph für einen PC (nach KURBEL, SCHNEIDER, SCHOOF 1995, S. 166)

Durch Auflösen der Verbindungen zwischen einzelnen Teileknoten wird ersichtlich, welche Baugruppen bzw. Teile in welcher Reihenfolge aus dem Alterzeugnis herausgelöst werden können. Der Detaillierungsgrad der Darstellung eines Alterzeugnisses kann entsprechend der Planungsaufgabe variiert werden. Durch eine sinnvolle Zusammenfassung von mehreren Teileknoten werden Baugruppen festgelegt, die im Recyclinggraph jedoch nur als einzelne Teileknoten dargestellt werden (z.B. Netzteil eines Elektrogerätes).

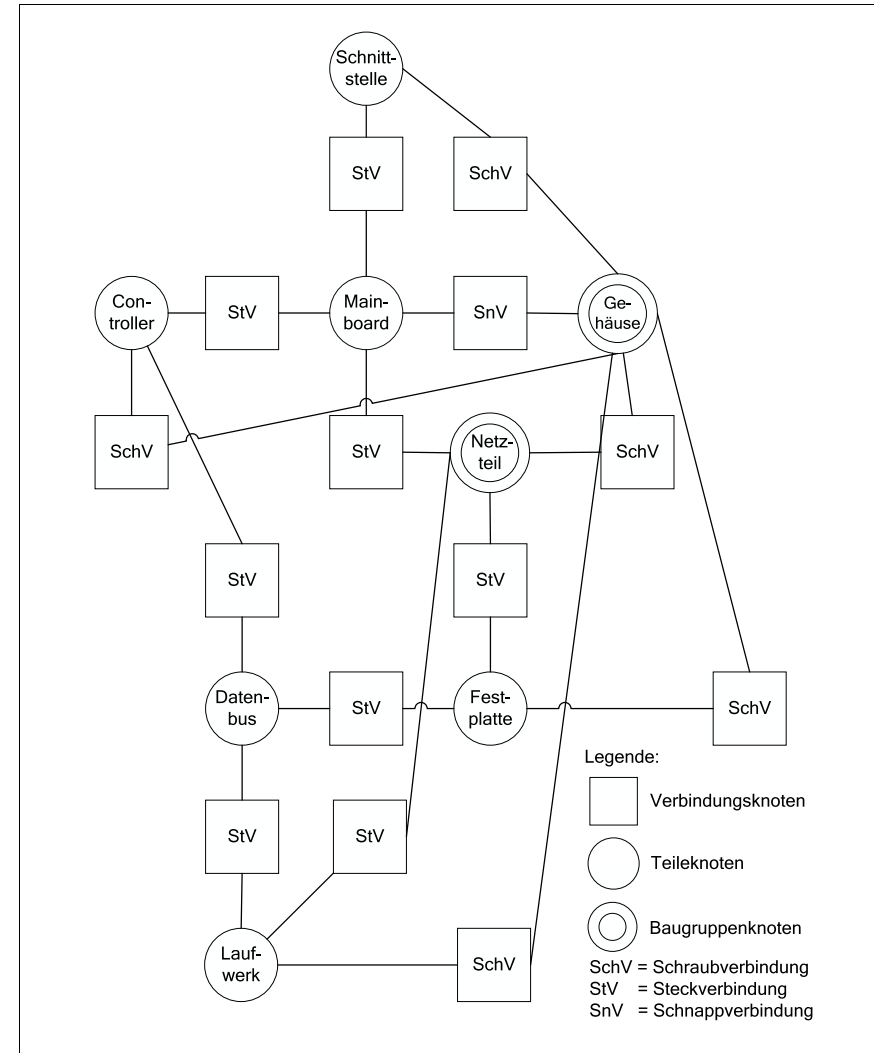


Abb. 3-2: Beispiel eines Recyclinggraphen für einen PC (Quelle: KURBEL, SCHNEIDER, SCHOOF 1995, S. 167)

Diese Vorgehensweise vereinfacht die Demontageplanung erheblich, insbesondere wenn die herausgelösten Teile anderen Demontagesystemen zugeführt werden sollen, in denen alternative Recyclingmethoden zur Anwendung kommen, wie z.B. die stoffliche Verwertung oder Wiederverwendung von Sekundärerzeugnissen.

### 3.2 Verbindungsgraph

SCHILLER (1998, S. 173) verwendet zur Beschreibung der bestehenden Verbindungen zwischen Komponenten eines Alterzeugnisses sowie von möglichen Trennvorgängen in Anlehnung an BOURJAULT (1984) einen Verbindungsgraphen, dessen Aufbauprinzip in Abbildung 3-3 beispielhaft dargestellt ist.

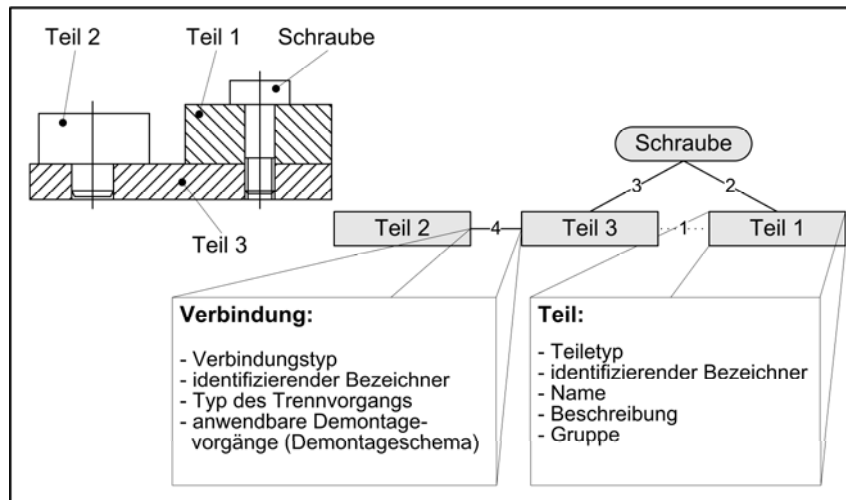


Abb. 3-3: Beispiel eines Verbindungsgraphen (Quelle: SCHILLER 1998, S. 173)

Bei der Demontage von Alterzeugnissen stellt die Verfügbarkeit von Alterzeugnisdaten ein besonderes Problem dar. Erfahrungsgemäß

liegen in den meisten Demontageunternehmen für viele Alterzeugnisse keine Konstruktionspläne vor, die einen detaillierten Aufschluss über vorhandene Teile, die Verbindungsarten zwischen diesen sowie über das verwendete Material ermöglichen. Die Ermittlung der einzelnen Demontagevorgänge und deren Beschreibung daher bei fehlenden Informationen aufgrund von durchgeführten Probedemontagen erfolgen (vgl. SCHILLER 1998, S. 167; HUBER 2001, S. 143).

Mit dem von SCHILLER entwickelten *Demontage-Informationssystem (DAISY)* kann anhand von mehreren Probedemontagen ein komplexer, statischer Verbindungsgraph erstellt werden (Abb. 3-4).

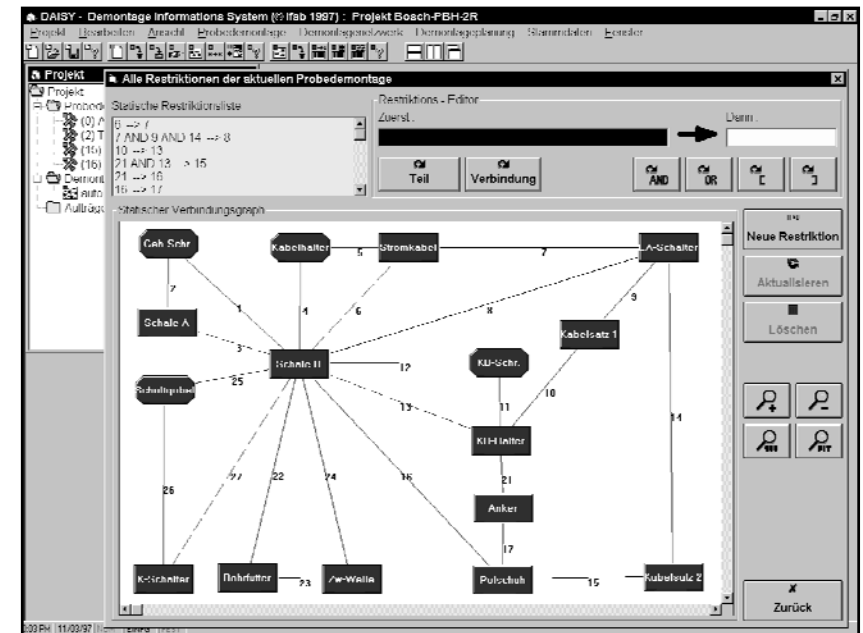


Abb. 3-4: Verbindungsgraph eines Bohrhammers (Quelle: SCHILLER 1998, S. 226)

Nach erfolgter Beschreibung der Alterzeugnisstruktur mittels des Verbindungsgraphen werden die Daten an das von SCHILLER entwickelte Stochastische Demontagenetzwerk (SDN) übergeben. Mit

diesem *SDN* lassen sich die Erzeugnisstruktur in den wesentlichen Komponenten, die möglichen Demontagevorgänge und die stochastisch auftretenden Demontageeinflussgrößen modellieren (Abb. 3-4).

Durch die Analyse und Auswertung der *SDN* können mit diesem Verfahren hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Aufwand und Ertrag optimierte Demontageabläufe bestimmt werden. Die Ermittlung der Demontagesequenzen erfolgt dabei auf der Basis einer Deckungsbeitragsrechnung, in der einerseits die erzielbaren Erlöse für die demontierten Baugruppen und Teile und andererseits die erforderlichen Demontagekosten einfließen (SCHILLER 1998, S. 228 ff.).

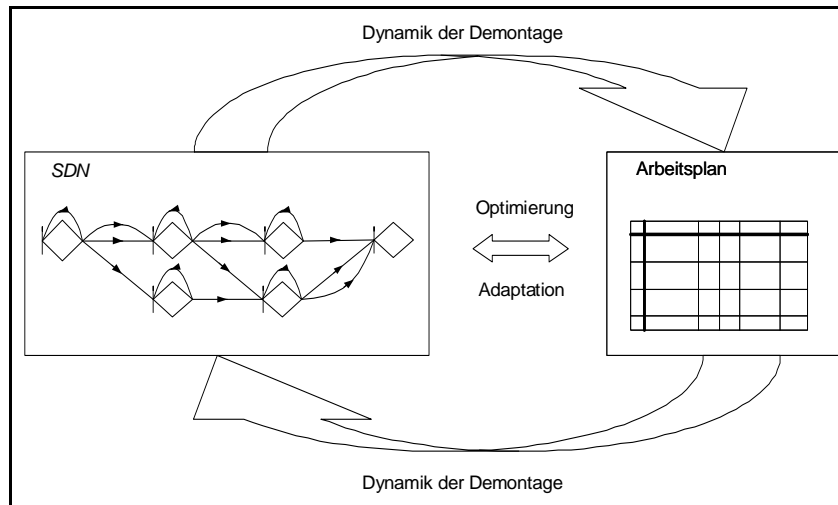


Abb. 3-5: Prinzip der adaptiv-dynamischen Optimierung (Quelle: HRDINA 2014, S. 40)

Während der Durchführung der Demontagen wird der Demontage-Mitarbeiter durch einen vom *DAISY* zur Verfügung gestellten Arbeitsplan angeleitet bzw. unterstützt. Hierbei besteht für den Mitarbeiter die Möglichkeit, eventuell auftretende Abweichungen der Arbeitsanweisungen oder fehlende demontagespezifische Daten interaktiv in das System einzugeben. Durch *DAISY* erfolgt eine adaptiv-dynamische Optimierung des Arbeitsplans (Abb. 3-5), d.h. dem Mitarbeiter

wird bei Bedarf ein modifizierter Arbeitsplan, beispielsweise mit einer neuen Demontagevorgangsfolge, zur Verfügung gestellt (SCHILLER 1998, S. 204; HRDINA 2014, S. 40 ff.).

### 3.3 Zerlegungsgraph

TRITSCH (1996, S. 63 ff.) sowie McGOVERN und GUPTA (2011, S. 65 ff.) verwenden zur Modellierung eines Demontageprozesses einen so genannten Zerlegungsgraphen. In einem AND/OR-Graphen werden dazu die einzelnen Komponenten des Alterzeugnisses durch Zahlen oder Buchstaben repräsentiert (Abb. 3-6).

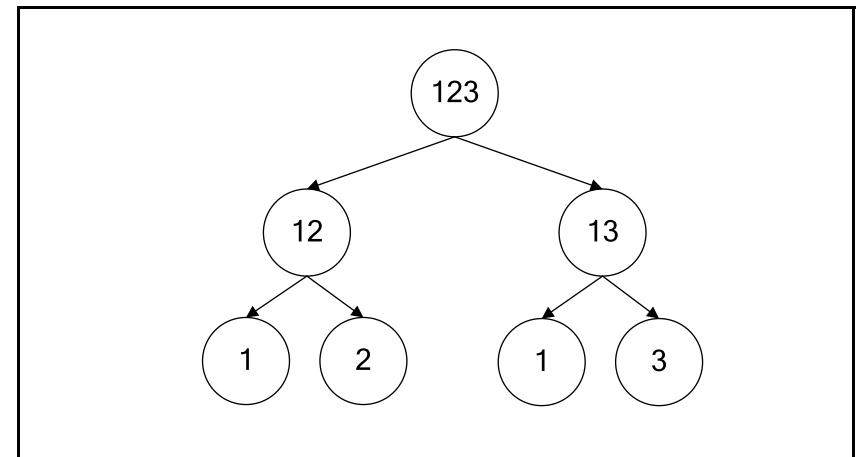


Abb. 3-6: AND/OR-Graph anhand eines aus drei Teilen bestehenden Alterzeugnisses (nach McGOVERN, GUPTA 2011, S. 65)

Auf der obersten Ebene wird ein zu demontierendes Erzeugnis in allen relevanten Baugruppen und Teilen beschrieben. In den folgenden Ebenen werden hierarchisch strukturiert, nach erfolgter Demontage einer einzelnen Komponente, die im Alterzeugnis jeweils noch verbleibenden Komponenten insgesamt angegeben und als Startpunkt für

eine weitere Verzweigung genommen. Ein AND/OR-Graph wird allerdings bei komplexen Alterzeugnissen in der Darstellung relativ schnell unübersichtlich.

Zur Reduktion der Anzahl Demontagevorgänge gliedert TRITSCH (1996, S. 63 ff.) das Alterzeugnis in einzelne Teile und verwendet für die Beschreibung des Demontageprozesses einen Zerlegungsgraphen, in dem die auszulösenden Teile einzelnen Demontageebenen zugeordnet sind (Abb. 3-7). In jeder Ebene werden durch den Planer unter Berücksichtigung der Demontagekosten den zu demontierenden Teilen ein Erlös und ein monetäres Abbruchkriterium zugeordnet. Nach Erreichen eines festgelegten Erlöses wird die Demontage in seinem Verfahren abgebrochen (TRITSCH 1996, S. 79).

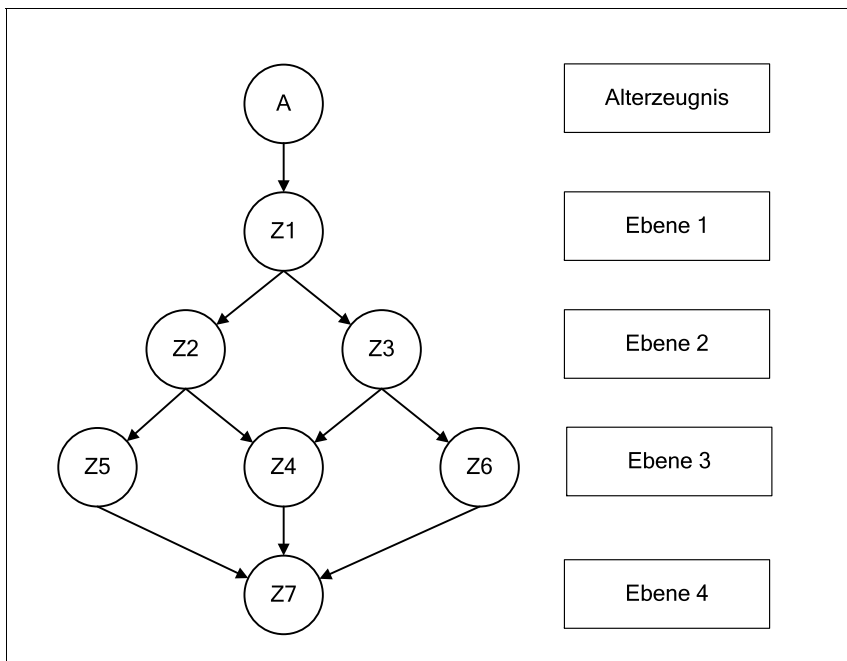


Abb. 3-7: Zerlegungsgraph (nach TRITSCH 1996, S. 79)

### 3.4 Demontagevorranggraph

In der Produktentwicklung werden für die montagegerechte Gestaltung eines Erzeugnisses ausgehend vom kompletten Erzeugnis oder von Konstruktionsplänen die einzelnen Baugruppen sowie deren Funktionsweisen betrachtet und von einem Expertenkreis, bestehend aus Konstrukteuren und Montageplanern, hinsichtlich der montagegerechten Gestaltung analysiert. Ergebnisse hieraus sind beispielsweise Montageablaufnetzpläne (EVERSHEIM 1987, S. 39) oder Prozessgraphen. Als Prozessgraph wird dabei eine als Flussdiagramm exemplarisch dargestellte mögliche Lösung für die Fertigung und Montage eines Erzeugnisses verstanden, die in iterativen Schritten beispielsweise hinsichtlich fertigungstechnischer Zielsetzungen noch verbessert werden kann (MEYER, GRAUER, RITTNER 2009, S. 9).

In der Demontageplanung können in hierzu umgekehrter Art und Weise anhand von ggf. vorhandenen Konstruktionsplänen oder von durchgeführten Probedemontagen Erzeugnisse ebenfalls netzplanartig dokumentiert werden (SCHILLER 1998, S. 47; HUBER 2001, S. 143). Ausgehend von der kompletten Erzeugnisstruktur werden auszulösende Baugruppen bzw. Komponenten identifiziert und Demontagevorgänge in eine zeitlich-logische Vorgangsfolge gebracht. Zur Beschreibung von möglichen Demontagevorgangsfolgen eignet sich in Anlehnung an die Montageplanung die Modellierung in Form eines Demontagevorranggraphen (Abb. 3-8).

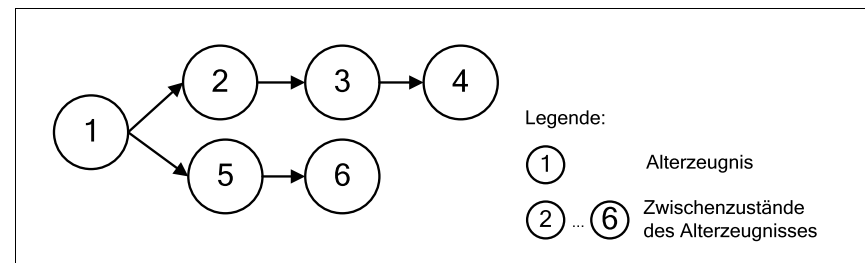


Abb. 3-8: Demontagevorranggraph (i.A.a. LAMBERT, GUPTA 2005, S. 207)

### 3.4.1 Vorgangsfolgerestriktionen

In einem Demontagevorranggraphen *DVG* können durch eine Menge Demotageknoten *MDK* und eine Menge gerichteter Kanten *MDR* die Vorgangsfolgerestriktionen (Anordnungsbeziehungen) zwischen den festgelegten Demontagevorgängen vollständig beschrieben werden. Ein Demontagevorranggraph ist somit wie folgt definiert (vgl. NEUMANN, MORLOCK 2004, S. 177 ff.; MÜLLER 2002, S. 57 ff.):

$$DVG = \{MDK, MDR\} \quad \text{Demontagevorranggraph} \quad (3.1)$$

mit: *MDK* Menge der Demotageknoten/  
-vorgänge  
*MDR* Menge der Vorgangsfolgerestriktionen

In der Menge der Demotageknoten *MDK* sind alle zur vollständigen Demontage eines Alterzeugnisses durchzuführenden Demontagevorgänge *i* enthalten:

$$MDK = \{i \in IN \mid i \leq ADK\} \quad \text{Indexmenge der Demotageknoten} \quad (3.2)$$

mit: *i* Index für Demotagevorgänge  
*ADK* Anzahl Demotagevorgänge

Eine Kante *j* ist die Verbindung zwischen zwei Knoten. Wenn die Kante *j* von einem Knoten ausgehend zu einem anderen Knoten gerichtet ist, so werden die Knoten Anfangs- und Endknoten genannt. Gilt diese Bedingung für alle Knoten in einem Graphen, wird dieser als gerichteter Graph oder auch als Digraph bezeichnet. Ein Vorgängerknoten *i* und ein Nachfolgeknoten *i'* werden als inzident bezeichnet:

$$j = \langle i, i' \rangle \quad \text{Kante zwischen Vorgänger- (3.3) knoten } i \text{ und Nachfolgeknoten } i'$$

Ein Knoten ohne Vorgängerknoten wird als Quelle, ein Knoten ohne Nachfolgeknoten als Senke bezeichnet (NEUMANN, MORLOCK 2004, S. 180; DOMSCHKE u.a. 2015, S. 71 ff.). Für die Menge Vorgangsfolgerestriktionen (allgemein als Anordnungsbeziehungen bezeichnet) der Kanten *MDR* gilt:

$$MDR = \{j \in IN \mid j \leq ADR\} \quad \text{Indexmenge der Vorgangsfolgerestriktionen} \quad (3.4)$$

mit: *j* Index für Vorgangsfolgerestriktionen  
*ADR* Anzahl Vorgangsfolgerestriktionen

Für einen Demontagevorranggraphen wird festgelegt, dass er zyklen- und schleifenfrei ist, also Anfangs- und Endknoten nicht identisch sind. Außerdem dürfen keine Transitionen enthalten sind, d.h. keinen Demontagevorgang beinhalten, der sowohl ein direkter und gleichzeitig auch ein indirekter Vorgänger eines anderen Demontagevorgangs ist (Abb. 3-9; BRAUN 1995, S. 52; MÜLLER 2002, S. 59; NEUMANN, MORLOCK 2004, S. 178; HRDINA 2014, S. 45).

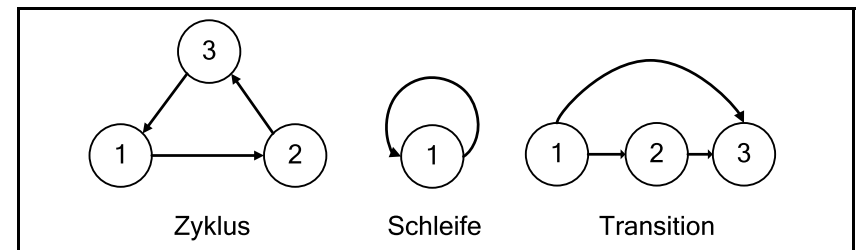


Abb. 3-9: Schleifen, Zyklen und Transitionen in Digraphen (Quelle: HRDINA 2014, S. 45; vgl. BRAUN 1995, S. 52)

### 3.4.2 Definition von Demontagepfaden

Die Menge der Demontagevorgänge, welche über Vorgangsfolgerestriktionen miteinander verbunden sind, lassen sich als Durchlaufplan *DLP* darstellen:

$$DLP = I \times J \quad \text{Durchlaufplan des Demontageprozesses} \quad (3.5)$$

Eine sequentielle Folge von mehreren Demontagevorgängen mit einem Anfangs- und einem Endknoten wird als Demontagepfad *p* bezeichnet und lässt sich durch die darin enthaltenen Demontagevorgänge und Vorgangsfolgerestriktionen wie folgt beschreiben (MÜLLER 2002, S. 82 ff.; NEUMANN, MORLOCK 2004, S. 181; HRDINA 2014, S. 56 ff.; DOMSCHKE u.a. 2015, S. 73):

$$p = \langle i_a, \dots, i_e \rangle \quad \text{Demontagepfad} \quad (3.6)$$

mit:  $i_a$  Anfangsknoten des Pfades *p*  
 $i_e$  Endknoten des Pfades *p*

Weiterhin gilt (MÜLLER 2002, S. 82; NEUMANN, MORLOCK 2004, S. 181):

$$i_a, \langle i_a, i_a' \rangle, i_a', \dots, i_e', \langle i_e', i_e \rangle, i_e \quad \text{Demontagevorgangsfolge} \quad (3.7)$$

mit:  $i_a \neq i_e \wedge \{i_a, \dots, i_e\} = MDK_p \subseteq MDK \wedge$   
 $[i_a, i_a'] \dots [i_e', i_e] = MDR_p \subseteq MDR$

$i_a, i_e'$  Index für einen ausgewählten Anfangs- und Endknoten

$MDK_p$  Menge der Demontagevorgänge im Pfad *p*

$MDR_p$  Menge der Vorgangsfolgerestriktionen im Pfad *p*

Für die Menge aller Pfade *MDP* in einem Demontevorranggraphen *DVG* gilt:

$$MDP = \{ p / p = \langle i_a, \dots, i_e \rangle \text{ ist gültiger Pfad im DVG} \} \quad (3.8)$$

Für den in Abbildung 3-8 dargestellten Demontevorranggraphen müssen für eine komplette Zerlegung des Alterzeugnisses in seine einzelnen Komponenten insgesamt sechs Demontagevorgänge durchgeführt werden. Hierfür sind zwei Demontagepfade abzuarbeiten:

$$MDP = \{ 1, 2 \}$$

$$I = \{ 1, 2, 3, 4, 5, 6 \}$$

$$J = \{ \langle 1, 2 \rangle, \langle 2, 3 \rangle, \langle 3, 4 \rangle, \langle 1, 5 \rangle, \langle 5, 6 \rangle \}$$

Der Knoten *I* ist der Anfangsknoten  $i_a$ , d.h. hierin ist der zum Demontieren des Alterzeugnisses erforderliche erste Demontagevorgang beschrieben, für den es keinen Vorgänger gibt. Nach der Durchführung des ersten Demontagevorgangs gibt es zwei Möglichkeiten der weiteren Demontagevorgangsfolge: Zum Erreichen des Demontageendzustands auf dem (in der Abbildung) oberen Pfad ( $p=1$ ) müssen die Arbeitsvorgänge *1* bis *4* in der angegebenen Vorgangsfolge der Knoten durchgeführt werden:

$$p = 1: \quad p = \langle 1, 2, 3, 4 \rangle$$

Für den unteren Pfad ( $p=2$ ) lautet die Vorgangsfolge der Demontagevorgänge *1*, *5* und *6* in der Reihenfolge:

$$p = 2: \quad p = \langle 1, 5, 6 \rangle$$

In welcher Reihenfolge zum Erreichen des Endzustands, der kompletten Zerlegung des Demontageerzeugnisses, die beiden Pfade abgearbeitet werden, ist hierbei im Sinne des AND/OR-Graphen beliebig wählbar.

### 3.4.3 Bildung disjunkter Teilgraphen

Bei der Demontage von komplexen Alterzeugnissen mit der Zielsetzung, definierte Komponenten in kürzest möglicher Zeit zu demontieren, ist es erforderlich, den Demontagevorranggraph in einzelne Teilgraphen  $TGR$ , zu gliedern. Die Anzahl der Vorgänge und Vorgangsfolgerestriktionen sind in einem Teilgraph wie folgt bestimmt:

$$ADK_p = |MDK_p| \quad \text{Anzahl Demontageknoten des Pfades } p \quad (3.9)$$

$$ADR_p = ADK_p - 1 \quad \text{Anzahl Vorgangsfolgerestriktionen des Pfades } p \quad (3.10)$$

In einem gerichteten Demontagevorranggraph ist aufgrund der vorgeschriebenen Vorgangsfolgerestriktionen innerhalb eines Pfades  $p$  ein Vorgängerknoten  $i_p$  seinem Nachfolgerknoten  $i_p'$  vorgeordnet. Es gilt somit (MÜLLER 2002, S. 83):

$$i_p \prec i_p' \quad \text{Indizes für Demontageknoten des Pfades } p \quad (3.11)$$

mit:  $i_p, i_p' \in MDK_p$

Handelt es sich bei dem Endknoten  $i_e$  im Teilgraph  $TGR$  um einen Vorgang, dessen Ergebnis die Auslösung einer Komponente des Alterzeugnisses ist, die eine besondere (wirtschaftliche) Bedeutung aufweist, so wird dieser Knoten nachfolgend als priorisiert bezeichnet (siehe ausführlicher Kap. 4.7.4). Für diese priorisierten Vorgänge lassen sich disjunkte Teilgraphen  $TGR$  innerhalb des Demontagevorranggraphen definieren:

$$TGR(TDK \times TDR): TDK \subset MDK \wedge TDR \subset MDR \quad (3.12)$$

Teilgraph des  $DVG$

mit:  $TDK$  Menge Demontageknoten im  $TGR$

$TDR$  Menge der Vorgangsfolgerestriktionen des  $TGR$

Dies gilt unter der Bedingung, dass alle im Teilgraphen enthaltenen Pfade  $p$  auch im Demontagevorranggraph enthalten sind. Für einen ausgewählten, disjunkten Teilgraph  $TGR_z$  gilt:

$$TGR_z = TDK_z \times TDR_z \quad \text{ausgewählter Teilgraph} \quad (3.13)$$

mit:  $i \in TDK_z \subset MDK_z$  Menge der Demontagevorgänge in  $TGR_z$

$j \in TDR_z \subset MDR_z$  Menge der Vorgangsfolgerbeziehung in  $TGR_z$

Für die beliebig wählbaren Anfangsknoten  $i_a$  und Endknoten  $i_z$  muss im Teilgraph  $TGR_z$  gelten:

$$MDK_z = TDK_z \quad \text{Menge der Demontagevorgänge im } TGR_z \quad (3.14)$$

$$i_{za}, i_{ze} \in MDK_z \quad \text{Anfangs- und Endknoten des } TGR_z \quad (3.15)$$

$$\text{mit: } \exists i_{za} \in TDK : i_{za} = I \\ \exists i_{ze} \in TDK : i_{ze} = ADK$$

Die disjunkte Unterteilung eines Demontagevorranggraphen in einzelne Teilgraphen und deren sequenzielle Anordnung unter strenger Beachtung der Vorgangsfolgerestriktionen der darin enthaltenen Demontagevorgänge wird als sequenzielle Partitionierung bezeichnet (MÜLLER 2002, S. 84 ff.). Die Menge der gebildeten disjunkten Teilgraphen  $MDT$  lässt sich wie folgt darstellen:



$$MDT = \{z \in IN \mid z \leq ADT\} \text{ Menge disjunkter Teilgraphen im } DVG \quad (3.16)$$

mit:  $ADT$  Anzahl disjunkter Teilgraphen

Die Menge aller disjunkten Teilgraphen bildet in ihrer Gesamtheit den gesamten Demontagevorranggraphen ab und es gilt:

$$\bigcup_{z \in MDT} TGR_z = DVG, \quad \bigcap_{z \in MDT} TGR_z = \emptyset \quad (3.17)$$

Durch die strukturierte Abbildung der Demontagevorgänge in einem Demontagevorranggraphen ist es möglich, alle für das Auslösen einer Komponente notwendigen Demontagevorgänge durch einen Pfad vom Startknoten bis zum Zielknoten zu beschreiben. Der Demontagevorgang, der zum Auslösen dieser Komponente aus dem Alterzeugnis führt, ist zwangsläufig ein Endknoten, hat also keinen direkten Nachfolger.

Bei der Anwendung des Verfahrens in arbeitsteiligen Demontagesystemen und der dabei durchzuführenden Leistungsabstimmung werden unter Beachtung der vorgegebenen Taktzeit oder der vorgegebenen Anzahl Demontagestationen die einzelnen Demontagevorgänge eines ausgewählten Teilgraphen im Demontagesystem den Demontagestationen zugeordnet (vgl. Kap. 2.3), ohne dabei zunächst eine vollständige Auslastung der Demontagestationen anzustreben. Die von dem primär abzuarbeitenden Demontagepfad abzweigenden Teilgraphen (Partitionen) werden im Weiteren dazu benutzt werden, die Auslastung in den Demontagestationen zu erhöhen. Hierauf wird in Kapitel 6.3 im Sinne der Priorisierung von Demontagevorgängen näher eingegangen.

## 4. Zeitwirtschaftliche Betrachtung der Demontage

In diesem Kapitel werden Grundlagen zur Ermittlung von Zeitdaten im Demontagebereich beschrieben. Ebenso wie in der Montageplanung ist die zeitwirtschaftliche Betrachtung von Demontagevorgängen von großer Bedeutung für die Gestaltung und die auftragsgemäße Durchführung von Demontageprozessen (LUCZAK 1998, S. 649).

Zeitwirtschaftliche Daten sind u.a. die Durchführungszeiten für Demontagevorgänge unter Berücksichtigung von diversen Einflussgrößen der abzuarbeitenden Erzeugnisse und der im Demontagesystem vorhandenen Arbeitsbedingungen (REFA 1994, S. 218). Die Zeit für die Durchführung von Demontagevorgängen hängt nicht nur von den eingesetzten Mitarbeitern, den Arbeitsmethoden und den Arbeitsbedingungen ab, sondern auch von weiteren Einflussgrößen, wie z.B. Weglängen, Gewichten und Schwierigkeiten bei der Durchführung (REFA 1992, S. 10; DEUSE, BUSCH 2012, S. 79 ff.).

### 4.1 Zeitbegriffe nach REFA

Die Prozesse beim Zerlegen eines Alterzeugnisses müssen hinsichtlich ihrer Dauer beschrieben werden. Zum einen ist es notwendig, als Grundlage für die Demontageplanung und für die Auslegung des Demontagesystems die Dauer der einzelnen Demontagevorgänge insgesamt zu bestimmen, zum anderen ist eine Leistungsabstimmung von Demontagelinien und eine Personaleinsatzplanung nur auf der Basis verlässlicher Zeitdaten durchführbar (DEUSE, BUSCH 2012, S. 81). Zur Ermittlung und Festlegung von Zeitdaten kann das von REFA entwickelte Standardprogramm zur Datenermittlung heran-

gezogen werden (REFA 1992, S. 11). Für die Planung eines Demontagesystems müssen zunächst die

- Arbeitsaufgaben,
- Arbeitsverfahren/-methoden und
- Arbeitsbedingungen

beschrieben werden. Im nächsten Schritt werden die festgelegten Demontagearbeitsabläufe in einzelne Ablaufabschnitte (Vorgänge, Teilvorgänge usw.) gegliedert. Bei der Planung ist es notwendig, für die zu demontierenden Alterzeugnisse die Bezugsmengen und Einflussgrößen (z.B. Weglängen) zu erfassen.

Im Weiteren müssen die notwendigen Demontagezeiten festgelegt werden. Zur Ermittlung von Zeiten für einzelne Ablaufabschnitte, wie z.B. das Auslösen einer Komponente aus einem Erzeugnis, liegt so eine stringente Methodik vor (Abb. 4-1).

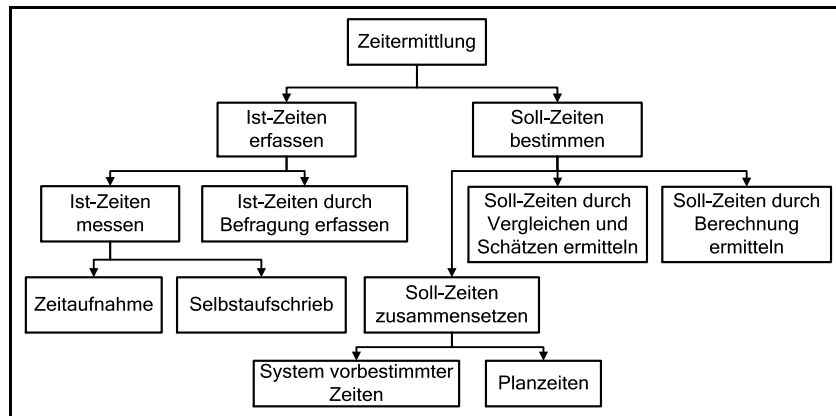


Abb. 4-1: Methoden zur Ermittlung von Ist- und Soll-Zeiten für Ablaufabschnitte  
(Quelle: REFA 1992, S. 61)

Ist-Zeiten sind die für die Durchführung von Arbeitsvorgängen tatsächlich benötigten Zeiten, die durch Zeitaufnahmen oder durch Selbstaufschrieb ermittelt werden können. Aus diesen Ist-Zeiten las-

sen sich unter Berücksichtigung von diversen Einflussgrößen (z.B. Leistungsgrad des ausführenden Mitarbeiters) Soll-Zeiten ableiten, auf deren Basis z.B. die Personaleinsatzplanung für planmäßig ablaufende Tätigkeiten durchgeführt werden kann (REFA 1994, S. 218 ff.). Unter Leistungsgrad versteht man das Verhältnis von Soll-Zeiten zu Ist-Zeiten, angegeben in Prozent:

$$\text{Leistungsgrad} \square \frac{\text{Soll-Zeit}}{\text{Ist-Zeit}} \cdot 100 \%$$

Der Leistungsgrad lässt sich auch über das Verhältnis zwischen der auf Basis der Soll-Zeit zu erwartenden Arbeitsleistung (Bezugsleistung) und der tatsächlich erbrachten Arbeitsleistung definieren, ebenfalls angegeben in Prozent:

$$\text{Leistungsgrad} \square \frac{\text{beobachtete Ist-Leistung}}{\text{vorgestellte Bezugsleistung}} \cdot 100 \%$$

Die tatsächlichen Tätigkeitszeiten hängen von der Intensität und dem Übungsgrad des ausführenden Menschen ab. Liegt die Ist-Zeit unter der Sollzeit bzw. die tatsächliche Arbeitsleistung über der Bezugsleistung, so ist der Leistungsgrad größer als 100 % (REFA 1994, S. 238).

Vorgabezeiten sind Soll-Zeiten für die Durchführung von Arbeitsabläufen und werden für Mensch und Betriebsmittel unterschiedlich betrachtet. Die Vorgabezeiten für den Menschen enthalten Grund-, Erholungs- und Verteilzeiten, für das Betriebsmittel Grund- und Verteilzeiten. Die Vorgabezeit wird weiterhin grundsätzlich unterschieden in auftragsabhängige und auftragsunabhängige Vorgabezeit (REFA 1992, S. 41 ff.; LUCZAK 1998, S. 655). Sofern die Arbeitstätigkeiten eines Mitarbeiters mit Hilfe eines Betriebsmittels durchgeführt werden, berücksichtigt die so genannte Auftragszeit  $T$  neben der Ausführungszeit  $t_a$  auch die für das Rüsten des Betriebsmittels notwendige Zeit  $t_r$ . In der manuellen Demontage steht zunächst die Betrachtung der Zeit je Einheit für den Menschen im Vordergrund, d.h. vorrangig wird zunächst die Zeit für die Demontage eines einzigen Erzeugnisses betrachtet. Für gleichartige Alterzeugnisse kann unter Verwendung

der Auftragsmenge bzw. Losgröße  $m$  die Ausführungszeit  $t_a$  bestimmt werden (Abb. 4-2).

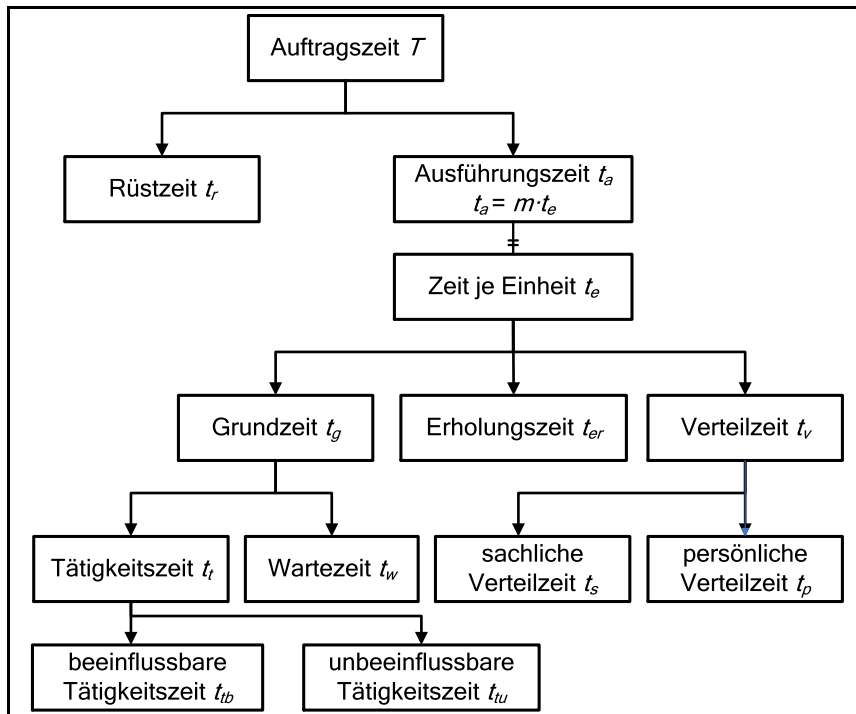


Abb. 4-2: Gliederung der Auftragszeit bezogen auf den ausführenden Menschen  
(Quelle: REFA 1994, S. 221)

Im Weiteren sind dann auch demontagespezifische Einflussgrößen für die nicht immer eindeutig bestimmbare Demontierbarkeit eines Alt-erzeugnisses zu berücksichtigen. Die Rüstzeit ist bei manueller Demontage in der Regel vernachlässigbar; zumindest werden bei den hier betrachteten Prozessen keine automatisierten bzw. teilautomatisierten Demontagesvorgänge angenommen.

Bei den wesentlichen Anteilen der Ausführungszeit  $t_a$  (Grund-, Erholungs- und Verteilzeit,  $t_g$ ,  $t_{er}$  bzw.  $t_v$ ) ist die Grundzeit  $t_g$  beson-

ders zu betrachten. Die Zeit für die beeinflussbare Tätigkeit  $t_{ib}$  kann durch einen Mitarbeiter im Falle einer unvorhergesehenen Störung bei der Demontage ggf. dadurch eingehalten werden, dass er das im Vorfeld festgelegte Demontagetrennverfahren (vgl. Kap. 2.2.3) wechselt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn beim Entfernen des Stromversorgungskabels eines Bohrhammers die Kontakte aufgrund von Korrosion oder Verformung der Schrauben nicht abgeschraubt werden können (zerstörungsfreies Verfahren) und daher mit einer Kneifzange abgetrennt werden (partiell zerstörendes Verfahren).

Im Reparaturbetrieb ist dieses Vorgehen nicht sinnvoll. Hier wird in der Regel im Falle von Korrosion zunächst versucht, durch die Anwendung eines Rostlösemittels die Kontaktschrauben zu lösen. Die hierbei abzuwartende Einwirkzeit ist dann für den ausführenden Mitarbeiter eine Wartezeit  $t_w$ . Sollte diese Vorgehensweise nicht zielführend sein, können die Schrauben beispielsweise auch ausgebohrt werden.

## 4.2 REFA-Zeitaufnahme

Mit einer Zeitaufnahme werden durch Messung und Analyse von Ist-Zeiten unter Berücksichtigung der wesentlichen Ausführungsbedingungen in einem betrachteten Arbeitssystem (Arbeitsmethode, Einflussgrößen, Leistungsgrad usw.) Soll-Zeiten für die Ausführung der Arbeitstätigkeiten ermittelt. Unter Verwendung eines Zeitaufnahmebogens und eines Zeiterfassungsgerätes werden die Ist-Abläufe beobachtet und dokumentiert (REFA 1992, S. 81 ff.).

Für die Planung eines neuen Demontagesystems lassen sich für noch nicht real existierende Arbeitsvorgänge mittels der Methode Vergleichen und Schätzen Planzeiten ermitteln (ebd., S. 279) oder mittels Zeitaufnahmen in einem vergleichbaren Arbeitssystem bestimmen, sofern die betrachteten Arbeitsvorgänge, Arbeitsmethoden und Arbeitsbedingungen ähnlich sind.

Im Einzelnen lassen sich typische Trennverfahren der Demontage zeitlich bewerten, wie z.B.

- Trennen von Schraubverbindungen,
- Trennen von Kabelverbindungen,
- Trennen von Lötverbindungen,
- Auseinandernehmen,
- Handhaben usw.

Im Rahmen eines vom Verfasser durchgeführten Forschungsprojekts, gefördert von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen, wurden Demontagevorgänge in einem Unternehmen analysiert, die im Zusammenhang mit der Reparatur von Elektrowerkzeugen vorkommen (ZÜLCH u.a. 2002). Hierfür kam ein Datenerhebungsbogen zum Einsatz, mit dem nicht nur die einzelnen Demontagevorgangszeiten, sondern auch einzelne Vorgangsfolgerestriktionen und relevante Einflussgrößen erfasst wurden (Abb. 4-3).

Ablaufabschnitte Demontage Bohrmaschine:			
Wieder-, bzw. weiterverwendbare Bauteile:	Gehäuseschale 1+2, Stromkabel,		
Wieder-, bzw. weiterverwertbare Bauteile:	Blechschauben, Schalter, Welle(n), Polschuh, Anker, Bohrfutter		
Demontagebeginn:	zutreffende Zustände unterstreichen, Demontagerihenfolge nummerieren		
<b>Gehäuse öffnen:</b>	( )Schrauben lösen	Schrauben defekt, verschmutzt, korrodiert, anderes	
Zeit:	mit Werkzeug	nicht zerstörend	
Bemerkung:		zerstörend	
<b>Gehäuseschale (GS) 1 abheben:</b>	manuell		Demontageablaufabschnitt-Nr.:
Zeit:	mit Werkzeug	nicht zerstörend	
Bemerkung:		zerstörend	
<b>Bohrfutter aus GS 2 entnehmen:</b>	manuell		Demontageablaufabschnitt-Nr.:
Zeit:	mit Werkzeug		
Bemerkung:			
<b>Kabel durchtrennen und entnehmen:</b>		Zange	Demontageablaufabschnitt-Nr.:
Zeit:		zerstörend	
Bemerkung:			
			Demontageablaufabschnitt-Nr.:

Abb. 4-3: Ausschnitt aus einem Datenerhebungsbogen im Reparaturbereich (nach ZÜLCH u.a. 2002, S. 17)

Der Datenerhebungsbogen beschreibt im Einzelnen die wesentlichen arbeitsorganisatorischen Bedingungen sowie auch die alterzeugnisbedingten Einflussgrößen, wie z.B. der Zustand des zu reparierenden

Elektrogeräts, in diesem Fall einer Elektrobohrmaschine. Weiterhin wurde der Datenerhebungsbogen auch zur Ermittlung von typischen Demontagevorgängen und von Zeiten für durchgeführte Tätigkeiten verwendet, wie

- zu demontierende Teile,
- Demontageverfahren,
- Demontagevorgangsfolge,
- Demontagevorgangszeit,
- Demontagehilfsmittel und
- Alterzeugniszustand.

Im Recyclingbereich des Unternehmens wurde das Zerlegen des Gehäuses eines Trennschleifers unter Verwendung eines Druckluftschraubers an einem Einzelarbeitsplatz analysiert (Abb. 4-4).



Abb. 4-4: Trennung der Gehäuseschale eines Trennschleifers (Quelle: ZÜLCH u.a. 2002, S. 12)

Bei dieser Untersuchung konnte beobachtet werden, dass es für die Handhabung und Positionierung des Alterzeugnisses mit anschließendem Ansetzen des Druckluftschraubers auf die Verbindungsschraube und dem danach folgenden Ausschrauben deutliche Zeitunterschiede gab. Ein Grund hierfür war, dass der Mitarbeiter den Druckluftschrau-

ber grundsätzlich immer länger eingesetzt hatte, als für den eigentlichen Ausschraubvorgang notwendig war. Auf die Nachfrage, warum er dies so durchführt, teilte der Mitarbeiter mit, dass er sicher sein wollte, dass die Schraube vollständig ausgedreht war. Weiterhin war festzustellen, dass im Laufe einer Arbeitsschicht die Konzentration des Mitarbeiters für das Ansetzen des Druckluftschraubers deutlich nachlies.

Die Dauer des anschließenden Auseinandernehmens war insbesondere vom Zustand der Gehäusedichtung abhängig, die bei manchen Geräten aufgrund früherer, nicht sachgemäß durchgeführter Reparaturen während der Nutzungsdauer eingeklebt und nicht, wie vom Hersteller vorgesehen, nur eingelegt worden war.

An diesem Beispiel wird deutlich, dass die Festlegung einer durchschnittlichen Arbeitsleistung in einem Demontagesystem insbesondere auch von typischen Demontageeinflussgrößen abhängt. Die Demontagevorgänge sind nicht bis ins letzte Detail zuverlässig und reproduzierbar zu beschreiben. Weitere Abweichungen bei den Zeitaufnahmen können fehlerhafte Bestimmungen von relevanten Einflussgrößen wie Ablese- oder Auswertungsfehler sein. Solche mögliche Fehlerquellen können durch geeignete Schulung des Zeitaufnehmers reduziert werden (DEUSE, BUSCH 2012, S. 94).

Eine mögliche Vorgehensweise für die Festlegung von Soll-Zeiten besteht darin, aus den für einen Arbeitsvorgang gemessenen Ist-Zeiten einen Mittelwert zu bilden (REFA 1994, S. 63). Dieser Mittelwert kann dann beispielsweise auch für die Leistungsabstimmung einer arbeitsteiligen Demontagelinie verwendet werden.

### 4.3 Multimomentaufnahme

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung verlässlicher Zeitdaten ist der Einsatz einer Multimomentaufnahme. Mit Hilfe der Multimomentaufnahme kann die relative Häufigkeit und daraus abgeleitet die Dauer definierter Demontagevorgänge oder auftretender Störungen innerhalb des Demontagesystems festgestellt werden. Auch stochastisch auf-

tretende, demontagespezifische Ereignisse, wie z.B. die Nicht-Demontierbarkeit eines Alterzeugnisses, lassen sich mittels einer Multimomentaufnahme quantifizieren. Hierfür werden stichprobenartig einzelne Ereignisse beobachtet, wie z.B. das Auftreten derartiger Störung (REFA 1994, S. 250; ARNOLD 1995, S. 192).

Die Durchführung einer Multimomentaufnahme erstreckt sich zumeist über mehrere Tage oder auch Wochen und ergibt daher ein verlässlicheres Abbild der Vorgänge und daraus abgeleitet der Ist-Zeiten im Demontagesystem als die Durchführung einer Ist-Zeit-Aufnahme. Für die Erfassung typischer Vorgänge in einem Recyclingunternehmen wurde vom Verfasser ein Multimomentbogen erstellt (Abb. 4-5).

Ablage-Nr.:	Datum:	Ergebnis:			
		Anzahl	Übertrag	Summe	Anteil
Beobachter:	Uhrzeit:				
	Rundgang-Nr.:				
Arbeitsplatz	Ablaufart/Bezeichnung				
12, Lager	MH Gibo abtransportieren				
	MH Gibo anliefern				
17, Schredder	MH Schreddern				
4, Clearingplatz	MH Sortieren der WE				
	MH Eintragung Gewichte				
	MN Gibo transportieren				
	MN Arbeitsplatz reinigen				
10, Sortierplatz	MH Sortieren demontierter				
	MH Kabel abschneiden				
	MN Gibo transportieren				
	MN Arbeitsplatz reinigen				
	MN Besprechung				

Abb. 4-5: Erhebungsbogen für Multimomentverfahren (nach ZÜLCH u.a. 2002, S. 18)

Neben dem Erfassen von Trenn- und Sortiervorgängen wurden auch nicht-wertschöpfende Tätigkeiten wie der Abtransport von Gitterboxen aufgenommen (ZÜLCH u.a. 2002, S. 18). Die Gitterboxen wurden dazu verwendet, um u.a. Kunststoffgehäuse sortenrein, d.h. nach Fraktionen getrennt, für den Abtransport zur Weiterverwertung

vorzubereiten, was im Recycling eine wertschöpfende Tätigkeit darstellt.

Mit Hilfe von einfachen Hubwagen wurden diese Gitterboxen manuell transportiert. Es sollte für die Neuplanung des Recyclingsystems geklärt werden, ob der Einsatz von elektrisch betriebenen Hubwagen oder von Gabelstaplern die Transportzeiten wesentlich verkürzen würde. Weiterhin sollte geklärt werden, in welchem Umfang nicht demontierbare Alterzeugnisse die Mitarbeiter zu einem Wechsel von geplanten zu alternativen Trennverfahren veranlasst bzw. in welchem Umfang Alterzeugnisse aus dem System ausgeschleust und der energetischen Verwertung zugeführt werden sollten.

Die Auswertung der Daten ergab, dass der Einsatz von Gabelstaplern zu einer wesentlichen Reduktion der Transportzeiten führen würde. Mit Hilfe der Gabelstapler könnten die Gitterboxen gestapelt und schneller innerhalb der Halle transportiert werden. Durch das Stapeln der Gitterboxen würde weiterhin der Platzbedarf für das Lagern der Fraktionen bis zum Abtransport reduziert werden. Die Anzahl nicht-demontierbarer Alterzeugnisse lag im einstelligen Prozentbereich und hatte keinen nennenswerten Einfluss auf die Demontageabläufe.

Die Genauigkeit der ermittelten Ergebnisse lässt sich durch die Erweiterung des Beobachtungszeitraums und damit durch eine daraus resultierende Erhöhung der Stichprobenzahl verbessern. Der möglicherweise verfälschende Einfluss einer Zeitaufnahme auf die Ergebnisse, wie z.B. ein übermotiviertes Arbeiten durch die sichtbare Präsenz des Zeitnehmers, entfällt bei einer Multimomentaufnahme weitgehend (LUCZAK 1998, S. 670).

#### 4.4 Systeme vorbestimmter Zeiten

Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ) sind Verfahren, mit deren Hilfe die Beschreibung und die zeitliche Bewertung von manuellen Arbeitsvorgängen durchgeführt werden können. Durch SvZ werden nur die durch den Menschen voll beeinflussbaren Tätigkeitszeiten  $t_{ib}$  berück-

sichtigt. Erste Arbeitszeitanalysen erfolgten Ende des neunzehnten, Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts durch TAYLOR und GILBRETH. GILBRETH definierte 1910 die so genannten Therbligs (Umkehrung des Namens Gilbreth), einem System zur Beschreibung von einfachen Arbeitsbewegungselementen zur Ermittlung des Zeitbedarfs von kompletten Arbeitsvorgängen. Darauf aufbauend entwickelte einer seiner Mitarbeiter, SEGUR (1924), das erste SvZ. Heute sind noch das WF-Verfahren (Work Factor 1945) und das MTM-Verfahren (Methods-Time Measurement 1948) von Bedeutung, welche in verschiedenen Varianten inzwischen als die maßgeblichen Verfahren der SvZ gelten (REFA 1992, S. 76; LUCZAK 1998, S. 666 ff.; HARTEL, LOTTER 2012, S. 370).

Bei der Anwendung von SvZ werden Bewegungsabläufe innerhalb von Arbeitsvorgängen in einzelne Bewegungselemente unter Berücksichtigung von Einflussgrößen zergliedert und zeitlich quantifiziert. Anhand von Tabellen werden dann den Bewegungselementen Planzeiten zugeordnet und diese über den gesamten Bewegungsablauf aufsummiert (REFA 1992, S. 66 ff.).

Das MTM-Verfahren besteht aus mehreren Varianten. Das MTM-Grundverfahren dient zur Beschreibung von elementaren Bewegungselementen, z.B. Grundbewegungen (Hinlangen, Greifen, Bringen usw.) und weitere Elemente (Drücken, Prüfen usw.). Aus einer MTM-Normzeitwertkarte können zu den jeweiligen Bewegungselementen die dafür vorgegebenen Zeitwerte entnommen werden (MTM 1978, S. 3-2).

Als kleinste Zeiteinheit wird das TMU (Time Measurement Unit) verwendet; 1 TMU entspricht 0,036 Sekunden. Die ermittelten Zeiten gelten für einen durchschnittlich geübten Mitarbeiter und für normale Arbeitsbedingungen. Wesentliche Einflussgrößen bei der Durchführung von Bewegungselementen sind die Bewegungslängen und die Schwierigkeit, mit der eine Stelle bei der Ausführung erreicht werden kann. Umso größer der Weg bei der Ausführung einer Grundbewegung ist, umso länger dauert sie (REFA 1994, S. 286). Die Zielgenauigkeit, d.h. die sensomotorische Kontrolle der Bewegung, hat bei der Bewegungsausführung ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Ausführungszeit.

Zur Datenverdichtung wurden so genannte MTM-Basiswerte entwickelt, beispielsweise für die Bewegungsfolgen Aufnehmen, bestehend aus den Grundbewegungen Hinlangen, Greifen und Loslassen, oder dem Platzieren, bestehend aus den Grundbewegungen Bringen und Fügen. Diese Bewegungsfolgen lassen sich in der Methode MTM-UAS (Universelles Analysiersystem) weiterhin zu Grundvorgängen zusammenfassen, wie z.B. Aufnehmen und Platzieren (DEUSE, BUSCH 2012, S. 102; Abb. 4-6). Bei dieser Vorgehensweise der Datenverdichtung variieren die Zeitdaten durch Rundungen der Werte und z.B. der Einteilung der Bewegungslängen in Klassen vom MTM-Grundverfahren, was jedoch kürzere Analysezeiten ermöglicht (LUCZAK 1998, S. 669).

Aufnehmen und Platzieren	Entfernungsbereich in cm		
	0-20	20-50	50-80
ungefähr	25 TMU	45 TMU	55 TMU
lose	40 TMU	65 TMU	75 TMU
eng	50 TMU	75 TMU	85 TMU

Abb. 4-6: Zeitwerte für Aufnehmen und Platzieren für Gewichte von 1 bis 8 daN (i.A.a. BULLINGER 1986, S. 113)

## 4.5 Einflussgrößen der Demontage

Im Demontagebereich liegen häufig keine verlässlichen Daten über den Aufbau der zu demontierenden Alterzeugnisse vor (SCHILLER 1998, S. 56 ff.). Teilweise sind die Daten nicht in digitaler Form verfügbar, sondern liegen gelegentlich in gedruckter Form in alten Handbüchern oder in Form von Mikrofilmen (Microfiches) vor. Für

neuere Erzeugnisse gibt es in zunehmendem Maße eine internet-basierte Verfügbarkeit von Daten (CRONE, ROSEMAN, MÖRTL 2012, S. 504).

Für eine Demontage im Bereich der Reparatur oder des Recyclings ist der Zustand eines Alterzeugnisses nach dessen Nutzungsphase eine relevante Einflussgröße auf die Durchführbarkeit und die Ausführungszeiten einzelner Demontagevorgänge (STEINHILPER 1993, S. 155 ff.; SCHILLER 1998, S. 28; HUBER 2001, S. 30). Durch Veränderungen an einzelnen Teilen oder Verbindungselementen während der Nutzungsphase müssen während der Demontage alternative Trennvorgänge wählbar sein, was eine Veränderung der geplanten Arbeitsabläufe bedingt und bei der Entwicklung von Planungslösungen berücksichtigt werden sollte, z.B. im schlechtesten Fall die Ausschleusung aus dem Demontagesystem.

In der Demontage können Einflussgrößen in Standardeinflussgrößen und spezielle Einflussgrößen differenziert werden. Standardeinflussgrößen resultieren vorwiegend aus der Nutzungsphase eines Erzeugnisses und bedingen die Wahl des Trennverfahrens. Dies sind beispielsweise

- Korrosionsgrad,
- Verformungsgrad,
- Zugänglichkeit der zu lösenden Verbindung,
- Kraftaufwand beim Lösen einer Verbindung,
- Auswahl des einzusetzenden Werkzeugs usw.

Spezielle Einflussgrößen sind einerseits erzeugnispezifisch aufgrund konstruktiver Vorgaben oder aber recyclingspezifisch. Hier sind zu nennen

- Verbindungsart (2. Schraubteil, Klemmverbindung usw.),
- Kopfform des Verbindungselementes,
- Gewindelänge,
- Entleerungsgrad (z.B. Kraftstoffbehälter),
- Art des zu entleerenden Mediums usw.

Die zeitbestimmenden Einflussgrößen sind für das Abschrauben bzw. Abklemmen im Trennvorgang Lösen von durch An- und Einpressen gefügten Verbindungen in Abbildung 4-7 beispielhaft dargestellt.

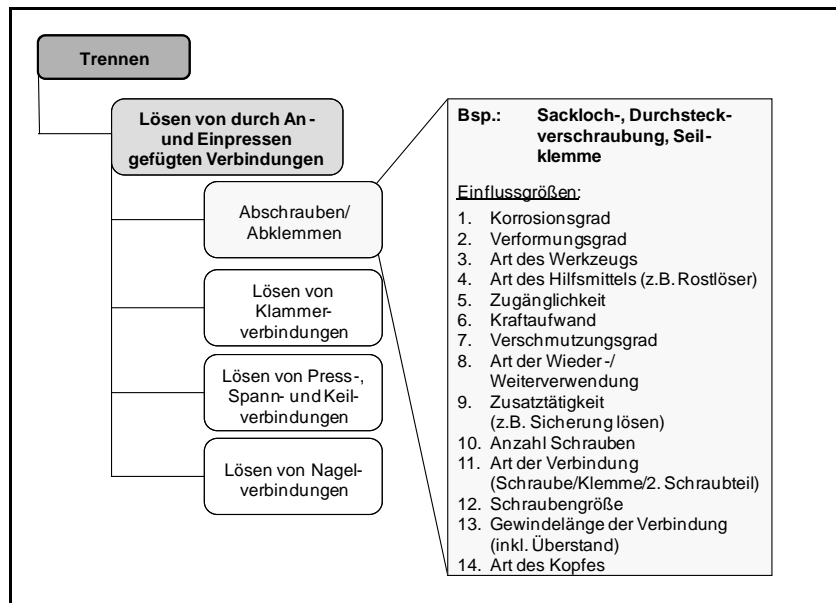


Abb. 4-7: Einflussgrößen beim Trennvorgang „Abschrauben bzw. Abklemmen“ (nach ZÜLCH u.a. 2002, S. 9; i.A.a. SCHILLER 1998, S. 280)

Der Korrosionsgrad wird hierbei qualitativ durch die Angabe der Ausprägung (z.B. stark, mittel, unwesentlich) bewertet, die konstruktiven Merkmale, wie die Anzahl Schrauben, können in quantitativer Weise für die Bestimmung der Dauer des Trennvorgangs berücksichtigt werden.

## 4.6 Demontagezeitbausteine

Die Festlegung von Vorgabezeiten im Demontagebereich erfolgt unter Beachtung der verschiedenen Zeitarten und Einflussgrößen. Die Zusammenführung einzelner Zeitanteile, welche für die Durchführung komplexer Tätigkeiten notwendig sind, führt zu einer Verdichtung von Zeitdaten und resultiert in Demontagezeitbausteinen (ZÜLCH u.a. 2002, S. 26 ff.). Bei der Entwicklung von Zeitbausteinen für manuelle Demontagesysteme kann davon ausgegangen werden, dass bei den Mitarbeitern die zu erwartende körperliche Belastung durch geeignete Gestaltungsmaßnahmen bei der Planung des Arbeitssystems reduziert werden kann.

Auf Basis des MTM-Verfahrens werden zunächst die durch den Menschen beeinflussbaren Demontagetätigkeiten hinsichtlich der Grundbewegungen ermittelt. Die grundsätzliche Vorgehensweise soll am Beispiel der Verwendung eines Werkzeugs bei einem Demontevorgang beschrieben werden. Für die Verwendung eines Werkzeugs in Abhängigkeit von der Zahl der Verwendungsstellen lassen sich elementare Teilbewegungen wie folgt beschreiben:

- Aufnehmen (abhängig von der Greifentfernung zum Werkzeug),
- Ansetzen (abhängig von der Positioniergenauigkeit),
- Werkzeugverwendung (abhängig von der Einsatzdauer) und
- Ablegen des Werkzeugs (abhängig von der Entfernung).

Sofern das Werkzeug an mehreren Stellen eingesetzt wird, werden die Zeiten für das Ansetzen und die Verwendung des Werkzeugs entsprechend der Häufigkeit der Anwendung addiert. Die Einflussgrößen auf die Demontagezeit sind dabei abhängig von deren jeweiliger Ausprägung beim Demontagerzeugnis. Dazu zählen beispielsweise:

- Korrosionsgrad: keine bis starke Korrosion,
- Verformungsgrad: keine bis starke Verformung,
- Werkzeug: Schraubendreher, Druckluftschrauber usw.,
- Zugänglichkeit: gute bis schlechte Zugänglichkeit,



- Kraftaufwand: z.B. 2 daN > Kraftaufwand < 5 daN,
- Schraubentyp: Schlitzschraube, Kreuzschraube usw.,
- Hilfsmittel: kein Hilfsmittel, Zange usw.

Unter Berücksichtigung der demontagespezifischen Einflussgrößen kann so beispielsweise ein Zeitbaustein für den häufig auftretenden Demontagevorgang Schraube lösen gebildet werden (Abb. 4-8).

Demontagevorgang "Schraube lösen"	TMU
Schraubendreher aufnehmen	17
Schraubendreher ansetzen	26
Positionierung	10
Kraftaufwand zum Lösen	11
erste Drehbewegung	52
2. und 3. Drehbewegung (Drehen mit Unterarm)	32
4. bis 7. Drehbewegung (zurückfassen)	24
4. bis 8. Drehbewegung (schrauben)	10
Schraube aufnehmen	10
Schraubendreher und Schraube ablegen	13
<b>Summe Demontagevorgangszeit</b>	<b>205</b>

Abb. 4-8: Demontagezeitbaustein für das manuelle Lösen einer Schraube (i.A.a. ZÜLCH u.a. 2002, S. 115)

Dieser Demontagevorgang lässt sich bei manueller Ausführung wie folgt beschreiben:

- Schraubendreher aufnehmen und ansetzen,
- Schraube mit 8 Drehbewegungen lösen und
- Schraubendreher und Schraube ablegen.

In gleicher Weise wird ein Zeitbaustein für das Ausschrauben unter Verwendung eines Druckluftschraubers gebildet. Diese Ausführung besteht aus den Grundvorgängen (Abb. 4-9):

- Druckluftschrauber aufnehmen und ansetzen,
- Schraube mit Druckluftschrauber lösen,
- Schraube aufnehmen und
- Schraubendreher und Schraube ablegen.

Demontagevorgang "Ausschrauben mit Druckluftschrauber"	TMU
Aufnehmen des Druckluftschraubers	17
Druckluftschrauber ansetzen	31
Gewichtszuschlag	2
Positionieren	10
Auslöser betätigen	4
Schraube aufnehmen	10
Schraube und Druckluftschrauber ablegen	13
<b>Summe Demontagevorgangszeit</b>	<b>87</b>

Abb. 4-9: Demontagezeitbaustein für „Ausschrauben mit Druckluftschrauber“ (i.A.a. ZÜLCH u.a. 2002, S. 118)

Bei dem Demontagevorgang „Ausschrauben mit Druckluftschrauber“ muss zu der im Zeitbaustein bestimmten Zeit noch die Prozesszeit des Druckluftschraubers addiert werden, die bei kurzen Schrauben mit 20 bis 25 TMU veranschlagt werden kann. Somit kann festgestellt werden, dass sich bei Verwendung eines Druckluftschraubers gegenüber der Nutzung eines manuell verwendeten Schraubendrehers, ein ungehinderter Zugang zur Schraube vorausgesetzt, die Demontagevorgangszeit für das gesamte Ausschrauben in etwa halbiert. Die Anteile der Erholungs- und der Verteilzeit (vgl. Kap. 4.1) werden bei der Entwicklung der Zeitbausteine als prozentuale Zeitzuschläge zur Grundzeit hinzugefügt (ZÜLCH u.a. 2002, S. 19).

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren lassen sich auf Basis des zuvor beschriebenen Vorgehens weitere verdichtete Zeitbausteine für standardisierte Demontagevorgänge erstellen (siehe

Kap. 6). Dies können beispielsweise Demontagezeitbausteine für das Demontieren von Elektrowerkzeuggehäusen oder für die Demontage von Kunststoffverkleidungen im Fahrzeugbereich sein, die üblicherweise hinsichtlich des Anbaus am Fahrzeug sehr ähnlich sind. Diese Zeitbausteine lassen sich auch mit einem im Unternehmen oder aufgrund von tariflichen Regelungen festgelegten Zeitzuschläge für die Erholungszeit und die Verteilzeit versehen. Durch den Planer können diese Zeitbausteine für das Auslösen von spezifischen Komponenten aus einem bestimmten Alterzeugnis in einer Datenbank hinterlegt werden. Für das Auslösen ähnlicher Komponenten aus anderen Alterzeugnissen bzw. deren Modellvarianten können diese Zeitbausteine sukzessive modifiziert werden.

## 4.7 Leistungsabstimmung einer Demontagelinie

Zur Durchführung einer Leistungsabstimmung müssen die durchzuführenden Tätigkeiten für das Auslösen einzelner Komponenten aus dem Alterzeugnis einzelnen Demontagestationen zugeordnet werden. Eine Leistungsabstimmung sollte derart durchgeführt werden, dass eine möglichst hohe und dabei gleichmäßige Auslastung auf allen Demontagestationen resultiert (DEUSE, BUSCH 2012, S. 91). In Abhängigkeit vom Kapazitätsbedarf für jeden zu demontierenden Alterzeugnistyp und von der Anzahl der insgesamt zu demontierenden Alterzeugnisse pro Zeiteinheit kann die Zuordnung auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen: entweder in Abhängigkeit von einer vorgegebenen Taktzeit oder von einer festgelegten Anzahl Demontagestationen (Kap. 2.3). Bei beiden Vorgehensweisen ist es gleichermaßen die Zielsetzung, den an den Demontagestationen zur Verfügung gestellten Kapazitätsbestand möglichst vollständig zu nutzen (REFA 1991b, S. 192 ff.).

### 4.7.1 Anzahl Demontagestationen

Eine manuelle, arbeitsteilig strukturierte Demontagelinie enthält eine Anzahl Demontagestationen, die im Rahmen dieser Arbeit mit einem Mitarbeiter besetzt sind. Jeder Demontagestation werden alle im Demontagevorranggraph abgebildeten Demontevorgänge zugeordnet. Die Menge der Demontagestationen wird beschrieben als:

$$D = \{ d \in \mathbb{N} \mid d \leq ADS \} \quad \begin{array}{l} \text{Indexmenge und Index} \\ \text{für Demontagestationen} \end{array} \quad (4.1)$$

mit:  $ADS$  Anzahl Demontagestationen

Die Zuordnung von Demontevorgängen zu Demontagestationen lässt sich wie folgt als Abbildung beschreiben:

$$i \in MDK \rightarrow d \in D \quad \begin{array}{l} \text{Zuordnung von Demontevorgängen zu} \\ \text{Demontagestationen} \end{array} \quad (4.2)$$

$$MDK_d = \{ i \in MDK \mid i \text{ ist } d \text{ zugeordnet} \} \quad (4.3)$$

Menge der Demontevorgänge in Demontagestation  $d$

mit:

$$\bigcup_{d \in D} MDK_d = MDK, \quad \bigcap_{d \in D} MDK_d = \emptyset \quad (4.4)$$

Bedingung für vollständige Zuordnung

Für die an einer Demontagestation  $d$  zur Durchführung der ihr zugeordneten Demontevorgänge benötigte Zeit  $t_d$  wird festgelegt als die Summe der ihr zugeordneten Demontevorgangszeiten  $t_i$ :

$$t_d = \sum_{i \in MDK_d} t_i \quad \begin{array}{l} \text{Demontevorgangszeit} \\ \text{in der Demontagestation } d \end{array} \quad (4.5)$$

### 4.7.2 Auslastung der Demontagestationen

Aus wirtschaftlicher Sicht ist anzustrebend, dass die Auslastung  $AUS_d$  einer Demontagestation  $d$  möglichst hoch ist und sollte im Idealfall 100 % betragen:

$$AUS_d = \frac{t_d}{TAZ} \cdot 100\% \quad \text{Auslastung der Demontagestation } d \quad (4.6)$$

Die Taktzeit  $TAZ$  ist gleichbedeutend mit der oberen zeitlichen Begrenzung für die Summe der Demontagevorgangszeiten  $t_d$  der einzelnen Demontagevorgänge, die dieser Demontagestation zugeordnet werden (DEUSE, BUSCH 2012, S. 91). Die mittlere Auslastung eines Demontagesystems sollte ebenfalls insgesamt möglichst hoch sein (SCHUH, STICH 2013, S. 29).

### 4.7.3 Bestimmung der Taktzeit

Für die Festlegung der Taktzeit ist der Kapazitätsbedarf pro Zeiteinheit (i.d.R. eine Schicht) zu bestimmen. Nach REFA (1991b, S. 224) lässt sich der Kapazitätsbedarf aus dem zeitlichen Auftragsbedarf des Menschen  $C_{MA}$  bestimmen (vgl. HRDINA 2014, S. 70 ff.), d.h. zahlenmäßig ist dies die Anzahl Mitarbeiter, die zur Erfüllung der gesamten Demontageaufgabe benötigt werden. Die nach REFA weiterhin additiv zu berücksichtigenden zeitlichen Zusatzbedarfe des Menschen  $C_{MZ}$  werden bei dem hier gewählten Ansatz in den Demontagezeitbausteinen berücksichtigt (Kap. 4.6). Im Weiteren wird von Demontagestationen ausgegangen, die jeweils mit nur einem Mitarbeiter besetzt sind, so dass der Kapazitätsbedarf hier mit der Summe der Demontagevorgangszeiten in den Demontagestationen gleichgesetzt werden kann. Die Taktzeit  $TAZ$  lässt sich in Abhängigkeit vom Kapazitätsbedarf und der Anzahl Demontagestationen bestimmen:

$$ADS = \left[ \frac{C_{MA}}{TAZ} \right]^+ = \left[ \frac{\sum_{i \in MDK} t_i}{TAZ} \right]^+ \quad \text{Anzahl Demontagestationen in Abhängigkeit von Taktzeit und Kapazitätsbedarf} \quad (4.7)$$

mit:  $[x]^+$  kleinste ganze Zahl  $\geq x$

$C_{MA}$  zeitlicher Auftragsbedarf des Menschen

$\sum_{i \in MDK} t_i$  Summe der Demontagevorgangszeiten

Die Taktzeit  $TAZ$  lässt sich andererseits in Abhängigkeit von der zu demontierenden Anzahl Alterzeugnisse (Auftragsmenge  $m$ ) innerhalb des zur Verfügung stehenden Kapazitätsbestands pro Zeiteinheit (Kap. 2.3) folgendermaßen bestimmen:

$$TAZ = \frac{ZE}{m} \quad \text{Taktzeit in Abhängigkeit vom Kapazitätsbedarf} \quad (4.8)$$

mit:  $m$  Auftragsmenge

$ZE$  Zeiteinheit

Die Vorgehensweise zur schrittweisen Ermittlung der tatsächlich anwendbaren Taktzeit  $TAZ$  einer Planungsalternative  $a$  bei einer feststehenden Anzahl Demontagestationen ist in Abbildung 4-10 dargestellt.

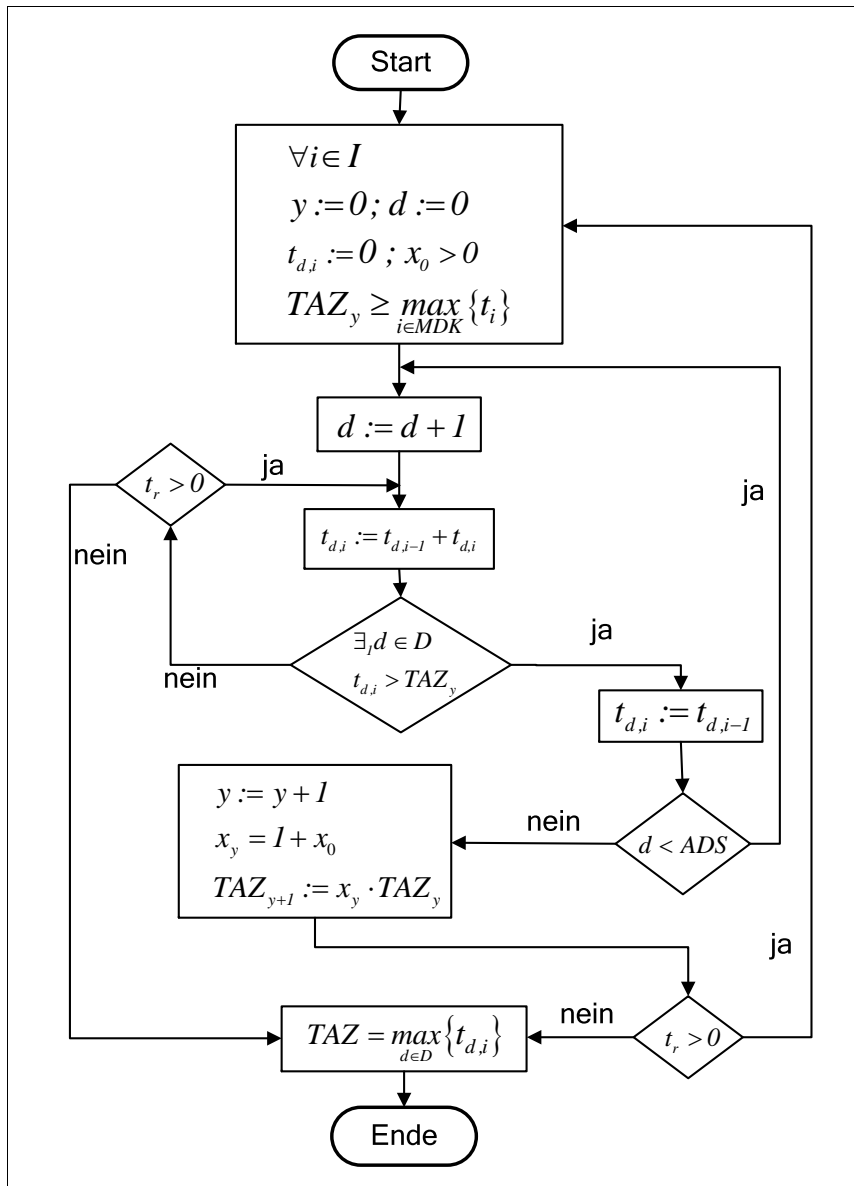


Abb. 4-10: Vorgehensweise zur Taktzeitbestimmung

In der zunächst leeren Demontagelinie wird die erste Demontagestation mit dem Startwert der Taktzeit  $TAZ_y$  generiert (MÜLLER 2002, S. 95 ff.). Es muss hierbei beachtet werden, dass die minimal zu wählende Taktzeit immer größer oder gleich sein muss, als die größte einzelne Demontagevorgangszeit

$$TAZ_y \geq \max_{i \in MDK} \{t_i\} \quad \text{Startwert der Taktzeit} \quad (4.9)$$

bzw. als die theoretisch ermittelbare Taktzeit  $TTZ$ , die sich aus einer idealen Teilbarkeit der Demontageaktivitäten ergibt:

$$TTZ = \frac{\sum_{i \in MDK} t_i}{m} \quad \text{theoretische Taktzeit} \quad (4.10)$$

Es wird dann in diese Demontagestation der erste Demontagevorgang (Startknoten) aus dem Demontagevorranggraphen  $DVG$  eingefügt. Unter Beachtung der Vorgangsfolgebeziehungen werden im Weiteren so lange Demontagevorgänge hinzugefügt, bis die Summe der dadurch hinzugefügten Demontagevorgangszeiten  $t_{d,i}$  größer ist als die Taktzeit  $TAZ_y$  und somit die Auslastung  $AUS_d$  dieser Demontagestation überschreitet:

$$AUS_d = \frac{t_{d,i}}{TAZ_y} > 1 \quad \text{überschrittene Auslastung der Demontagestation } d \quad (4.11)$$

Es wird eine weitere Demontagestation generiert und der in der vorherigen Demontagestation für die Überschreitung der Auslastung verantwortliche, darin zuletzt zugeordnete Demontagevorgang  $t_{d,i-1}$  wird dieser neuen Demontagestation zugeordnet. Die Leistungsabstimmung der Demontagelinie erfolgt iterativ so lange, bis die festgelegte Anzahl Demontagestationen erreicht ist.

Sofern im Idealfall alle Demontagevorgänge auf die festgelegte Anzahl Demontagestationen  $D$  zugeordnet werden konnten, wird die Leistungsabstimmung beendet. Sollten bei dieser ersten Abtaktung, wie in den meisten Fällen zu erwarten ist, noch weitere Demontagevorgänge im Demontagevorranggraph vorhanden sein ( $t_r > 0$ ), wird der

Startwert der Taktzeit  $TAZ_y$  um den Faktor  $x_y$  erhöht und in einem weiteren Schritt erfolgt die Leistungsabstimmung mit der neuen Taktzeit:

$$TAZ_y = x_y \cdot TAZ_{y-1} \quad \text{erhöhte Taktzeit} \quad (4.12)$$

mit:  $x_y = 1 + x_0$  Steigerungsfaktor der Taktzeit mit  $x_0 > 0$

Der zur Erhöhung der Taktzeit  $TAZ_y$  verwendete Faktor  $x_0$  kann in einer geeigneten Größenordnung im Vorfeld vom Planer festgelegt werden, z.B. mit 0,1. Die Iteration erfolgt so lange, bis die Auslastung  $AUS_d$  der in der Demontagelinie zuletzt vorhandenen Demontagestation nicht mehr überschritten wird und dabei alle Demontevorgänge des Demontevorranggraphen  $DVG$  den Stationen zugeordnet werden konnten. Die Leistungsabstimmung wird abgebrochen und der zuletzt ermittelte Taktzeitwert als die für die Demontagelinie zu verwendende Taktzeit  $TAZ$  gewählt.

$$TAZ = \max_{d \in D} (t_{d,i} \mid D \leq ADS) \quad \text{tatsächliche Taktzeit der Demontagelinie} \quad (4.13)$$

Die Vorgehensweise einer Leistungsabstimmung bei vorgegebener Taktzeit  $TAZ$  einer Planungsalternative  $a$  erfolgt grundsätzlich in gleicher Weise, lediglich mit dem Unterschied, dass die Taktzeit  $TAZ$  dabei nicht erhöht wird und die Anzahl der Demontagestationen  $ADS$  nicht limitiert ist.

#### 4.7.4 Abtaktung bei partitionierten Demontagepfaden

Die Durchführung der Leistungsabstimmung einer Demontagelinie bei vorgegebener Taktzeit  $TAZ$  unter Verwendung von disjunkten Teilgraphen (Kap. 3.4.3) ist in Abb. 4-11 dargestellt.

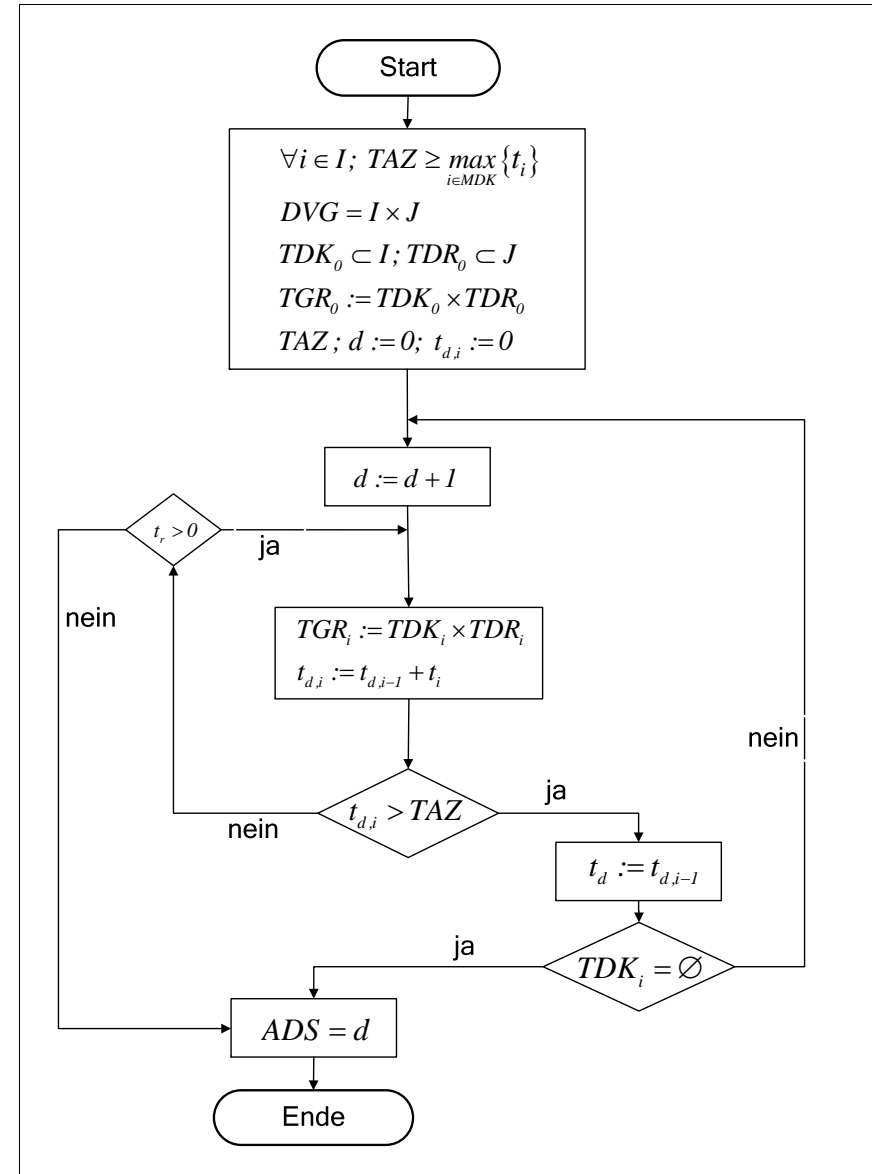


Abb. 4-11: Zuordnung von Teilgraphen zu Demontagestationen

Die Abtaktung erfolgt derart, dass die einzelnen Demontagevorgänge  $TDK_i$  einer ausgewählten Partition  $TGR_i$  gemäß der festgelegten Taktzeit  $TAZ$  der ersten Demontagestation  $d$  zugeordnet werden (DOMSCHKE, SCHOLL, VOß 1997, S. 196 ff.; MÜLLER 2002, S. 109; NEUMANN, MORLOCK 2004, S. 393 ff.; McGOVERN, GUPTA 2011, S. 102 ff.). Beginnend mit dem Anfangsknoten  $i_a$  des ersten Teilgraphen  $TGR_i$  (Startknoten des  $DVG$ ), werden in der Folge alle Demontagevorgänge zugeordnet, bis die Taktzeit  $TAZ$  erreicht ist. Falls die hierbei zugeordneten Demontagevorgänge diese überschreiten, wird die nächste Demontagestation generiert und mit den verbleibenden Demontagevorgängen des Teilgraphen  $TGR_i$  befüllt, bis der zugehörige Endknoten  $i_e$  zugeordnet ist.

Wenn in dem zu Beginn ausgewählten Teilgraphen  $TGR_i$  keine weiteren Demontagevorgänge  $TDK_i$  zur Verfügung stehen, wird als nächstes der erste Demontagevorgang des nächsten auswählbaren Teilgraphen  $TGR_{i+1}$  dieser bzw. einer neu generierten Demontagestation zugeordnet.

Falls es im Demontagevorranggraphen eine Alternative bei der Wahl des nachfolgenden Teilgraphen gibt, wird zunächst derjenige abgearbeitet, der eine frühere Auslösung einer Komponente aus dem Alterzeugnis ermöglicht, d.h. der in Summe die kürzeren Demontagevorgangszeiten enthält. Die Leistungsabstimmung erfolgt so lange, bis alle im Demontagevorranggraphen enthaltenen Teilgraphen den Demontagestationen zugeordnet sind.

## 5. Bewertung von Planungsalternativen

Für die Realisierung eines Demontagesystems werden detaillierte Informationen benötigt, die eine Aussage über die Funktionalität des Systems und mögliche Verbesserungspotenziale hinsichtlich festgelegter Zielkriterien ermöglichen. Hierfür eignen sich rechnerunterstützte Verfahren (MÄRZ, WEIGERT 2011, S. 4), die speziell für den Einsatz in kleinen und mittelständischen Betrieben entwickelt wurden. Bei einem Vergleich und einer Bewertung der für ein Demontagesystem ermittelten Planungsalternativen kann anhand von zuvor festgelegten Kriterien entsprechend der Vorgehensweisen in Verfahren der erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA) vorgegangen werden (ZANGEMEISTER 1976, S. 45 ff., 2000, S. 30; HARTEL, LOTTER 2012, S. 365 ff.).

### 5.1 Zielkriterien der Demontage

Um Planungsalternativen für ein Demontagesystem multikriteriell zu bewerten, müssen zunächst Kriterien definiert, anschließend deren Erreichung quantitativ bewertet und schließlich miteinander verglichen werden. Im Weiteren können die ermittelten Planungsalternativen hinsichtlich der erreichten Zielerreichungsgrade bei den einzelnen Kriterien in eine Rangreihe gebracht werden, um so die beste Alternative zu ermitteln.

#### 5.1.1 Festlegung von Zielkriterien

In Produktion und Logistik werden unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit u.a. folgende Zielsetzungen genannt (SCHUH, BRANDENBURG, CUBER 2012, S. 29; MÄRZ, WEIGERT 2011, S. 9):

- hohe Produktivität,
- hohe Termintreue,
- hohe und gleichmäßige Kapazitätsauslastung,
- kurze Durchlaufzeiten,
- niedrige Lager- und Werkstattbestände und
- hohe Flexibilität.

Im Recyclingbereich stehen ergänzend dazu branchenübergreifend vor allem folgende Zielsetzungen im Vordergrund:

- Erfüllung gesetzlicher Vorgaben bei der Rücknahme von Alt-erzeugnissen (z.B. durch Hersteller und deren Subunternehmer),
- Gewinnung von Sekundärrohstoffen (z.B. von Stahlschrott als Zugabe bei der Stahlherstellung) sowie
- Gewinnung von Sekundärerzeugnissen (z.B. als Ersatzteile).

Für den Demontagebereich und insbesondere im Reparaturbereich gelten hinsichtlich Produktivität, Termintreue, Durchlaufzeiten und Flexibilität grundsätzlich die gleichen Zielsetzungen wie in der Produktion. Jedoch kann es für Recyclingunternehmen zur Erfüllung dieser Zielsetzungen häufig von Vorteil sein, einen hohen Lagerbestand zu haben, beispielsweise auch in dem Fall, wenn ein Recyclingunternehmen Ersatzteile für ein Erzeugnis zur Verfügung stellt (vgl. Kap. 2.4.2), die in einer großen Modellvielfalt auf dem Verbrauchermarkt benötigt werden.

Eine hohe Kapazitätsauslastung ist in arbeitsteiligen Demontage-systemen in aller Regel mit einer möglichst hohe Auslastung der einzelnen Demontagestationen verbunden, was eine besondere Herausforderung an das Planungsverfahren stellt. Kurze Durchlaufzeiten bedeuten in der Demontage häufig das möglichst schnelle Erreichen des festgelegten Demontageziels, was oftmals nicht die vollständige Zerlegung des Alterzeugnisses erfordert. Sehr oft wird bei der Demontage nach Erreichen der festgelegten Wertschöpfung der verbleibende Rest des Alterzeugnisses einer stofflichen Verwertung zugeführt. Das gezielte Auslösen bestimmter Komponente aus einer größeren Anzahl

zur Verfügung stehender Alterzeugnisse aufgrund einer Kundenbestellung gebietet auch aus ökonomischer Sicht das Einhalten festgelegter Liefertermine. Eine hohe Flexibilität wird hierbei weniger als Zielkriterium im Sinne der Auftragssteuerung verstanden, als vielmehr beispielsweise die Möglichkeit, unterschiedliche Trennverfahren schnell und effizient einzusetzen.

Für die effiziente Planung eines Demontagesystems ist es somit notwendig, zu Anfang der Planungsphase die maßgeblichen Zielkriterien zu definieren und sich dabei auf eine überschaubare Anzahl davon festzulegen. Diese Zielkriterien müssen quantifizierbar und hinsichtlich ihrer Wichtigkeit miteinander vergleichbar sein.

### 5.1.2 Bewertung mittels Zielkriterien

SCHNECK (2000, S. 93) bezeichnet die Bewertung komplexer Arbeitssysteme hinsichtlich monetärer und nicht-monetärer Zielsetzungen als Teil eines komplexen Entscheidungsproblems und beschreibt einige Methoden zur Auswahl einer Planungsalternative aus mehreren zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, welche die gesetzten Ziele zumindest teilweise erfüllen. Allen Entscheidungsproblemen ist gemeinsam, dass mehrere Zielfunktionen zu berücksichtigen sind und es ein Entscheidungsfeld gibt, in dem aus den möglichen Alternativen unter Berücksichtigung von festgelegten Rahmenbedingungen eine zu realisierende Lösung ermittelt werden kann. Um eine Entscheidung aus mehreren Alternativen unter Berücksichtigung mehrerer Zielkriterien zu treffen, werden diese wie folgt beschrieben (i.A.a. SCHNECK 2000, S. 95 ff.):

$$MPA = \{a \in IN \mid a \leq APA\} \quad \text{Indexmenge und} \quad (5.1)$$

Index für Planungs-  
alternativen

mit:  $APA$  Anzahl Planungs-  
alternativen

$$MZK = \{k \in IN \mid k \leq AZK\} \quad \text{Indexmenge und Index für Zielkriterien} \quad (5.2)$$

mit:  $AZK$  Anzahl Zielkriterien

Für eine Alternative  $a$  wird bezogen auf ein Zielkriterium  $k$  ein Kriterienwert  $w_{ak}$  definiert. Für das Tupel aller Kriterienwerte gilt:

$$TKW_a = (w_{a1}, \dots, w_{ak}, \dots, w_{a,AZK}) \quad \text{Tupel der Kriterienwerte für Alternative } a \quad (5.3)$$

mit:  $w_{ak}$  Wert des Zielkriteriums  $k$  bei Alternative  $a$

Beim Vorliegen mehrerer Zielkriterien muss entschieden werden, in welcher Weise die einzelnen Kriterien die Festlegung auf eine Lösung bestimmen. Eine mögliche Vorgehensweise ist die Anwendung einer additiven Präferenzfunktion, bei der die Kriterien mit Gewichtungsfaktoren versehen und in eine Rangordnung gebracht werden. Die Anwendung der additiven Präferenzfunktion setzt jedoch eine metrische Skalierung der Kriterienwerte voraus. Sie kann dazu führen, dass die mangelnde Zielerreichung bei einem Kriterium durch eine sehr hohe Erfüllung bei einem anderen Kriterium kompensiert wird (SCHNECK 2000, S. 105).

Eine weitere Möglichkeit für die aggregierte Bewertung mehrerer Zielkriterien ist die Einordnung der Kriterien in eine lexikographische Präferenzfunktion. Hierbei wird den einzelnen Zielkriterien eine bestimmte Priorität zugeordnet, die durch die jeweilige Position in einer ordinal skalierten Rangfolge zum Ausdruck gebracht wird (ZÜLCH 1993, S. 36; SCHNECK 2000, S. 105 ff.):

$$l_{ak} = \text{rng}(w_{ak}) \quad \text{ordinaler Rang des Zielkriteriums } k \text{ für die Alternative } a \quad (5.4)$$

mit:  $l_{ak} = 1$  höchster Rang  
 $l_{ak} = NRK$  niedrigster Rang

Für eine Alternative  $a$  können somit die Kriterienwerte als lexikographisch geordneter Kriterienwertetupel angegeben werden:

$$RKW_a = (w_{a1}, \dots, w_{a1}, \dots, w_{a,NRK}) \quad \text{geordneter Tupel der Kriterienwerte für Alternative } a \quad (5.5)$$

Die Ordnung der Kriterien lässt sich für ein Entscheidungsproblem demnach so festlegen, dass ein Kriterium als dominantes, ranghöchstes Entscheidungskriterium definiert wird, d.h. die Rangfolge der Alternativen orientiert sich zunächst nur anhand dieses als wichtigstes zu erfüllendes Kriterium. Sollten zwei oder mehr Alternativen hinsichtlich des ranghöchsten Entscheidungskriteriums gleichwertig sein, wird das an zweiter Stelle stehende Kriterium in gleicher Weise behandelt usw.

Das Ergebnis wird dies als eine lexikographische Ordnung bezeichnet (KRELLE 1968, S. 76; ZÜLCH 1979, S. 120; SCHILLER, MÜLLER 1997, S. 72; SCHNECK 2000, S. 109). Ein Nachteil bei dieser Vorgehensweise ist, dass bei einer Entscheidung für eine Alternative anhand des ranghöchsten Kriteriums alle anderen Alternativen nicht berücksichtigt werden, auch wenn sie bei den nachrangig geordneten Kriterien insgesamt deutlich bessere Werte erzielen (SCHNECK 2000, S. 109). Eine Möglichkeit besteht dann darin, bei diesem Kriterium eine angemessene Toleranzbreite anzugeben und alle Alternativen dabei als gleichrangig zu betrachten (siehe hierzu ein Beispiel bei ZÜLCH, HEEL, KRÜGER 1996, S. 43 ff.).

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Zielkriterien hinsichtlich ihrer Zielerreichungsgrade zu betrachten und diese in geeigneter Weise zu aggregieren. Hierauf wird in Kapitel 5.3 näher eingegangen.



### 5.1.3 Gewichtung von Zielkriterien

Im Falle einer additiven Präferenzfunktionen kann für die Gewichtung von Zielkriterien die Vorgehensweise nach GROB und HAFFNER (1982, S. 44 ff.) verwendet werden. Bei dieser Methode werden in einer ersten Stufe die Zielkriterien  $k$  durch ein Entscheidungsgremium festgelegt und mittels eines paarweisen Vergleichs mit Gewichtungsfaktoren  $g_k$  versehen. Der paarweise Vergleich kommt in Verfahren der erweiterte Wirtschaftlichkeits- und Nutzenrechnung zur Anwendung. Bei diesen Verfahren erfolgt in einer zweiten Stufe die Bewertung der entwickelten Planungsalternativen durch den Planer bzw. ein Planungsgremium aufgrund der Vergabe von Punkten für die Erfüllung der Zielkriterien durch die einzelnen Lösungen (GROB 1984, S. 60 ff.; BULLINGER 1986, S. 192 ff.; BULLINGER 1994, S. 300 ff.). Die hierbei ermittelten Erfüllungsgrade werden mit den jeweiligen Gewichtungsfaktoren multipliziert und aggregiert (siehe z.B. GROB 1984, S. 25 ff.; ZANGEMEISTER 2000, S. 242).

Für den paarweisen Vergleich werden Zielkriterien, die möglichst voneinander unabhängig sein sollten, in einer Matrix eingetragen (REFA 1993b, S. 396). Jeweils zwei Kriterien werden hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Planungsziel miteinander verglichen und mittels eines Punktsystems hinsichtlich ihrer Bedeutung gewichtet. Die Punktevergabe bezüglich zweier Zielkriterien  $k$  und  $k'$  erfolgt derart, dass eine vom Planer festgelegte Anzahl maximaler Punkte  $BMX$  auf die beiden Kriterien verteilt wird:

$$B = \{b_{kk'} \in \mathbb{N} \mid b_{kk'} \leq BMX\} \quad \text{Erfüllungsgrade für paarweisen Vergleich} \quad (5.6)$$

$$\text{mit: } b_{kk'} \quad \text{Erfüllungsgrad des Kriteriums } k \text{ im Vergleich zu Kriterium } k'$$

$$b_{kk'} = 0 \quad \forall k = k' \quad \text{keine Punktevergabe im Vergleich mit sich selbst}$$

$$BMX = b_{kk'} + b_{k'k} \quad \text{maximale Bewertungszahl pro Vergleich von } k \text{ und } k'$$

Im Weiteren werden die vergebenen Punkte für jedes Kriterium  $k$  aufsummiert und es ergibt sich das Gewicht  $r_k$  dieses Kriteriums:

$$r_k = \sum_{k \in MZK} b_{kk'} \quad \text{Gewicht für Kriterium } k \quad (5.7)$$

Verglichen mit den insgesamt zu vergebenden Punkten ergibt sich für dieses Kriterium  $k$  das prozentuale Gewicht  $g_k$ :

$$g_k = \frac{r_k}{\sum_{k \in MZK} r_k} \quad \text{prozentuales Gewicht des Kriteriums } k \quad (5.8)$$

Am Beispiel von der Vergabe von 4 Punkten ( $BMX = 4$ ) soll die prinzipielle Vorgehensweise erläutert werden. Jeder Punkteteilung wird in abgestufter Weise verbal in einer Steigerungsform so beschrieben, dass eine Bewertung der jeweils zu vergleichenden Kriterien durchgeführt wird. Sofern die festgelegte Anzahl Punkte geradzahlig ist, kann eine paritätische Punkteteilung erfolgen, d.h. beide Kriterien sind in diesem Fall gleich gewichtet. Für das Beispiel der Vergabe von 4 Punkten zwischen zwei Kriterien ( $k=1$  und  $k'=2$ ) lässt sich für die jeweilige Wertung formulieren als  $b_{kk'}/b_{k'k}$  (ZANGEMEISTER 2000, S. 242):

- Wertung 4/0: 1 ist sehr viel wichtiger als 2,
- Wertung 3/1: 1 ist wichtiger als 2,
- Wertung 2/2: 1 ist gleich wichtig wie 2,
- Wertung 1/3: 1 ist weniger wichtig als 2 und
- Wertung 0/4: 1 ist viel weniger wichtig als 2.

Je kleiner die Anzahl der zu vergebenden Punkte  $BMX$  ist, umso weniger ist eine Differenzierung zwischen der relativen Wertigkeit der beiden Kriterien möglich. Je mehr Punkte zwischen den beiden

betrachteten Kriterien zu vergeben sind, umso schwieriger wird auch die Punktevergabe, da der Unterschied zwischen den einzelnen Abstufungen sehr gering und damit schwierig verbal einzustufen ist. In Abbildung 5-1 ist das Ergebnis einer möglichen Bewertung bei der Vergabe von vier Punkten ( $BMX = 4$ ) pro Vergleich beispielhaft dargestellt:

$k \backslash k'$	$b_{kk'}$				Gewichtung		Rang
	1	2	3	4	$r_k$	$g_k$	$mg(g_k)$
1	0	3	2	1	6	0,25	3
2	1	0	0	2	3	0,13	4
3	2	4	0	1	7	0,29	2
4	3	2	3	0	8	0,33	1
Summe					24	1	

Abb. 5-1: Beispiel für den paarweisen Vergleich von Zielkriterien (i.A.a. ZANGEMEISTER 2000, S. 242)

Hieraus resultiert eine Rangreihe der einzelnen Zielkriterien, für das hier gewählte Beispiel ist dies:

- Rang 1: Kriterium 4 mit  $g_k=0,33$ ,
- Rang 2: Kriterium 3 mit  $g_k=0,29$ ,
- Rang 3: Kriterium 1 mit  $g_k=0,25$ ,
- Rang 4: Kriterium 2 mit  $g_k=0,13$

Somit ergibt sich für die in Abbildung 5-1 aufgelisteten Kriterien die Rangreihe  $mg(g_k)$ :

$$mg(g_k) = (4,3,1,2) \quad \text{Rangordnung der Kriterien} \quad (5.9)$$

Bei diesem Beispiel und der hier festgelegten Punkteverteilung ergibt sich, dass drei Kriterien relativ hoch gewichtet sind und lediglich das

vierte Kriterium mit deutlichem Abstand auf dem letzten Rang liegt. Die auf diese Weise gewichteten Kriterien sollen vom Planer bei der Gestaltung von Alternativen entsprechend berücksichtigt werden, d.h. sie dienen als Zielvorgabe bei der Planung des Demontagesystems.

## 5.2 Zielerreichungsgrade

Zur quantitativen Bewertung von Planungsalternativen können Kennzahlen herangezogen werden, die auch eine Aussage über die Güte der Planungsalternativen hinsichtlich der jeweiligen Zielsetzungen ermöglichen (GROBEL 1993, S. 54). Für diese Kennzahlen gibt es einen zu definierenden oder festzulegenden Bestwert. Der erreichte Erfüllungsgrad, d.h. der Grad der Annäherung einer für eine Planungsalternative ermittelten Kennzahl eines Kriteriums an diesen Bestwert, wird Zielerreichungsgrad genannt (GROBEL 1993, S. 57; SCHNECK 2000, S. 67; LOOS 2013, S. 80). Der Bestwert eines Kriteriums wird auf 100 % normiert und die jeweiligen Werte der weiteren Kriterien können in der Regel eine Ausprägung im Bereich von 0 % bis 100 % erreichen (GROBEL 1993, S. 58 ff.; SCHILLER, MÜLLER 1997, S. 59; MÜLLER 2000, S. 67). Hierbei ist 0 % immer der schlechteste (pessimale) und 100 % immer der maximal erreichbare (optimale) Wert (STOCK 2012, S. 101; GAMBER 2015, S. 155).

Für das Erreichen eines Zielkriteriums kann als Bewertung auch der Bezug auf den jeweils besten erreichten Wert herangezogen werden. Bei mehreren Planungslösungen besteht somit eine mögliche Vorgehensweise darin, den jeweils mit einer Alternative erreichten Wert eines Zielkriteriums in normierter Weise relativ auf den besten erreichten Wert zu beziehen. Der je nach Zielkriterium maximal bzw. minimal zu erreichende Wert wird somit als Bestwert mit 100 % festgelegt. Auf diese Weise lässt sich durch den Planer auch erkennen, inwieweit die weniger effizienten Lösungsalternativen ein Verbesserungspotenzial aufweisen (SCHILLER, MÜLLER 1997, S. 59; SCHUH, BRANDENBURG, CUBER 2012, S. 72).

### 5.2.1 Zielkriterium Anzahl Demontagestationen

Es gibt Demontageaufträge, die aufgrund von gesetzlichen Vorgaben (Rücknahmeverpflichtung, Verwertungsquoten usw.) durchzuführen sind, dabei jedoch nur eine geringe Wertschöpfung für die aus dem Alterzeugnis gewonnenen Sekundärrohstoffe, dabei jedoch keine Wertschöpfung als Sekundärerzeugnis erwarten lassen, da für dieses Erzeugnis (Ersatzteil) zur Zeit oder auch nachhaltig keine Nachfrage am Markt besteht. Ein Beispiel hierfür ist das Recycling von Elektrobohrhämmern älterer Baujahre. Durch das Abtrennen des Stromkabels und die Entfernung des Isoliermaterials lässt sich der hochwertige Sekundärrohstoff Kupfer gewinnen, aus den demontierten Gehäuseschalen der Sekundärrohstoff Kunststoff. Für die im Elektrobohrhammer enthaltenen Bauteile, wie Antriebswelle oder Schalter, besteht erwartungsgemäß keine Nachfrage als Sekundärerzeugnis, da diese Alterzeugnisse kaum noch am Markt vorhanden bzw. in Gebrauch sind.

In manuellen Demontagesystemen ist es in solchen Fällen anzustreben, den relativ kostenintensiven Personaleinsatz möglichst gering zu halten, d.h. die Anzahl manueller Demontagestationen zu minimieren bzw. die entsprechenden Planungslösungen zu bevorzugen. Dies bedeutet für die Bestimmung des Zielerreichungsgrads für die Anzahl Demontagestationen:

$$ZDS_a = \frac{MNS}{ADS_a} \cdot 100\% \quad \begin{array}{l} \text{Zielerreichungsgrad} \\ \text{Anzahl Demontage-} \\ \text{stationen} \end{array} \quad (5.10)$$

mit:  $MNS = \min_{a \in MPA} \{ ADS_a \}$  minimale Anzahl Demontagestationen

$ADS_a$  Anzahl Demontagestationen bei Planungsalternative  $a$

### 5.2.2 Zielkriterium Auslastung

Die Auslastung einer Demontagestation in einem manuellen, arbeitsteiligen Demontagesystem ist ein Maß dafür, in welchem Umfang die an einer Demontagestation zur Verfügung stehende Taktzeit durch das an dieser Demontagestation tätige Personal genutzt wird (DOMSCHKE, SCHOLL, VOß 1997, S. 172; MÜLLER 2002, S. 96). Somit ist in diesem Fall die Auslastung der Demontagestation äquivalent zur Mitarbeiterauslastung. Werden Arbeitstätigkeiten während der kompletten Taktzeit im Sinne der Demontageaufgabe genutzt, beträgt die Auslastung dieser Demontagestation 100 % (Kap. 4.7.2).

Für eine Demontagelinie lässt sich die durchschnittliche Auslastung ZAU für die im System eingeplanten Demontagestationen bestimmen. Insofern ist die Angabe der Auslastung ein Äquivalent für den Zielerreichungsgrad (SCHILLER, MÜLLER 1997, S. 67 ff.):

$$AUS_{d,a} = \frac{t_{d,i}}{TAZ_a} \cdot 100\% \quad \begin{array}{l} \text{Auslastung der Demon-} \\ \text{tagestation } d \text{ bei Alter-} \\ \text{native } a \end{array} \quad (5.11)$$

mit:  $t_{d,i}$  Summe der Vorgangszeiten an einer Demontagestation  $d$

$TAZ_a$  Taktzeit der Planungsalternative  $a$

Damit ergibt sich für den Zielerreichungsgrad Auslastung der Demontagelinie einer Alternative  $a$  (DOMSCHKE, SCHOLL, VOß 1997, S. 180):

$$ZAU_a = \frac{1}{ADS_a} \sum_{d \in D} AUS_{a,d} \quad \begin{array}{l} \text{Zielerreichungsgrad} \\ \text{durchschnittliche Aus-} \\ \text{lastung der Demontage-} \\ \text{linie bei Planungsalter-} \\ \text{native } a \end{array} \quad (5.12)$$

### 5.2.3 Zielkriterium Durchlaufzeit

Nach REFA (1991c, S. 16) wird die Durchlaufzeit als „die Soll-Zeit für die Erfüllung einer Aufgabe“ in einem Arbeitssystem definiert. Wie auch in der Produktionsplanung ist es in der Demontageplanung hinsichtlich der effizienten Nutzung des Systems eine stets anzustrebende Zielsetzung, die Durchlaufzeit eines Alterzeugnisses möglichst kurz zu halten (HUBER 2001, S. 78). In der Produktionsplanung werden für die Bestimmung der Durchlaufzeit  $T_D$  eines Arbeitsauftrags in einem betrachteten Arbeitssystem  $S$  folgende Zeiten berücksichtigt (HACKSTEIN 1989, S. 13; REFA 1991c, S. 16):

- Durchführungszeit  $t_{dS}$ ,
- Zwischenzeit  $t_{zwS}$  und
- Zusatzzeit  $t_{zuS}$ .

In einem Arbeitsauftrag bildet sich die Durchlaufzeit  $T_D$  aus der Addition der planmäßigen Durchlaufzeit  $t_{pS}$  und der Zusatzzeit  $t_{zuS}$  (REFA 1991c, S. 16):

$$T_D = t_{pS} + t_{zuS} \quad \text{Durchlaufzeit} \quad (5.13)$$

Die planmäßige Durchlaufzeit  $t_{pS}$  setzt sich zusammen aus der Durchführungszeit  $t_{dS}$  und der Zwischenzeit  $t_{zwS}$ :

$$t_{pS} = t_{dS} + t_{zwS} \quad \text{planmäßige Durchlaufzeit} \quad (5.14)$$

Die Durchführungszeit  $t_{dS}$  beinhaltet die Haupt- ( $t_{hS}$ ) und die Nebendurchführungszeit ( $t_{nS}$ ),

$$t_{dS} = t_{hS} + t_{nS} \quad \text{Durchführungszeit} \quad (5.15)$$

Die Zwischenzeit  $t_{zwS}$ , resultiert aus den summierten Zeiten für das Fördern  $t_{SAT}$  und das auflaufbedingte Liegen  $t_{SAA}$  eines Auftrags (ZÜLCH 1996, S. 12-102):

$$t_{zwS} = \sum t_{SAT} + \sum t_{SAA} \quad \text{Zwischenzeit} \quad (5.16)$$

Zusätzlich zur planmäßigen Durchlaufzeit wird die Zusatzzeit bei der Bestimmung von Soll-Zeiten berücksichtigt. Die Zusatzzeit entsteht beispielsweise aus einem störungsbedingtem Unterbrechen der Arbeitsdurchführung und können bei der Planung als Sicherheitszuschlag prozentual zur planmäßigen Durchlaufzeit als Zusatzzeitzuschlag  $z_{zuS}$  ausgedrückt werden (REFA 1991c, S. 21):

$$z_{zuS} = \frac{t_{zuS}}{t_{pS}} \cdot 100\% \quad \text{Zusatzzeitzuschlag} \quad (5.17)$$

In einem manuellen, arbeitsteiligen Demontagesystem kann der Taktausgleich, d.h. der für Demontagetätigkeiten nicht genutzte Anteil der Taktzeit, ggf. auch als Anteil der Zwischenzeit betrachtet werden:

$$TAU_d = TAZ - t_{d,i} \quad \text{Taktausgleich in Demontestation } d \quad (5.18)$$

Für die in dieser Arbeit betrachtete manuelle Demontage können in verketteten Systemen ablaufbedingte Liegezeiten zumeist unberücksichtigt bleiben, da diese Zeiten im Wesentlichen nicht vorkommen bzw. bei der Bestimmung einzelner Vorgangszeiten bereits eingeplant werden (z.B. Einwirkzeit Rostlöser).

Gleiches gilt für Zusatzzeiten, da stochastisch auftretende Störungen im Demontageablauf, die ggf. auch einen Wechsel von Trennvorgängen erforderlich machen können, in den Zeitbausteinen schon berücksichtigt sind.

Bei Planungsalternativen, für die es in einem Demontagesystem zwingend erforderlich ist, einzelne Demontestationen in einem signifikanten räumlichen Abstand voneinander zu positionieren (ARNOLD 1995, S. 223 ff.), kann der Transport der teildemontierten Alterzeugnisse von einer Demontestation zur nächsten beispielsweise durch den Einsatz von Hubwagen erfolgen. In diesem Fall ist die Förderzeit  $t_{SAT}$  zu berücksichtigen. Für die Durchlaufzeit der Planungsalternative  $DLZ$  gilt dann:

$$DLZ_a = t_{dS,a} + t_{zwS,a} \quad \text{Durchlaufzeit der} \quad (5.19)$$

Planungsalternative  $a$

Bei manuellen Demontagevorgängen in einem arbeitsteiligen Demontagesystem nach dem Flussprinzip sind vergleichsweise kurze Transportwege und Durchlaufzeiten realisierbar. Die Anwendung des Flussprinzips eignet sich insbesondere für die Demontage von Alterzeugnissen in hoher Stückzahl (HUBER 2001, S. 64), ermöglicht es aber auch, einzelne Demontagevorgänge in entkoppelten Demontagebereichen als Ausschleusstationen anzuordnen (WIENDAHL, HEGENSCHIED 2012, S. 333). In diesem Fall erhöht sich die Durchlaufzeit, da die Zeit zwischen Ankunft und Verlassen des Alterzeugnisses aus dem Demontageunternehmen deutlich zunimmt (REFA 1992, S. 445). Bezogen auf die kürzeste Durchlaufzeit aller Planungsalternativen  $MND$

$$MND = \min_{a \in APA} DLZ_a \quad \text{minimale Durchlaufzeit} \quad (5.20)$$

ergibt sich für den Zielerreichungsgrad Durchlaufzeit  $ZDG_a$  einer Planungsalternative  $a$ :

$$ZDG_a = \frac{MND}{DLZ_a} \cdot 100\% \quad \text{Zielerreichungsgrad} \quad (5.21)$$

Durchlaufzeit bei  
Planungsalternative  
 $a$

#### 5.2.4 Zielkriterium variable Demontagestückkosten

Die wirtschaftliche Betrachtung von Demontagesystemen im Recyclingbereich ist aus unterschiedlicher Sicht möglich. SCHILLER (1998, S. 111 ff.) verwendet für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Demontageaufträgen die Ermittlung eines Deckungsbeitrags, d.h. die für eine ausgelöste Komponente erzielbaren Erlöse werden den dafür anfallenden Demontagevorgangskosten gegenübergestellt.

Ein Demontagesystem kann grundsätzlich dann als wirtschaftlich bezeichnet werden, wenn für ein Alterzeugnis ein positiver Deckungsbeitrag entsteht, d.h. dass die tatsächlich erzielten Erlöse die bei der Demontage anfallenden Kosten übersteigen. SCHILLER berücksichtigt hierbei auch die Wahrscheinlichkeit von erfolgreichen Demontagevorgängen und eine wählbare Demontagetiefe, bis zu der ein Alterzeugnis wirtschaftlich sinnvoll demontiert werden soll.

HUBER (2001, S. 52) definiert die optimale Demontagetiefe als den Demontagezustand eines Alterzeugnisses, für den der Deckungsbeitrag ein Maximum erreicht. Die Erlöse beim Verkauf von Demontageerzeugnissen und von Sekundärrohstoffen hängen u.a. von der aktuell vorhandenen Nachfrage am Markt ab und sind daher nicht zuverlässig im Voraus zu bestimmen. Eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit kann jedoch immer durch die Senkung der Kosten erfolgen.

Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eines Demontagesystems ist der Vergleich der variablen Demontagestückkosten  $DSK$ , die für die einzelnen Planungsalternativen anfallen (BULLINGER 1986, S. 194). Hierbei werden die aus der Demontage zu erwartenden Erlöse, z.B. für den Verkauf von Sekundärerzeugnissen, nicht einbezogen. Es wird davon ausgegangen, dass die einzuplanende bzw. erforderliche Anzahl Demontagestationen im Unternehmen schon vorhanden ist und mit der notwendigen Anzahl qualifizierter Mitarbeiter besetzt werden kann.

Im Folgenden wird bei allen Planungsalternativen für die durchzuführende Leistungsabstimmung derselbe Demontagevorranggraph verwendet, d.h. die

- Anzahl zu demontierender Alterzeugnisse (Auftragsgröße)
- Demontagetiefe,
- auszulösenden Komponenten,
- Demontagevorgänge und
- Demontagevorgangszeiten

sind für alle Planungsalternativen gleich. Unterschiede gibt es jedoch hinsichtlich

- Anzahl Demontagestationen und
- Taktzeit.

Bei komplexeren Alterzeugnissen, deren Demontageerzeugnisse nur eine geringe bzw. keine signifikante Wertschöpfung erwarten lassen, ist die Minimierung der variablen Demontagestückkosten anzustreben. Die variablen Demontagestückkosten werden hier mit den anfallenden Kosten, jeweils bezogen auf die Taktzeit, an den Demontagestationen einer Planungsalternative  $a$  ermittelt:

$$DSK_a = ADS_a \cdot TAZ_a \cdot KOS \quad \begin{array}{l} \text{variable Demontagestück-} \\ \text{kosten der Planungsalter-} \\ \text{native } a \end{array} \quad (5.22)$$

Der für die Bestimmung der Demontagestückkosten anzuwendende Kostensatz  $KOS$  pro Zeiteinheit (i.d.R. Stunden) wird für das jeweilige Demontageunternehmen als bekannt vorausgesetzt. Der Kostensatz wird für alle Planungsalternativen und Tätigkeiten als einheitlich angenommen und somit als relative Größe zur Bewertung der Kosten einer Planungsalternative verwendet. Für den Zielerreichungsgrad der variablen Demontagestückkosten  $ZSK_a$  der Planungsalternative  $a$  gilt:

$$ZSK = \frac{MSK}{DSK_a} \cdot 100\% \quad \begin{array}{l} \text{Zielerreichungsgrad} \\ \text{variable Demontagestück-} \\ \text{kosten bei Planungsalter-} \\ \text{native } a \end{array} \quad (5.23)$$

mit:  $MSK = \min_{a \in APA} \{ DSK_a \}$  geringste variable Demontage-  
stückkosten aller Planungsalter-  
nativen

$DSK_a \geq MSK$  variable Demontagestückkosten der  
Planungsalternative  $a$

### 5.3 Multikriterielle Bewertung

Die bei der Planung entwickelten Alternativen lassen sich vom Planer anhand festgelegter Kriterien bewerten. Diese werden mittels der Methode des paarweisen Vergleichs mit Gewichtungsfaktoren versehen und in eine Rangreihe gebracht. Die Systembewertung erfolgt nicht, wie bei der erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA) üblich, durch die Ermittlung von Erfüllungsfaktoren anhand einer Expertenbewertung, sondern anhand einer kriterienspezifischen Rangreihe (ZANGEMEISTER 2000, S. 56 ff.).

Die Bestimmung der Rangreihe von Alternativen kann anhand einer lexikographischen Ordnung erfolgen, insbesondere wenn nur die Zielerreichung eines einzigen Kriteriums für die Auswahl der besten Planungsalternative berücksichtigt werden soll. Im Rahmen dieser Arbeit werden für die multikriterielle Bewertung der Planungsalternativen die Zielerreichungsgrade auf den jeweiligen Bestwert normiert (Kap. 5.2), mittels einer Präferenzfunktion aggregiert und so in eine Rangreihe gebracht. Das Ergebnis dient dann zur Auswahl der besten und somit zu realisierenden Planungsalternative.

#### 5.3.1 Matrix der Zielerreichungsgrade

Für die einzelnen Planungsalternativen  $a$  werden für die einzelnen Zielerreichungsgrade  $ZEG_{ak}$  die erreichten Kriterienwerte quantitativ bestimmt und in einer Matrix dargestellt (Abb. 5-2). Der Bestwert für die metrische Kriterienwerte von allen Planungsalternative  $a$  kann einerseits als Minimum definiert sein

$$MNZ_k = \min_{a \in MPA} \{ ZEG_{ak} \} \quad \begin{array}{l} \text{minimaler Wert des} \\ \text{Kriteriums } k \end{array} \quad (5.24)$$

oder aber als der maximal erreichbare Wert:

$$MXZ_k = \max_{a \in MPA} \{ ZEG_{ak} \} \quad \begin{array}{l} \text{maximaler Wert des} \\ \text{Kriteriums } k \end{array} \quad (5.25)$$

Kriterium Planungs- alternative <i>a</i>	Zielerreichungsgrad $ZEG_{ak}$				
	1	...	<i>k</i>	...	AZK
1	$ZEG_{1,1}$	...	$ZEG_{1,k}$	...	$ZEG_{1,AZK}$
...	...	...	...	...	...
<i>a</i>	$ZEG_{a,1}$	...	$ZEG_{a,k}$	...	$ZEG_{a,AZK}$
...	...	...	...	...	...
APA	$ZEG_{1,1}$	...	$ZEG_{APA,k}$	...	$ZEG_{APA,AZK}$

Abb. 5-2: Matrix der Zielerreichungsgrade

### 5.3.2 Normierte Zielerreichungsgrade

In einem nächsten Schritt erfolgt die Bestimmung des so genannten normierten Zielerreichungsgrad  $NZG_{ak}$ , d.h. die Ermittlung der Werte für die einzelnen Zielerreichungsgrade  $ZEG_{ak}$ , bezogen auf den jeweiligen Kriteriumsbestwert. Für den normierten Zielerreichungsgrad  $NZG_{ak}$  eines Kriteriums *k* bei einer Planungsalternative *a* gilt:

$$NZG_{ak} = \begin{cases} \frac{MNZ_k}{ZEG_{ak}} & \dots \text{ falls } NZG_{ak} \text{ mini-} \\ & \text{miert werden soll.} \\ \frac{ZEG_{ak}}{MXZ_k} & \dots \text{ falls } NZG_{ak} \text{ maxi-} \\ & \text{miert werden soll.} \end{cases} \quad (5.26)$$

Die erreichbaren Werte für  $NZG_{ak}$  liegen zwischen 0 und 1, wobei 0 immer den schlechtesten und 1 immer den besten Wert darstellt:

$$0 < NZG_{ak} \leq 1 \quad \text{Wertebereich des normierten Zielerreichungsgrades} \quad (5.27)$$

Die Vorgehensweise bei der Bewertung von drei Planungsalternativen (APA=3), die anhand von vier Zielkriterien (AZK=4) betrachtet wer-

den, soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Für alle Zielkriterien gilt, dass der minimale Kriterienwert als Optimum definiert ist. In Abb. 5-3 sind in einer Matrix die auf den jeweiligen Kriterienbestwert normierten Zielerreichungsgrade dargestellt:

Kriterium <i>k</i> Planungs- alternative <i>a</i>	normierter Zielerreichungsgrad $NZG_{ak}$			
	1	2	3	4=AZK
1	1,0	0,9	0,7	1,0
2	0,9	1,0	1,0	0,6
3=APA	0,9	0,6	0,8	1,0

Abb. 5-3: Beispiel einer Matrix für normierte Zielerreichungsgrade

Das Ergebnis der zeilenweisen Addition der metrisch skalierten Werte der normierten Zielerreichungsgrade für jede einzelne Planungsalternative *a* ist in Abb. 5-4 dargestellt.

Kriterium <i>k</i> Planungs- alternative <i>a</i>	normierte Zielerreichungsgrade $NZG_{ak}$				$NZG_a$
	1	2	3	4	
1	1,0	0,9	0,7	1,0	3,6
2	0,9	1,0	1,0	0,6	3,5
3	0,9	0,6	0,8	1,0	3,3

Abb. 5-4: Summe der normierten Zielerreichungsgrade einer Planungsalternative *a*

mit

$$NZG_a = \sum_{k \in MEK} NZG_{ak} \quad \text{Summe der normierten Zielerreichungsgrade einer Planungsalternative } a \quad (5.28)$$

Diese Vorgehensweise bedeutet implizit, dass alle Kriterien  $k$  als gleichwertig betrachtet werden. Die hierbei resultierende Rangreihe der Planungsalternativen ergibt sich wie folgt:

$$rng(NZG_a): PA1 \succ PA2 \succ PA3 \quad \text{Rangreihe aufgrund summierter } NZG_a \quad (5.29)$$

Unter Berücksichtigung einer lexikographischen Ordnung der normierten Zielerreichungsgrade anhand der in Kapitel 5.1.3 festgelegten Rangreihe der vier Zielkriterien ( $rng(g_k) = 4,3,1,2$ ), jedoch unabhängig von deren Gewichtung, ergibt sich für die drei Planungsalternativen eine geänderte Rangreihe:

$$rng(g_k): PA3 \succ PA1 \succ PA2 \quad \text{lexikographisch geordnete Rangreihe} \quad (5.30)$$

Bei dieser Vorgehensweise wird die Planungsalternative  $PA_3$  als beste Lösung bewertet, da zwar sowohl  $PA_3$  als auch  $PA_1$  für den Wert von  $ZEG_{a,4}$  den Bestwert erzielen, jedoch  $PA_3$  für den Wert von  $ZEG_{a,3}$  für einen besseren Wert als  $PA_1$  erreicht. Die deutlich besser erreichten Werte für  $ZEG_{a,1}$  und  $ZEG_{a,2}$  von  $PA_1$  gegenüber  $PA_3$  bleiben so allerdings unberücksichtigt.

### 5.3.3 Gewichtete normierte Zielerreichungsgrade

Um den für die Entwicklung von alternativen Planungslösungen gesetzten Vorgaben zu entsprechen, werden die normierten Zielerreichungsgrade  $NZG_{ak}$  mit Gewichtungsfaktoren (Kap. 5.1.3) versehen:

$$GNZ_{ak} = g_k \cdot NZG_{ak} \quad \text{gewichtete, normierte Zielerreichungsgrade} \quad (5.31)$$

und die Werte für jede Planungsalternative wie folgt aggregiert:

$$GNZ_a = \sum_{k \in MEK} g_k \cdot NZG_{ak} \quad \text{aggregierte Zielerreichungsgrade der Planungsalternative } a \quad (5.32)$$

Das Ergebnis für das gewählte Beispiel ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

Kriterium $k$ Gewichtung $g_k$	gewichtete normierte Zielerreichungsgrade $GNZ_{ak}$				aggregierter $GNZ_a$	$rng(GNZ_a)$
	1	2	3	4		
Planungsalternative $a$	0,25	0,13	0,29	0,33		
1	0,250	0,117	0,203	0,330	0,900	1
2	0,225	0,130	0,290	0,198	0,843	3
3	0,225	0,078	0,232	0,330	0,865	2

Abb. 5-5: Matrix der gewichteten normierten Zielerreichungsgrade (i.A.a. ZANGEMEISTER 2000, S. 117)

Unter Berücksichtigung der aggregierten  $GNZ_{ak}$  ergibt sich für die Rangreihe der Planungsalternativen:

$$rng(GNZ_{ak}): PA1 \succ PA3 \succ PA2 \quad \text{Rangreihe aufgrund der aggregierten } GNZ_{ak} \quad (5.33)$$

Sofern die Bewertungsergebnisse der einzelnen Planungslösungen sehr nahe beieinander liegen, besteht für den Planer die Möglichkeit, in einem weiteren Schritt eine zusätzliche Planungsalternative (z.B. als Kompromisslösung) zu entwickeln und diese in die Bewertung als weitere Planungsalternative einzubeziehen.



Abschließend betrachtet lässt sich feststellen, dass es bei der Bewertung von Planungsalternativen unter Verwendung der zuvor beschriebenen Vorgehensweisen zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen kommt (Abb. 5-6):

Vorgehensweise	Rangreihe
$rng(NZG_a)$	$PA1 \succ PA2 \succ PA3$
$rng(g_k)$	$PA3 \succ PA1 \succ PA2$
$rng(GNZ_{ak})$	$PA1 \succ PA3 \succ PA2$

Abb. 5-6: vergleichende Betrachtung

Im Gegensatz zu den beiden anderen Vorgehensweisen erfüllt die Erstellung der Rangreihe von Planungsalternativen auf Basis der gewichteten, normierten Zielerreichungsgrade  $GNZ_{ak}$  insgesamt die gestellten Bedingungen, alle Zielkriterien gemäß ihrer festgelegten Gewichtung bei der Entscheidung für die beste Planungsalternative zu berücksichtigen.

## 5.4 Beurteilung von Arbeitsbedingungen

Gemäß Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG 2015, § 5) ist eine Beurteilung der Arbeitsbedingungen durch den Arbeitgeber zwingend vorgeschrieben. Tätigkeiten, die eine Gefährdung für die Gesundheit der Beschäftigten darstellen, müssen durch den Arbeitgeber vermieden werden. Falls dies nicht möglich sein sollte, sind diese so gering wie möglich zu halten (ArbSchG 2015, § 4; LasthandhabV 2015, § 2).

Durch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) und dem Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI) wird zur Beurteilung von Gefährdungspotenzialen für die Sicherheit und die Gesundheit von Mitarbeitern sowie für die

Beurteilung von Arbeitsbedingungen die Anwendung der Leitmerkalmethode empfohlen. Bei der manuellen Handhabung von Lasten kann die Arbeitstätigkeit hinsichtlich der Ausführungsbedingungen und der auftretenden Belastungen mittels dieser Leitmerkalmethode detailliert zunächst bewertet und anschließend beurteilt werden. Hierfür werden drei Verfahren angeboten (BAuA 2016a):

- Manuelle Arbeitsprozesse (Version 2012),
- Ziehen, Schieben (Version September 2002) sowie
- Heben, Halten und Tragen (Version 2001).

Die Leitmerkalmethode zur Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen ist für die „Beurteilung von Tätigkeiten mit überwiegender Belastung des Finger-Hand-Arm-Bereichs“ entwickelt worden und ist beispielsweise nicht geeignet für die Beurteilung von Tätigkeiten mit Lastenhandhabung von „Gewichten über 5 kg“ (BAuA 2016d). BAuA verweist hier explizit auf die Anwendung der beiden anderen Verfahren.

Durch die Leitmerkalmethode können die ergonomische Belastung von Mitarbeitern und potenzielle Gefährdungen gemäß der bestehenden Ordnungen und Gesetze (z.B. ArbSchG 2015; ArbStättV 2015) durch den Planer bewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Tätigkeiten bei der manuellen Handhabung von Lasten mit Gewichten von deutlich mehr als 5 kg betrachtet. Daher wird auf die Beschreibung des Verfahrens „Manuelle Arbeitsprozesse“ hier nicht weiter eingegangen.

### 5.4.1 Leitmerkalmethode für Ziehen und Schieben

Bei der Beurteilung gemäß der Leitmerkalmethode für das Ziehen und Schieben von Lasten erfolgt die Bewertung jeder Tätigkeit „anhand eines teiltätigkeitsbezogenen Punktwertes“ (BAuA 2016b), ist grundsätzlich auf einen Arbeitstag bezogen und wird in Abhängigkeit von einer resultierenden Punktschwere textuell ausgegeben. In Abbildung 5-5 sind die Eingabemöglichkeiten für diese Leitmerkalmethode dargestellt.





Geschlecht	<input type="radio"/> männlich	<input type="radio"/> weiblich				
Art des Ziehens/Schiebens	<input type="radio"/> gleitend	<input type="radio"/> rollend				
Lastwichtung	<input type="radio"/> < 10 kg 1 Punkt	<input type="radio"/> 10 bis 25 2 Punkte	<input type="radio"/> 25 bis 50 4 Punkte	<input type="radio"/> > 50		
Einzelstanz	<input type="radio"/> Einzelweg < 5 m	<input type="radio"/> Einzelweg > 5 m				
Zeitwichtung	<input type="radio"/> < 10 x 1 Punkt	<input type="radio"/> 10 bis 40 x 2 Punkte	<input type="radio"/> 40 bis 200 4 Punkte	<input type="radio"/> 200 bis 500 6 Punkte	<input type="radio"/> 500 bis 1000 8 Punkte	<input type="radio"/> ab 1000 x 10 Punkte
Positioniergenauigkeit	<input type="radio"/> gering 1 Punkt	<input type="radio"/> hoch 2 Punkte				
Bewegungsgeschwindigkeit	<input type="radio"/> langsam 1 Punkt	<input type="radio"/> schnell 2 Punkte				
Haltung	 1 Punkt	 2 Punkte	 4 Punkte	 8 Punkte		
Ausführungsbedingungen	<input type="radio"/> gut 0 Punkt	<input type="radio"/> eingeschränkt 2 Punkte	<input type="radio"/> schwierig 4 Punkte	<input type="radio"/> kompliziert 8 Punkte		
<b>Aktuelle Rechnung</b>						
Zeit * [ Last + Haltung + Ausführung + [ Positionieren * Bewegungsgeschwindigkeit ] ] * ( 1,3 für Frauen )						
			<b>Punktsomme</b>	<b>Bewertung</b>		

Abb. 5-5: Leitmerkalmethode zur Beurteilung von Ziehen und Schieben (BAuA 2016b)

Die verbal formulierten, in vier Bereiche abgestuften Beurteilungsförmulierungen sind in vielfältiger Weise differenziert. Die Formulierungen reichen von geringer Belastung mit geringem Gefährdungspotenzial bis hin zur Bewertung einer hohen Belastung, die geeignete Gestaltungsmaßnahmen erforderlich machen. Die zur den jeweiligen Punktsommen zugehörigen verbalisierten Bewertungen der Arbeitstätigkeit sind in vier Bereiche gegliedert (BAuA 2016b):

- weniger als 10 Punkte: geringe Belastung,
- 10 bis < 25 Punkte: grundsätzlich besteht kein Handlungsbedarf,

- 25 bis < 50 Punkte: es sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll,
- 50 oder mehr Punkte: hohe Belastung, es besteht die Notwendigkeit für Gestaltungsmaßnahmen.

Falls es sich bei einer Tätigkeitsbeschreibung ergibt, dass eine erhöhte Belastung bei einer (Teil-)Tätigkeit vorliegt, erfolgt der Hinweis, dass eine körperliche Überlastung bei vermindert belastbaren Personen möglich ist und Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll sind (BAuA 2016b, S. 3).

Bei der Anwendung der Leitmerkalmethode muss der Anwender sehr gute Kenntnisse über die durchgeführten Tätigkeiten besitzen, hingegen sind Detailkenntnisse in Ergonomie oder Sicherheitstechnik nicht erforderlich. Im Einzelnen müssen folgende Angaben gemacht werden:

- Geschlecht,
- Art der Ziehens oder Schiebens,
- Art der Fortbewegung,
- Lastmasse in kg (Lastwichtung),
- Weglänge,
- Häufigkeit der Belastung (Zeitwichtung),
- Positioniergenauigkeit,
- Bewegungsgeschwindigkeit,
- Haltung und
- Ausführungsbedingungen.

Die Unterscheidung bei der betrachteten Tätigkeitsausführung hinsichtlich des Geschlechts bewirkt eine Multiplikation der Punktsomme mit dem Faktor 1,3. Dieser Faktor soll laut Handlungsanleitung für das Ziehen und Schieben berücksichtigen, dass Frauen im Vergleich zu Männern eine geringere physische Leistungsfähigkeit besitzen.

## 5.4.2 Leitmerkmalmethode für Heben, Halten, Tragen

In Abbildung 5-6 ist die Eingabemaske der Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Heben, Halten und Tragen von Lasten dargestellt (BAuA 2016c). Die Eingaben erfolgen analog zur Vorgehensweise beim Ziehen und Schieben unter der Berücksichtigung von

- Gewicht der Last (Lastmasse),
- Dauer der Belastung,
- Zeitanteil der Belastung innerhalb einer Arbeitsperiode,
- Körperhaltung während der Tätigkeit und
- Ausführungsbedingungen.


Geschlecht	männlich	weiblich							
Wirksame Last	< 10 kg	10 bis < 20 kg	20 bis < 30 kg	30 bis < 40 kg	ab 40 kg				
	1 Punkt	2 Punkte	4 Punkte	7 Punkte	25 Punkte				
Art der Tätigkeit	Heben (<5 s)	Halten (>5 s)	Tragen (>5 m)						
Zeitwichtung	< 10 x	10 bis 40 x	40 bis 200 x	200 bis 500 x	500 bis 1000 x				
	1 Punkt	2 Punkte	4 Punkte	6 Punkte	8 Punkte				
Haltung									
Ausführungsbedingungen	gut	eingeschränkt	stark						
	0 Punkt	1 Punkt	2 Punkte						
<b>Aktuelle Rechnung</b>									
Zeitwichtung * ( Last + Haltung + Ausfuehrungsbedingungen )									
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"><b>Punktsumme</b></td> <td style="width: 50%;"><b>Bewertung</b></td> </tr> <tr> <td style="height: 20px;"></td> <td style="height: 20px;"></td> </tr> </table>						<b>Punktsumme</b>	<b>Bewertung</b>		
<b>Punktsumme</b>	<b>Bewertung</b>								

Abb. 5-6: Leitmerkmalmethode für das Heben und Tragen von Lasten (BAuA 2016c, Version 2001)

Im Fall einer durch die Leitmerkmalmethode als erhöhte Belastung bewertete Arbeitssituation sollten alternative Arbeitsvorgänge oder

spezielle Hilfsmittel zur Entlastung des Mitarbeiters eingeplant und die Arbeitstätigkeit dann erneut bewertet werden. Die hierbei angewendete Vorgehensweise wird in Kapitel 6.5 beispielhaft behandelt.

## 6. Entwicklung eines Verfahrens zur Planung von Demontagesystemen

Zur Entwicklung eines Demontageplanungsverfahrens wird in der Weise vorgegangen, dass ein komplexes Problem in einzelne, voneinander unabhängige Teilprobleme zerlegt wird und dafür Lösungen gesucht werden. Letztendlich werden die einzelnen Module in geeigneter Weise wieder zusammengeführt (vgl. RICHTER, SANDER, STUCKY 1999, S. 120).

Grundsätzliche Zielsetzung der Demontageplanung ist es, die organisatorischen, technischen und personellen Voraussetzungen zu schaffen, um Alterzeugnisse in wirtschaftlicher und ergonomischer Weise in ihre Komponenten zu zerlegen. Die Planung eines Demontagesystems beinhaltet neben der Festlegung von Demontageaufgaben die Bestimmung einer geeigneten Ablauf- und Mittelplanung. Dies umfasst die Alterzeugnisstrukturierung, die Erstellung von Demontagearbeitsplänen, die Festlegung der einzusetzenden Trennverfahren und der im Vorfeld festgelegten Demontagetiefe, die Bestimmung der Anzahl Demontagestationen und der damit in Beziehung stehenden Taktzeit, die Wahl der Betriebsmittel und Materialflusssysteme u.v.a.m. (BRAUN 1995, S. 29 ff.; SCHILLER 1998, S. 30 ff.; MÜLLER 2002, S. 26 ff., ARNOLD, FURMANS 2007, S. 233 ff.)

### 6.1 Aufbau des Verfahrens TANJA

Das im Rahmen dieser Arbeit prototypenhaft entwickelte Demontageplanungsverfahren *TANJA* (Demontageplanung mit objektorientiertem Leistungsabstimmungsverfahren) dient zur schrittweisen Durchführung der Planung von arbeitsteiligen Demontagelinien. Zunächst werden die erforderlichen Demontagevorgänge strukturiert und in

einem Demontagevorranggraphen abgebildet, danach erfolgt die Durchführung der Leistungsabstimmung, die Gestaltung des Layouts und schließlich die Bewertung der Planungslösungen. Im Verfahren *TANJA* werden außerdem Module zur Beschreibung der Demontagestationen und zur Durchführung einer ergonomischen Belastungsanalyse der resultierenden Tätigkeiten implementiert.

Dabei erweist es sich als sinnvoll, gleichzeitig mit der Alterzeugnisstrukturierung den einzelnen Demontagevorgängen spezifische Angaben zuzuordnen. Dies wird hier in der Weise gelöst, dass in dem im ersten Planungsschritt durch den Planer zu entwickelnden Demontagevorranggraphen innerhalb jedes einzelnen Demontagevorgangs jeweils alle für diesen Vorgang relevanten Daten als Information hinterlegt werden. Dazu. Zu jedem Demontagevorgang werden dazu Vorgangszeiten, Vorgangskosten, Demontageanweisungen, verwendete Betriebsmittel usw. angegeben.

Mit dem Verfahren *TANJA* ist es möglich, eine Demontageplanung entsprechend der zu erfüllenden Zielsetzungen durchzuführen und als Projekt in einer integrierten Datenbank zu speichern. Während der Planung müssen folgende Module und Vorgänge abgearbeitet werden (Abb. 6-1):

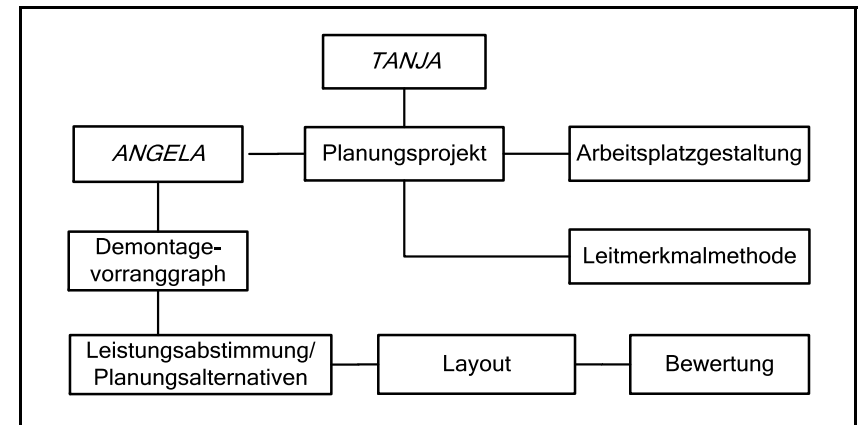


Abb. 6-1: Modularer Aufbau des rechnerunterstützten Planungsverfahrens *TANJA*

- Planungssystem *ANGELA* (Planungshilfsmittel für die Zeitwirtschaft bei manueller Erzeugnisdemontage) zur Bestimmung der Vorgangszeiten,
- Demontevorranggraph zur Strukturierung des Alterzeugnisses,
- Leistungsabstimmung für die Zuordnung von Demontevorgängen zu Demontestationen und die Entwicklung von Planungsalternativen,
- Layoutgestaltung für die räumlichen Gestaltung des Demontagesystems und
- Durchführung des Bewertungsverfahrens.

Darüber hinaus können für ein Planungsprojekt mit den beiden weiteren Modulen

- Leitmerkalmethode und
- Arbeitsplatzgestaltung

die im Demontagesystem einzuplanenden Demontearbeitsplätze beschrieben und ergonomische Belastungsanalysen für körperlich anspruchsvolle Demontagetätigkeiten durchgeführt werden. Hierauf wird in Kapitel 6.6 noch näher eingegangen.

Mit dem Modul *ANGELA* werden Demontevorgangszeiten sowie demontagespezifische Besonderheiten für die Auslösung einer Komponente aus einem Alterzeugnis bestimmt. Jeder für die Demontage einer einzelnen Komponente notwendige Vorgang wird in *ANGELA* definiert und mit einer Bezeichnung versehen, sodass letztendlich die komplette Demontage eines Alterzeugnisses durch eine Menge von Demonteteilvorgängen beschrieben wird.

Als nächstes erfolgt die schrittweise Entwicklung des Demontevorranggraphen, indem die Knoten des Vorranggraphen in Abhängigkeit von den Demontevorgangsfolgerestriktionen des Alterzeugnisses angeordnet werden. Der Begriff Knoten wird hierbei synonym für Demontevorgang verwendet.

In Abhängigkeit von einer gewählten Taktzeit oder einer festgelegten Anzahl Stationen (jeweils Einzelarbeitsplätze) werden die im Demontevorranggraphen angeordneten Knoten einzelnen Demon-

tagestationen zugeordnet und mit Hilfe des Moduls Layoutgestaltung räumlich in einem Arbeitsbereich angeordnet. Die so durchgeführte Leistungsabstimmung kann mehrfach erfolgen, sodass mehrere Planungsalternativen entstehen, die anhand des Bewertungsverfahrens miteinander verglichen werden können. Die einzelnen Demontestationen können mittels des Moduls Arbeitsplatzgestaltung beschrieben werden. Die ergonomische Betrachtung der einzelnen Demontagetätigkeiten zur Überprüfung von möglichen gesundheitlichen Gefährdungen für den Mitarbeiter aufgrund von Heben, Halten und Tragen von Lasten sowie Ziehen und Schieben wird unter Verwendung des Moduls zur Leitmerkalmethode durchgeführt.

## 6.2 Abbildung von Demontevorgängen

Für die zeitwirtschaftliche Analyse der Demontevorgänge werden Zeitbausteine verwendet, die auf Basis von Analysen mittels MTM-Grundverfahren entwickelt wurden. Hier konnte auf Datenmaterial aus eigenen Forschungsarbeiten zurückgegriffen werden (ZÜLCH u.a. 2002), welches für die vorliegende Arbeit durch weitere Datenaufnahmen in einem Demontagebetrieb ergänzt und erweitert wurde. Das in diesem Forschungsprojekt entwickelte Verfahren *ANGELA* diente ursprünglich dazu, an einem Einzelarbeitsplatz Demontevorgänge zeitwirtschaftlich zu analysieren und hieraus eine Kapazitätsplanung für eine Demontestation abzuleiten (HEINZ u.a. 2002, S. 15 ff.; ZÜLCH, SCHWARZ 2003, S. 347 ff.). Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Verfahren modifiziert und in *TANJA* integriert.

Mit Hilfe von *ANGELA* lässt sich ein beliebig detaillierter Demontevorgang mit seinen Eigenschaften als Knoten beschreiben (Abb. 6-2). Neben allgemeinen Angaben zu der zu demontierenden Komponente wie Demonteteilbezeichnung usw. wird ausgewählt, in welcher Weise die aus dem Alterzeugnis ausgelöste Komponente im Weiteren verwendet werden soll, ob sie also vorgesehen ist für die

- Wieder-/Weiterverwertung oder

- Wieder-/Weiterverwendung.

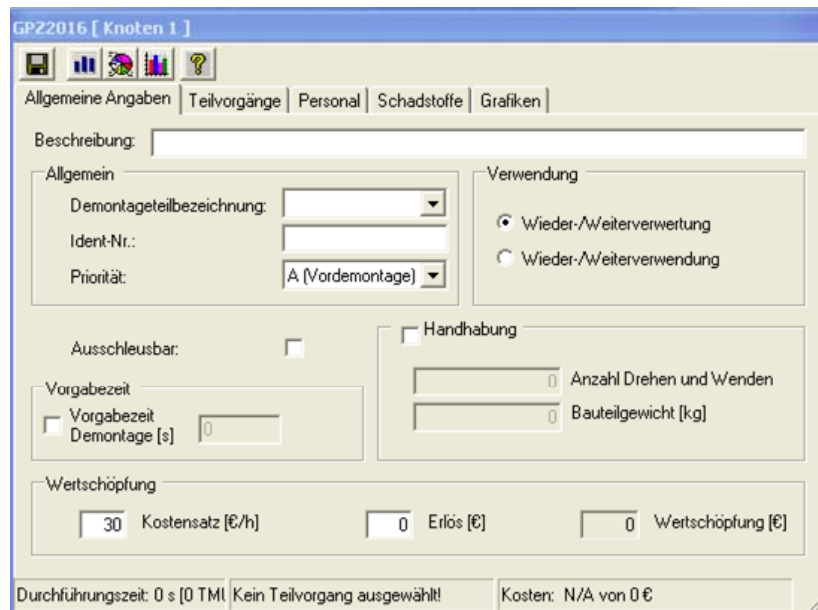


Abb. 6-2: Startansicht eines Demontagevorgangsknotens im Modul *ANGELA*

Diese Auswahl hat einen Einfluss auf die Demontagezeit, da für eine weitere Verwendung die Komponente zerstörungsfrei ausgebaut werden muss. Im Knoten kann zu diesem Zweck eine Priorität für die Reihenfolge des Auslösen aus dem Alterzeugnis innerhalb der zu beschreibenden Demontagevorgangsfolge angegeben werden. Unabhängig von weiteren Zielsetzungen der zu planenden Demontage sind mit der höchsten Prioritätsstufe *A* alle Vorgänge zu versehen, die laut Gesetzgeber nach Annahme eines Alterzeugnisses zwingend als erste Vorgänge durchzuführen sind. Die Vorgänge mit der Prioritätsstufe *A* werden hier auch mit dem Begriff *Vordemontage* versehen, die vom Grundsatz her sowohl innerhalb der Demontagelinie (wie im Startknoten voreingestellt, s. Abb. 6-2) als auch außerhalb der Demontage-

linie durchgeführt werden kann. Aus der Demontagelinie auszulagern sind diese Vorgänge, wenn die gesamte Demontage nicht direkt nach der Annahme des Alterzeugnisses erfolgen kann (siehe z.B. *AltfahrzeugV 2015*, Anhang, Punkt 3.2.2.1). Die Vorgänge sind beispielsweise die Entnahme von Batterien und Akkus aus einem Elektrogerät (*ElektroG2 2015*, § 4) oder die Trockenlegung eines Fahrzeugs, d.h. die Entnahme aller Betriebsflüssigkeiten wie z.B. Treibstoff, Kühlflüssigkeit usw. (*AltfahrzeugV 2015*, § 2). Die Vorgehensweise zur Vergabe von Prioritätsstufen wird im Kapitel 6.3.1 näher beschrieben.

Die Demontagevorgangsbeschreibung erfolgt aufgrund der Auflistung aller insgesamt für die Demontage einer einzelnen, ausgewählten Komponente notwendigen Teilvorgänge (Abb. 6-3). Als Ergebnis dieser Beschreibung erhält man auch die gesamte Tätigkeitszeit für diesen Demontagevorgang.

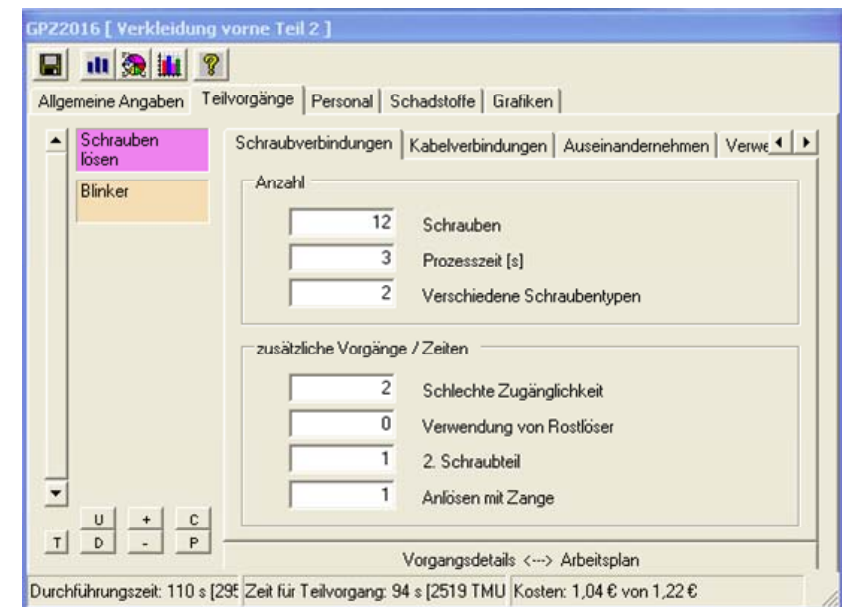


Abb. 6-3: Teilvorgänge zur Demontage einer Komponente im Modul *ANGELA*

Am Beispiel des Lösen von Schraubverbindungen soll die Vorgehensweise erläutert werden. Mit der Anzahl Schrauben als Multiplikator in Verbindung mit der Festlegung der erwarteten Dauer des elektromechanischen Ausschraubvorgangs, den Zeitzuschlägen für unterschiedliche Schraubentypen ergibt sich die Teilvorgangszeit  $t_{K,SV}$  für das Lösen der Schrauben. Demontagespezifischen Einflussgrößen, wie die Zugänglichkeit der Schraubverbindungen, der notwendige Einsatz von Hilfsvorgängen (z.B. Verwendung eines weiteren Werkzeugs) werden hierbei berücksichtigt.

Für die an dieser Komponente  $K$  angebauten elektronischen Bauelemente, die auch über Kabelverbindungen mit dem Alterzeugnis verbunden sind (z.B. Blinker), wird das Lösen der Kabelverbindungen  $t_{K,V}$  in analoger Weise beschrieben (Abb. 6-4).

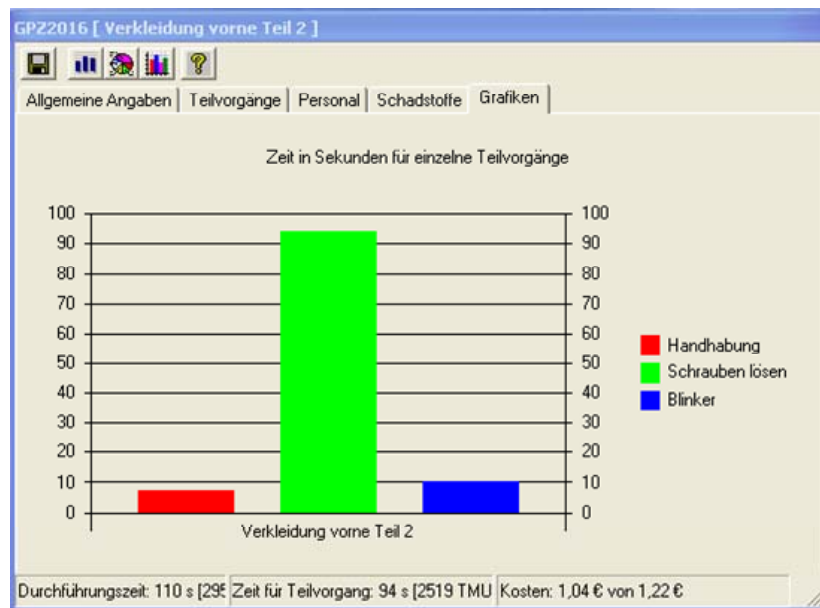


Abb. 6-4: Darstellung von Teilvorgangszeiten für einen Trennvorgang im Modul ANGELA

Summiert mit den Vorgangszeiten der weiteren Demontageteilvorgänge Handhabung  $t_{K,H}$  wird die Durchführungszeit  $t_K$  für das Auslösen dieser Komponente  $K$  in der Fußzeile in Abbildung 6-4 in TMU und in Sekunden angegeben. Die erforderliche Demontevorgangszeit für das Auslösen dieser Komponente kann als Demontagezeitbaustein im Modul ANGELA hinterlegt werden:

$$t_K = \sum t_{K,SV} + \sum t_{K,V} + \sum t_{K,H} \quad \begin{array}{l} \text{Durchführungszeit für} \\ \text{eine Komponente } K \end{array} \quad (6.1)$$

Weiterhin können in ANGELA die Daten für das einzusetzende Personal (Qualifikation, Schichtgruppe usw.), Angaben zu möglicherweise in der Komponente vorhandenen Schadstoffen oder allgemeine Hinweise zu diesem Demontevorgang hinterlegt werden.

Für eine schnelle Kalkulation im Sinne einer Grobplanung kann für die Dauer des gesamten Demontevorgangs anstelle der detaillierten Beschreibung der einzelnen Teilvorgänge eine gesamte (ggf. vorläufige) Vorgangsdauer eingegeben werden. Dadurch wird dieser Bereich für die Eingabe von Teilvorgängen gesperrt. Für einen Planer, der mit der Demontage von Alterzeugnissen vertraut ist, kann so der gesamte Demontageprozess in einer ersten Näherungslösung aufgrund empirischer Daten überschlägig bestimmt werden. In einer zweiten Planungsphase können anschließend die einzelnen Teilvorgänge im Sinne einer Feinplanung schrittweise konkretisiert werden.

### 6.3 Entwicklung des Demontevorranggraphen

Mit einem Demontevorranggraph (Kap. 3.4) werden die einzelnen Demontevorgänge und deren Vorgangsfolgerrestriktionen dargestellt. Die Beschreibung von einzelnen Demontevorgängen erfolgt in unterschiedlichen Detaillierungsgraden in den einzelnen Demontevorgangsknoten, die im Modul ANGELA modelliert werden. Hierzu erfasst der Planer sukzessive alle Demontevorgänge zur Auslösung von Komponenten aus dem Alterzeugnis und ordnet sie entsprechend ihrer durch die Konstruktion vorgegebenen Vorgangs-



folgerestriktion an. Die Abbildung 6-5 zeigt ein Beispiel für einen mit *TANJA* erstellten Demontagevorranggraphen.

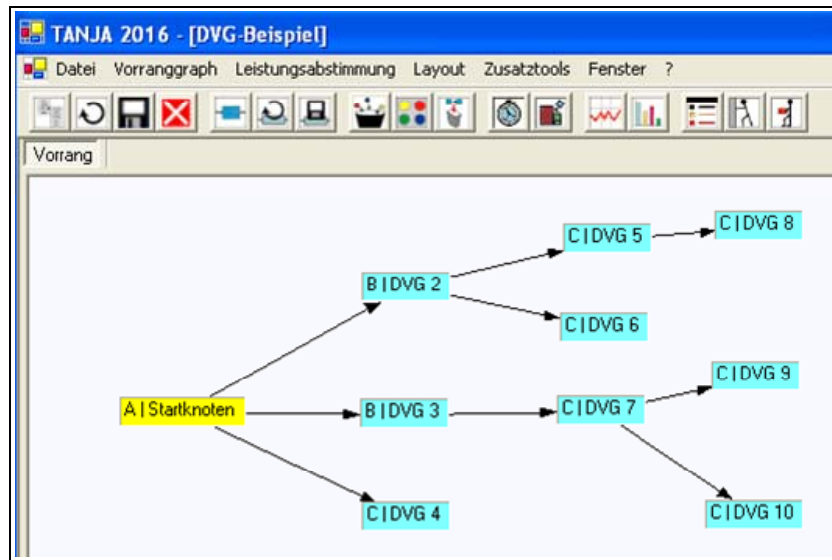


Abb. 6-5: Beispiel für einen mit *TANJA* erstellten Demontagevorranggraphen (mit Prioritätsstufen der Demontagevorgänge)

### 6.3.1 Priorisierung von Demontagevorgängen

Die Festlegung der Vorgangsfolge von einzelnen Demontagevorgängen hängt beim Recycling häufig von gesetzlichen Vorgaben ab und ist daher zu Beginn der Demontage zwingend vorgegeben, d.h diese Vorgänge erhalten die höchste Prioritätsstufe A. Für die weiter noch durchzuführenden Demontagevorgänge sind jedoch auch wirtschaftliche Zielsetzungen relevant.

Die Festlegung der Vorgangsfolge der für die Demontage eines Altzeugnisses erforderlichen Arbeitsvorgängen und ggf. deren Zuord-

nung zu Demontagestationen kann mittels Prioritätsregeln erfolgen (vgl. REFA 1993a, S. 184). Elementare Regeln können beispielsweise das Einhalten der kürzesten Auftragszeit, das Erreichen einer möglichst kurzen Durchlaufzeit, das Maximieren der Kapazitätsauslastung oder auch das Erreichen eines definierten Deckungsbeitrags sein. Bei der Maschinenbelegungsplanung oder im Logistikbereich gibt es bekannte Prioritätsregeln wie FIFO (First In First Out), KOZ (Kürzeste Operationszeit) oder SLACK (Schlupfzeitregel, vgl. z.B. SCHUH, BRANDENBURG, CUBER 2012, S. 53), bei der die verbleibende Restzeit eines Auftrags mit Arbeitsvorgängen ausgefüllt werden, die für diesen Zeitraum zeitlich und ablauforganisatorisch einplanbar sind. In der Vorgangsfolgeplanung von Demontagevorgängen kann durch die Anwendung der Schlupfzeitregel eine Steigerung der Auslastung von Demontagearbeitsstationen erfolgen (SCHUH, SCHÜRMEYER, HERING 2013, S. 220), indem die Differenzzeit (Taktverlust) zwischen der Taktzeit und der vorgegeben Sollzeit durch eine Zuordnung von Demontagevorgängen oder zusätzlichen Teilvorgängen aufgefüllt wird (GRINNINGER 2012, S. 233). Bei Demontagevorgängen können Prioritäten gesetzt werden, sodass zuerst die Vorgänge mit der obersten Priorität eingeplant werden und in einem nächsten Schritt die Arbeitsvorgänge zur Erfüllung der Zielsetzungen mit weniger wichtigen Priorität (DOMSCHKE, SCHOLL, VOB 1997, S. 187; FURMANS 2000, S. 58). In diesem Fall können die einzelnen Prioritäten hintereinandergeschaltet als Haupt- und Nebensortierkriterien eingesetzt (NEUMANN, MORLOCK 2004, S. 519) und so in eine lexikographische Ordnung gesetzt werden.

### 6.3.2 Prioritätsstufen

Die Altauto-Verordnung verpflichtet Entsorgungsunternehmen dazu, nach Annahme des zu recycelnden Fahrzeugs unverzüglich die Batterien zu entnehmen und alle Flüssigkeiten (z.B. Kraftstoff, Motorenöl, Gefahrstoffe usw.) aus dem Fahrzeug zu entfernen. Dies bedeutet, dass als erster Demontagevorgang die Trockenlegung des Altautos festzulegen ist (AltautoV 2010, § 12; AltautoV 2015, § 2).



Aus wirtschaftlicher Sicht sind Recyclingunternehmen zumeist auch immer Anbieter von Sekundärerzeugnissen, vor allem in Form von Ersatzteilen für Erzeugnisse in der Nutzungsphase. Zur Bereitstellung von Ersatzteilen ist es sinnvoll, die am meisten wertschöpfenden Komponenten möglichst früh und vor allem zerstörungsfrei aus einem Alterzeugnis zu demontieren.

Bei der Festlegung der einzelnen Demontagevorgänge  $i$  im Demontagevorranggraphen  $DVG$  werden diese vom Planer mit Prioritätsstufen  $q$  hinsichtlich ihres Auslösens aus dem Alterzeugnis versehen. Hierfür gilt allgemein:

$$MPR = \{q \in IN \mid q \leq APR\} \quad \begin{array}{l} \text{Index und Indexmenge} \\ \text{für Prioritätsstufen der} \\ \text{Demontageaufgabe} \end{array} \quad (6.2)$$

mit:  $APR$  Anzahl Prioritätsstufen

Im hier entwickelten Verfahren sind fünf Prioritätsstufen ( $A$  bis  $E$ ) vorgesehen, die vom Planer jedoch nicht alle genutzt werden müssen. Für die einzelnen Prioritätsstufen gilt in absteigender Wertigkeit von  $A$  bis  $E$ :

$$MPR = \begin{cases} A := \text{zwingend vorgeschrieben} \\ B := \text{größtmöglicher Erlös} \\ C := \text{durchschnittlicher Erlös} \\ D := \text{geringe Wertschöpfung} \\ E := \text{stoffliche/energetische Verwertung} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Prioritätsstufen von} \\ \text{Demontagevorgängen} \end{array} \quad (6.3)$$

Die Prioritätsstufe  $A$  repräsentiert Demontagevorgänge, die zwingend aufgrund von z.B. rechtlichen Vorgaben zu Beginn des Demontageprozesses durchgeführt werden müssen. Mit der Prioritätsstufe  $B$  werden Demontagevorgänge eingestuft, die den größtmöglichen Erlös

erwarten lassen, wie z.B. Kunststoffgehäuse beim Elektrozycling oder Verkleidungsteile beim Fahrzeug. Die Prioritätsstufe  $C$  wird für Komponenten verwendet, die am Markt weniger häufig nachgefragt werden, aber dennoch einen nennenswerten Erlös erzielen können. Komponenten, für die nur ein geringer Erlös zu erwarten ist, erhalten die Prioritätsstufe  $D$ . Für alle nicht wieder verwendbaren Komponenten, die einer stofflichen oder energetischen Verwertung zugeführt werden sollen, ist die Prioritätsstufe  $E$  vorgesehen.

## 6.4 Leistungsabstimmung von priorisierten Demontagevorgängen

Zur Abtaktung einer Demontagelinie werden die einzelnen Demontagevorgänge gemäß der jeweils festgelegten Prioritätsstufe auf Basis einer festgelegten Taktzeit den Demontagestationen zugeordnet. Hierbei wird die Partitionierung des Demontagevorganggraphen derart verwendet, dass jeder Teilgraph (Kap. 4.7.4) mit der Prioritätsstufe versehen wird, wie die höchste Prioritätsstufe eines darin enthaltenen Demontagevorgangs. Die Teilgraphen  $TGR_q$  haben jeweils den Demontagevorgang als Endknoten  $i_e$ , der das Auslösen der priorisierten Komponente beinhaltet.

Zu Beginn der Leistungsabstimmung mit einer vorgegebenen Taktzeit  $TAZ$  wird die erste Demontagestation  $d$  generiert. Zunächst werden Demontagevorgänge der Prioritätsstufe  $A$  dieser Demontagestation zugeordnet. Falls diese Demontagevorgänge in Summe die Taktzeit  $TAZ$  überschreiten sollten, wird die nächste Demontagestation generiert und mit den verbleibenden Vorgängen befüllt. Sind keine weiteren Vorgänge mit Prioritätsstufe  $A$  vorhanden, wird als nächstes der erste Vorgang des Teilgraphen zugeordnet, der zu dem mit der Prioritätsstufe  $B$  versehenen Demontagevorgang führt. Sofern zwei oder mehr Vorgänge mit der Prioritätsstufe  $B$  versehen sind, wird zunächst mit demjenigen Teilgraph weitergearbeitet, der eine frühere Auslösung der Komponente aus dem Alterzeugnis ermöglicht. Bei jeder Zuordnung eines Demontagevorgangs zu einer Demontage-

station wird zuvor geprüft, ob sich dieser Vorgang, unter Beachtung der bestehenden Vorgangsfolgerestriktionen, in eine zuvor angeordnete Demontagestation mit noch freier Arbeitszeitkapazität einfügen lässt.

Im Falle einer erfolgreichen Anwendung der Schlupfzeitregel resultiert für die betreffende Demontagestation eine Reduktion des Taktausgleichs. Diese Vorgehensweise wird so lange durchgeführt, bis alle Demontagevorgänge auf Demontagestationen verteilt sind. Die Zuordnung der Demontagevorgänge endet, wenn die Auslastung der im Demontagesystem vorhandenen Demontagestationen nicht mehr zu steigern ist.

Unter der Vorgabe, dass für eine Planungsalternative  $a$  die Anzahl der Demontagestationen  $ADS$  vorgegeben ist, wird die Leistungsabstimmung, beginnend mit einem Startwert für die Taktzeit  $TAZ_y$  (der iterativ gesteigert wird), so lange durchgeführt, bis keine Demontagevorgänge mehr zur Verfügung stehen. Die Taktzeit wird dann mit dem Wert festgelegt, der in der am höchsten belasteten Demontagestation vorliegt (siehe Kap. 4.7.3).

## 6.5 Produktionslogistische Planungsbewertung

Die Bewertung der Planungsalternativen erfolgt aufgrund der Zielerreichungsgrade für festgelegte Zielkriterien. Folgende Zielsetzungen werden hierzu herangezogen (siehe Kap. 5.2):

- geringe Anzahl Demontagestationen,
- hohe Auslastung der Demontagelinie,
- geringe Durchlaufzeit und
- geringe Demontagestückkosten.

Die unterschiedlichen Planungsalternativen können dadurch gebildet, dass eine unterschiedliche Anzahl Demontagestationen eingeplant werden oder alternativ eine festgelegte Taktzeit zu erfüllen ist. Gründe hierfür können sein, dass die Anzahl der für die Demontagelinie zur

Verfügung stehenden Mitarbeiter aus betrieblichen Gründen variieren kann oder aber die innerhalb einer Zeiteinheit erwartungsgemäß zu demontierende Anzahl Alterzeugnisse noch nicht eindeutig feststeht und deshalb die Taktzeit mit unterschiedlichen Werten angenommen wird. Weiterhin besteht die Möglichkeit, für eine Planungsalternative die Taktzeit mit einem Zeitzuschlag zu versehen, beispielsweise aufgrund dessen, dass aus anderen Betriebsabteilungen Mitarbeiter zur Verfügung gestellt werden sollen, die nur eine geringe Qualifikation für die Durchführung der Demontageaufgabe aufweisen.

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei der Bewertung von Planungsalternativen werden für ein zu demontierendes Alterzeugnis drei Planungsalternativen betrachtet, mit jeweils einem Mitarbeiter pro Demontagestation. Die Vorgaben für die Entwicklung der Planungsalternativen, unter Berücksichtigung von gewichteten Zielerreichungsgraden, sind zum einen, den Einsatz von drei bzw. vier Mitarbeitern einzuplanen und weiterhin zu prüfen, ob eine mit sechs Minuten vorgegebene Taktzeit  $TAZ$  zu realisieren ist. In Abb. 6-6 ist das Ergebnis für die Demontageplanung eines Alterzeugnisses auf insgesamt vier Demontagestationen dargestellt.

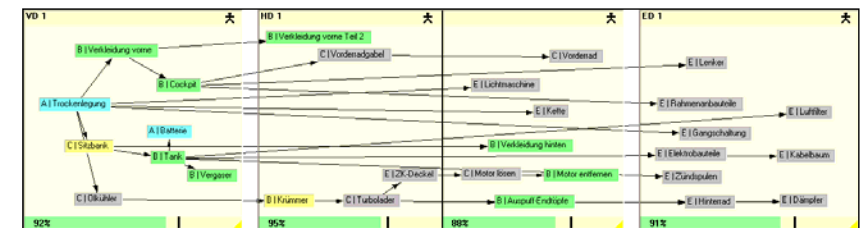


Abb. 6-6: Leistungsabstimmung bei vier Demontagestationen

Die Planungsbewertung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die entwickelten Planungsalternativen hinsichtlich der erreichten Zielkriterien in einer Matrix zusammengefasst (Abb. 6-7). In dieser Matrix sind spaltenweise die erreichten Werte für jede Planungsalternative  $a$  angegeben.

	Layout 81.57	Layout 82.58	Layout 87.63
Demontagestationen (ADS)	5	3	4
Auslastung (AUS)	0,99	0,94	0,91
Durchlaufzeit (DLZ) [s]	1856	1946	2003
Demontagestückkosten (DSK) [€]	15,43	16,2	16,67
Bewertung:	0	0	0

Abb. 6-7: Kriterienwerte für die Planungsalternativen *a*

Im Folgenden werden die Werte auf den jeweilig erreichten Bestwert pro Kriterium normiert und mit vorgegebenen Faktoren gewichtet (Kap. 5.3.3). Ein Beispiel für eine mögliche Gewichtung mit dem Schwerpunkt auf eine hohe Auslastung und eine möglichst geringe Durchlaufzeit, einer geringeren Gewichtung für die Anzahl Demontagestationen und am geringsten für die Demontagestückkosten ist in Abbildung 6-8 dargestellt:

Nr	Kriterien	1.	2.	3.	4.	Points	%	Rank
1.	Auslastung (AUS)	-	2	2	2	6	25	3
2.	Durchlaufzeit (DLZ)	2	-	3	3	8	33,3	1
3.	Demontagestationen (ADS)	2	1	-	4	7	29,2	2
4.	Demontagestückkosten (DSK)	2	1	0	-	3	12,5	4

Abb. 6-8: Gewichtung der Zielkriterien

Das Ergebnis der Bewertung der Planungsalternativen anhand der gewichteten normierten Zielerreichungsgrade (Kap. 5.3.3) ist in Abbildung 6-9 dargestellt.

	Layout 82.58	Layout 81.57	Layout 87.63
Auslastung (AUS)	0,94	0,99	0,91
Durchlaufzeit (DLZ) [s]	1946	1856	2003
Demontagestationen (ADS)	3	5	4
Demontagestückkosten (DSK) [€]	16,2	15,43	16,67
Bewertung:	1	0,92	0,91

Abb. 6-9: Ergebnis der Bewertung der Planungsalternativen

Für die Rangreihe der entwickelten Planungslösungen *a* ergibt sich:

$$rng(a) : 82.58 > 81.57 > 87.63 \quad \text{Rangreihe der Planungsalternativen} \quad (6.4)$$

Die Planungsalternativen *a* sind nun neu sortiert, nämlich spaltenweise gemäß der Rangreihe. Die als die beste bewertete Lösung erhält die Bewertung 1, die nachrangigen Planungslösungen sind in der Bewertungszeile mit ihrem auf den Bestwert normierten Wert versehen. Zur transparenten Darstellung für den Planer bleiben die einzelnen Kriterienwerte der Planungsalternativen weiterhin angegeben.

## 6.6 Ergonomische Bewertung von Demontevorgängen

Die Funktionalität der durch die BAuA zur Verfügung gestellten Leitmerkmalermethode für den Bereich Ziehen und Schieben sowie für das Heben, Halten und Tragen von Lasten (Kap. 5.4) wurde inhaltlich in das Verfahren *TANJA* implementiert. Die mittels der Leitmerkmalermethode durchgeführten Bewertungen gehen nicht in die Bewertung der entwickelten Planungsalternativen ein, da die Tätigkeiten und Ausführungsbedingungen für alle im Demontevorranggraph abge-

bildeten Demontagevorgänge festgelegt werden und somit für alle Alternativen gleichermaßen gelten.

In Abbildung 6-10 ist ein Beispiel für die Bewertung für das Auf-schieben eines Motorrads auf eine Hebebühne über eine relativ kurze Distanz mittels der „Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Ziehen und Schieben“ dargestellt.

**Leitmerkmalmethode - LMM Ziehen und Schieben [GPZ-Hubplattform.tst]**

Gender: männlich / weiblich

Art des Ziehens/Schiebens: gleitend / rollend

Flurförderzeug: ohne Last wird gerollt / Karren / Trolleys, Wagen, Roller / Gleis-, Hand-, Hubwagen / Manipulatoren

Lastwichtung: < 50 kg (0.5 Pkt), 50 bis 100 (1 Pkt), 100 bis 200 (1.5 Pkt), 200 bis 300 (2 Pkt), 300 bis 400 (3 Pkt), 400 bis 600 (4 Pkt), 600 bis 1000 (5 Pkt), > 1000 kg (2 Punkte)

Einzelstanz: Einzelweg < 5 m / Einzelweg > 5 m

Zeitwichtung: < 10 x (1 Pkt), 10 bis 40 x (2 Punkte), 40 bis 200 (4 Punkte), 200 bis 500 (6 Punkte), 500 bis 1000 (8 Punkte), ab 1000 x (10 Punkte) (2 Punkte)

Positioniergenauigkeit: gering (1 Pkt) / hoch (2 Punkte) (1 Punkt)

Bewegungsgeschwindigkeit: langsam (1 Pkt) / schnell (2 Punkte) (1 Punkte)

Haltung: 1 Pkt, 2 Punkte, 4 Punkte, 8 Punkte (4 Punkte)

Ausführungsbedingungen: gut (0 Pkt), eingeschränkt (2 Punkte), schwierig (4 Punkte), kompliziert (8 Punkte) (0 Punkt)

**Aktuelle Rechnung**

Zeit \* ( Last + Haltung + Ausführung + ( Positionieren \* Bewegungsgeschwindigkeit ) ) \* ( 1,3 für Frauen )  
 2 Pkt. \* ( 2 Pkt. + 4 Pkt. + 0 Pkt. + 1 Pkt. \* 1 Pkt. ) \* 1

6	11	22	33	44	55
6	12	24	36	48	60
7	13	26	39	52	65
7	14	28	42	56	70
8	16	32	48	64	80
9	18	36	54	72	90
10	20	40	60	80	100

**Punktsumme: 14**

**Bewertung:** Erhöhte Belastung, körperliche Überbelastung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich, Gestaltungsmaßnahmen sind sinnvoll.

Abb. 6-10: Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Ziehen und Schieben im Verfahren TANJA

In der Bewertung zeigt sich, dass für diese Tätigkeit eine erhöhte Belastung des Mitarbeiters resultiert und für den Fall eines Einsatzes

von vermindert belastbaren Mitarbeitern Gestaltungsmaßnahmen für die Reduktion der Belastung sinnvoll sind.

Ein weiterer Vorgang mit einer hohen physischen Belastung bei der Demontage eines Motorrads ist der Ausbau des Motors. Aufgrund der üblichen Konstruktionsweise eines Motorrads ist der tragende Rahmen außenliegend. Ein von allen angebauten Komponenten losgelöster Motor lässt sich zumeist nur seitwärts und nicht in einfacher Weise aus dem Rahmen entnehmen.

**Leitmerkmalmethode - LMM Heben und Tragen von Lasten**

Gender: männlich / weiblich

Wirksame Last: < 10 kg (1 Pkt), 10 bis < 20 kg (2 Punkte), 20 bis < 30 kg (4 Punkte), 30 bis < 40 kg (7 Punkte), ab 40 kg (25 Punkte) (4 Punkte)

Art der Tätigkeit: Heben (< 5 s) / Halten (> 5 s) / Tragen (> 5 m)

Zeitwichtung: < 5' (1 Pkt), 5' bis 15' (2 Punkte), 15' bis 1 h (4 Punkte), 1 h bis 2 h (6 Punkte), 2 h bis 4 h (8 Punkte), > 4 h (10 Punkte) (2 Punkte)

Haltung: 1 Pkt, 2 Punkte, 4 Punkte, 8 Punkte (8 Punkte)

Ausführungsbedingungen: gut (0 Pkt), eingeschränkt (1 Punkt), stark (2 Punkte) (2 Punkte)

**Aktuelle Rechnung**

Zeitwichtung \* ( Last + Haltung + Ausführungsbedingungen )  
 2 Punkte \* ( 4 Punkte + 8 Punkte + 2 Punkte )

11	22	44	66	88	110
12	24	48	72	96	120
14	28	56	84	112	140
17	34	68	102	136	170
35	70	140	210	280	350

**Punktsumme: 28**

**Bewertung:** Wesentliche erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich, Gestaltungsmaßnahmen sind angezeigt.

Abb. 6-11: Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Heben, Halten und Tragen von Lasten im Verfahren TANJA

Die mittels der Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Heben, Halten und Tragen von Lasten durchgeführte Bewertung (Abb. 6-11) ergibt für eine rein manuelle Ausführung des Herausnehmens im Ergebnis eine wesentlich erhöhte physische Belastung für den Mitarbeiter. Eine körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Gestaltungsmaßnahmen sind angezeigt.

Zur Beseitigung des vorhandenen Gefährdungspotenzials für mögliche Muskel-Skelett-Erkrankungen kann die körperliche Belastung bei der Entnahme des Motors aus dem Rahmen beispielsweise durch einen rollbaren Lastkran mit Auslegearm und Seilzug deutlich reduziert werden.

## 6.7 Arbeitsplatzgestaltung im Demontagesystem

Zur Beschreibung und Gestaltung von Arbeitsplätzen ist in *TANJA* das Modul Arbeitsplatzgestaltung implementiert. Die Zielsetzung besteht darin, den Arbeitsplatz so zu gestalten, dass er zur Durchführung der Arbeitsaufgabe an den Menschen angepasst ist (so bereits REFA 1984, S. 125 ff.; ROHMERT 1993, S. 493 ff.). Die Zielsetzung aus Unternehmenssicht ist zumeist, die Leistung(-sfähigkeit) der Mitarbeiter bestmöglich zu nutzen, d.h. den besten Wirkungsgrad bei möglichst geringer Beanspruchung zu erzielen (SCHMIDTKE 1993, S. 502).

Die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung im Demontagebereich ist in vielen Unternehmen verbesserungswürdig. Insbesondere in Recyclingunternehmen werden häufig nur unzulänglich an den Menschen und die Arbeitsaufgabe angepasste Arbeitsplätze zur Verfügung gestellt. Ein Beispiel hierfür sind Container für das Sammeln von sortenreinen Fraktionen. Mitarbeiter haben u.a. die Aufgabe, diese Container auf sortenreine Inhalte zu überprüfen. Mit manuellen Greifwerkzeugen versuchen sie oftmals, über eine (insbesondere für kleinere Personen) zu hohe Kante des Containers das falsch eingeworfene Recyclingmaterial wieder zu entnehmen, und zwar auch im hinteren Bereich des Containers. Ein einfacher Klappmechanismus im Einwurfbereich des Containers, wie er bei Gitterboxen schon lange Jahre üblich ist, würde bereits Abhilfe schaffen.

In Abbildung 6-12 ist ein Beispiel für die Auswahlmöglichkeit von Werkzeugen als sinnvolle Ausstattung entsprechend der Demontageaufgabe dargestellt.

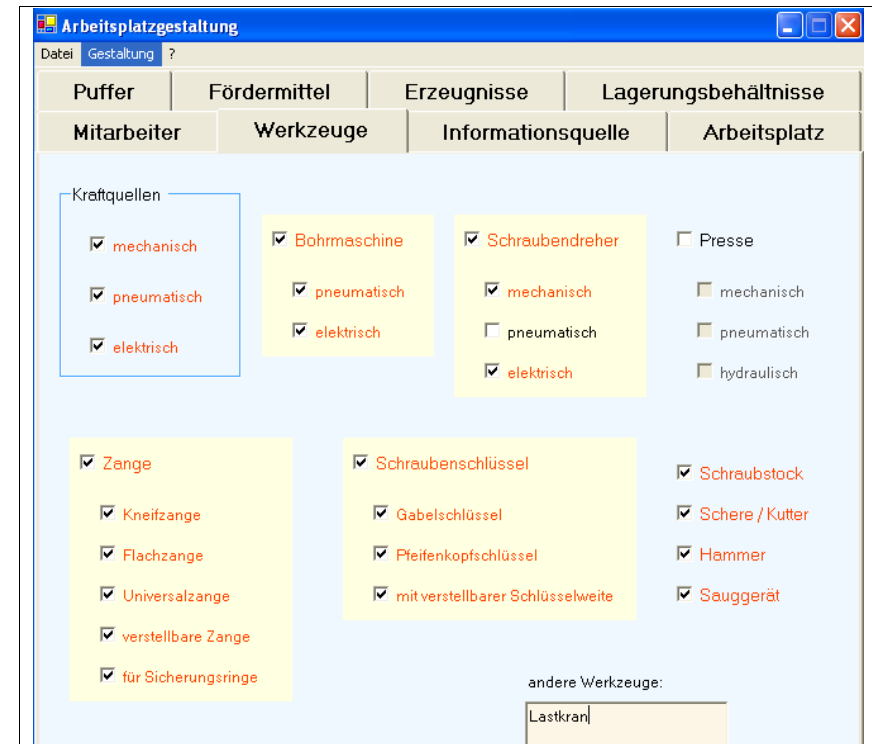


Abb. 6-12: Werkzeugausstattung für einen Demontagearbeitsplatz im Verfahren *TANJA*

Für die Werkzeugausstattung am Demontagearbeitsplatz können im Verfahren *TANJA* Detailangaben zu folgenden Aspekten der Arbeitsplatzgestaltung gemacht werden:

- Mitarbeiter: Anzahl, differenziert nach Männer und Frauen,
- Werkzeuge: Ausstattung, Kraftquellen, ...
- Kommunikation: Anzeigen, Steuerelemente, ...,
- Arbeitsplatz: Arbeitsflächen, Steharbeitsplatz, Beleuchtung,
- Puffer: Paletten, Gitterbox, ...,

- Fördermittel: Handwagen, Förderband, usw.,
- Erzeugnisse: Anzahl, Demontagetiefe,
- Lagerungsbehältnisse: Sammelbehälter, Fässer, Gitterboxen.

Die Ausstattung eines der jeweiligen Demontageaufgabe angepassten Demontagearbeitsplatz kann im Verfahren *TANJA* hinterlegt und im Bedarfsfall in relativ einfacher Weise modifiziert werden.

## 7. Anwendung des Verfahrens *TANJA*

Die mit dem Demontageplanungsverfahren *TANJA* entwickelten Lösungen lassen sich erst nach deren Realisierung in einem Betrieb abschließend bewerten. Um die Gültigkeit des Verfahrens annähernd zu beurteilen, besteht eine Möglichkeit darin, ein bestehendes System zunächst zu analysieren, Alternativen für die Bewältigung der anstehenden Demontageaufgaben zu entwickeln und das daraus resultierende (verbesserte) Demontagesystem mit dem real existierenden Demontagesystem hinsichtlich vorgegebener Zielkriterien und deren Erreichung zu vergleichen. In diesem Sinne wird hier von einer Verifizierung gesprochen.

Schon in der frühen Entwicklungsphase des Verfahrens *TANJA* und auch in der Folgezeit wurden die entwickelten Algorithmen und Vorgangszeiten an industriellen Anwendungsfällen erprobt und die daraus gewonnenen Erkenntnisse in die Verfahrensentwicklung eingebunden. Bei den Untersuchungen, die in dem in Kapitel 4.2 genannten Forschungsprojekt in Demontageunternehmen durchgeführt wurden, konnten die Ergebnisse mit den realen Vorgehensweisen in den Betrieben verglichen werden.

### 7.1 Schwierigkeiten bei der Datenerhebung

Die zu Beginn der hier vorliegenden Arbeit zunächst in Erwägung gezogene Zielsetzung, Demontagetätigkeiten in Reparaturbetrieben und in Recyclingunternehmen zu analysieren, konnte nicht realisiert werden. Es war nicht möglich, gezielt Datenerhebungen in Reparaturbetrieben, beispielsweise in Kfz-Werkstätten, durchzuführen. Da in diesen Unternehmen die Reparaturkosten anhand von vorgegebenen, monetär bewerteten Zeitwerten erfolgen, den so genannten Arbeitswerten, bestand in den Betrieben kein großes Interesse an einer Daten-



erhebung. Auch der Versuch, bei einem namhaften Kfz-Hersteller in dessen Demontagebereich innerhalb einer Forschungsabteilung Analysen durchzuführen, ergab nur einen Besichtigungstermin, mit dem Ergebnis, dass Detailinformationen zu Demontevorgängen nicht für diese Arbeit zur Verfügung gestellt werden konnten.

Daher erfolgten die grundlegenden Datenerhebungen in mehreren Recyclingbetrieben. Deren vorrangige Zielsetzung bei der Demontage von Alterzeugnissen ist es stets, eine hohe Personalauslastung bei einer möglichst geringen Anzahl von Demontestationen zu realisieren. Zumeist werden die Demontagetätigkeiten an Einzelarbeitsplätzen durchgeführt. Ein Unternehmen aus der Motorradbranche erklärte sich schließlich bereit, sich für eine Anwendung des Verfahrens zur Verfügung zu stellen.

## 7.2 Anwendung des Verfahrens bei der Motorrad demontage

Die Anwendung des Demontageplanungsverfahrens *TANJA* erfolgte in einem Demontagebetrieb anhand einer Motorrad demontage. Aus Gründen der Vertraulichkeit erfolgt hier jedoch keine Nennung des Betriebs oder von konkreten Einzelheiten. Aufgabe der Untersuchung war es, die real existierende Recyclingabteilung zu analysieren und mit Hilfe des Verfahrens *TANJA* Planungsalternativen für diese Abteilung zu entwickeln. Zielsetzung des Betriebs war es, alle wiederverwendbaren Komponenten eines bestimmten Motorradtyps (Motor, Vergaser, Elektroteile usw.) zu demontieren und die nicht wiederverwendbaren Materialien in möglichst sortenreine Fraktionen zu trennen, um sie einer weiteren Verwertung zuzuführen. Für das Projekt standen drei Motorräder des gleichen Typs zur Verfügung, die Demontearbeiten wurden von berufserfahrenen Facharbeitern an Einzelarbeitsplätzen durchgeführt.

### 7.2.1 Analyse des bestehenden Komplett-Demontage-arbeitsplatzes

Da es vorrangig die Zielsetzung des Betriebs ist, Motorrad-Ersatzteile für den Verbrauchermarkt zur Verfügung zu stellen, hatte der Betrieb eine Internetplattform eingerichtet, auf der die verfügbaren Ersatzteile zum Verkauf angeboten werden. Die darin aufgeführten Komponenten sind in erster Linie aus hochwertigem Kunststoff bestehende Verkleidungsteile, elektrischen Bauelemente (Zündspulen, Lichtmaschine usw.) sowie diverse Tanks, Auspuffanlagen und Motoren. Die bei der Demontage ausgebauten Komponenten wurden neben dem Arbeitsplatz auf dem Boden bzw. auf einer Palette sortiert abgelegt (siehe Abb. 7-1).

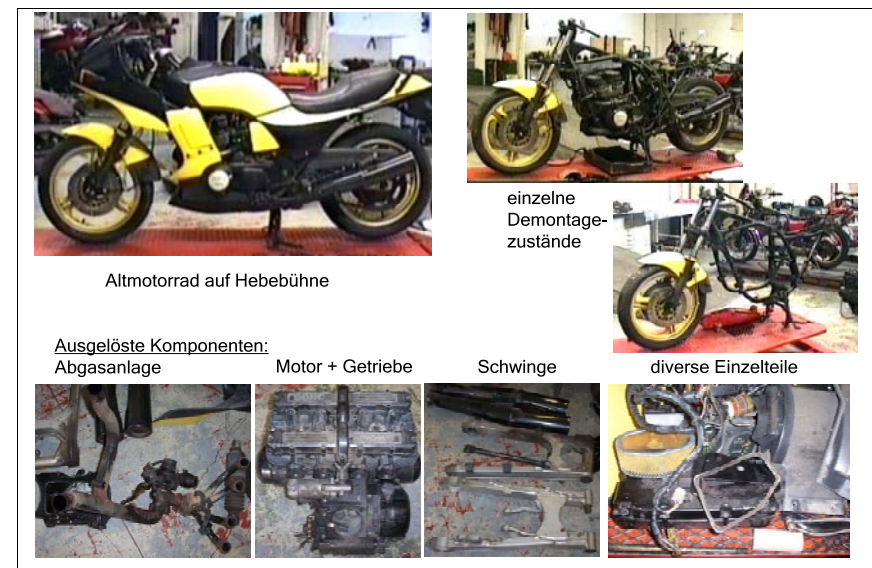


Abb. 7-1: Ist-Situation bei der Motorrad demontage

Im Rahmen der Analyse erfolgte zunächst eine Probedemontage eines Motorrads gemäß der üblichen Vorgehensweise in diesem Betrieb, bei der einzelne Demontevorgangszeiten für das Herauslösen einzelner

Bauteilen gemessen wurden. Die dabei eingesetzten Trennverfahren, Werkzeuge, Hilfsmittel, Nebentätigkeiten usw. wurden dokumentiert. Die Ersatzteile mit dem größten zu erwartenden Verkaufserlös waren:

- Verkleidungsteile aus hochwertigem Kunststoff,
- Motor,
- Tank,
- Krümmer und Auspuff-Endtöpfe,
- Cockpit mit elektronischen Anzeigeelementen,
- Lichtmaschine und
- Vergaserbatterie.

Für die Außenteile wie Verkleidungselemente und Tank gibt es aus branchenspezifischen Gründen die größte Nachfrage und die höchsten Verkaufserlöse. Die im Betrieb verbleibenden Teile werden für einige Zeit gelagert und letztendlich, bei ausbleibendem Verkauf, einem Verwertungsunternehmen zugeführt.

Die Vorgehensweise bei der Demontage ist prinzipiell so angelegt, dass die Tätigkeiten an den leicht zugänglichen Außenteilen begonnen werden und im Weiteren in einer mehr oder weniger stochastischen Reihenfolge oder nach den Vorlieben des Mitarbeiters erfolgen. Die Gesamtdauer der Motorrad Demontage in seine wesentlichen Komponenten betrug am Einzelarbeitsplatz in etwa zwei Stunden.

## 7.2.2 Planung einer Demontagelinie

Nach Aufnahme des Ist-Zustands im Betrieb erfolgte die Planung des Demontagesystems mit Hilfe von *TANJA*. Basierend auf den Ergebnissen der Probedemontage und mit Hilfe von Konstruktionsplänen des Motorrads im Neuzustand bestand die erste Aufgabe darin, einen Demontevorranggraphen zu erstellen. Alle wesentlichen Vorgänge für die Demontage der vorhandenen Komponenten wurden dabei mittels *ANGELA* erfasst und unter Beachtung der Vorgangsfolgerestriktionen abgebildet (Abb. 7-2).

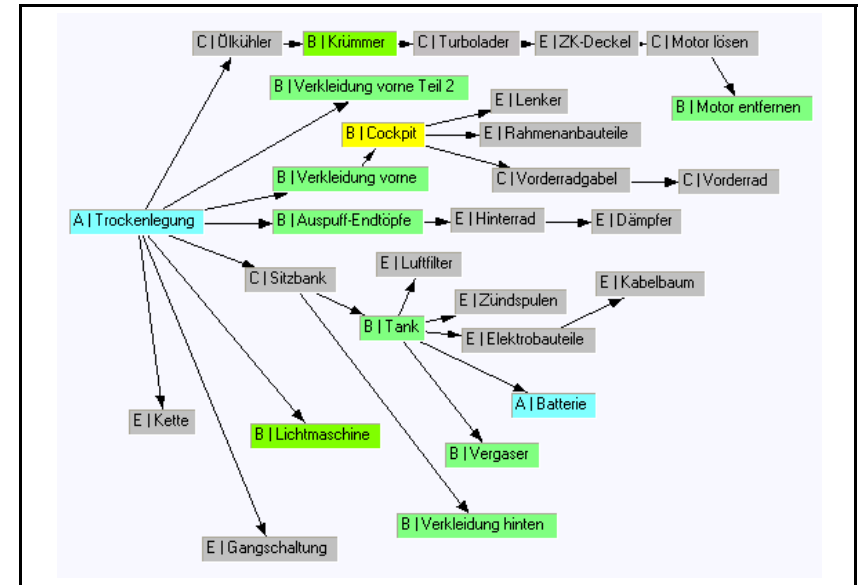


Abb. 7-2: Mittels *TANJA* erstellter Demontevorranggraph

Die gesetzlich vorgeschriebene Trockenlegung des Motorrads (Prioritätsstufe A) erfordert zunächst die Entleerung des Tanks, der Vergaserbatterie und des Ölkühlers sowie den Ausbau der Batterie. Der Vorgang des Trockenlegens ist der Startknoten des Demontevorranggraphen. Mit der Prioritätsstufe B sind diejenigen Komponenten bezeichnet, die erwartungsgemäß den größtmöglichen Erlös erzielen werden. Der Motor kann aufgrund der konstruktiven Anordnung (Motor im Außenrahmen fixiert) bei der Demontage erst zu einem relativ späten Zeitpunkt demontiert werden.

Die durchgeführte Leistungsabstimmung erfolgte auf Basis der lokalen Gegebenheiten derart, dass drei Demontagestationen einzuplanen waren. Die Leistungsabstimmung erfolgt daher aufgrund dieser Vorgabe für drei Demontagestationen (Abb. 7-3). Die Bestimmung der Demontevorgangszeiten bei vorgegebenen Trennverfahren für das Herauslösen von definierten Komponenten summiert sich auf insgesamt 30 Minuten, die Taktzeit beträgt somit 10 Minuten.



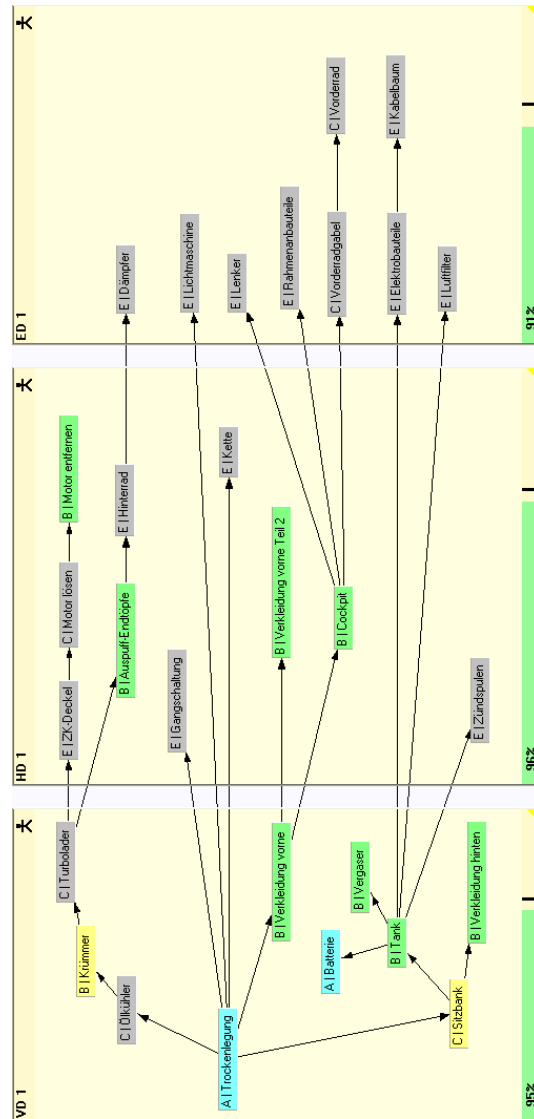


Abb. 7-3: Mit TANJA durchgeführte Leistungsabstimmung mit resultierender Auslastung der Demontagestationen

Durch den Einsatz alternativer Trennverfahren, der Bereitstellung von zusätzlichem Werkzeug auf beweglichen Werkzeugwagen, die an mehreren unterschiedlichen Positionen rund um jede der drei Demontagestationen mobil angeordnet sind, und der daraus resultierenden deutlichen Verringerung von Wegezeiten des Mitarbeiters ließ sich die gesamte Demontagezeit gegenüber der bisher üblichen Vorgehensweise von 2 Stunden theoretisch auf 0,5 Stunden, also auf etwa 25 % reduzieren.

### 7.2.3 Verifikation und Umsetzung der Demontagelinie

Aufgrund dieses Ergebnisses erklärte sich der Betrieb bereit, zur Überprüfung der Planungslösung mit den verbleibenden beiden Motorrädern eine Demontage an drei in Linie angeordneten Demontagestationen (Abb. 7-4) durchzuführen.

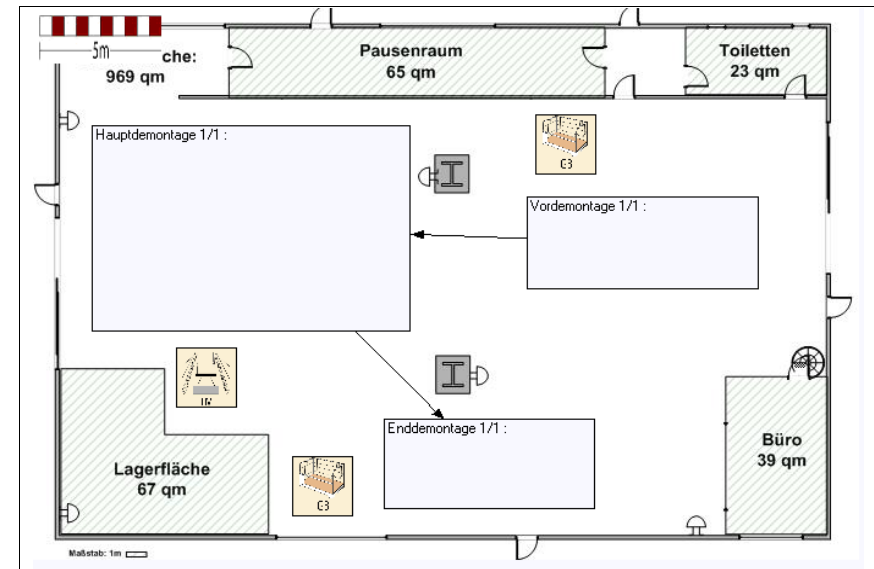


Abb. 7-4: Layout der Halle für die Motorraddemontage

Hierfür standen mobile Hebebühnen zur Verfügung (Abb. 7-1), die nach jedem abgearbeiteten Takt zur nächsten Position gezogen wurden. Für die größeren Komponenten wurden neue Ablageplätze im direkten Umfeld der jeweiligen Demontagestation eingerichtet, z.B. eine Haltevorrichtung an der Decke für die abgebauten Krümmer und Endrohre.

Für das zweite Motorrad (das erste war für die Probedemontage genutzt worden) ergab sich eine starke Taktüberschreitung, insbesondere wegen der neu angeordneten Demontagevorgänge, der in ungewohnter Weise positionierten Werkzeuge und des geringen Übungsgrads der Mitarbeiter bei der für sie neuen Vorgehensweise in der Demontage.

Das dritte Motorrad wurde schon routinierter und schneller über die Demontagelinie geführt. Insgesamt konnte die Durchlaufzeit über die drei Demontagestationen bei diesen beiden Versuchen gegenüber der ursprünglichen Demontagezeit im Durchschnitt um 40 % reduziert werden.

Die Verifikation der entwickelten Planungslösung kann somit nicht als „völlig gelungen“ bezeichnet werden. Es zeigte sich aber, dass zwar die vorgegebenen Demontagevorgangszeiten (noch) nicht eingehalten werden konnten, aber die Durchführungszeit für die Komplettdemontage aufgrund der Strukturierung der Demontagevorgänge, der vorgegebenen Trennverfahren und der neuen Arbeitsplatzgestaltung deutlich gesenkt werden konnte.

Aufgrund der begrenzten Anzahl der für diesen Test zur Verfügung stehenden Motorräder sah sich der Betrieb nicht veranlasst, das neu geplante Demontagesystem für eine nachhaltige Nutzung zu realisieren. Allerdings wurden einige Kernpunkte aus dem Planungsverfahren übernommen, wie

- Festlegung der Reihenfolge der auszulösenden Komponenten,
- Verwendung von alternativen Hilfsmitteln (z.B. Kran) und
- Arbeitsplatzgestaltung.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

In kleinen und mittelständischen Unternehmen, insbesondere im Recyclingbereich, kommen für die Demontage von Alterzeugnissen geeignete und auch anwendbare Planungsverfahren bisher nur in geringem Umfang zum Einsatz. Zumeist stehen für die Demontageplanung in der Regel nur einfache Datenbanksysteme und empirisches Wissen zur Verfügung. Die in der vorliegenden Arbeit gesetzten Ziele, nämlich die systematische Entwicklung eines rechnerunterstützten Planungsverfahrens zur Demontageplanung mit Leistungsabstimmung für arbeitsteilige Demontagesysteme, die prototypenhafte Implementierung in einem Softwareverfahren und die Verifizierung des entwickelten Verfahrens in einem industriellen Anwendungsfall konnten jedoch erfüllt werden.

### 8.1 Erreichte Ziele der vorliegenden Arbeit

Unter Berücksichtigung der organisatorischen, technischen und personellen Rahmenbedingungen in der Demontage wurde das rechnerunterstützte Planungsverfahren *TANJA* entwickelt, welches es dem Anwender ermöglicht,

- mit Hilfe der durch das Verfahren zur Verfügung gestellten Module ein Demontagesystem in den notwendigen Details zu strukturieren und im Rechner abzubilden,
- Demontagevorgänge in Verbindung mit einzelnen Demontagevorgangszeiten in einem Demontevorranggraphen abzubilden,
- eine Leistungsabstimmung für eine arbeitsteilige Demontagelinie durchzuführen,

- entwickelte Planungsalternativen auf Basis von gewichteten, normierten Zielerreichungsgraden zu bewerten und miteinander zu vergleichen sowie
- die physische Belastung der Mitarbeiter durch manuelle Tätigkeiten nach ergonomischen Gesichtspunkten zu bewerten.

Für die Strukturierung und Planung der zur Demontage von Alt-erzeugnissen notwendigen Vorgänge werden in *TANJA* mittels eines Demontagevorranggraphen die einzelnen Demontagevorgänge durch den Anwender eingegeben. Im Demontagevorranggraph werden ausgehend von dem zu demontierenden Alterzeugnis die Demontagevorgänge hinsichtlich der Vorgangszeiten beschrieben, die zur Erreichung des gewählten Demontagezustands notwendig und über Vorgangsfolgerestriktionen miteinander verknüpft sind.

Die für die Beschreibung der Demontagevorgänge notwendigen Daten (Komponenten, Verbindungsarten, Zeitbausteine usw.) erhält der Anwender aus Konstruktionsplänen des Erzeugnisses im Neuzustand, eigenen Detailkenntnissen über die zu demontierenden Alterzeugnisse oder anhand von durchgeführten Probedemontagen. Der Detaillierungsgrad bei der Aufteilung der Demontagevorgänge kann durch den Anwender festgelegt werden. Auf Basis des Demontagevorranggraphen kann er dann unter Vorgabe der Taktzeit oder der Anzahl Demontagestationen algorithmisch eine Leistungsabstimmung der Demontagelinien durchführen. Mit *TANJA* wird somit ein neues Verfahren zur Verfügung gestellt, das auf Basis zeitwirtschaftlicher Daten die Durchführung einer Leistungsabstimmung von Demontagelinien ermöglicht.

Die an den einzelnen Demontagestationen auftretenden physischen Belastungen der Mitarbeiter lassen sich durch das im Verfahren *TANJA* integrierte Modul „Leitmerkmalmethode“ bewerten. Der Anwender wird textuell auf kritische Tätigkeiten und auf die Notwendigkeit zur Durchführung von sinnvollen Gestaltungsmaßnahmen hingewiesen, die zu einer Reduzierung der Belastung führen.

Im nächsten Schritt wird das leistungsabgestimmte Demontagesystem durch ein Layoutmodul graphisch dargestellt. Der Anwender hat hier die Möglichkeit, aus den durch das Planungsverfahren zur

Verfügung gestellten oder aus selbst erstellten graphischen Objekten (Grundriss, Demontagestationen, Fördermittel usw.) die Planungslösung in einer maßstabsgerechten Umgebung darzustellen.

Mittels des Demontagevorranggraphen lassen sich mehrere Leistungsabstimmungen mit unterschiedlichen Taktzeiten oder unterschiedlicher Anzahl Demontagestationen durchführen; zu jeder Leistungsabstimmung können jeweils beliebig viele Layouts erstellt werden. Durch ein in das Verfahren integriertes Bewertungsmodul lassen sich die einzelnen Planungslösungen anhand der gewichteten Zielerreichungsgrade (für Durchlaufzeit, Auslastung usw.) bewerten und miteinander vergleichen. Mit Hilfe des entwickelten Planungsverfahrens kann die Planung der Demontage spezifischer Alterzeugnisse durchgeführt und so der Kapazitätsbedarf bzw. die Auslastung des Demontagesystems kalkuliert werden.

## 8.2 Möglichkeiten der Fortführung und Weiterentwicklungen

Zur Fortführung dieser Arbeit wäre es sinnvoll, die mit Hilfe von *TANJA* entwickelten statischen Ausgangslösungen in ihrem dynamischen Systemverhalten zu analysieren. Die Planung und Steuerung von Demontageaufträgen mit variantenreichen Alterzeugnissen oder aber im Extremfall mit einem Model-Mix stellen einen weiteren Ansatz dar, ebenso die Schaffung eines regelbasierten Expertensystems zur automatisierten Bereitstellung von Verbesserungsvorschlägen für ein bestehendes oder vorläufig geplantes Demontagesystem.

Hierzu wäre es notwendig, das Planungsverfahren an ein Simulationsverfahren zu koppeln, um das dynamische Verhalten rechnerunterstützt zu bewerten. Eine weitere Möglichkeit wäre die Untersuchung von Demontagelinien mit mehreren Subsystemen und mit Mehrarbeitsplätzen an einzelnen Demontagestationen (Abb. 8-1).

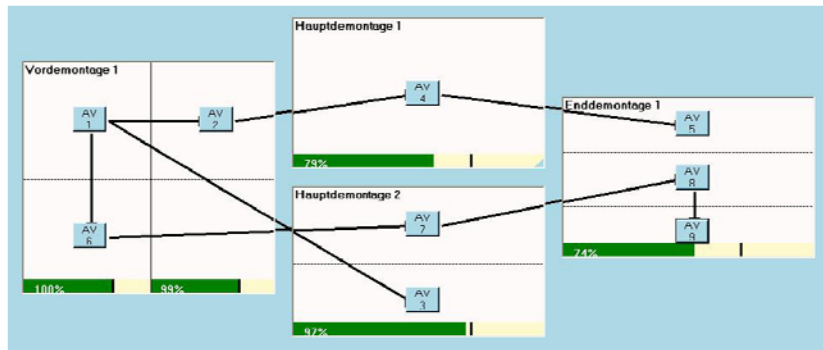


Abb. 8-1: Beispiel einer Demontagelinie mit zwei Hauptdemontagelinien und Mehrarbeitsplätzen

Während der Durchführung dieser Arbeit zeigte sich, dass in Demontageunternehmen ein großer Bedarf an einer zeitwirtschaftlichen Analyse von Demontagevorgängen und an einem geeigneten Planungsverfahren besteht. Darüber hinaus ist es aber auch zwingend notwendig, durchzuführende Demontageprozesse, die stark von stochastisch auftretenden Problemsituationen geprägt sind, nicht nur zu planen, sondern gleichermaßen auch die laufenden Prozesse zu steuern. Durch ein umfassendes Planungs- und Steuerungsverfahren, das an die Erfordernisse der Demontage auf Basis von (ggf. auch variantenspezifischen) Demontagevorgangszeiten angepasst ist, könnte ein effizienterer Ablauf innerhalb des Demontagesystems und damit eine noch wirtschaftlichere Demontage gewährleistet werden.

Es könnte ein umfangreiches Datenbanksystem entwickelt werden, das beispielsweise branchenspezifische Demontagezeitbausteine, alterzeugnisspezifische Demontageteilvorgänge für das Auslösen einzelner, bestimmter Komponenten sowie erfolgreich durchgeführte Demontagevorgänge zur Verfügung stellt.

Zielführend wäre hierfür ein neues Projekt, das auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit aufbaut und im Ergebnis ein integriertes Verfahren zur Demontagesystemplanung und -auftragssteuerung bietet. Dieses sollte insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen nicht nur bei der Entwicklung von neuen Demontagesystemen

unterstützen, sondern auch eine Verbesserung bestehender Systeme sowie die Steuerung variierender Auftragsprogramme ermöglichen.

## 9. Literaturverzeichnis

### 9.1 Quellen

2002/96/EG:

Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte.  
Vom 27. Januar 2003, zuletzt geändert am 8. Dezember 2003.

2012/19/EU:

Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Neufassung).  
Vom 4. Juli 2012.

AltfahrzeugV:

Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung).  
Vom 04. Juli 1997, zuletzt geändert am 31. August 2015.

ArbSchG:

Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG).  
Vom 07. August 1996, zuletzt geändert am 31. August 2015.

ArbStättV:

Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV).  
Vom 12. August 2004, zuletzt geändert am 31. August 2015.

ARNOLD, Dieter:

Materialflußlehre.  
Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg-Verlag, 1995.

ARNOLD, Dieter; FURMANS, Kai:

Materialfluss in Logistiksystemen.  
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 5. Auflage, 2007.

BAuA - Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.):  
Gefährdungsbeurteilung mithilfe der Leitmerkmalmethode.  
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Physische-Belastung/Gefährdungsbeurteilung.html>, Stand: 23.07.2016.  
(=2016a)

BAuA - Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.):  
Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Ziehen und Schieben.  
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Physische-Belastung/Gefährdungsbeurteilung.html>, Stand: 23.07.2016.  
(=2016b)

BAuA - Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.):  
Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Heben, Halten, Tragen.  
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Physische-Belastung/Gefährdungsbeurteilung.html>, Stand: 23.07.2016.  
(=2016c)

BAuA - Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.):  
Leitmerkmalmethode zur Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen.  
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Physische-Belastung/Gefährdungsbeurteilung.html>, Stand: 23.07.2016.  
(=2016d)

BRAUN, Wolfgang Jürgen:

Beitrag zur Festlegung der Arbeitsteilung in manuellen Arbeitssystemen.  
Karlsruhe, Uni Diss 1995.  
(ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 9 - ISSN 0940-0559)

BULLINGER, Hans-Jörg (Hrsg.):

Systematische Montageplanung.  
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1986.

BULLINGER, Hans-Jörg; RIETH, Dieter; EULER, Hanns Peter:

Planung entkoppelter Montagesysteme.  
Stuttgart: B. G. Teubner Verlag, 1993.

BULLINGER, Hans-Jörg (Hrsg.):

Ergonomie: Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung.  
Stuttgart: B. G. Teubner Verlag, 1994.

CRONE, Joachim; ROSEMANN, Bernd; MÖRTL, Markus:  
Recyclinggerechtes Konstruieren.  
In: Handbuch Konstruktion.  
Hrsg.: RIEG, Frank; STEINHILPER, Rolf.  
München Wien: Carl Hanser Verlag, 2012, S. 485-510.

DEUSE, Jochen; BUSCH, Felix:  
Zeitwirtschaft in der Montage.  
In: Montage in der industriellen Produktion.  
Hrsg.: LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter.  
Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2. Auflage 2012, S. 79-107.

DIN 31051:2012-03, 2012  
Grundlagen der Instandhaltung.  
September 2012.

DIN 8580:2003-09:  
Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung.  
September 2003.

DIN 8588:2013-08:  
Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.  
September 2013.

DIN 8589-0:2003-09:  
Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines, Einordnung,  
Unterteilung, Begriffe.  
September 2003.

DIN 8590:2003-09:  
Fertigungsverfahren Abtragen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.  
September 2003.

DIN 8590:2004-02:  
Berichtigung zu DIN 8590:2003-09.  
Februar 2004.

DIN 8591:2003-09:  
Fertigungsverfahren Zerlegen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.  
September 2003.

DIN 8592:2003-09:  
Fertigungsverfahren Reinigen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.  
September 2003.

DIN 8593:2003-09:  
Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung,  
Begriffe.  
September 2003.

DITTMAYER, Stefan:  
Arbeits- und Kapazitätsteilung in der Montage.  
Berlin: Springer-Verlag, 1981.

DOMSCHKE, Wolfgang; DREXL, Andreas; KLEIN, Andreas; SCHOLL,  
Armin:  
Einführung in Operations Research.  
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 9. Auflage 2015.

DOMSCHKE, Wolfgang; SCHOLL, Armin; VOß, Stefan:  
Produktionsplanung, Ablauforganisatorische Aspekte.  
Berlin, Heidelberg, New York u.a.: Springer-Verlag, 2. Auflage 1997.

ElektroG:  
Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträg-  
liche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elek-  
tronikgerätegesetz).  
Vom 16. März 2005, zuletzt geändert am 20. September 2013.

ElektroG2:  
Gesetz zur Neuordnung des Rechts über das Inverkehrbringen, die Rück-  
nahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronik-  
geräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz).  
Vom 20. Oktober 2015.

EVERSHEIM, Walter (Hrsg.):  
Montagegerechte Produktgestaltung.  
In: Strategien zur Rationalisierung der Montage.  
Hrsg.: EVERSHEIM, Walter.  
Düsseldorf: VDI Verlag, 1987.

EVERSHEIM, Walter:  
Produktentstehung.  
In: Produktion und Management „Betriebshütte“, Teil 1.  
Hrsg.: EVERSHEIM, Walter, SCHUH, Günther.  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 7. Auflage 1996.

FANDEL, Günter; FISTEK, Allegra; STÜTZ, Sebastian:  
Produktionsmanagement.  
Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer-Verlag, 2011.

FURMANS, Kai:

Bedientheoretische Methoden als Hilfsmittel der Materialflußplanung.  
Karlsruhe: Universitätsverlag, 2000.  
(Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe, Band 52)

GAMBER, Thilo:

Entwicklung eines Verfahrens zur agentenbasierten Einsatzzeitgestaltung.  
Aachen: Shaker Verlag, 2015.  
(ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 44)

GRINNINGER, Jürgen:

Schlanke Produktionssteuerung zur Stabilisierung von Auftragsfolgen in der Automobilproduktion.  
München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2012.

GROB, Robert:

Erweiterte Wirtschaftlichkeits- und Nutzenrechnung.  
Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1984.

GROB, Robert;, HAFFNER, Helmut:

Planungsleitlinien Arbeitsstrukturierung.  
Berlin u.a.: Siemens-Aktiengesellschaft, Abt. Verlag, 1982.

GROBEL, Thomas:

Analyse der Einflüsse auf die Aufbauorganisation von Produktionssystemen.  
Karlsruhe, Uni Diss 1993.  
(ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 6 – ISSN 0940-0559)

HACKSTEIN, Rolf:

Produktionsplanung und -steuerung (PPS).  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2. Auflage 1989.

HERRMANN, Christoph:

Ganzheitliches Life Cycle Management.  
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.

HARTEL, Marko; LOTTER, Bruno:

Planung und Bewertung von Montagesystemen.  
In: Montage in der industriellen Produktion.  
Hrsg.: LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter.  
Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2. Auflage 2012, S. 365-398.

HEINZ, Klaus; MÖNIG, Olaf; SCHWARZ, Rainer; ZÜLCH, Gert:

Zeitermittlung für die manuelle Demontage.  
In: REFA-Nachrichten,  
Darmstadt, 55(2002)4, S. 15-18.

HRDINA, Jan:

Beitrag zur Steuerung von arbeitsteiligen Demontagesystemen.  
Aachen: Shaker Verlag, 2014.  
(ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 43)

HORN, Gustaf A.:

Abwrackprämie.  
Hrsg.: Springer Gabler Verlag, Gabler Wirtschaftslexikon.  
<http://www.wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/89412/abwrackpraemie-v8.html>, Stand: 04.03.2016.

HUBER, Alexander:

Demontageplanung und -steuerung. Planung und Steuerung industrieller Demontageprozesse mit PPS-Systemen.  
Aachen: Shaker Verlag, 2001.

HUBER, Alexander:

Primärbedarfsplanung im Rahmen on-demand orientierter Demontageplanung.  
Magdeburg, Universität: Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme, 21.02.2002.  
<http://enviroinfo.isep.at/UI%20200/Huber.pdf>, Stand: 20.09.2015.

IDIS (Hrsg.):

Entdecken Sie IDIS.  
Saarbrücken: IDIS-Management.  
[http://www.idis2.com/index.php?action=discover\\_idis&language=german](http://www.idis2.com/index.php?action=discover_idis&language=german),  
Stand: 08.12.2015.

KRELLE, Wilhelm:

Präferenz- und Entscheidungstheorie.  
Tübingen: Verlag J. C. B. Mohr, 1968.

KrW-/AbfG:

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG).  
Vom 27. September 1994, zuletzt geändert am 06. Oktober 2011.

KrWG:

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG).

Vom 24. Februar 2012, zuletzt geändert am 04. April 2016.

KURBEL, Karl:

Produktionsplanung und –steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management.

München, Wien: Oldenbourg Verlag, 6. Auflage 2005.

KURBEL, Karl; SCHOOF, Bernhard:

Ein Entscheidungsunterstützungssystem für Entsorgungsunternehmen:

In: Vernetzte Strukturen in Informatik, Umwelt und Wirtschaft, Proceedings des 12. Internationalen Symposiums „Informatik im Umweltschutz“ 1998.

Hrsg.: HAASIS, Hans-Dietrich; RANZE, Karl Christoph.

Marburg: Metropolis-Verlag, 1998, S. 215-225

KURBEL, Karl; SCHNEIDER, Bernd; ZYADEH, H.:

Funktionen, Aufbau und Einsatzformen eines betrieblichen Recycling-Informationssystems.

Industrie Management, 12(1996)5, S. 56-60.

LAMBERT, Fred; GUPTA, Surendra M.:

Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse, and Recycling. Boca Raton, London, New York u.a.: CRC Press, 2005.

LasthandhabV:

Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten bei der Arbeit (Lastenhandhabungsverordnung - LasthandhabV).

Vom 04. Dezember 1996, zuletzt geändert am 31. August 2015.

LOOS, Manuel Norbert:

Daten- und termingesteuerte Entscheidungsmethodik der Fabrikplanung unter Berücksichtigung der Produktentstehung.

Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013.

<http://dx.doi.org/10.5445/KSP/1000032015>, Stand: 05.12.2015.

LUCZAK, Holger:

Arbeitswissenschaft.

Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1998.

LUTZ, Ludwig:

Abtaktan von Montagelinien.

Mainz: Otto Kraußkopf-Verlag, 1974.

(Produktionstechnik heute, Band 8)

MARTENS, Hans; GOLDMANN, Daniel:

Recyclingtechnik.

Wiesbaden: Springer Vieweg, 2. Auflage 2016.

MÄRZ, Lothar; WEIGERT, Gerald:

Simulationsgestützte Optimierung.

In: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik.

Hrsg: MÄRZ, Lothar; KRUG, Wilfried; ROSE, Oliver; WEIGERT, Gerald.

Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, S. 3-13.

McGOVERN, Seamus M.; GUPTA, Surendra M.:

The Disassembly Line.

New York, Chicago, San Francisco u.a.: The McGraw-Hill Companies, 2011.

MEYER, André; GRAUER, Matthias; RITTNER, Martin:

Methodisches Vorgehen zur integralen Auslegung von Produkt und Montage.

In: Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte.

Hrsg.: FELDMANN, Klaus.

Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, S. 5-82.

MEYER, Jan Christoph; SANDER, Ulrich:

Bestände senken, Lieferservice steigern – Ansatzpunkt Bestandsmanagement.

Aachen: Forschungsinstitut für Rationalisierung, 2009.

MÖNIG, Olaf; SCHWARZ, Rainer:

Zeitermittlung für die manuelle Demontage.

In: aktuell, das Info-Magazin der Deutschen MTM-Vereinigung.

Hamburg, 2(2002), S. 14-15.

MÜLLER, Reinhard:

Planung hybrider Montagesysteme auf Basis mehrschichtiger Vorranggraphen.

Aachen: Shaker Verlag, 2002.

(ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 27)



- NAVE, Markus:  
Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des  
Trennprozesses von Schraubenverbindungen.  
Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2003.
- NEUMANN, Klaus; MORLOCK, Martin:  
Operations-Research.  
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2. Auflage 2004.
- OHLENDORF, Martin:  
Simulationsgestützte Planung und Bewertung von Demontagesystemen.  
Essen: Vulkan Verlag, 2006.
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.):  
Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 1, Grundlagen.  
München: Carl Hanser Verlag, 7. Auflage 1984.
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.):  
Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 3, Kostenrechnung, Arbeits-  
gestaltung.  
München: Carl Hanser Verlag, 7. Auflage 1985.
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.):  
Planung und Steuerung, Teil 1 (=1991a).  
Planung und Steuerung, Teil 2 (=1991b).  
Planung und Steuerung, Teil 3 (=1991c).  
München: Carl Hanser Verlag, 1991.  
(Methodenlehre der Betriebsorganisation)
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.):  
Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 2: Datenermittlung.  
München: Carl Hanser Verlag, 7. Auflage 1992.
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.):  
Ausgewählte Methoden der Planung und Steuerung.  
München: Carl Hanser Verlag, 1993.  
(REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation)  
(=1993a)
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.):  
Grundlagen der Arbeitsgestaltung.  
München: Carl Hanser Verlag, 1993.  
(Methodenlehre der Betriebsorganisation)  
(=1993b)

- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.):  
Ausgewählte Methoden des Arbeitsstudiums.  
München: Carl Hanser Verlag, 2. Auflage 1994.
- REPPAHN, Thomas:  
Schulungsmethoden und Anwendungsgebiete.  
In: Roll-Out von Lean-Management in Lägern.  
Hrsg.: FURMANS, Kai; SCHWAB, Melanie.  
Hamburg: DVV Media Group, 2014.
- RICHTER, Reinhard; SANDER, Peter; STUCKY, Wolfried:  
Problem, Algorithmus, Programm.  
In: Grundkurs Angewandte Informatik II.  
Hrsg.: STUCKY, Wolfried.  
Stuttgart, Leipzig: B. G. Teubner, 2. Auflage, 1999.
- ROHMERT, Walter:  
Grundlagen der technischen Arbeitsgestaltung.  
In: Ergonomie.  
Hrsg.: SCHMIDTKE, Heinz.  
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 3. Auflage 1993, S. 493-502.
- SCHÄFER, Tobias:  
Untersuchung zur Dispersion und ihre Auswirkungen beim Übergang aus  
der Nutzungsphase in das Recycling.  
Aachen: Shaker Verlag, 2004.
- SCHILLER, Emmerich F.:  
Ein Beitrag zur adaptiv-dynamischen Arbeitsplanung in der Demontage.  
Aachen: Shaker Verlag, 1998.  
(ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und  
Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 14)
- SCHILLER, Emmerich F.; MÜLLER, Reinhard:  
Simulationsunterstützte Planung der Arbeitsorganisation in manuellen  
Montagesystemen.  
Aachen: Shaker Verlag, 1997.
- SCHMIDTKE, Heinz:  
Arbeitsplatzgestaltung.  
In: Ergonomie.  
Hrsg.: SCHMIDTKE, Heinz  
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, 1993, S. 502-520.

SCHNECK, Milko:

Ein Beitrag zur kennzahlenunterstützten Investitionsplanung komplexer Arbeitssysteme.

Aachen: Shaker Verlag, 2000.

(ifab Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 23)

SCHUH, Günther; BRANDENBURG, Ulrich; CUBER, Stefan:

Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Aufgaben.

In: Produktionsplanung und -steuerung 1, Grundlagen der PPS.

Hrsg.: SCHUH, Günther; STICH, Volker

Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 4. Auflage 2012, S. 29-79.

SCHUH, Günther; SCHÜRMEYER, Maik; HERING, Niklas:

Funtionen.

In: Logistikmanagement.

Hrsg.: SCHUH, Günther; STICH, Volker.

Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2. Auflage 2013, S. 195-296.

(Handbuch Produktion und Management 6)

SCHUH, Günther; STICH, Volker; WIENHOLDT, Henrik:

Ersatzteillogistik.

In: Logistikmanagement.

Hrsg.: SCHUH, Günther; STICH, Volker

Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2. Auflage 2013, S. 165-207.

(Handbuch Produktion und Management 6)

SCHWARZ, Rainer; ZÜLCH, Gert:

Demontageplanung mit Leistungsabstimmung in arbeitsteiligen Demontage-systemen.

In: Innovationen für Arbeit und Organisation.

Hrsg.: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft.

Dortmund: GfA-Press, 2006, S. 441-444.

STAHLBROKER:

Stahlpreis, Stahlpreisentwicklung.

<http://www.stahlbroker/>, Stand: 07.11.2011.

STEINHILPER, Rolf; HUDELMAIER, Ulrike:

Erfolgreiches Produktrecycling zur erneuten Verwendung oder Verwertung.

Eschborn: Rationalisierungs-Kuratorium der Deutschen Wirtschaft, 1993.

STICH, Volker; HERING, Niklas; BROSZE, Tobias:

Beschaffungslogistik.

In: Logistikmanagement.

Hrsg.: SCHUH, Günther; STICH, Volker

Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2. Auflage 2013, S. 77-113.

STOCK, Patricia:

Entwicklung einer reaktiven Fertigungssteuerung auf der Basis der Ant-Colony-Optimierung.

Aachen: Shaker Verlag, 2012.

(ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 42)

WIENDAHL, Hans-Peter:

Betriebsorganisation für Ingenieure.

München, Wien: Carl Hanser Verlag, 4. Auflage, 1997.

WIENDAHL, Hans-Peter; HEGENSCHIED, Matthias:

Verfügbarkeit von Montagesystemen.

In: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis.

Hrsg.: LOTTER, Bruno; WIENDAHL, Hans-Peter.

Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2. Auflage, 2012, S. 331-363.

WV Stahl - Wirtschaftsvereinigung Stahl:

Entwicklung der Stahlschrottpreise.

<http://www.stahl-online/>, Stand: 07.12.2015.

ZANGEMEISTER, Christof:

Nutzwertanalyse in der Systemtechnik.

München: Wittenmann, 4. Auflage 1976.

ZANGEMEISTER, Christof:

Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse.

Bremerhaven: Wirtschaftsverlag, 2. Auflage 2000.

ZÜLCH, Gert:

Entwicklung eines lexikographischen Zuordnungsmodells zur qualitativen

Personaleinsatzplanung auf der Basis gemischt skalierten Anforderungs- und

Fähigkeitsmerkmale.

Aachen: TH Diss., 1979.

ZÜLCH, Gert:

Integrierte Fabrikplanung – Ein Ansatz zu einer ganzheitlichen Vorgehensweise.

In: VDI-Zeitschrift.

Düsseldorf, 135(1993)3, S. 34-38.

ZÜLCH, Gert:

Arbeitswissenschaft.

In: Produktion und Management "Betriebshütte", Teil 2.

Hrsg.: EVERSHEIM, WALTER; SCHUH, GÜNTHER.

Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 7. Auflage 1996, S. 12-94 - 12-124.

ZÜLCH, Gert; HEEL, Jochen; KRÜGER, Jan:

Simulation unterstützt die Parallelisierung der Produktionssystemplanung.

In: VDI-Zeitschrift.

Düsseldorf, 138(1996)5, S. 42-44.

ZÜLCH, Gert; HRDINA, Jan; SCHWARZ, Rainer:

Disassembly – Not the Reverse of Assembly.

In: Sixteenth International Working Seminar on Production Economics.

Hrsg.: GRUBBSTRÖM, Robert W.; HINTERHUBER, Hans H.

Innsbruck, Congress Innsbruck, March 1-5, 2010.

Pre-prints, Volume 1, S. 543-554.

ZÜLCH, Gert; SCHILLER, Emmerich F.; MÜLLER, Reinhard:

Adaptiv-dynamische Arbeitspläne als Grundlage für ein Demontage-Informationssystem.

In: Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage.

Hrsg.: BAUMGARTEN, Helmut u.a.

Berlin: Technische Universität, 1997, S. 386-390.

(Veröffentlichungen des Sonderforschungsbereiches 281: Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen)

ZÜLCH, Gert; SCHWARZ, Rainer:

Demontagesystemplanung an einem Beispiel aus der Elektroindustrie.

In: Good Practice – Ergonomie und Arbeitsgestaltung.

Hrsg.: LANDAU, Karl.

Stuttgart: Ergonomia, 2003, S. 347-362.

ZÜLCH, Gert; SCHWARZ, Rainer; HEINZ, Klaus; MÖNIG, Olaf:

Entwicklung eines Planungshilfsmittels für die Zeitwirtschaft bei manueller Erzeugnisdemontage.

Karlsruhe Uni: Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation, 2002.

(Schlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt 12438 N/7; Pub.-Nr. 1762001)

## 9.2 Verwendete Software

Microsoft Visual Studio .NET Professional 2003:

Version 7.1.3088.

Microsoft Corporation, 2003.

## 10. Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

### 10.1 Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Definiert bzw. zuerst verwendet in Kapitel
$a$	Index Planungsalternative	5.1.2
$ADK$	Anzahl Demontageknoten	3.4.1
$ADR$	Anzahl Vorgangsfolgebeziehungen	3.4.1
$ADS$	Anzahl Demontagestationen	4.7.1
$ADT$	Anzahl disjunkter Teilgraphen im Demontagevorranggraphen	3.4.3
$AUS$	Auslastung der Demontagestation $d$	4.7.2
$APA$	Anzahl Planungsalternativen	5.1.2
$AZK$	Anzahl Zielkriterien	5.1.2
$B$	Menge der Bewertungszahlen	5.1.3
$b_{kk'}$	Bewertungszahl	5.1.3
$BMX$	maximale Bewertungszahl	5.1.3
$C_{MA}$	zeitlicher Auftragsbedarf eines Mitarbeiters	4.7.3
$d, D$	Index und Indexmenge Demontagestationen	4.7.1

Formelzeichen	Bezeichnung	Definiert bzw. zuerst verwendet in Kapitel
$DLP$	Durchlaufplan	3.4.2
$DLZ$	Durchlaufzeit Planungsalternative	5.2.3
$DSK$	Demontagestückkosten	5.2.4
$DVG$	Demontagevorranggraph	3.4.1
$g_k$	relatives Gewicht des Kriteriums	5.1.3
$GNZ$	gewichteter normierter Zielerreichungsgrad der Alternative $a$ bei Kriterium $k$	5.3.3
$i, I$	Index und Indexmenge der Demontagevorgänge/Knoten	3.4.1
$i'$	Nachfolgeknoten	3.4.1
$i_a$	Anfangsknoten eines Pfades $p$	3.4.2
$i_e$	Endknoten eines Pfades $p$	3.4.2
$i_p$	Knoten in einem Pfad $p$	3.4.3
$j, J$	Index und Indexmenge der Anordnungsbeziehungen/Kanten	3.4.1
$k$	Index für Entscheidungskriterium	5.1.2
$KOS$	Kostensatz	5.2.4
$l_{ak}$	Rang des Zielkriteriums $k$ für die Alternative $a$	5.1.2
$m$	Auftragsmenge	4.7.3
$MDK$	Menge der Demontageknoten	3.4.1
$MDP$	Menge aller Pfade	3.4.2
$MDR$	Menge der Vorgangsfolgen	3.4.1
$MDT$	Menge disjunkter Teilgraphen im Demontagevorranggraphen	3.4.3

Formelzeichen	Bezeichnung	Definiert bzw. zuerst verwendet in Kapitel
$MND$	minimale Durchlaufzeit	5.2.3
$MNS$	minimale Anzahl Demontagestationen	5.2.1
$MNZ$	minimaler Zielerreichungsgrad	5.3.1
$MPA$	Menge der Planungsalternativen	5.1.2
$MPR$	Menge Prioritätsstufen	6.3.2
$MSK$	minimale Demontagestückkosten	5.2.4
$MZK$	Menge der Zielkriterien	5.1.2
$MXZ$	maximaler Zielerreichungsgrad	5.3.1
$NRK$	niedrigster Rang von Kriterium $k$	5.3.2
$NZG_{ak}$	normierter Zielerreichungsgrad der Alternative $a$ bei Kriterium $k$	5.3.2
$p$	Demontagepfad	3.4.2
$q$	Index Prioritätsstufen	6.3.2
$rng(x)$	Rang des Wertes $x$	5.1.2
$r_k$	Gewicht eines Kriteriums	5.1.3
$RKW$	Rangordnung der Kriterienwerte	5.1.2
$T$	Auftragszeit	4.1
$t_a$	Ausführungsszeit	4.1
$t_d$	Demontevorgangszeit einer Demontagestation	4.7.1
$t_{dS}$	Durchlaufzeit im Arbeitssystem	5.2.3
$T_D$	Durchlaufzeit Arbeitsauftrag	5.2.3
$t_e$	Zeit je Einheit	4.1
$t_{er}$	Erholungszeit	4.1
$t_g$	Grundzeit	4.1

Formelzeichen	Bezeichnung	Definiert bzw. zuerst verwendet in Kapitel
$t_{hS}$	Hauptdurchführungszeit im Arbeitssystem	5.2.3
$t_i$	Demontevorgangszeit	4.7.1
$t_K$	Vorgangszeit für Auslösen einer Komponente	6.2
$t_{K,H}$	Vorgangszeit für Handhabung einer Komponente	6.2
$t_{K,SV}$	Vorgangszeit für Lösen von Schraubverbindungen einer Komponente	6.2
$t_{K,V}$	Vorgangszeit Trennen von Kabelverbindungen einer Komponente	6.2
$t_{nS}$	Nebendurchführungszeit	5.2.3
$t_p$	persönliche Verteilzeit	4.1
$t_{pS}$	planmäßige Durchlaufzeit	5.2.3
$t_r$	noch nicht zugeordnete Demontevorgangszeiten des $DVG$	4.7.3
$t_s$	sachliche Verteilzeit	4.1
$t_{SAA}$	Zeit für ablaufbedingtes Liegen	5.2.3
$t_{SAT}$	Förderzeit	5.2.3
$t_t$	Tätigkeitszeit	4.1
$t_{tb}$	beeinflussbare Tätigkeitszeit	4.1
$t_{tu}$	unbeeinflussbare Tätigkeitszeit	4.1
$t_{zuS}$	Zusatzzeit im Arbeitssystem	5.2.3
$t_{zwS}$	Zwischenzeit im Arbeitssystem	5.2.3
$t_w$	Wartezeit	4.1
$t_v$	Verteilzeit	4.1

Formelzeichen	Bezeichnung	Definiert bzw. zuerst verwendet in Kapitel
$TAU$	Taktausgleich	5.2.3
$TAZ$	Taktzeit	4.7.3
$TDK$	Menge der Demontageknoten des Teilgraphen $TGR$	3.4.3
$TDR$	Menge der Vorgangsfolgebearbeitungen des Teilgraphen $TGR$	3.4.3
$TGR$	Teilgraph	3.4.3
$TKW_a$	Tupel der Kriterienwerte für Alternative $a$	5.1.2
$TTZ$	theoretische Taktzeit	4.7.3
$w_{ak}$	Wert der Alternative $a$ bei Entscheidungskriterium $k$	5.1.2
$x_v$	Steigerungsfaktor der Taktzeit	4.7.3
$z_{zuS}$	Zusatzzeitzuschlag im Arbeitssystem	5.2.3
$ZEG_{ak}$	Zielerreichungsgrad einer Planungsalternative $a$ beim Kriterium $k$	5.3.1
$ZAU$	Zielerreichungsgrad durchschnittliche Auslastung der Demontagelinie	5.2.2
$ZDG$	Zielerreichungsgrad Durchlaufzeit	5.2.3
$ZDS$	Zielerreichungsgrad Anzahl Demontagestationen	5.2.1
$ZSK$	Zielerreichungsgrad Demontagestückkosten	5.2.4
$\forall$	für alle	3.4.2
$\exists$	es existiert	3.4.3

Formelzeichen	Bezeichnung	Definiert bzw. zuerst verwendet in Kapitel
$\in$	ist Element von	3.4.3
$\subset$	ist echte Teilmenge von	3.4.2
$\subseteq$	ist Teilmenge von	3.4.3
$\cup$	Vereinigung zweier Mengen	3.4.3
$\cap$	Schnittmenge zweier Mengen	3.4.3
$\emptyset$	leere Menge	3.4.3
$\times$	kartesisches Produkt	3.4.2
$\prec$	ist vorgeordnet	3.4.3
$\mathbb{N}$	Menge der natürlichen Zahlen ohne 0	3.4.2
$\mathbb{R}^+$	Menge der reellen Zahlen ohne 0	3.4.2
$[x]^+$	kleinste ganze Zahl $\geq x$	3.4.2

## 10.2 Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
<i>ANGELA</i>	Planungshilfsmittel für die Zeitwirtschaft bei manueller Erzeugnisdemontage
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
daN	Dekanewton (10 Newton)
DIN	Deutsches Institut für Normung
<i>DAISY</i>	Demontage-Informationssystem
DPS	Demontageplanungs- und -steuerungssystem
<i>DZB</i>	Demontagezeitbaustein
<i>efeu</i>	Informationssystem zur Entscheidungsunterstützung für Entsorgungsunternehmen
ERP	Enterprise Resource Planning-Systeme
EWA	Erweiterte Wirtschaftlichkeits- und Nutzwertanalyse
FIFO	First In First Out
<i>IDIS</i>	International Dismantling Information System
ifab	Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation des Karlsruher Instituts für Technologie
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
KOZ	Kürzeste Operationszeit
LASI	Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik
MRP	Material Requirement Planning-Systeme
MRP II	Manufacturing Resource Planning-Systeme
MSE	Muskel-Skelett-Erkrankungen
MTM	Methods-Time Measurement
<i>ooRIS</i>	Objektorientiertes Recycling-Informationssystem
<i>PA</i>	Planungsalternative
<i>PRI</i>	Prioritätsstufen
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung

Abkürzung	Bezeichnung
RPS	Recyclingsplanungs- und -steuerung
SDN	stochastisches Demontagenetzwerk
<i>SiDDatAS</i>	Simulation Disassembly Data Administration Software
SvZ	System vorbestimmter Zeiten
<i>TANJA</i>	Demontageplanung mit objektorientiertem Leistungsabstimmungsverfahren
TMU	Time Measurement Unit
UAS	Universelles Analysier-System
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
WF	Work Factor
ZE	Zeiteinheit
ZK	Zielkriterium