

Simulationsunterstützte Entwicklung von Methoden zur reaktiven Steuerung von Demontagelinien

Simulation-supported Development of Methods for the Reactive Control of Disassembly Lines

Jan Hrdina, Conti Temic microelectronic, Nürnberg (Germany),
jan.hrdina@continental-corporation.com

Gert Zülch, Karlsruher Institut für Technologie (Germany),
gert.zuelch@gefora-beratung.de

Abstract: Since many years, "sustainability" is playing an important role in Germany's economy and society. This involves the reprocessing of end-of-life products formerly declared as waste. However, in order to reuse components of them, disassembling is necessary. In contrast to assembly processes, the control of disassembly systems has some special features: for example, when disassembling an end-of-life product it is possible that components are not removable or even missing, so that stations and employees required for this purpose threaten to remain underutilised. Thus the problem of dynamic-reactive control arises, which results in a number of possibilities which extend far beyond the usual control measures in assembly systems. The paper describes a novel procedure for the control of disassembly lines designed to ensure their economic operation by adapting to the special requirements of disassembling and reacting dynamically to emerging problems. The effectiveness of the method is verified using a simulation example.

1 Anforderungen an einen wirtschaftlichen Demontagebetrieb

Demontagesysteme sind im Vergleich zur industriellen Teilefertigung und Montage meist durch eine geringe Wertschöpfung gekennzeichnet. Die bei der Demontage häufig vorherrschenden unwirtschaftlichen Abläufe verschärfen diese Situation zusätzlich. Außerdem ist die Demontage vielfach durch schlechte Arbeitsbedingungen (z. B. Lärm, Schmutz, muskuläre Belastung) geprägt. Daher gilt es zum einen, die Demontagekosten durch eine systematische Planung und Steuerung der Abläufe zu reduzieren. Zum anderen ist die Wirtschaftlichkeit der Demontage zu steigern, indem sie zunehmend einen industriellen Charakter erhält.

Automatisierung wird allenfalls in Kombination manueller Arbeitsvorgänge mit automatisierten Teilprozessen, also mit sog. hybriden Systemen bzw. flexibel automatisierten Systemen gesehen (Seliger et al. 2007, S. 290). Als Hemmnisse gelten dabei insbesondere die Heterogenität und Planungsunsicherheit des zu demontierenden Alterzeugnisspektrums sowie die nicht demontagegerechte Produktgestaltung (vgl. Bols 2002, S. 64 und S. 94). Insbesondere bei der Gewinnung von Sekundärerzeugnissen (z. B. von Ersatzteilen) ist eine automatisierte Demontage von Komponenten vielfach zu aufwendig.

2 Demontagespezifische Besonderheiten und deren Berücksichtigung in der vorliegenden Literatur

Neben der Planung eines geeigneten Demontagesystems (siehe z. B. Schwarz 2017) bietet deren Steuerung Möglichkeiten zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Bestehende Steuerungsverfahren eignen sich jedoch dafür nur bedingt, da sie nicht hinreichend die spezifischen Eigenschaften der Demontage berücksichtigen. Insbesondere bei arbeitsteiligen Demontagesystemen wird das Steuerungsproblem durch die Vielfalt der Alterzeugnistypen und durch deren unterschiedliche Zustände erschwert (vgl. Kim et al. 2007, S. 198).

Während bei der Montage deterministische Bearbeitungszeiten vorliegen oder zumindest im Rahmen der Zeitwirtschaft angenommen werden, ist dieses Vorgehen für die Demontage in aller Regel nicht zielführend. Die Unsicherheit bezüglich des Zustandes der Alterzeugnisse bereitet erhebliche Probleme bei der Erstellung des Arbeitsplans, weil die Demontage im Gegensatz zur Montage in vielfacher Hinsicht mit Schwierigkeiten behaftet ist. So lässt sich z. B. der Abnutzungsgrad von Komponenten vor Beginn der Demontage nicht immer sicher beurteilen oder die Lösbarkeit von Verbindungen nicht garantieren. Da übliche Arbeitspläne jedoch einen strengen Determinismus zugrunde legen, eignen sich diese bestenfalls bedingt für die Demontage. Außerdem ist der Arbeitsablauf in der Montage im Grundsatz fest vorgegeben, da die auszuführenden Arbeitsvorgänge unveränderlich sind und für diese a priori eine Arbeitsmethode vorgegeben ist.

Bei der Demontage sind jedoch die auszuführenden Arbeitsvorgänge aufgrund der Unsicherheit bezüglich der Eigenschaften des zu demontierenden Alterzeugnisses nicht fest vorgegeben und daher auch nicht deterministisch (z. B. Grochowski und Tang 2009, S. 374). Die einzusetzenden Demontagemethoden müssen abhängig vom individuellen Zustand des Alterzeugnisses gewählt werden, aus denen sich dann ggf. die erforderlichen Bearbeitungszeiten ableiten lassen (Heinz et al. 2002; Zülch und Schwarz 2008, S. 328). Der Umfang der zu demontierenden Komponenten pro Alterzeugnis, d. h. die Demontagetiefe, ist außerdem nicht notwendigerweise vorgegeben, sondern muss abhängig vom Zustand des Alterzeugnisses jeweils neu bestimmt werden (vgl. Schiller 1998, S. 31). Damit ist logischerweise die Demontagetiefe auch nicht mit der Fertigungstiefe gleichzusetzen, da diese betriebsbezogen, nicht jedoch (alt-)erzeugnisbezogen ist.

Als Konsequenz erkannten bereits Geiger et al. (1996), dass die Demontage reaktiv gesteuert werden muss. Grund hierfür ist, dass die Gewinnung bestimmter Alterzeugniskomponenten vom Erfolg der Demontage ihrer Vorgängerkomponenten

abhängt und die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Demontage vom Zustand dieser Komponenten abhängt (vgl. ebd., S. 49).

Die in der Literatur vorgeschlagenen Steuerungskonzepte berücksichtigen demontagespezifische Schwierigkeiten jedoch nicht oder nur rudimentär (vgl. Hrdina 2014, S. 30ff.) – sofern solche überhaupt für arbeitsteilige Demontagesysteme unter Berücksichtigung eines Demontageauftragsprogramms bestehend aus verschiedenen Alterzeugnisvarianten existieren. Eine dynamische, reaktive Auftragssteuerung unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Ressourcen erfolgt bei keinem der bisher vorgestellten Verfahren.

Um auf Störungen bzw. Demontageschwierigkeiten reagieren zu können, genügt es bei der Demontage nicht, diesen durch kurzfristige Änderungen der Auftragsreihenfolge mittels eines sog. Reschedulings oder Resequencings zu begegnen. Vielmehr muss das Demontagesteuerungsverfahren in der Lage sein, eine Rekonfiguration des bestehenden Flussprinzips im Sinne einer kurzfristigen reaktiven Ablaufplanung (z. B. eine Neuordnung einzelner Demontagevorgänge zu Demontagestationen) vorzunehmen. Außerdem muss das Verfahren eine Arbeitsverteilung in Verbindung mit einer adaptiv-dynamischen Arbeitsplanung durchführen (vgl. Schiller 1998, S. 29). Gesucht wird folglich ein kurzfristiger Ablaufplan, der gegebene Nebenbedingungen (z. B. begrenzte Ressourcen, Arbeitstakt) einhält und die Zielsetzungen (z. B. hohe Auslastung der Demontagestationen) bestmöglich erfüllt.

3 Modellierung spezifischer Steuerungsmaßnahmen für Demontagelinien

Für die Entwicklung eines neuartigen Demontagesteuerungsverfahrens werden folgende Annahmen zugrunde gelegt: Es wird eine manuelle und bereits leistungsabgestimmte Demontagelinie (vgl. z. B. Schwarz 2017) mit einem vorliegenden Programm von Alterzeugnissen vorausgesetzt, die in einer definierten Reihenfolge zu demontieren sind. Dieses Auftragsprogramm kann dabei aus unterschiedlichen Varianten eines Alterzeugnistyps mit individuellen Zuständen bestehen. Die Zielsetzung besteht zum einen darin, eine hohe und gleichmäßige Auslastung der Demontagestationen zu gewährleisten. Zum anderen ist der Erlös des eingesteuerten Demontageauftragsprogramms einer definierten Planungsperiode zu maximieren. Im Folgenden werden Steuerungsmaßnahmen entwickelt, mit denen adaptiv-dynamisch auf Störungen bzw. demontagespezifische Schwierigkeiten reagiert werden kann (Abb. 1; vgl. hierzu auch z. B. Zülch et al. 2008, 2010; Zülch und Hrdina 2010a, 2010b).

Bei der Demontage besteht in vielen Fällen eine gewisse Flexibilität bezüglich der Reihenfolge der durchzuführenden Arbeitsvorgänge. Dies ist zum einen auf die gegenüber der Montage geringere Anzahl technologisch bedingter Zwangsfolgen und zum anderen auf eine mögliche Auswahl der einzusetzenden Demontagemethoden und -werkzeuge zurückzuführen. Die Steuerungsmaßnahme *Variation der Demontagevorgangsfolge* muss folglich eine Änderung der ursprünglich geplanten Vorgangsfolge ermöglichen.

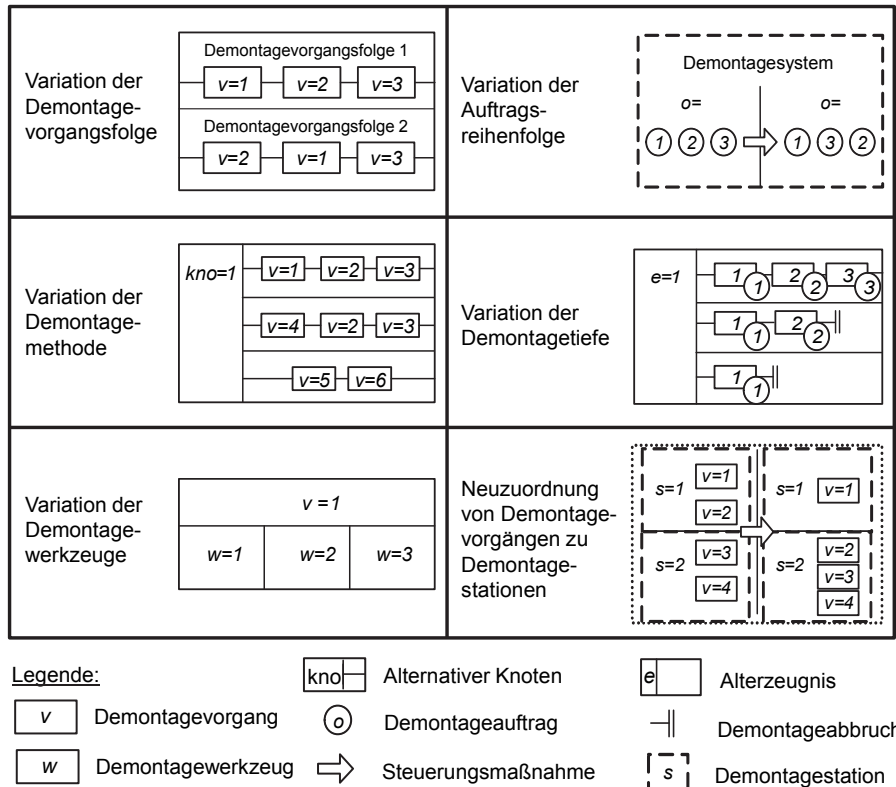


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Maßnahmen zur Demontagesteuerung (vgl. Hrdina 2014, S. 101 ff.)

Darüber hinaus kommen für die Demontage zusätzliche Arbeitsvorgänge in Betracht, die sich nicht allein aus der Alterzeugnisstruktur, sondern sich aus zusätzlichen Erfordernissen und speziellem Wissen ergeben, so z. B. das Reinigen von Komponenten vor ihrer Demontage. Gerade weil solche zusätzlichen Arbeitsvorgänge nicht notwendigerweise, sondern nur bei Bedarf ausgeführt werden, müssen sie als Steuerungsmaßnahme *Variation der Demontagemethode* berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang ist auch eine mögliche *Variation von Demontagewerkzeugen* von Bedeutung. So kann bei einer hohen Auslastung einer Demontagestation von einer zeitaufwendigen, aber zerstörungsfreien zu einer schnelleren, jedoch (teil-)zerstörenden Demontage gewechselt werden, um eine bessere Auslastung des Demontagesystems zu erreichen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass ein Wechsel des Demontagewerkzeuges zu Einschränkungen bei der Wieder- bzw. Weiterverwendung bzw. -verwertung von Komponenten führen kann. Da für eine Demontagetätigkeit (z. B. Trennen einer Schraubverbindung) – egal ob (teil-)zerstörend oder nicht - mehrere Demontagewerkzeuge (z. B. Elektroschrauber statt manueller Schraubendreher) in Frage kommen, werden Werkzeuge modelliert, die dann entsprechend auch die

Demontagemethode implizieren. Huber (2001, S. 181) spricht in diesem Zusammenhang von gleichrangigen und nachrangigen Arbeitsvorgängen.

Je nach Zielsetzung der Demontage ist die Einhaltung einer strikten Reihenfolge der Demontageaufträge nicht unbedingt erforderlich und ermöglicht so eine *Variation der Auftragsreihenfolge*. Diese Flexibilität kann unter Berücksichtigung der bereits eingesteuerten Demontageaufträge genutzt werden, um Abstimmungsverluste in den Demontagestationen zu vermindern.

Um Schwankungen bei der Auslastung einzelner Demontagestationen abzuschwächen, besteht zusätzlich die Möglichkeit einer *Variation der Demontagetiefe*. Abhängig von der Auslastung einer Demontagestation kann situativ entschieden werden, wie weit ein Alterzeugnis demontiert werden soll. Bei hoher Auslastung einer einzelnen Demontagestation lassen sich z. B. die Demontagetiefe und damit der Kapazitätsbedarf an dieser Station verringern. Auf diese Weise kann durch eine verkürzte Demontage verhindert werden, dass an den nachfolgenden Demontagestationen Wartezeiten aufgrund eines Werkstückmangels auftreten. Hierbei sollte man sich vorrangig auf diejenigen Demontagevorgänge konzentrieren, die eine vergleichsweise hohe Wertschöpfung versprechen und fallweise Demontagevorgänge mit einer geringeren Wertschöpfung nicht ausführen.

Im Falle einer geringen Auslastung einer Demontagestation kann hingegen die Demontagetiefe erhöht werden, d. h., es werden Demontagevorgänge durchgeführt, die bei einer Normalauslastung nicht wirtschaftlich wären, mit denen aber dennoch eine, wenn auch relativ geringe Wertschöpfung erzielt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, dynamische Abstimmungsverluste zu verringern, besteht in der *Neuzuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen*. Abhängig von der Auslastung können Demontagevorgänge von einer Station auf eine benachbarte verlagert werden. Hierfür ist die zu Beginn eines Demontageauftrages vorgenommene Zuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen während der Durchführung zu überwachen. Bei drohenden Abstimmungsverlusten kann dann die Zuordnung verändert und an die tatsächlichen Zustände im Demontagesystem respektive an die im Demontagesystem vorliegenden Alterzeugnisse angepasst werden. Diese Steuerungsmaßnahme kann daher vor allem dann eingesetzt werden, wenn vergleichsweise einfache Demontagemethoden angewendet werden und die demontierten Komponenten an dieser Demontagestation für die spätere Wieder- und Weiterverwendung bzw. -verwertung sortiert und in Puffern gesammelt werden können. Zudem können – je nach Zuordnung von Puffern zu Demontagestationen – Demontagevorgänge nur auf diejenigen Stationen verlagert werden, bei denen eine entsprechende Puffermöglichkeit gegeben ist oder, wenn kein Puffer vorhanden ist, die Demontagestationen direkt hintereinander angeordnet sind.

Die genannten Steuerungsmaßnahmen wurden in das bestehende Simulationsverfahren *OSim* (*Objektsimulator*) integriert. Daraus entstand dann das Verfahren *OSim-DPS* (*OSim zur Demontageplanung und -steuerung*; Hrdina 2014).

4 Verifizierung der Wirksamkeit der Steuerungsmaßnahmen

Im neu entwickelten Demontagesteuerungsverfahrens wird für jede Demontagestation die verbleibende Zeit innerhalb des Arbeitstaktes berechnet. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Steuerungsmaßnahmen wird dann diejenige Folge von Demontagevorgängen ausgewählt, die einerseits die Auslastung der Demontagestation und andererseits den Demontagerlös maximiert. Im Folgenden wird die Wirksamkeit der entwickelten Algorithmen und Steuerungsmaßnahmen an einem Anwendungsbeispiel mit Hilfe der Simulation nachgewiesen.

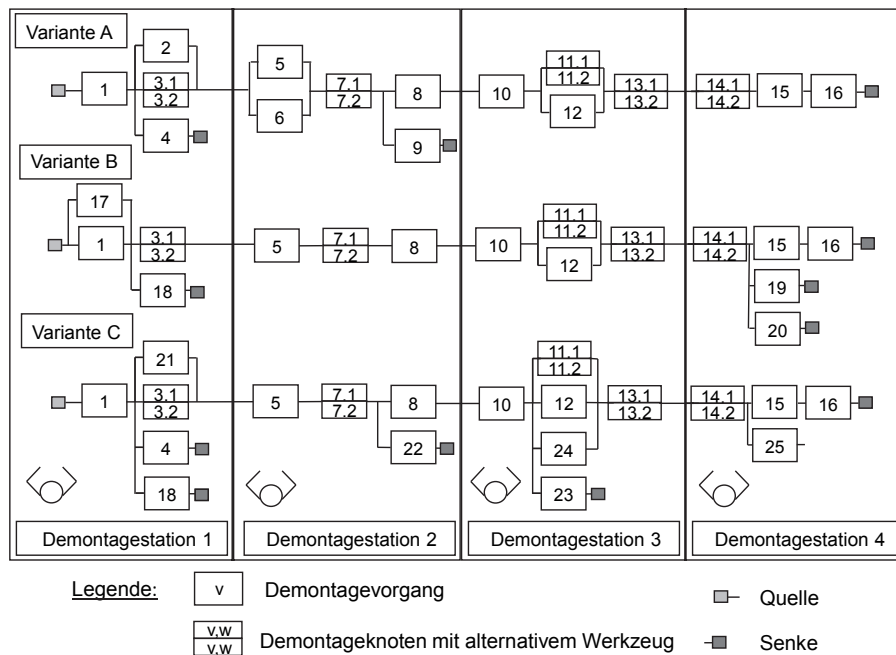


Abbildung 2: Durchlaufpläne der Varianten und Zuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen (vgl. Hrdina 2014, S. 142)

4.1 Ausgangssituation der Simulationsuntersuchung

In einem Demontagebetrieb wird in einer Planungsperiode ein Demontageauftragsprogramm ausgeführt, das aus drei verschiedenen Varianten eines Alterzeugnistyps besteht. Die Alterzeugnisse werden in einer Demontagelinie bestehend aus vier Demontagestationen von jeweils einem Mitarbeiter demontiert. Die Durchlaufpläne der drei Varianten A, B und C gibt Abbildung 2 wieder. Darüber hinaus ist die (statische) Zuordnung von Demontagevorgängen zu Demontagestationen dargestellt. Dabei werden betaverteilte Tätigkeitszeiten unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Werkzeuge verwendet. Außerdem werden die möglichen Erlöse, die Ausführbarkeitswahrscheinlichkeiten, die

Beschädigungswahrscheinlichkeiten sowie die mit dem jeweiligen Werkzeug verbundene Wahrscheinlichkeit der Wertminderung angesetzt (Tab. 1).

Tabelle 1: Eingangssparameter des Simulationsmodells mit alternativen Werkzeugen (nach Hrdina 2014, S. 143f.)

Demontagestation	Knotennummer	Variante	Werkzeug 1						Werkzeug 2							
			min. Dauer	häufigste Dauer	max. Dauer	Erlös	Ausführbarkeitswahrscheinlichkeit	Beschädigungswahrscheinlichkeit	Wertminderung	min. Dauer	häufigste Dauer	max. Dauer	Erlös	Ausführbarkeitswahrscheinlichkeit	Beschädigungswahrscheinlichkeit	Wertminderung
1	1	A, B, C	75	80	85	7	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	A, C	110	120	140	8	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	A, B, C	90	100	105	10	0,8	-	-	65	70	75	10	1,0	0,7	0,7
	4	A, B, C	30	50	60	10	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17	B	95	100	105	3	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18	B	60	70	120	1	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	C	11	15	17	9	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	5	A, B, C	100	12	140	9	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	A	55	60	66	7	0,7	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	A, B, C	70	80	85	10	0,9	-	-	25	30	35	10	1,0	0,9	0,2
	8	A, B, C	30	35	40	6	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	A, B	5	10	15	2	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	22	C	55	60	65	2	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	10	A, B, C	70	80	90	7	0,9	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	A, B, C	100	130	140	10	1,0	-	-	90	100	120	10	1,0	0,5	0,5
	12	A, B, C	35	40	50	1	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13	A, B, C	35	40	50	9	0,8	-	-	15	20	25	9	1,0	1	0,5
	23	C	60	65	70	3	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	24	C	17	20	22	8	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	14	A, B, C	90	100	100	10	0,9	-	-	70	80	90	10	1,0	0,5	0,8
	15	A, B, C	70	80	85	8	0,5	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	A, B, C	65	80	85	8	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	19	B	15	20	25	1	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	B	15	20	25	4	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	C	15	20	25	3	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

In der Ausgangssituation wählen die Mitarbeiter bei möglichen Ablaufstörungen eine zufällige Steuerungsmaßnahme bzw. zufällig eine alternative Demontagemethode aus. Dieses Szenario wird wie auch die folgenden mit einer Simulationsperiode von 28.800 Sekunden (8 Stunden) durchgeführt. Dabei werden die zu demontierenden Alterzeugnisse in der Reihenfolge Variante A, Variante B, Variante C, Variante A usw. (zyklisch wiederholt) mit der Losgröße 1 eingesteuert. Um eine Zufälligkeit der erzielten Ergebnisse auszuschließen, werden jeweils 10 Simulationsläufe mit unterschiedlichen Zufallszahlenkeimen durchgeführt.

In der Ausgangssituation ist insbesondere Demontagestation 4 mit 77,2 % schlecht, Demontagestation 1 hingegen mit 89,4 % bereits relativ hoch ausgelastet. Ziel des Demontagesteuerungsverfahrens ist es, neben einer Erlösmaximierung auch eine möglichst gleichmäßige Auslastung über alle Demontagestationen hinweg zu erreichen. In der Ausgangssituation beträgt die Differenz zwischen der am höchsten und niedrigsten ausgelasteten Demontagestation 12,2 %. Der erzielte Demontageerlös wird vereinfachend als 1 Geldeinheit (GE) pro erfolgreichen Demontagevorgang ermittelt und beträgt hier 7.854 GE.

4.2 Ergebnisse der Verbesserungslösung

Zur Verbesserung der Ausgangssituation werden die entwickelten Steuerungsmaßnahmen in mehreren Simulationsläufen schrittweise freigegeben. Abbildung 3 zeigt Ausschnitte der Zeitbanddarstellungen der letztlich besten Lösung mit der Ausgangslösung. Anhand der Lücken in den Zeitbändern, also der Wartezeiten der Mitarbeiter bzw. der Leerzeiten der Demontagestationen, lässt sich bereits graphisch der Vorteil der Verbesserungslösung erkennen.

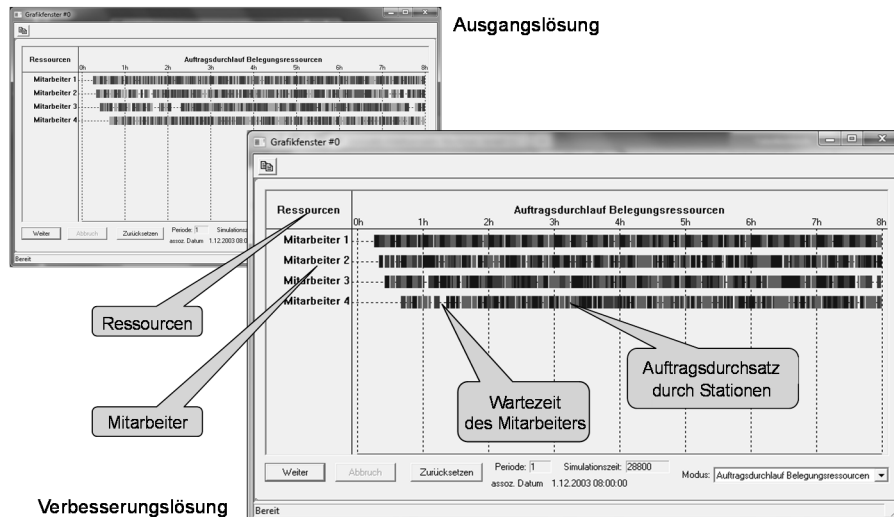


Abbildung 3: Vergleich der Zeitbanddarstellungen von Ausgangs- und Verbesserungslösung (nach Hrdina 2014, S. 146 und 151)

In der Verbesserungslösung können die Mitarbeiter über Puffer auf die Arbeitsinhalte der Vorgänger-Demontagestationen zugreifen und sich dadurch gegenseitig bei der Abarbeitung helfen. Die Ermittlung der Demontageerlöse geschieht, indem eine Neuordnung von Demontevorgängen zu Demontagestationen vorgenommen wird und diejenigen Demontevorgänge gewählt werden, die einen möglichst hohen Demontageerlös versprechen. Durch diese Neuordnung können folgende Ergebnisse erzielt werden: Der erzielte Erlös beträgt nun 8.411 GE, die Differenz zwischen der am höchsten (91,6 %) und niedrigsten ausgelasteten Demontagestation (82,4 %) liegt bei 9,2 %.

4.3 Fazit der Simulationsuntersuchung

Mit Hilfe der durchgeführten Simulationsuntersuchung konnte gezeigt werden, dass die Demontageabläufe mit Hilfe des entwickelten Demontagesteuerungsverfahrens verbessert werden können. Obwohl das System in der Ausgangssituation durch die statische Leistungsabstimmung über alle Demontagestationen hinweg bereits hoch ausgelastet ist (durchschnittlich 83 %) und ein hoher Demontageerlös erzielt wird, kann das System dennoch verbessert werden. Durch den Einsatz der entwickelten Demontagesteuerung lässt sich die

durchschnittliche Auslastung aller Demontagestationen in der Verbesserungslösung auf etwas über 87 % steigern. Die Differenz zwischen der am höchsten und niedrigsten ausgelasteten Demontagestation liegt nun bei etwa 9 %. Der erzielte Erlös steigt um 7 % auf 557 GE. Damit wird die Wirksamkeit des Demontagesteuerungsverfahrens verifiziert. Insbesondere die Kombination aus den entwickelten Steuerungsmaßnahmen kann Demontageabläufe für arbeitsteilige Demontagesysteme verbessert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein reaktives Steuerungsverfahren entwickelt, das es ermöglicht, arbeitsteilige Demontagesysteme so zu steuern, dass ein vorliegendes Auftragsprogramm möglichst wirtschaftlich durchgeführt werden kann. Hierfür wurden adäquate, der Demontage angepasste Steuerungsmaßnahmen entwickelt und in einem Gesamtkonzept zusammengeführt. Außerdem wurde die Wirksamkeit des Verfahrens unter Beweis gestellt. Damit das Steuerungsverfahren in der Praxis realisiert werden kann, müssen die Steuerungsmaßnahmen den Mitarbeitern in geeigneter Form mitgeteilt werden. Um auf konkrete Situationen reagieren zu können, muss darüber hinaus eine Interaktion zwischen Mitarbeiter und Steuerungsverfahren ermöglicht werden, indem der Mitarbeiter aktuelle Störungen bzw. Demontageschwierigkeiten an das Steuerungsverfahren kommuniziert. Daraufhin erhält er neue Arbeitsanweisungen im Sinne einer aktualisierten Auswahl an zu demontierenden Alterzeugnissen, deren Komponenten sowie einen aktualisierten Arbeitsplan (Dimitrov 2015). Prinzipiell lassen sich zumindest Teile des hier entwickelten Demontagesteuerungsverfahrens auch auf andere Teilefertigungs- und Montagesysteme übertragen, für die wegen ihrer Störanfälligkeit eine reaktive Steuerung sinnvoll ist. Ein derartiges Störungsmanagement erfordert dann jedoch ein aktuelles Zustandsmodell des zu steuernden Fertigungssystems (siehe z. B. Kleiner 2017). Ob sich daraus eine vorausschauende Fertigungssteuerung entwickeln wird (so z. B. o. V. 2013), bleibt allerdings abzuwarten.

Literatur

- Boks, C.B.: The relative importance of uncertainty factors in product end-of-life scenarios: A quantification of future developments in design, economy, technology and policy. Dissertation, Universität Delft, 2002.
- Dimitrov, T.: Permanente Optimierung dynamischer Probleme der Fertigungssteuerung unter Einbeziehung von Benutzerinteraktionen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2015.
- Geiger, D.; Zussmann, E.; Lenz, E.: Probabilistic reactive disassembly planning. *Annals of the CIRP* 45 (1996) 1, S. 49-52.
- Grochowski, D.E.; Tang, Y.: A machine learning approach for optimal disassembly planning. *Journal of Computer Integrated Manufacturing* 22 (2009) 4, S. 374-383.
- Heinz, K.; Mönig, O.; Schwarz, R.; Zülch, G.: Zeitermittlung für die manuelle Demontage. *REFA-Nachrichten* 55 (2002) 4, S. 15-18.
- Hrdina, J.: Beitrag zur Steuerung von arbeitsteiligen Demontagesystemen. Aachen: Shaker 2014.

- Kim M.H.; Harms, R.; Seliger, G.: Automatic Control Sequence Generation for a Hybrid Disassembly System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 4 (2007) 2, S. 194-205.
- Kleiner, N.: BigPro - Einsatz von Big Data-Technologien zum Störungsmanagement in der Produktion. <https://www.fzi.de/forschung/projekt-details/bigpro-einsatz-von-big-data-technologien-zum-stoerungsmanagement-in-der-produktion/>. Letzter Zugriff am 21.04.2017.
- o. V.: Vorausschauende Fertigungssteuerung. *IT & Production*, 04.11.2013. <http://www.it-production.com/allgemein/predictability-in-der-halbleiter-industrievorausschauende-fertigungssteuerung/print/>. Letzter Zugriff am 21.04.2017.
- Schiller, E.F.: Ein Beitrag zur adaptiv-dynamischen Arbeitsplanung in der Demontage. Aachen: Shaker 1998.
- Schwarz, R.: Ein Beitrag zur Leistungsabstimmung von Demontagesystemen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2017 (im Druck).
- Seliger, G.; Uhlmann, E.; Friedrich, T. et al.: Hybrid Disassembly System. In: Seliger, G. (Hrsg.): *Recovery of Resources in Product and Material Cycles*. Berlin, Heidelberg: Springer 2007, S. 237-253.
- Zülch, G.; Hrdina, J. (2010a): Control of Disassembly Systems Based on the Division of Labour by Means of Dynamically Adapting Routing Plans. In: Dangelmaier, W. et al. (Hrsg.): *Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics*. Berlin, Heidelberg: Springer 2010, S. 396-407.
- Zülch, G.; Hrdina, J. (2010b): A new Approach for Controlling Disassembly Systems. In: Sihm, W.; Kuhland, S. (Hrsg.): *Sustainable Production and Logistics in Global Networks*. Wien, Graz: Neuer Wissenschaftlicher Verlag 2010, S. 228-235.
- Zülch, G.; Hrdina, J.; Schwarz, R.: Development of a Computer Aided Procedure to Control Division of Labour Based Disassembly Systems. In: Mitsuishi, M.; Ueda, K.; Kimura, F. (Hrsg.): *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. London: Springer 2008, S. 217-220.
- Zülch, G.; Hrdina, J.; Schwarz, R.: Disassembly – Not the Reverse of Assembly. In: Grubbström, R.W.; Hinterhuber, H.H. (Hrsg.): *Sixteenth International Working Seminar on Production Economics*, Innsbruck, 2010. Pre-prints, Volume 1, S. 543-554.
- Zülch, G.; Schwarz, R.: Planning and Balancing of Disassembly Systems. In: Koch, T. (Hrsg.): *Lean Business Systems and Beyond*. New York NY: Springer 2008, S. 325-330.