



**Modellgestützte Flexibilitätsanalyse von
Strategien zur Ersatzteilversorgung
in der Nachserienphase**

Karl Inderfurth • Rainer Kleber

FEMM Working Paper No. 26, September 2008

F E M M

Faculty of Economics and Management Magdeburg

Working Paper Series

Modellgestützte Flexibilitätsanalyse von Strategien zur Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase

Karl Inderfurth und Rainer Kleber

Fakultät für Wirtschaftswissenschaft

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

26. September 2008

Überblick. Das Bestandsmanagement von Ersatzteilen stellt Hersteller langlebiger Industrie- und Konsumgüter insbesondere in der Nachserienphase vor große Herausforderungen, da nach Abschluss der Serienproduktion die zur einer effizienten Bedarfsbefriedigung notwendige Flexibilität nur noch in eingeschränktem Maße vorhanden ist. In diesem Beitrag werden Strategien, bestehend aus Kombinationen der am häufigsten genutzten Beschaffungsoptionen in Form von Abschlusslosbildung zu Serienbedingungen, Nachproduktion in kleineren Losen und Aufarbeitung von Altprodukten anhand eines mathematischen Planungsmodells bezüglich ihrer Flexibilitätseigenschaften untersucht. Unter praxisnahen Rahmenbedingungen zeigt sich, dass sowohl Nachproduktion als auch Aufarbeitung als Versorgungsoption - insbesondere aufgrund der ihnen innewohnenden Zeitflexibilität - eine hohe Kostenersparnis gegenüber einer reinen Abschlusslosbevorratung gewährleisten können, selbst wenn deren Stückkosten weit über denjenigen der Serienproduktion liegen. Weiter stellt sich heraus, dass die Nachproduktion das größte Flexibilitätspotenzial besitzt, soweit es nicht durch Vorgabe von Mindestproduktionsmengen zu stark eingeschränkt wird. Die aufgrund ihrer Abhängigkeit vom Altproduktrückfluss aus Flexibilitätssicht eigentlich weniger attraktive Aufarbeitung kann der Nachproduktion im Endeffekt jedoch überlegen sein, sofern ihr Stückkostenvorteil hinreichend hoch ist. Schließlich ergibt sich, dass eine kombinierte Nutzung beider Versorgungsoptionen in der Nachserienphase in der Regel nur noch einen vergleichsweise geringen zusätzlichen Erfolgsbeitrag liefert.

Keywords Spare Parts, Inventory Management, Flexibility

JEL: C61, M11

A. Einleitung

Hersteller langlebiger Industrie- und Konsumgüter generieren einen nicht unwesentlichen Teil ihres Unternehmenserfolgs mittlerweile im Rahmen ihres After Sales-Geschäfts. In diesem Zusammenhang hat eine gut funktionierende Ersatzteillogistik dafür zu sorgen, dass die Kunden nicht nur während der Vermarktungsphase dieser Güter, sondern auch noch über einen längeren Zeitraum nach Produktionsende bedarfsgerecht mit Ersatzteilen versorgt werden. Diese Teile werden benötigt, um defekte Bauteile oder Baugruppen zu ersetzen und dadurch die Gebrauchsfähigkeit des Primärprodukts wieder herzustellen (Eberhardt, 2002). Aufgrund der in der betrieblichen Praxis zu beobachtenden stetig steigenden Teilevielfalt und der im Vergleich zur Nutzungsdauer häufig nur kurzen Produktlebenszyklen kommt einem effizienten Bestandsmanagement von Ersatzteilen eine zunehmende Bedeutung zu. Dessen Aufgaben beinhalten die Festlegung von Beschaffungszeitpunkten und Beschaffungsmengen derart, dass bei möglichst niedrigen Kosten eine hinreichend hohe Lieferfähigkeit für Ersatzteile während der sog. Serviceperiode sichergestellt ist. Die Serviceperiode umfasst dabei den Zeitraum, in welchem das Primärprodukt verkauft wird zuzüglich der Garantiedauer sowie einer weiteren Zeitperiode, deren Länge durch Versorgungszusagen des Herstellers festgelegt ist. In der deutschen Automobilbranche beispielsweise erstreckt sich die Serviceperiode nach dem Auslaufen der Serienproduktion eines Modells je nach Hersteller noch über einen Zeitraum von zehn bis fünfzehn Jahren (VDA, 2007).

Neben dem langen Zeithorizont sind es insbesondere zwei Umstände, welche die Ersatzteilversorgung zu einer sehr komplexen Aufgabe machen, nämlich

- (i) die *schwierige Prognostizierbarkeit* von Zeitpunkt und Höhe der Ersatzteilmachfrage, die durch das stochastische Ausfallverhalten von Komponenten, aber auch durch unterschiedliche Instandhaltungspolitiken, die Ausnutzung von Kannibalisierungspotentialen oder durch unvorhersehbare technische Veralterung bedingt ist (Kennedy et al., 2002), sowie
- (ii) die *hohe zeitliche Dynamik der Nachfrageentwicklung* nach Ersatzteilen, die durch die Abhängigkeit des Bedarfs von der variierenden Anzahl der sich in Gebrauch befindlichen Primärprodukte erzeugt wird und keinen zeitlich gleichmäßigen Grundverlauf der Nachfrage erwarten lässt (Hesselbach et al., 2002).

Diese Rahmenbedingungen erfordern im Grunde ein hohes Maß an Flexibilität bei der Versorgung mit Ersatzteilen, um Unsicherheit und Dynamik der Ersatzteilmachfrage wirkungsvoll begegnen zu können. Diese Flexibilität ist aber gerade in der Nachserienphase

häufig nur in beschränktem Ausmaß vorhanden oder kann durch verschiedene Strategien zur Ersatzteilversorgung nur zu recht hohen Kosten verfügbar gemacht werden.

Innerhalb des Zeitraumes, in welchem das Primärprodukt hergestellt und verkauft wird, können Ersatzteile effizient im Rahmen der (regulären) Neuteileproduktion zu Serienbedingungen hergestellt bzw. bei Fremdbezug von externen Lieferanten beschafft werden. Diese Form der Ersatzteilbeschaffung ist nicht nur besonders kostengünstig, sondern wegen ihrer zeitlichen und mengenmäßigen Anpassungsfähigkeit auch äußerst flexibel nutzbar. Sobald jedoch die Herstellung des Primärprodukts eingestellt wird, entfällt diese günstige Versorgungsoption. Damit stellt sich die Frage, mit welchen Strategien für den (oft beträchtlichen) Teil der Serviceperiode nach Ende der Produktion eine Ersatzteilversorgung sichergestellt werden sollte und welche Rolle die Flexibilität unterschiedlicher Versorgungsoptionen dabei spielt.

Eine für diesen Fall traditionell genutzte Option ist die Produktion auf Lager im Rahmen eines sog. *Abschlussloses* der Serienproduktion, das den Ersatzteilbedarf für die gesamte Restdauer der Serviceperiode abdecken soll. Diese Versorgungsstrategie bietet allerdings keinerlei Flexibilität im Sinne einer späteren Anpassungsmöglichkeit in zeitlicher und mengenmäßiger Hinsicht. Insofern kommt es darauf an, das Abschlusslos möglichst robust festzulegen, damit auch bei unterschiedlichster zukünftiger Nachfrageentwicklung ein akzeptabler Service ohne extreme Überbestände ermöglicht wird. Aufgrund des Mangels an Flexibilität lässt sich hierbei aber eine hohe Überbevorratung häufig nicht vermeiden, wenn man nicht ein gravierendes Fehlmengenrisiko in Kauf nehmen will. Recknagel (2007) beispielsweise spricht von einem Verschrottungsanteil von 25% der eingelagerten Ersatzteile in der Hausgerätebranche. Aus der Automobilindustrie weiß man, dass die Ersatzteilverräte zu über 20% aus dem Bestandsaufbau durch Bildung von Abschlusslosen (der sog. Abschlussbevorratung) herrühren. Aus flexibilitätstheoretischer Sicht (Gerwin, 1993) wäre zur Lösung dieses Problems entweder eine Reduktion des Nachfragerisikos (welche aufgrund der Rahmenbedingungen nur schwer umsetzbar ist) oder die Nutzung von Strategien unter Zuhilfenahme weiterer Ersatzteilversorgungsoptionen mit größerem Flexibilitätspotenzial angeraten. Zu diesen Optionen zählen die Nachproduktion nach Abschluss der Serienfertigung sowie die Teilegewinnung aus der Aufarbeitung von Altprodukten. In der vorliegenden Arbeit werden die Flexibilitätseigenschaften dieser Strategien sowie deren Erfolgsbeiträge an Hand eines mathematischen Planungsmodells zur Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase detailliert untersucht. In Abschnitt B. werden der Begriff Flexibilität definiert und die Versorgungsstrategien mit ihren wesentlichen Eigenschaften vorgestellt. Im Anschluss daran erfolgt in Abschnitt C. die allgemeine Modellierung des

Ersatzteilversorgungsproblems als ein stochastisches dynamisches Optimierungsproblem. Im Rahmen einer numerischen Studie werden im Abschnitt D. die Erfolgswirkungen der wesentlichen Flexibilitätseigenschaften der betrachteten Strategien analysiert. Abschnitt E. fasst schließlich die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammen.

B. Flexibilität von Ersatzteilversorgungsstrategien

Die Bedeutung von Flexibilität im Rahmen betrieblichen Handelns ist unumstritten. Unter Flexibilität versteht man allgemein die Eigenschaft, in zielgerichteter Weise auf geänderte Umweltbedingungen reagieren zu können.¹ Meffert (1985) unterscheidet zwischen Built-in-Flexibilität durch Maßnahmen zur Risikovorsorge und -abwälzung und Handlungsflexibilität durch Festlegung der Menge der Freiheitsgrade in einer Entscheidungssituation. Während innerhalb der betrieblichen Teilfunktionen verschiedene Flexibilitätsbegriffe unterschieden werden können², sind für die Ersatzteilversorgung von besonderer Bedeutung die *Mengenflexibilität* (mengenmäßige Anpassungsfähigkeit aufgrund von verfügbaren Kapazitäten), die *Zeitflexibilität* (Fähigkeit zur laufenden zeitlichen Anpassung von Entscheidungen) sowie die *Bestandsflexibilität* (Reaktionsfähigkeit aufgrund des Einsatzes von Lagerbeständen).

Die Flexibilität der Ersatzteilversorgungsstrategie in der Nachserienphase hängt wesentlich von den zur Verfügung stehenden Optionen ab. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der mit ihnen verbundenen Kosten sowie im Hinblick auf ihre verschiedenartigen Flexibilitätsmerkmale. In Anlehnung an Hesselbach et al. (2002), die Versorgungsstrategien in der Automobilindustrie untersuchen, sollen in der nachfolgenden Analyse neben der Produktion eines Abschlussloses unter Serienbedingungen die beiden oben schon erwähnten Optionen als die bedeutendsten berücksichtigt werden, nämlich die Nachproduktion in kleinen Mengen (in Eigenfertigung oder Fremdbezug durch Lieferanten) und die Aufarbeitung von Teilen aus zurückgenommenen Altprodukten. Auf diese Optionen kann bei Vorliegen entsprechender technischer Infrastruktur während der gesamten Serviceperiode zurückgegriffen werden.

Bei periodischer *Nachproduktion* auf beibehaltenen Produktionsanlagen (mit reduzierter Kapazität) bzw. in Sonderfertigung entfallen die Skalenvorteile des hohen Produktionsvolumens der regulären Produktion. Dies führt zur Erhöhung der Stückkosten, die Recknagel (2007) zufolge bis weit über 200% betragen kann. Dafür besitzt diese Beschaffungsoption allerdings ein hohes Maß an Zeitflexibilität, da mit der Nachproduktion vergleichsweise unmittelbar auf die im Verlauf der Serviceperiode zusätzlich verfügbaren Informationen über die Entwicklung des Ersatzteilbedarfs reagiert werden kann. Die Men-

genflexibilität dieser Option ist im Zusammenhang mit der Notwendigkeit aufwändiger Produktionsumstellungen in der Praxis häufig durch mit Lieferanten vertraglich fixierte Mindestbestellmengen bzw. -losgrößen eingeschränkt.

Die *Teileaufarbeitung* stellt eine Versorgungsalternative dar, die in den letzten Jahren stark an Relevanz gewonnen hat, da verschiedene Gründe zu einer verstärkten Rücknahme gebrauchter Produkte durch die Hersteller geführt haben. Zu diesen gehören gesetzliche Rahmenbedingungen wie beispielsweise Rücknahmeverpflichtungen, aber auch der Schutz des eigenen Ersatzteilmarktes vor Konkurrenten (Toffel, 2003). Durch die Aufarbeitung werden Altteile in einen Zustand versetzt, der gleichwertig zu neu produzierten Teilen ist. Häufig werden aufgearbeitete Teile und Komponenten auch mit denselben Garantiezusagen abgegeben wie Neuteile. Aus Sicht der Ersatzteilversorgung ist diese Option besonders vorteilhaft, da die Aufarbeitung aufgrund der hohen in den Altteilen noch enthaltenen Wertschöpfung materialmäßig relativ kostengünstig durchgeführt werden kann, wobei allerdings aufgrund der geringen Automatisierung der (oft auch aufwändigen) Aufarbeitungsprozesse in der Regel kein Kostenvorteil gegenüber der Serienproduktion gegeben ist. In die Kostenbewertung der Aufarbeitung muss gegebenenfalls noch ein Preisabschlag eingerechnet werden, falls aufbereitete Teile nicht zu demselben Marktpreis abgegeben werden können wie Neuteile. Obwohl hier Mindestmengen zumeist eine untergeordnete Rolle spielen, ist die Mengenflexibilität dieser Versorgungsoption gegenüber der Nachproduktion dadurch eingeschränkt, dass die Altproduktrückflüsse gewöhnlich nicht den Teilebedarf decken und zusätzlich durch ein hohes Maß an zeitlicher und volumenmäßiger Unsicherheit gekennzeichnet sind. Eine weitere Einschränkung der Flexibilität dieser Versorgungsalternative in Form mangelnder Bestandsflexibilität liegt vor, wenn die zurückgenommenen Altprodukte aus technischen oder organisatorischen Gründen nicht gelagert werden können, sondern gleich aufgearbeitet oder entsorgt werden müssen.

Neben den hier genannten Versorgungsquellen für Ersatzteile gehen Hesselbach et al. (2002) und insbesondere Schröter (2006) noch auf weitere Optionen ein, die aber eine geringere Bedeutung haben und im Folgenden nicht weiter berücksichtigt werden. Zu nennen wären hier die einfache Reparatur fehlerhafter Teile, die Nutzung kompatibler Teile aus aktuell produzierten Produkten sowie das Redesign der benötigten Ersatzteile derart, dass sie mit aktuell genutzten Fertigungsprozessen hergestellt werden können. Cattani/Souza (2003) untersuchen darüber hinaus mögliche Vorteile, die durch ein Postponement des Abschlussloses erzielt werden können.

C. Modellierung des Ersatzteilversorgungsproblems

I. Literaturüberblick

Quantitative Forschungsansätze zur Lösung des Ersatzteilversorgungsproblems in der Nachserienphase bezogen sich zunächst alleine auf die Festlegung der Abschlusslosgröße. Fortuin (1980) präsentiert als erster einen entsprechenden Ansatz, mit dessen Hilfe für gegebene Servicegrade und unter der Annahme einer exponentiell fallenden stochastischen Nachfrage ein Abschlusslos ermittelt wird.

Teunter/Fortuin (1999) entwickeln ein stochastisches dynamisches Modell, in welchem zusätzlich zum Abschlusslos eine Aufarbeitungsoption von Altteilen auf Basis einer einfachen Push-Strategie ohne Lagerhaltung von Altprodukten integriert ist. Im Rahmen eines heuristischen Lösungsverfahrens wird für den Fall stochastischer Ersatzteilbedarfe und Altteiltrückflüsse eine einfache Bestimmungsformel für die Höhe des Abschlussloses abgeleitet. In einer Modellerweiterung wird darüber hinaus dargestellt, wie eine Regel zur Reduzierung möglicherweise zu hoher Altproduktbestände aussehen könnte. Teunter/Fortuin (1998) beschäftigen sich in einer parallelen Veröffentlichung mit der Anwendung ihrer Heuristik auf einen Praxisfall in der Elektronikindustrie und entwickeln Prognoseverfahren für die Parameter der Nachfrageverteilungen. Kleber/Inderfurth (2007) verallgemeinern das Modell einer Kombination von Abschlusslosproduktion und laufender Altteileaufarbeitung und entwickeln einen heuristischen Ansatz zur Strategiebestimmung.

Spengler/Schröter (2003) und Schröter (2006) analysieren die Vorteilhaftigkeit von unterschiedlichen Strategien (auch unter Berücksichtigung der Nachproduktion) zur Ersatzteilversorgung insbesondere für elektronische Industriegüter unter Nutzung eines systemdynamischen Ansatzes, ohne allerdings Methoden zur optimalen Festlegung einzelner Strategieparameter zu entwickeln. Inderfurth/Mukherjee (2008) beschreiben das stochastische Ersatzteilversorgungsproblem unter Einbeziehung aller Optionen als stochastisches dynamisches Optimierungsproblem und schlagen einen einfachen heuristischen Lösungsansatz vor.

II. Annahmen und Notation

Im Folgenden wird eine Variante der in Inderfurth/Mukherjee (2008) modellierten Problemstellung genutzt, auf deren Grundlage sowohl für die kombinierte Anwendung von Versorgungsstrategien als auch für den isolierten Einsatz einzelner Beschaffungsoptionen optimale Versorgungsentscheidungen numerisch ermittelt werden. Das Planungsziel in diesem mehrperiodigen Modell besteht in der Minimierung der erwarteten Kosten, die durch

die Maßnahmen zur Ersatzteilbeschaffung sowie durch Lagerhaltung und eventuelle Fehlmengen während der Serviceperiode auftreten können. Zunächst sollen jedoch die getroffenen Annahmen und die genutzte Notation vorgestellt werden. Im Zusammenhang mit dem langen Planungshorizont kann die Länge einer Planungsperiode einen oder auch mehrere Monate betragen. Vorlaufzeiten für die Produktion bzw. Aufarbeitung werden deshalb vernachlässigt. Angesichts des langen Zeithorizonts der Planung wäre eigentlich eine Zielgrößenformulierung auf Grundlage eines Barwertansatzes angemessen. Da hier aber keine konkrete Entscheidungsunterstützung beabsichtigt ist, sondern eine Modellanalyse zum Vergleich alternativer Strategien vorgenommen wird, soll auf diese Komplizierung des Modellansatzes verzichtet werden. Dies erleichtert die Darstellung und Interpretation; darüber hinaus ist keine qualitative Änderung der Ergebnisse zu erwarten. Die im Folgenden aufgeführten Kostengrößen können insofern auch als reale Kostenwerte interpretiert werden. Die Grundannahmen des Modells und die genutzte Notation werden im Folgenden beschrieben.

Daten

T	Länge des Planungszeitraumes
c_F	Produktionsstückkosten bei Herstellung des Abschlussloses
c_P	Produktionsstückkosten bei Nachproduktion
p^{\min}	Mindestproduktionsmenge bei Nachproduktion
c_R	Aufarbeitungsstückkosten
h	Lagerkostensatz für Ersatzteile je Stück und Periode
v	Vormerkkostensatz für nicht sofort befriedigte Nachfragen je Stück und Periode
s	Strafzahlung für (endgültig) nicht befriedigte Nachfragen je Stück
D_t	unsichere (stochastische) Nachfrage in Periode t mit Erwartungswert μ_t^D
R_t	unsichere (stochastische) Rückflussmenge in Periode t mit Erwartungswert μ_t^R
q_R	(mittlere) Rückflussquote

Zur Vereinfachung der Darstellung werden alle Kostenparameter als zeitinvariant angenommen. Aufgrund des nur geringen gebundenen Kapitals und der häufig niedrigen Anforderungen an die Lagerung von Altprodukten werden Lagerhaltungskosten für Altteile vernachlässigt. Wenn eine Möglichkeit zur Nachproduktion von Ersatzteilen existiert, so stellt die Aufarbeitung von Altteilen in der Praxis nur dann eine relevante Option dar, wenn die Nachproduktionskosten die Kosten der Aufarbeitung übersteigen. Die niedrigsten Stückkosten treten in jedem Fall im Zusammenhang mit der Produktion des Ab-

schlussloses auf, so dass von einer Kostenrelation $c_F < c_R < c_P$ ausgegangen werden kann. Zwei Arten von Fehlmengenkosten werden unterschieden: Vormerkkosten v fallen für Nachfragen an, die nicht sofort beliefert werden können, bei denen jedoch die Lieferung grundsätzlich später nachgeholt wird. Eine Strafzahlung s kompensiert den Kunden für eine endgültig nicht zu befriedigende Nachfrage. Diese kann schlimmstenfalls die Lieferung eines Ersatzproduktes anstelle des Ersatzteils bedeuten. Es wird davon ausgegangen, dass die Strafzahlung hinreichend hoch ist ($s > c_F + (T - 1) \cdot h$), so dass es gegen Ende der Serviceperiode nicht grundsätzlich günstiger ist, eine Strafzahlung zu akzeptieren, als ein Ersatzteil im Abschlusslos zu produzieren und bis dahin zu lagern. Somit ist sichergestellt, dass die Serviceperiode auch ökonomisch sinnvoll gewählt ist. Entsorgungskosten für die am Ende des Planungszeitraumes noch übrigen Ersatzteile bzw. Altteile werden vernachlässigt. In vielen Fällen können diese Teile noch einem Materialrecycling zugeführt werden, wobei es häufig zu einer erlösmäßigen Kompensation der anfallenden Kosten kommt.³ Die Nachfragen D_t und Rückflüsse R_t sind stochastische Größen mit gegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen.⁴

Entscheidungs- und Zustandsvariablen

y	Größe des Abschlusslos
p_t	Nachproduktionsmenge in Periode t
r_t	Aufarbeitungsmenge in Periode t
I_t^S	Nettobestand an Ersatzteilen am Anfang der Periode t
I_t^R	Bestand an Altteilen am Anfang der Periode t

Die einmalige Entscheidung über die Größe des Abschlussloses y fällt zu Beginn der ersten Periode, die laufenden Entscheidungen über die Nachproduktionsmengen p_t und Aufarbeitungsmengen r_t werden zu Beginn der entsprechenden Periode t ($t = 1, 2, \dots, T$) nach Realisation der vorhergehenden Nachfragen und Rückflüsse getroffen. Sollte in einer Periode Nachproduktion stattfinden, darf diese die Mindestproduktionsmenge p^{\min} nicht unterschreiten. Die Aufarbeitungsmenge einer Periode darf ihrerseits den jeweiligen Bestand an Altteilen zu Periodenbeginn nicht überschreiten. Der Nettobestand an Ersatzteilen I_t^S (positiv bei physischen Bestandsmengen, negativ bei Fehlbeständen) und der Bestand an Altteilen I_t^R beinhalten die für die Entscheidungen in jeder Periode relevanten Zustandsinformationen.

III. Das Modell

Unter Berücksichtigung der oben getroffenen Annahmen und bei Nutzung aller Optionen lässt sich die Planungssituation durch das folgende Modell wiedergeben:

$$\min Z = E \left\{ c_F \cdot y + \sum_{t=1}^{T-1} [c_P \cdot p_t + c_R \cdot r_t + h \cdot \max\{I_{t+1}^S; 0\} + v \cdot \max\{-I_{t+1}^S; 0\}] + c_P \cdot p_T + c_R \cdot r_T + h \cdot \max\{I_{T+1}^S; 0\} + s \cdot \max\{-I_{T+1}^S; 0\} \right\} \quad (1)$$

$$\text{u.d.N.:} \quad I_2^S = \bar{I}_1^S + p_1 + r_1 + y - D_1, \quad (2)$$

$$I_{t+1}^S = I_t^S + p_t + r_t - D_t \quad \forall t = 2, \dots, T, \quad (3)$$

$$I_1^R = \bar{I}_1^R, \quad (4)$$

$$I_{t+1}^R = I_t^R - r_t + R_t \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (5)$$

$$y \geq 0, \quad p_t = 0 \text{ oder } p_t \geq p^{\min} \quad \text{und} \quad 0 \leq r_t \leq I_t^R \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (6)$$

Planungsziel ist die Minimierung der erwarteten Gesamtkosten (1) durch geeignete Entscheidungen hinsichtlich der Höhe des Abschlussloses y sowie der Nachproduktionsmengen p_t und Aufarbeitungsmengen r_t in den einzelnen Perioden. Nachproduktion und Aufarbeitung sind dabei in Abhängigkeit von den jeweiligen Zustandsgrößen I_t^S und I_t^R zu betrachten. Berücksichtigt werden die variablen Kosten der Produktion des Abschlussloses, der Nachproduktion und der Aufarbeitung sowie Lagerhaltungskosten für die Ersatzteile, Vormerkkosten für nicht sofort befriedigte Nachfragen und Strafzahlungen für Nachfragen, die bis zum Ende des Planungshorizontes nicht befriedigt werden. Die Nebenbedingungen (2) bis (5) stellen - ausgehend von gegebenen Anfangsbeständen \bar{I}_1^S und \bar{I}_1^R - Lagerbilanzgleichungen für Ersatzteile und Altteile dar. Die unter (6) angegebenen Restriktionen beinhalten die Nichtnegativität der Entscheidungsgrößen, die Mindestproduktionsmenge und die Beschränkung der Aufarbeitungsmenge durch die verfügbaren Altprodukte.

Die Lösung des obigen Modells erfordert eine Formulierung der Funktionalgleichungen der Dynamischen Optimierung, wie sie im Folgenden kurz dargestellt sind. Dabei steht $(x)^+$ für $\max\{x, 0\}$.

Periode T :

$$f_T(I_T^R, I_T^S) = \min_{\substack{p_T \in \{0; [p^{\min}; \infty)\} \\ r_T \in [0; I_T^R]}} \left\{ c_P \cdot p_T + c_R \cdot r_T + E_{D_T} \left\{ h \cdot (I_T^S + p_T + r_T - D_T)^+ + p \cdot (-(I_T^S + p_T + r_T - D_T))^+ \right\} \right\} \quad (7)$$

Perioden $t = 2, \dots, T - 1$:

$$f_t(I_t^R, I_t^S) = \min_{\substack{p_t \in \{0; [p^{\min}; \infty)\} \\ r_t \in [0; I_t^R]}} \left\{ c_P \cdot p_t + c_R \cdot r_t + \right. \\ \left. + E_{D_t, R_t} \left\{ h \cdot (I_t^S + p_t + r_t - D_t)^+ + v \cdot (-(I_t^S + p_t + r_t - D_t))^+ \right. \right. \\ \left. \left. + f_{t+1}(I_t^R - r_t + R_t, I_t^S + p_t + r_t - D_t) \right\} \right\} \quad (8)$$

Periode 1:

$$f_1(\bar{I}_1^R, \bar{I}_1^S) = \min_{y \geq 0} \left\{ c_F \cdot y + E_{D_1, R_1} \left\{ h \cdot (\bar{I}_1^S + y - D_1)^+ + v \cdot (-(\bar{I}_1^S + y - D_1))^+ \right. \right. \\ \left. \left. + f_2(\bar{I}_1^R + R_1, \bar{I}_1^S + y - D_1) \right\} \right\} \quad (9)$$

Aufgrund der oben beschriebenen Stückkostenrelationen der einzelnen Versorgungsoptionen ist in der ersten Periode nur die Optimierung der Abschlusslosgröße relevant, während die Nachproduktions- und Aufarbeitungsmenge gleich null ist. Wegen der Ähnlichkeit mit dem mehrperiodigen, stochastischen Lagerhaltungsproblem der Kreislaufwirtschaft bei rein proportionalen Kosten (vergl. Inderfurth, 1997) ist für den Spezialfall ohne Berücksichtigung einer Mindestproduktionsmenge bekannt, dass die optimale Entscheidungsregel für die Teileversorgung nach dem Abschlusslos (d.h. ab Periode 2) durch eine Strategie der Bestandsergänzung mit periodenabhängigen Bestellgrenzen S_t für die Nachproduktion und M_t für die Aufarbeitung (mit $t = 2, \dots, T$) beschrieben werden kann. Die optimalen Entscheidungen der einzelnen Perioden lassen sich auf Basis der jeweiligen Lagerbestände wie folgt darstellen:

$$p_t = \max\{S_t - I_t^S - I_t^R, 0\} \quad \text{für } t = 2, \dots, T, \quad (10)$$

$$r_t = \min\{\max\{M_t - I_t^S, 0\}, I_t^R\} \quad \text{für } t = 2, \dots, T. \quad (11)$$

Trotz der relativ einfachen Lösungsstruktur ist bereits in diesem Fall die numerische Ermittlung der optimalen Bestellgrenzen sehr aufwändig und allgemein für realistische Problemgrößen kaum durchführbar.⁵ Für eine begrenzte Modellanalyse - wie in der vorliegenden Arbeit - ist eine optimale Lösung des Planungsproblems selbst unter Einschluss der Bedingungen zur Mindestproduktionsmenge numerisch noch möglich.

D. Numerische Flexibilitätsanalyse

Die oben beschriebenen Optionen der Abschlusslosfertigung, Nachproduktion und Aufarbeitung können im Grundsatz einzeln sowie nebeneinander genutzt werden, wobei auf die Möglichkeit zur Produktion eines Abschlussloses aus Wirtschaftlichkeitsgründen praktisch

immer zurückgegriffen wird. Um den Erfolgsbeitrag der Flexibilitätseigenschaften der Versorgungsoptionen in sinnvollen Anwendungskombinationen zu prüfen, werden im Weiteren die folgenden Strategien einzeln untersucht:

- (a) Ausschließliche Nutzung des Abschlussloses (AL)
- (b) Abschlusslos und Nachproduktion ($AL+NP$)
- (c) Abschlusslos und Aufarbeitung ($AL+AU$)
- (d) Abschlusslos, Nachproduktion und Aufarbeitung ($AL+NP+AU$)

Als Maß für den flexibilitätsbedingten Erfolgsbeitrag einer Strategie nach (b) bis (d) wird deren relativer Kostenvorteil gegenüber einer ausschließlichen Nutzung der Abschlusslos-option (AL) genutzt, welche ja mit dem absolut niedrigsten Flexibilitätspotenzial einhergeht.

In Abschnitt I. wird ein Basisfall - bestehend aus jeweils einem dynamischen und statischen Szenario für die Nachfragen und Rückflüsse - mit geeigneten Kostendaten vorgestellt. Für diesen Fall werden für alle beschriebenen Strategien zur Ersatzteilbeschaffung die Größe des Abschlussloses und die erwarteten Gesamtkosten miteinander verglichen. In Abschnitt II. wird der Flexibilitätserfolg für Strategien mit jeweils einer zusätzlichen Option, d.h. Nachproduktion ($AL+NP$) bzw. Aufarbeitung ($AL+AU$), genauer analysiert und in einzelne Bestandteile zerlegt. Weiter wird auf die Auswirkungen von Flexibilitätsbeschränkungen aufgrund mangelnder Lagermöglichkeit von Altteilen und vorgegebener Mindestlosgrößen bei Nachproduktion eingegangen. Im Anschluss daran werden in Abschnitt III. die Auswirkungen einzelner wichtiger Einflussgrößen wie Rückflussquote und Nachfrage- und Rückflussrisiko auf den Flexibilitätsgewinn diskutiert, bevor schließlich in Abschnitt IV. der Flexibilitätsbeitrag einer kombinierten Anwendung von Nachproduktion und Aufarbeitung ($AL+NP+AU$) thematisiert wird.

I. Basisfall

Der Basisfall ist von Struktur und Datenkonstellation so gewählt, dass er einem denkbaren Anwendungsfall entsprechen könnte. Da für die folgende Analyse das stochastische dynamische Optimierungsproblem aus Abschnitt C.III. zu lösen ist, werden die Szenarien allerdings so skaliert, dass sie noch in relativ kurzer Zeit lösbar sind. Die Lösung erfolgt mittels diskreter Approximation der Nachfrage- und Rückflussverteilungen innerhalb des $\mu \pm 3 \cdot \sigma$ -Intervalls. Mit einem selbst entwickelten und in C++ implementierten Softwaretool konnten die Beispiele in Abhängigkeit von den Parametern innerhalb weniger

Sekunden bis maximal ca. 15 Minuten auf einem PC mit Athlon 64 Prozessor mit 2GHz Prozessortakt gelöst werden.

In dieser Studie wurden zwei Szenarien genutzt: ein dynamisches mit zeitabhängigen Erwartungswerten für Nachfrage bzw. Rückflüsse, die jeweils Produktlebenszykluseffekte abbilden sollen (vgl. Hesselbach et al. (2002)) und ein statisches mit konstanten Mittelwerten für Nachfragen bzw. Rückflüsse, die einen Grenzfall gleichmäßigen Verhaltens darstellen sollen (siehe Abbildung 1). Damit soll der Einfluss sehr unterschiedlicher Strukturen des Nachfrage- und Rückflussverhaltens auf die Flexibilitätseigenschaften der unterschiedlichen Versorgungsstrategien überprüft werden können. Der Planungshorizont beträgt 12 Perioden (z.B. Halbjahre oder Jahre).

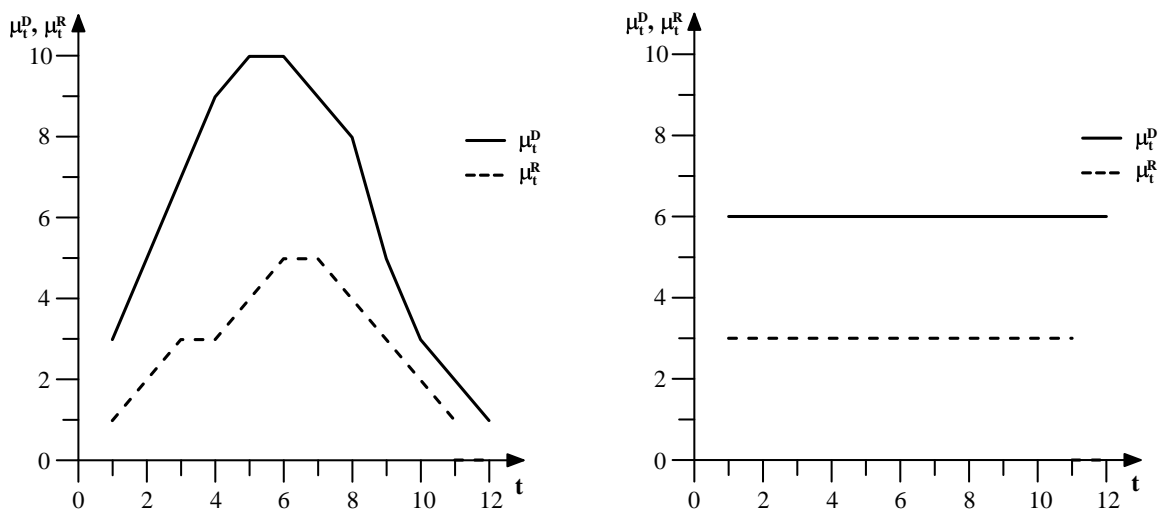


Abb. 1: Mittelwerte der Nachfragen und Rückflüsse im dynamischen und statischen Szenario.

Die Nachfragen und Rückflüsse sind periodenweise unabhängig und unterliegen einer Normalverteilung mit den in Tabelle 1 angegebenen Erwartungswerten und konstanten Variationskoeffizienten $\rho_D = 0.2$ und $\rho_R = 0.3$. Die Rückflussquote q_R (durchschnittlicher Anteil der insgesamt zurückgenommenen Alteile am gesamten Neuteilebedarf unter Vernachlässigung der Anfangsbestände) beträgt in beiden Szenarien 46%.

Tab. 1: Mittlere Nachfragen und Rückflüsse in den betrachteten Szenarien.

Szenario	Periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Gesamt
Statisch	Nachfrage	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	72
	Rückflüsse	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	33
Dynamisch	Nachfrage	3	5	7	9	10	10	9	8	5	3	2	1	72
	Rückflüsse	1	2	3	3	4	5	5	4	3	2	1	0	33

Für beide Szenarien werden im Basisfall dieselben Kostenparameter genutzt. Sie sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Die (regulären) Produktionsstückkosten im Rahmen der Herstellung des Abschlussloses unter Serienbedingungen sind auf $c_F = 10$ normiert. Der Aufarbeitungskostensatz liegt um 40% höher bei $c_R = 14$. Die Stückkosten der Nachproduktion übersteigen ihrerseits die Aufarbeitungskosten und liegen um 80% über den Kosten der Serienproduktion. Von einer Mindestlosgröße bei Nachproduktion wird im Basisfall abgesehen. Der Lagerkostensatz je Periode beträgt 10% der regulären Produktionsstückkosten, die Fehlmengenkosten sind mit $v = 20$ und die Strafzahlung mit $s = 100$ festgelegt.

Tab. 2: Kostenparameter im Basisfall.

Parameter	c_F	c_R	c_P	h	v	s
Wert	10	14	18	1	20	100

Die optimalen Abschlusslosgrößen und die erwartete Gesamtkosten der einzelnen Strategien sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Bei ausschließlicher Nutzung des Abschlussloses (AL) werden im dynamischen (statischen) Szenario 76(75) Stück auf Lager produziert. Dies entspricht einem langfristigen Sicherheitsbestand in Höhe von 4(3) Stück. Dieser ist (bedingt durch den konstanten Variationskoeffizienten) aufgrund der höheren Variabilität der Gesamtnachfrage im dynamischen Szenario geringfügig höher als im statischen. Die Wahrscheinlichkeit, dass keine Fehlmengen auftreten, beträgt 80%(76%) und die erwartete Verschrottungsmenge beläuft sich auf 5(4) Stück.

Tab. 3: Größe des Abschlussloses (y), erwartete Gesamtkosten (Z) und relative Ersparnis (ΔZ_{rel} in %) der gemischten Strategien im Vergleich zur ausschließlichen Nutzung des Abschlussloses.

Szenario	AL		$AL+NP$			$AL+AU$			$AL+NP+AU$		
	y	Z	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}
Dynamisch	76	1216	63	1064	12,5	52	1001	17,7	44	990	18,6
Statisch	75	1243	53	1120	9,9	48	1029	17,2	40	1011	18,7

Bei zusätzlicher Nutzung der Nachproduktion ($AL+NP$) lohnt es sich trotz der geringeren Produktionskosten nicht mehr, alle Periodenbedarfe durch das Abschlusslos zu decken, da sich durch Nachproduktion insbesondere in den letzten Perioden Lagerkosten einsparen lassen. Die Abschlusslosgröße verringert sich um 17%(29%) auf 63(53). Die Reduktion ist im statischen Szenario größer als im dynamischen, da sich hier ein höherer

Anteil der Gesamtnachfrage auf die letzten Perioden konzentriert. Die Kostenreduktion, die sich trotz der um 80% höheren Stückkosten der Nachproduktion aufgrund der hohen Zeit- und Mengenflexibilität dieser Option erzielen lässt, ist mit 12,5%(9,9%) bemerkenswert hoch und verdeutlicht den ökonomischen Wert des Flexibilitätspotenzials.

Wird neben dem Abschlusslos ohne Rückgriff auf die Option der Nachproduktion nur die Altteileaufarbeitung ($AL+AU$) als Versorgungsoption genutzt, sinkt das Abschlusslos trotz des Risikos beschränkter Verfügbarkeit an Altprodukten sogar um 32%(36%) auf 52(48) Stück ab. Hier macht sich die vergleichsweise günstige Kostenposition der Aufarbeitung bemerkbar. Interessanterweise beinhaltet diese Strategie erwartete Restbestände von Altprodukten in Höhe von 8(6) Stück. Die Kostensenkung liegt bei 17,7%(17,2%) und übertrifft damit trotz geringerer Mengenflexibilität aufgrund der niedrigeren Stückkosten diejenige der Nachproduktionsstrategie $AL+NP$.

Werden als Zusatzoptionen zum reinen Abschlusslos die beiden Versorgungsmöglichkeiten der Nachproduktion und Aufarbeitung im Rahmen der Kombinationsstrategie $AL+NP+AU$ gemeinsam genutzt, verringert sich im Vergleich zu den Teilstrategien $AL+NP$ und $AL+AU$ das Abschlusslos noch einmal deutlich und erreicht mit 44(40) Stück seinen niedrigsten Wert. Dies gilt sowohl für das dynamische wie auch für das statische Szenario. Die Kombination von Nachproduktion und Aufarbeitung führt allerdings auf der Kostenseite nur noch gegenüber der reinen Nachproduktionsstrategie $AL+NP$ zu einer deutlichen Reduktion von 6.1(8.8) %-Punkten, während sich die reine Aufarbeitungsstrategie $AL+AU$ nur noch um 0.9(1.5) %-Punkte verbessern lässt. Hier wirkt sich offensichtlich der zusätzliche mengenmäßige Flexibilitätsgewinn der Nachproduktion wegen ihrer höheren Stückkosten nur noch recht beschränkt auf die Verbesserungsmöglichkeit des wirtschaftlichen Erfolgs aus. Insgesamt lässt sich ansonsten feststellen, dass für den Basisfall die sehr unterschiedlichen Verläufe von Ersatzteilmachfrage und Altproduktrückflüssen im statischen und dynamischen Szenario einen nur wenig ausgeprägten Einfluss auf die flexibilitätsbezogene Performance der verschiedenen Strategien zur Ersatzteilversorgung hat.

II. Zerlegung des Flexibilitätserfolgs

In diesem Abschnitt soll der Flexibilitätsgewinn bei Nachproduktions- bzw. Aufarbeitungsstrategie (gemessen durch die relative Kostenreduktion gegenüber reiner Abschlusslosnutzung) genauer analysiert werden. Hierzu sind in Abbildung 2 die Kostenvorteile der Strategien $AL+NP$ und $AL+AU$ bei kombinierter Nutzung von Abschlusslos und Nachproduktion bzw. Aufarbeitung in Abhängigkeit von den jeweiligen Stückkosten dargestellt.

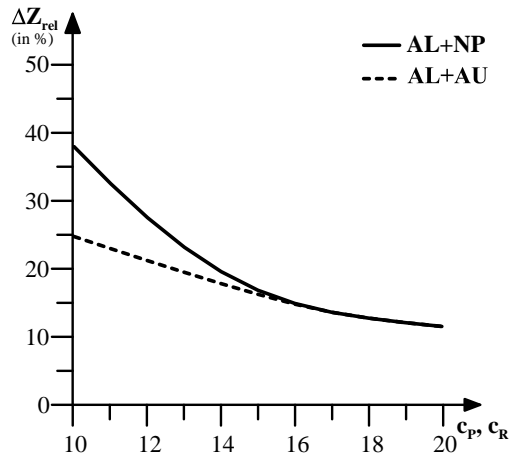


Abb. 2: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Änderung von c_P bzw. c_R im dynamischen Szenario.

Die Stückkosten für die jeweiligen Optionen werden dabei zwischen den Abschlussloskosten als Untergrenze und dem Doppelten dieses Kostensatzes als Obergrenze variiert. Da sich die Ergebnisse im statischen nicht wesentlich von denen im dynamischen Szenario unterscheiden, wird in der Abbildung nur auf die Darstellung des dynamischen Szenarios Bezug genommen (im Anhang finden sich die zahlenmäßigen Ergebnisse für beide Szenarien).

Die Schnittpunkte der einzelnen Kurven mit der Ordinatenachse kennzeichnen die jeweiligen Kostenersparnisse, die sich bei den einzelnen Strategien herausbilden würden, wenn sie keinen Stückkostennachteil gegenüber der Abschlusslosproduktion hätten ($c_P = c_F$ bzw. $c_R = c_F$). Damit sind die Kostenvorteile allein auf die besseren Flexibilitäts-eigenschaften dieser Strategien zurückzuführen. So ist die Kostensenkung bei Nachproduktionsstrategie $AL+NP$ in Höhe von 38,2% vollständig deren Zeit- und Mengenflexibilität zuzuschreiben. Bedingt durch ihre eingeschränkte Mengenflexibilität weist die Aufarbeitungsstrategie einen geringeren Kostenvorteil von nur 24,8% auf. Der Erfolgsbeitrag der Flexibilität sinkt also in diesem Fall um rund ein Drittel. Hierbei ist zu beachten, dass bei dieser Problemsituation die Mengenflexibilität der Nachproduktion durch keinerlei Mindestlosgröße eingeschränkt ist.

Mit zunehmenden Stückkosten gegenüber einer Abschlusslosproduktion verringert sich bei beiden Strategien der flexibilitätsbezogene Kostenvorteil kontinuierlich. Dabei wird der Kostennachteil der Aufarbeitungsoption gegenüber der Nachproduktionsstrategie (bei identischen Stückkosten) immer geringer, da ab einer bestimmten Stückkostenhöhe das Abschlusslos so groß wird, dass die eingeschränkte Mengenflexibilität der Aufarbeitungsstrategie kaum noch Relevanz hat. Insgesamt reicht auch bei sehr hohen Stückkosten (in

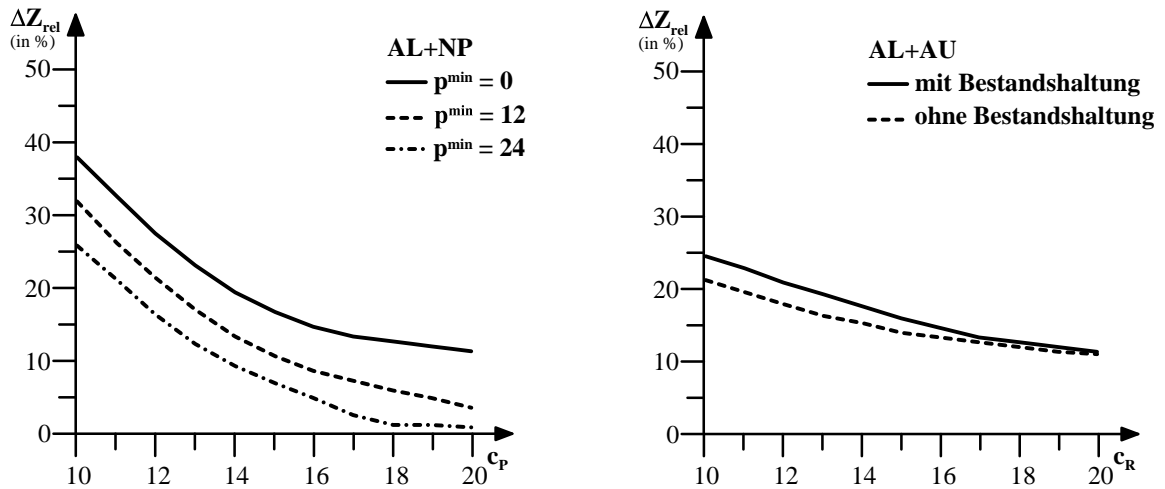


Abb. 3: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Nachproduktion (links) und Aufarbeitung (rechts) unter Berücksichtigung von optionsspezifischen Einschränkungen im dynamischen Szenario.

einer Größenordnung des Doppelten der Serienstückkosten) die Flexibilität beider Strategien aus, um gegenüber einer reinen Abschlusslosstrategie einen Kostenvorteil von gut 11% zu erzielen. Dies ist im Wesentlichen auf die bessere Vermeidbarkeit von Strafzahlungen für nicht befriedigte Nachfrage zurückzuführen.

In der Praxis stößt man sowohl bei der Nachproduktion als auch bei der Aufarbeitung als Versorgungsoption auf spezifische Flexibilitätsbeschränkungen, deren Wirkungen bisher noch nicht betrachtet wurden. So ist schon darauf hingewiesen worden, dass im Fall der Nachproduktion von Ersatzteilen unter Umständen Mindestlosgrößen von erheblichem Umfang in Kauf genommen werden müssen. Die Kostenwirkung einer solchen Einschränkung der Mengenflexibilität lässt sich aus der linken Seite von Abbildung 3 ablesen, wo zusätzlich zum Basisfall der Verlauf der relativen Kostenersparnis bei Nachproduktionsstrategie $AL+NP$ für den Fall abgetragen ist, dass die Mindestproduktionsmenge dem Zweifachen bzw. dem Vierfachen der mittleren Periodennachfrage entspricht. Im Fall niedriger Stückkosten wie bei Serienproduktion macht sich der Flexibilitätsverlust von Kurve zu Kurve durch ein Absinken der relativen Kostenersparnis von jeweils 6 %-Punkten bemerkbar. Weiter zeigt sich, dass sich auch bei steigenden Stückkosten der Nachproduktion die Ersparniseinbuße deutlich ist und auf ähnlicher Höhe verbleibt. Aus der (untersten) Kurve für die höchste Mindestlosgröße lässt sich entnehmen, dass bei einer Mindestproduktionsmenge in Höhe der vierfachen Periodennachfrage der Flexibilitätsvorteil der Nachproduktionsstrategie $AL+NP$ gegenüber der Aufarbeitungsstrategie $AL+AU$ aus Kostensicht vollständig verloren gegangen ist und dass bei hinreichend hohen Nachproduktionskosten

selbst gegenüber der reinen Abschlusslosstrategie AL praktisch kein Kostenvorteil mehr besteht. Flexibilitätseinschränkungen durch Mindestproduktionsmengen können mithin die auf ihrer Zeitflexibilität beruhende Vorteilhaftigkeit der Nachproduktionsoption wieder zunichte machen.

Mit einer spezifischen Einschränkung der Aufarbeitungsoption ist man konfrontiert, wenn Altprodukte aufgrund mangelnder Lagerfähigkeit oder fehlender Lagereinrichtung nicht dauerhaft gelagert werden können, sondern innerhalb einer Periode entweder aufgearbeitet oder entsorgt werden müssen. Abbildung 3 (rechts) beschreibt den Verlauf der Kostenersparnis bei Aufarbeitungsstrategie $AL+AU$ mit und ohne Altproduktlagerung. Man erkennt am Abstand der beiden Kurvenverläufe, dass sich der Mangel an Bestandsflexibilität durchgehend negativ auf die Vorteilhaftigkeit der Aufarbeitungsoption auswirkt. Hierbei ist der Verlust an Kostenersparnis im Grenzfall abschlusslosgleicher Aufarbeitungskosten mit 4(8) %-Punkten im dynamischen (statischen) Szenario durchaus spürbar. Mit zunehmenden Stückkosten der Aufarbeitung nimmt die Kostendifferenz jedoch kontinuierlich ab.

III. Einflussgrößen auf den Flexibilitätserfolg

Nach der Analyse des Einflusses der Stückkosten der einzelnen Versorgungsoptionen soll in diesem Abschnitt für die Nachproduktions- und für die Aufarbeitungsstrategie im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden, wie sich die übrigen Einflussgrößen auf die flexibilitätsbedingten Kostenreduzierungen auswirken. Hierbei wird zunächst auf die Eigenschaften des Nachfrage- und Rückflussprozesses eingegangen. Dazu dient eine einfache Sensitivitätsanalyse, bei der die übrigen Kostenparameter sowie die Korrelationskoeffizienten der Nachfrage und Rückflüsse im Vergleich zum Basisfall stark erhöht bzw. gesenkt wurden. Die entsprechenden Ergebnisse sind im Anhang II. in den Tabellen 8 und 9 wiedergegeben.

Das Ausmaß der Unsicherheit über den zukünftigen Verlauf der Ersatzzeilnachfrage läßt sich durch den Variationskoeffizienten der Nachfrage ρ_D beschreiben. Der Abbildung 4 lässt sich entnehmen, wie sich die Flexibilitätsvorteile von Nachproduktion und Aufarbeitung entwickeln, wenn sich ρ_D im Bereich zwischen null (dh. keinerlei Unsicherheit) und dem Doppelten des Basisfalls bewegen kann. Hier wird deutlich, dass die Schwankung der Nachfrage einen starken Einfluss auf den Wert der Flexibilität beider Strategien zur Ersatzteilversorgung hat. Bei steigender Nachfragevariabilität ρ_D zeigt sich (vgl. Abbildung 4), dass der Flexibilitätsgewinn durch die Nutzung einer zusätzlichen Versorgungsoption neben der Abschlusslosproduktion zunimmt. Dieser Effekt ist auf die größer werdende Be-

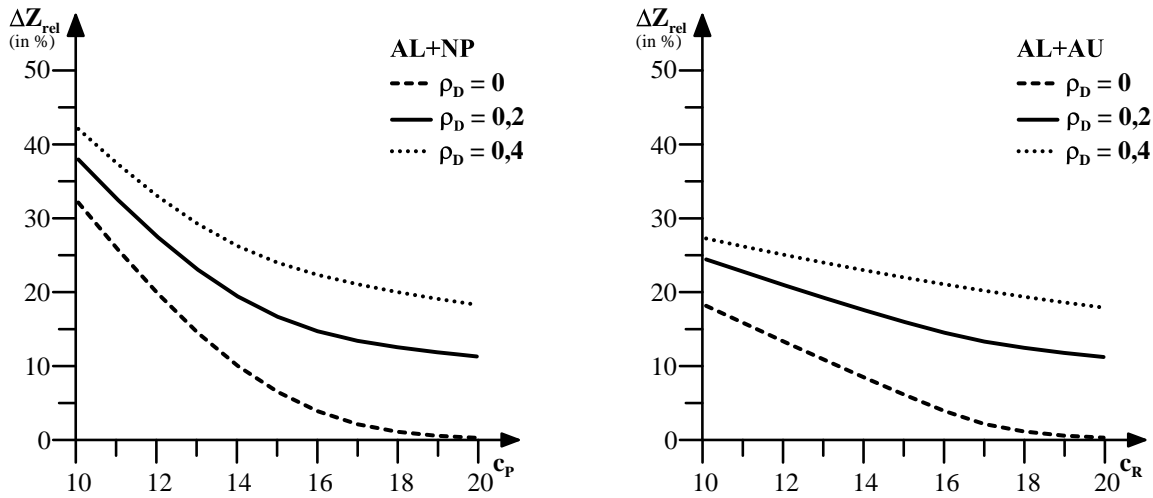


Abb. 4: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Nachproduktion (links) bzw. Aufarbeitung (rechts) für unterschiedliche Höhen der Nachfragesteuerung ρ_D und Variation von c_P bzw. c_R im dynamischen Szenario.

deutung der Zeitflexibilität bei stärkeren Nachfrageschwankungen zurückzuführen. Dieser Vorteil sinkt jedoch bei zunehmenden Stückkosten der jeweiligen Option. Dabei ist der Einfluss der Nachfragesteuerung um so größer, je höher die Kosten der zusätzlichen Option, d.h. c_P bzw. c_R , sind. Im Fall deterministischer Nachfrage (d.h. $\rho_D = 0$) verschwindet bei hohen Kosten der Nachproduktion bzw. Aufarbeitung für beide Optionen der Flexibilitätsvorteil praktisch zu 100% und die Nachfrage wird vollständig durch das Abschlusslos gedeckt.

Anders als bei der Nachfragevariabilität stellt sich für die Rückflussvariabilität ρ_R heraus, dass sie nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die potenzielle Kostensenkung bei Nutzung der Aufarbeitungsstrategie $AL+AU$ besitzt.⁶ Die Rückflussquote q_R dagegen, in welcher der mittlere Anteil der Altproduktrückflüsse an der Nachfrage einer Periode zum Ausdruck kommt, wirkt sich erheblich auf den Flexibilitätserfolg der Aufarbeitungsoption aus. Dies lässt die Abbildung 5 erkennen, in der (der einfacheren Darstellung wegen auf das statische Szenario beschränkt) neben dem Kurvenverlauf für den Basisfall einer mittleren Rückflussquote von 46% auch der Verlauf bei hoher (76%) und niedriger (15%) Quote wiedergegeben ist. Es ist deutlich zu sehen, wie gerade bei geringen Aufarbeitungskosten das Flexibilitätspotenzial der Aufarbeitung bei niedriger Rückflussquote sehr stark eingeschränkt wird und bei hoher Quote signifikant ansteigt. Mit zunehmenden Stückkosten der Aufarbeitung verliert die Rückflussquote allerdings immer mehr an Einfluss, weil aufgrund einer Vergrößerung des Abschlussloses die Aufarbeitungsmenge sinkt und damit die Bedeutung der mengenmäßigen Verfügbarkeit von

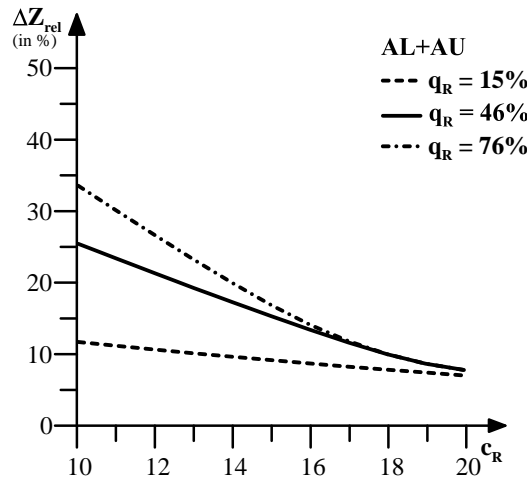


Abb. 5: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) der Aufarbeitungsstrategie $AL+AU$ bei unterschiedlichen Rückflussquoten q_R und Variation von c_R im statischen Szenario.

Altprodukten abnimmt. Insgesamt wird deutlich, dass zumindest bei niedrigen Aufarbeitungskosten die Rückflussquote über ihren Einfluss auf die Mengenflexibilität eine sehr große Rolle für das Erfolgspotenzial der Aufarbeitungsstrategie spielt.

Eine Analyse der einzelnen Kosteneinflussgrößen zeigt, dass hinsichtlich der Flexibilitätseffekte der einzelnen Versorgungsstrategien der Fehlmengenkostensatz v und die Strafzahlung s nur eine untergeordnete Rolle spielen.⁷ Anders verhält es sich mit dem Lagerkostensatz für Ersatzteile h , der ebenso wie die jeweiligen Stückkosten für Nachproduktion und Aufarbeitung die Vorteilhaftigkeit beider Strategien stark beeinflusst. Dies wird in Abbildung 6 demonstriert, wo der Lagerkostensatz gegenüber dem Basisfall halbiert bzw. verdoppelt wurde. Ein höherer Lagerkostensatz für Ersatzteile h vergrößert in besonderem Maß die bestandsbedingten Kosten des Abschlussloses und führt damit zu einer Losgrößenreduzierung. Die zeitflexiblen Strategien der Nachproduktion bzw. Teilaufarbeitung sind wesentlich weniger vom Lagerkostensatz betroffen und verzeichnen deshalb mit zunehmendem Kostensatz eine deutliche Steigerung des Flexibilitätserfolgs. Dieser lagerkostenbedingte Erfolgsbeitrag der Flexibilität ist für sehr niedrige Stückkosten der Nachproduktion bzw. Aufarbeitung am höchsten. Mit zunehmenden Stückkosten wird er immer niedriger, da der Zeitflexibilität dann eine geringere Bedeutung zukommt. Der Vorteil verschwindet jedoch nicht vollständig, da die zusätzliche Versorgungsoption genutzt werden kann, um Strafzahlungen am Ende der Serviceperiode zu vermeiden.

Schließlich soll noch untersucht werden, inwieweit die Dauer des Servicezeitraums, der im Basisfall mit 12 Perioden festgelegt wurde, den Wert der Flexibilität der einzelnen Strategien beeinflusst. In Abbildung 7 sind die Kurvenverläufe für Nachproduktions- und

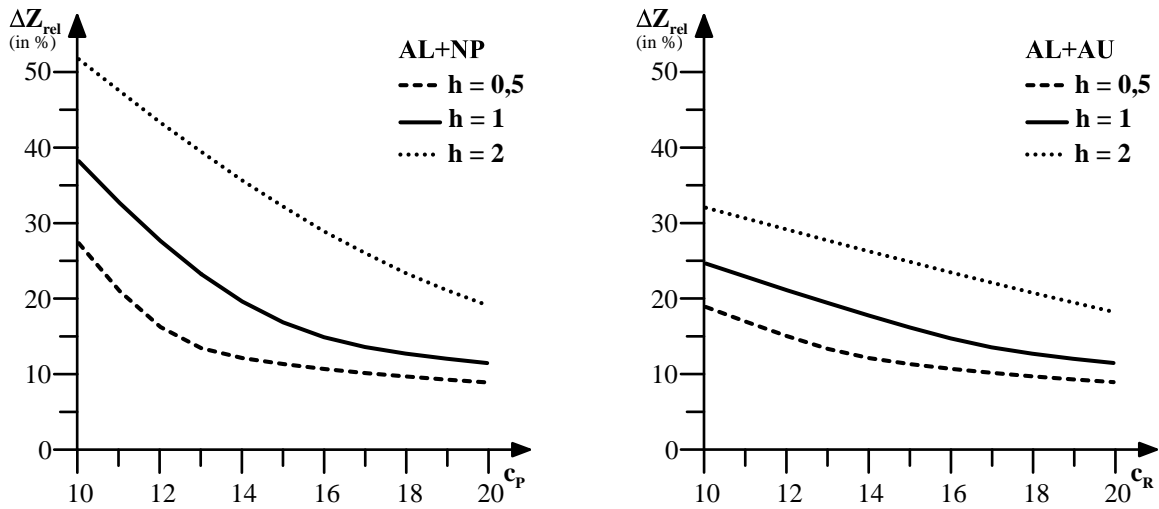


Abb. 6: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Nachproduktion (links) bzw. Aufarbeitung (rechts) für unterschiedliche Höhen des Lagerkostensatzes h bei Variation von c_P bzw. c_R im dynamischen Szenario.

Aufarbeitungsstrategie zusätzlich für einen kürzeren (8 Perioden) und längeren (16 Perioden) Servicezeitraum wiedergegeben (wiederum beschränkt auf des statische Szenario). Beinahe unabhängig von den jeweiligen Stückkosten ergibt eine Verlängerung der Serviceperiode immer eine gleichmäßige Erhöhung des Erfolgsbeitrags der einzelnen Strategien. Dies erklärt sich einfach daraus, dass mit zunehmendem Servicezeitraum die zeitliche Flexibilität von Nachproduktion und Aufarbeitung gleichermaßen immer wichtiger wird.

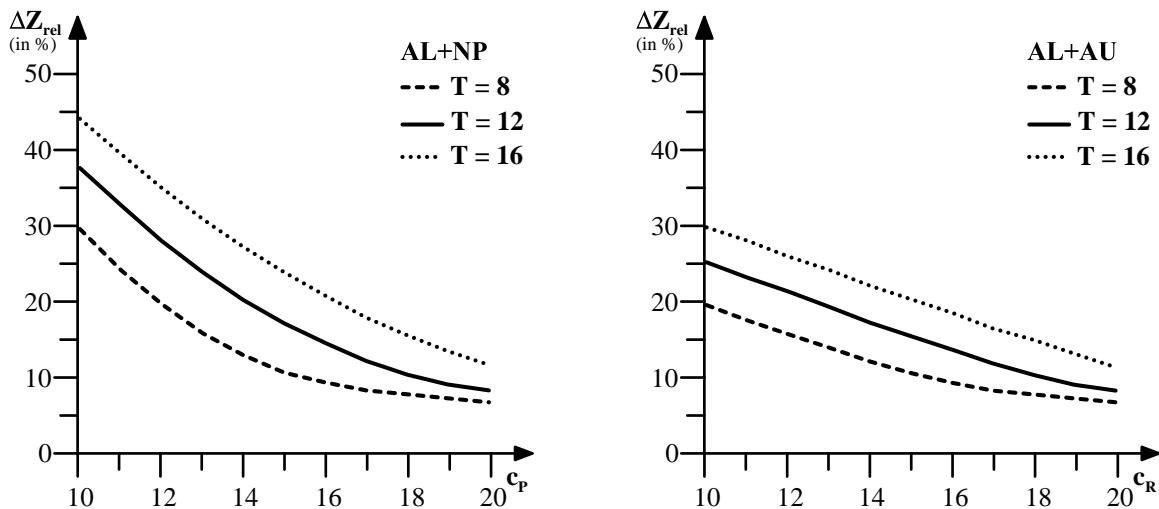


Abb. 7: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Nachproduktion (links) bzw. Aufarbeitung (rechts) für unterschiedliche Dauern des Servicezeitraumes T bei Variation von c_P bzw. c_R im statischen Szenario.

IV. Flexibilitätsgewinne durch kombinierte Nutzung von Nachproduktion und Aufarbeitung

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Flexibilitätswirkungen der Einzelstrategien unter Nutzung des Abschlussloses sowie nur einer der beiden zusätzlichen Optionen Nachproduktion ($AL+NP$) und Aufarbeitung ($AL+AU$) diskutiert wurden, soll nun der Frage nachgegangen werden, welcher Flexibilitätsgewinn durch die gemeinsame Nutzung beider Versorgungsoptionen ($AL+NP+AU$) zu erzielen ist. Hierzu sind in Abbildung 8 die relativen Einsparungen der Einzelstrategien und der kombinierten Strategie in Abhängigkeit der Aufarbeitungsstückkosten (bei konstanten Nachproduktionskosten in Höhe von $c_P = 20$) sowie der Nachproduktionsstückkosten (bei konstanten Aufarbeitungskosten von $c_R = 10$) dargestellt.

Analysiert man den Kostenverlauf bei variierenden Aufarbeitungskosten c_R in Abbildung 8 (links), so zeigt sich bei Nachproduktion (aufgrund der festen Stückkosten c_P) ein konstanter Verlauf, während die Flexibilitätsgewinne bei Aufarbeitung und bei kombinierter Nutzung beider Optionen mit steigenden Aufarbeitungskosten erwartungsgemäß fallen. Bei hohen Kosten der Aufarbeitung nähern sich die Kurven der Einzelstrategien einander an, wobei bei geringer Verfügbarkeit von Altprodukten im Rahmen einer niedrigen Rückflussquote auch ein Unterschreiten des Flexibilitätsgewinnes der Nachproduktion durch denjenigen der Aufarbeitung möglich ist (hier jedoch nicht dargestellt).

Der Zusatznutzen der kombinierten Nutzung beider Optionen ist im vorliegenden Fall bei einer großen Differenz zwischen Nachproduktions- und Aufarbeitungskosten am höchsten (nämlich 3% für $c_R = 10$), da bei den zugehörigen niedrigen Kosten der Aufar-

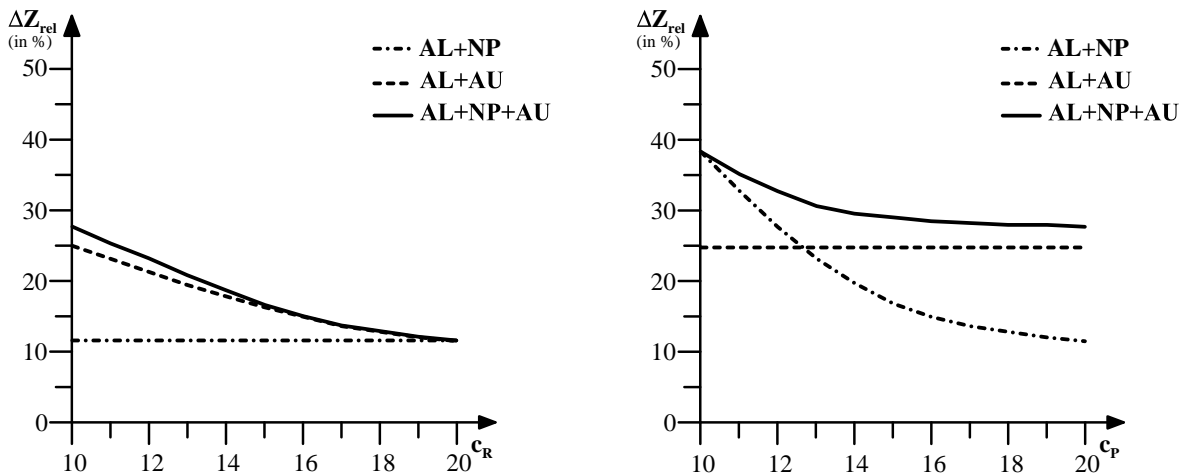


Abb. 8: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei $c_P = 20$ und Variation von c_R (links) bzw. bei $c_R = 10$ und Variation von c_P (rechts) im dynamischen Szenario.

beitung die Rückflussbeschränkung am ehesten greift und die hohe Mengenflexibilität der Nachproduktion zum Tragen kommt. Wird diese Flexibilität allerdings durch die Vorgabe einer Mindestlosgröße eingeschränkt, so ist damit unmittelbar eine Verringerung des Zusatzvorteils einer kombinierten Strategie $AL+NP+AU$ verbunden, die z.B. bei einer Mindestproduktionsmenge in Höhe des Doppelten der Periodennachfrage schon ca. 50% beträgt (vgl. Tabelle 14 in Anhang III.).

In Abbildung 8 (rechts) ist das Ergebnis einer entsprechenden Analyse für den Fall variierender Nachproduktionsstückkosten c_P dargestellt. Hier bleibt die Erfolgswirkung einer Einzelstrategie mit Aufarbeitung ($AL+AU$) konstant, während der Erfolgsbeitrag bei Nachproduktionsstrategie $AL+NP$ mit steigenden Stückkosten c_P sinkt und dabei für niedrige Kosten ($c_P < 13$ höher und für hohe Kosten $c_P \geq 13$ niedriger als bei isolierter Aufarbeitungsstrategie ist. Bei kombinierter Strategie $AL+NP+AU$ ergibt sich ein Zusatzvorteil gegenüber der besten Einzelstrategie, der bei kleiner Differenz zwischen Aufarbeitungs- und Nachproduktionskosten wiederum sehr gering ist. Seinen höchsten Wert nimmt der Zusatzvorteil bei der Höhe der Nachproduktionskosten an, bei der beide Einzelstrategien dieselbe Vorteilhaftigkeit aufweisen. In diesem Fall ist im Zusammenhang mit dem niedrigen Kostenniveau von Aufarbeitung und Nachproduktion das Abschlusslos relativ klein, so dass beide Versorgungsoptionen eine wichtige Rolle spielen und für die Gesamteffektivität der Flexibilitätsnutzung von Bedeutung sind. Mit größer werdender Stückkostendifferenz zwischen Nachproduktion und Aufarbeitung bei steigendem c_P -Wert nimmt der Zusatznutzen bei kombinierter Strategie $AL+NP+AU$ allerdings wieder ab, weil die höhere Flexibilität der Nachproduktion aus Kostengründen immer weniger zum Einsatz kommt.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Zusatzgewinn, der aus einem kombinierten Einsatz von Nachproduktion und Teileaufarbeitung aufgrund der gemeinsamen Nutzung von Flexibilitätpotenzialen erzielt werden kann, vergleichsweise beschränkt ist. Eine Ausnahme bilden Situationen, in denen sich im Zusammenhang mit einer niedrigen Abschlusslosbildung und einem mäßigen Kostenvorsprung der Aufarbeitung beide Zusatzoptionen sehr gut ergänzen.

E. Schlussbetrachtung

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, inwieweit sich verschiedene Strategien zur Ersatzteilversorgung nach Ablauf der Serienproduktion, die über die alleinige Teilebeschaffung durch Produktion eines Abschlussloses hinausgehen, in Bezug auf ihre Flexibilitätseigenschaften unterscheiden. Dabei wurde zwischen Mengen-, Zeit- und Bestands-

flexibilität unterschieden und herausgearbeitet, welchen Beitrag die einzelnen Flexibilitätskomponenten zum Erfolg der jeweiligen Strategie leisten.

Es zeigt sich hierbei, dass die Versorgungsoption der Nachproduktion aufgrund ihrer besonders hohen Flexibilität auch das größte Erfolgspotenzial besitzt, sofern diese Flexibilität nicht durch die Vorgabe von Mindestproduktionsmengen deutlich eingeschränkt wird. Dagegen erscheint die Option der Altteileaufarbeitung im Zusammenhang mit ihrer eingeschränkten Mengenflexibilität generell weniger attraktiv. Aufgrund niedrigerer Stückkosten kann die Aufarbeitung allerdings der Nachproduktion trotz geringerer Flexibilität im Endeffekt überlegen sein. Hierbei ist aber zu beachten, dass die Aufarbeitungsoption mit der Möglichkeit zur Lagerung der zurückfließenden Altteile verbunden sein sollte, weil eine mangelnde Bestandsflexibilität dieser Option deren Effektivität wiederum beeinträchtigen kann. Im Übrigen hängt die Vorteilhaftigkeit der Aufarbeitung vorrangig von dem durch die Höhe der Rückflussquote geprägten Ausmaß an Mengenflexibilität ab.

Sowohl Nachproduktion als auch Aufarbeitung verlieren jeweils mit zunehmenden Stückkosten an Vorteilhaftigkeit, bleiben aber auch bei hohen Kostendifferenzen im Vergleich zur Serienproduktion immer noch sinnvolle Ergänzungen zur Ersatzteilversorgung in Form der Produktion eines Abschlussloses. Eine kombinierte Nutzung beider Optionen erhöht das Flexibilitätspotenzial vielfach nur noch recht beschränkt und lässt in den meisten Fällen nur einen vergleichsweise geringfügigen zusätzlichen Erfolgsbeitrag erwarten. Nähere Untersuchungen zeigen, dass der Flexibilitätserfolg der einzelnen Versorgungsstrategien außer durch ihre spezifischen Beschaffungskosten insbesondere durch die Höhe der Lagerkosten sowie durch das Ausmaß der Nachfragestreuung, weniger dagegen durch die Streuung der Altproduktrückflüsse beeinflusst wird. Interessanterweise scheint die Dynamik der Nachfrage- und Rückflussprozesse für die qualitativen - und in weiten Bereichen auch für die quantitativen - Ergebnisse der Flexibilitätsanalyse nur eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Eine genauere Analyse des Einflusses unterschiedlich strukturierter zeitlicher Prozesse von Ersatzteilmachfrage und Altproduktrückflüssen bleibt weitergehenden Untersuchungen vorbehalten. Ebenso besteht ein interessantes Untersuchungsfeld auch darin, den Einfluss einer zunehmenden Prognoseunsicherheit mit wachsendem Zeithorizont in die Flexibilitätsanalyse einzubeziehen. In diesem Zusammenhang könnte auch untersucht werden, wie sich eine im Zeitablauf ergebende Verbesserung des Informationsstands über zukünftige Nachfragen und Rückflüsse auf den Flexibilitätserfolg einzelner Strategien auswirken. Schließlich wäre es auch eine lohnende Forschungsaufgabe, die hier vorgenommene Untersuchung auf weitere Optionen der Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase, wie

sie in Abschnitt B. angesprochen wurden, auszudehnen.

Anmerkungen

¹Vgl. Jacob (1974); Schneeweiß/Kühn (1990); Schneeweiß (1996).

²Vgl. z.B. für den produktionswirtschaftlichen Bereich Schneeweiß (1996).

³Die hier beschriebenen Rahmenbedingungen und Grundannahmen bezüglich der Kostensituation findet man z.B. häufig bei der Ersatzteilversorgung in der Automobilindustrie.

⁴Praktikable Vorgehensweisen zur Ermittlung dieser Verteilungen finden sich z.B. in Teunter/Fortuin (1998) und Marx-Gómez et al. (2002).

⁵Hier können heuristische Lösungskonzepte zum Einsatz kommen, wie sie z.B. in Kleber/Inderfurth (2007) oder in Inderfurth/Mukherjee (2008) entwickelt wurden.

⁶Entsprechende Zahlenergebnisse können den Tabellen 8 und 9 im Anhang entnommen werden.

⁷Vgl. Tabellen 8 und 9 im Anhang.

Literatur

Cattani, K. D./Souza, G. C. (2003): Good buy? Delaying end-of-life purchases, in: *European Journal of Operational Research*, 146, S. 216–228.

Eberhardt, S. (2002): Ersatzteillistik, in: Arnold, D./Isermann, H./Kuhn, A./Tempelmeier, H. (Hrsg.), *Handbuch Logistik*, S. B7–10–B7–16, 2. Aufl., Springer, Berlin.

Fortuin, L. (1980): The All-Time Requirement of Spare Parts for Service After Sales – Theoretical Analysis and Practical Results, in: *International Journal of Operations & Production Management*, 1(1), S. 59–70.

Gerwin, D. (1993): Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective, in: *Management Science*, 39, S. 395–410.

Hesselbach, J./Mansour, M./Graf, R. (2002): Reuse of components for the spare parts management in the automotive electronics industry after end-of-production, 9th CIRP International Seminar, Erlangen, Germany.

Inderfurth, K. (1997): Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with leadtimes, in: *OR Spektrum*, 19, S. 111–112.

- Inderfurth, K./Mukherjee, K. (2008): Decision Support for Spare Parts Acquisition in Post Product Life Cycle, in: Central European Journal of Operations Research, 16, S. 17–42.
- Jacob, H. (1974): Unsicherheit und Flexibilität - Zur Theorie der Planung bei Unsicherheit, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 44(5), S. 299–326.
- Kennedy, W. J./Patterson, J. W./Fredendall, L. D. (2002): An overview of recent literature on spare parts inventories, in: International Journal of Production Economics, 76, S. 201–215.
- Kleber, R./Inderfurth, K. (2007): Heuristic Approach for Inventory Control of Spare Parts after End-of-Production, in: Otto, A./Obermaier, R. (Hrsg.), Logistikmanagement - Analyse, Bewertung und Gestaltung logistischer Systeme, S. 185–200, DUV, Wiesbaden.
- Marx-Gómez, J./Rautenstrauch, C./Nürnberger, A./Kruse, R. (2002): Neuro-fuzzy approach to forecast returns of scrapped products to recycling and remanufacturing, in: Knowledge-Based Systems, 15, S. 119–128.
- Meffert, H. (1985): Größere Flexibilität als Unternehmenskonzept, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 37, S. 121–137.
- Recknagel, S. E. A. (2007): Differenzierte Beschaffungsstrategien für Ersatzteile in der Hausgerätebranche, in: Barkawi, K./Baader, A./Montanus, S. (Hrsg.), Erfolgreich mit After Sales Service, S. 271–276, Springer, Berlin.
- Schneeweiß, C. (1996): Flexibilität, Elastizität und Reagibilität, in: Kern, W./Schröder, H./Weber, J. (Hrsg.), Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, S. 489–501, 2. Aufl., Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- Schneeweiß, C./Kühn, M. (1990): Zur Definition und gegenseitigen Abgrenzung der Begriffe Flexibilität, Elastizität und Robustheit, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 42(5), S. 378–395.
- Schröter, M. (2006): Strategisches Ersatzteilmanagement in Closed-Loop Supply Chains, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden.
- Spengler, T./Schröter, M. (2003): Strategic management of spare parts in closed-loop supply chains - a System Dynamics approach, in: Interfaces, 6, S. 7–17.

Teunter, R. H./Fortuin, L. (1998): End-of-life-service: A case study, in: European Journal of Operational Research, 107, S. 19–34.

Teunter, R. H./Fortuin, L. (1999): End-of-life-service, in: International Journal of Production Economics, 59, S. 487–497.

Toffel, M. W. (2003): The Growing Strategic Importance of End-of-Life Product Management, in: California Management Review, 45(3), S. 102–129.

VDA (2007): Jahresbericht 2007 des Verbands der Automobilhersteller, Frankfurt am Main.

Modellgestützte Flexibilitätsanalyse von Strategien zur Ersatzteilversorgung in der Nachserienphase

Zusammenfassung. Das Ersatzteilgeschäft stellt einen sehr profitablen Geschäftsbereich für Hersteller langlebiger Industrie- und Konsumgüter dar. Aufgrund steigender Teilezahlen und des langen Zeithorizonts, in welchem die Verfügbarkeit von Ersatzteilen sichergestellt sein muss, kommt einem effizienten Bestandsmanagement eine hohe Bedeutung zu. Die schwierige Prognostizierbarkeit und zeitliche Dynamik der Nachfrageentwicklung nach Ersatzteilen erfordern ein hohes Maß an Flexibilität, welche insbesondere nach Abschluss der Serienproduktion des Primärprodukts nur noch eingeschränkt vorhanden ist. Die in diesem Falle traditionell genutzte Option der Produktion auf Lager im Rahmen eines sogenannten Abschlussloses besitzt keinerlei Flexibilität im Sinne einer späteren Anpassbarkeit und trägt somit ein hohes Risiko sowohl in Bezug auf eine Überbevorratung als auch im Hinblick auf das Auftreten von Fehlbeständen in sich. Ein höheres Flexibilitätspotential lässt sich gewinnen, indem man - allerdings zu höheren Kosten - eine Nachproduktion von Ersatzteilen in kleinen Mengen oder die Aufarbeitung von Teilen aus zurückgenommenen Altprodukten als zusätzliche Beschaffungsoption nutzt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Flexibilitätseigenschaften von Strategien, bestehend aus Kombinationen der genannten Optionen, anhand eines mathematischen Planungsmodells untersucht. Dabei wird zwischen Mengen-, Zeit- und Bestandsflexibilität unterschieden. Im Rahmen einer umfassenden numerischen Untersuchung wird herausgearbeitet, welchen Erfolgsbeitrag die Flexibilitätseigenschaften der einzelnen Strategien generieren können.

On the Flexibility of Strategies for Spare Parts Inventory Control after End-of-Production

Summary. An important task in after sales service is the provision of spare parts for durables. Due to its nature and dependence on earlier sales, the demand for spare parts is inherently dynamic and uncertain requiring for high procurement flexibility. During the product life cycle, inventory management of spare parts is performed efficiently under use of flexibility provided by existing production facilities. This situation completely changes once the OEM ceases production of the parent product. A prime option of procuring spare parts for the End-of-production period is to place a final order for parts when regular production ends. Besides low unit production costs, this option does not contain any flexibility, yielding a high risk of obsolescence of stored parts, and at the same time a high risk of not being able to satisfy all demand during the service period. In order to increase flexibility further options like extra production at higher unit cost or remanufacturing of components taken from used products could be used. After introducing the problem and a basic quantitative model, we evaluate flexibility properties of strategies using different combinations of the above options. In doing so we distinguish between quantity, time, and stock related flexibility. In a comprehensive numerical study it is investigated to which extent flexibility properties of the different strategies can contribute to their economic profitability.

A Anhang

I. Ergebnisdaten zu Abschnitt D. II.

Tab. 4: Größe des Abschlussloses (y), erwartete Gesamtkosten (Z) und relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Variation von c_P bzw. c_R im dynamischen Szenario.

c_P, c_R	AL		$AL+NP$			$AL+AU$		
	y	Z	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}
10	76	1216	4	751	38,2	49	915	24,8
11	76	1216	5	819	32,7	50	938	22,9
12	76	1216	13	881	27,6	50	959	21,1
13	76	1216	22	935	23,1	51	981	19,4
14	76	1216	32	979	19,5	52	1001	17,7
15	76	1216	43	1013	16,7	53	1021	16,1
16	76	1216	52	1038	14,7	55	1039	14,6
17	76	1216	59	1053	13,4	60	1054	13,4
18	76	1216	63	1064	12,5	63	1064	12,5
19	76	1216	65	1072	11,8	65	1072	11,8
20	76	1216	66	1079	11,3	66	1079	11,3

Tab. 5: Größe des Abschlussloses (y), erwartete Gesamtkosten (Z) und relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Variation von c_P bzw. c_R im statischen Szenario.

c_P, c_R	AL		$AL+NP$			$AL+AU$		
	y	Z	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}
10	75	1243	8	770	38	46	927	25,5
11	75	1243	10	835	32,8	47	953	23,4
12	75	1243	17	894	28,1	47	979	21,3
13	75	1243	23	946	23,9	48	1004	19,2
14	75	1243	29	993	20,1	48	1029	17,2
15	75	1243	35	1034	16,9	49	1053	15,3
16	75	1243	41	1068	14,1	50	1077	13,4
17	75	1243	47	1097	11,8	51	1100	11,6
18	75	1243	53	1120	9,9	54	1120	9,9
19	75	1243	59	1136	8,6	59	1136	8,6
20	75	1243	64	1148	7,7	64	1148	7,7

Tab. 6: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Nachproduktion und Aufarbeitung unter Berücksichtigung von optionsspezifischen Einschränkungen im dynamischen Szenario.

c_P, c_R	$AL+NP$			$AL+AU$	
	$p^{\min} = 0$	$p^{\min} = 12$	$p^{\min} = 24$	mit Bestandshaltung	ohne Bestandshaltung
10	38,2	32,1	25,9	24,8	21,0
11	32,7	26,4	21,1	22,9	19,2
12	27,6	21,5	16,4	21,1	17,5
13	23,1	17,1	12,3	19,4	16,1
14	19,5	13,5	9,2	17,7	14,8
15	16,7	10,7	6,9	16,1	13,7
16	14,7	8,6	4,6	14,6	12,9
17	13,4	7,2	2,4	13,4	12,2
18	12,5	5,9	1,1	12,5	11,5
19	11,8	4,7	0,9	11,8	11,0
20	11,3	3,5	0,8	11,3	10,5

Tab. 7: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Nachproduktion und Aufarbeitung unter Berücksichtigung von optionsspezifischen Einschränkungen im statischen Szenario.

c_P, c_R	$AL+NP$			$AL+AU$	
	$p^{\min} = 0$	$p^{\min} = 12$	$p^{\min} = 24$	mit Bestandshaltung	ohne Bestandshaltung
10	38,0	33,2	26,6	25,5	17,7
11	32,8	28,1	22,5	23,4	15,7
12	28,1	23,6	18,4	21,3	13,9
13	23,9	19,4	14,4	19,2	12,3
14	20,1	16,0	11,1	17,2	10,9
15	16,9	12,8	8,9	15,3	9,8
16	14,1	10,3	6,7	13,4	8,9
17	11,8	8,1	4,6	11,6	8,1
18	9,9	6,4	2,5	9,9	7,5
19	8,6	5,1	0,4	8,6	7,0
20	7,7	3,9	0,3	7,7	6,5

II. Ergebnisdaten zu Abschnitt D. III.

Tab. 8: Größe des Abschlussloses (y), erwartete Gesamtkosten (Z) und relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) aller Strategien im Vergleich zur ausschließlichen Nutzung des Abschlussloses im dynamischen Szenario.

geänderter Parameter	AL		$AL+NP$			$AL+NP+AU$			$AL+AU$		
	y	Z	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}
Basisfall	76	1216	63	1064	12,5	44	990	18,6	52	1001	17,7
c_R											
12	76	1216	63	1064	12,5	42	934	23,2	50	959	21,1
16	76	1216	63	1064	12,5	52	1038	14,7	55	1039	14,6
c_P											
16	76	1216	52	1038	14,7	42	987	18,8	52	1001	17,7
20	76	1216	66	1079	11,3	46	991	18,5	52	1001	17,7
h											
0,5	77	1015	68	919	9,5	63	894	11,9	63	894	11,9
2	75	1605	32	1231	23,3	31	1109	30,9	49	1181	26,4
v											
10	76	1211	63	1062	12,3	44	987	18,5	51	998	17,6
40	77	1224	63	1065	12,9	45	992	18,9	53	1004	17,9
s											
50	75	1186	63	1064	10,3	44	989	16,5	51	999	15,7
200	78	1247	63	1065	14,6	44	990	20,6	53	1004	19,5
ρ_R											
0,15	76	1216	63	1064	12,5	44	989	18,7	50	998	18,0
0,45	76	1216	63	1064	12,5	45	991	18,5	54	1006	17,3
ρ_D											
0,1	74	1139	65	1057	7,3	43	977	14,2	48	985	13,5
0,4	81	1376	59	1100	20,1	48	1028	25,3	59	1056	23,2
$(\rho_R; \rho_D)$											
(0,15;0,1)	74	1139	65	1057	7,3	42	976	14,4	46	980	14,0
(0,45;0,4)	81	1376	59	1100	20,1	48	1029	25,2	60	1062	22,8

Hinweise: In jeder Zeile wurden nur die in der ersten Spalte angegebenen Parameter geändert.

Tab. 9: Größe des Abschlussloses (y), erwartete Gesamtkosten (Z) und relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) aller Strategien im Vergleich zur ausschließlichen Nutzung des Abschlussloses im statischen Szenario.

geänderter Parameter	AL		$AL+NP$			$AL+NP+AU$			$AL+AU$		
	y	Z	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}
Basisfall	75	1243	53	1120	9,9	40	1011	18,7	48	1029	17,2
c_R											
12	75	1243	53	1120	9,9	39	948	23,7	47	979	21,3
16	75	1243	53	1120	9,9	44	1070	13,9	50	1077	13,4
c_P											
16	75	1243	41	1068	14,1	38	1006	19,1	48	1029	17,2
20	75	1243	64	1148	7,7	42	1014	18,5	48	1029	17,2
h											
0,5	76	1022	69	962	5,8	54	932	8,8	55	932	8,8
2	74	1671	29	1240	25,8	29	1109	33,6	45	1197	28,4
v											
10	75	1243	53	1119	10,0	40	1010	18,8	48	1028	17,3
40	75	1244	54	1121	9,9	41	1013	18,6	48	1031	17,1
s											
50	73	1203	53	1112	7,6	40	1004	16,6	46	1017	15,5
200	77	1277	53	1130	11,5	41	1019	20,2	50	1041	18,5
ρ_R											
0,15	75	1243	53	1120	9,9	40	1010	18,8	47	1024	17,6
0,45	75	1243	53	1120	9,9	41	1012	18,6	50	1036	16,7
ρ_D											
0,1	74	1184	52	1103	6,8	40	989	16,4	46	1002	15,3
0,4	79	1368	55	1164	14,9	42	1063	22,3	54	1096	19,9
$(\rho_R; \rho_D)$											
(0,15; 0,1)	74	1184	52	1103	6,8	40	988	16,6	44	996	15,9
(0,45; 0,4)	79	1368	55	1164	14,9	42	1064	22,2	55	1101	19,5
μ_t^R											
0	75	1243	53	1120	9,9	53	1120	9,9	75	1243	0,0
1	75	1243	53	1120	9,9	53	1076	13,5	67	1124	9,6
2	75	1243	53	1120	9,9	48	1037	16,6	57	1068	14,1
4	75	1243	53	1120	9,9	34	997	19,8	40	1006	19,1
5	75	1243	53	1120	9,9	30	993	20,1	33	995	19,9
6	75	1243	53	1120	9,9	29	993	20,1	30	993	20,1

Hinweise: In jeder Zeile wurden nur die in der ersten Spalte angegebenen Parameter geändert.

Tab. 10: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Nachproduktion ($AL+NP$) für unterschiedliche Höhen von Nachfragesteuerung ρ_D bzw. Lagerkostensatz h und unterschiedliche c_P im dynamischen Szenario.

c_P	Basis	Nachfragesteuerung		Lagerkostensatz	
	$\rho_D=0,2 / h=1$	$\rho_D=0$	$\rho_D=0,4$	$h=0,5$	$h=2$
10	38,2	32,3	42,4	27,3	51,9
11	32,7	25,8	37,5	20,9	47,6
12	27,6	19,8	33,2	16,1	43,4
13	23,1	14,5	29,4	13,2	39,5
14	19,5	10,0	26,4	11,9	35,7
15	16,7	6,4	24,1	11,1	32,2
16	14,7	3,8	22,4	10,5	28,9
17	13,4	2,0	21,1	9,9	26,0
18	12,5	0,9	20,1	9,5	23,3
19	11,8	0,4	19,2	9,0	21,0
20	11,3	0,1	18,3	8,7	19,0

Tab. 11: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Nachproduktion ($AL+NP$) für unterschiedliche Höhen von Nachfragesteuerung ρ_D , Lagerkostensatz h sowie Dauer des Servicezeitraumes T und unterschiedliche c_P im statischen Szenario.

c_P	Basis: $\rho_D=0,2 /$	Nachfragesteuerung		Lagerkostensatz		Servicezeitraum	
	$h=1/T=12$	$\rho_D=0$	$\rho_D=0,4$	$h=0,5$	$h=2$	$T=8$	$T=16$
10	38,0	35,5	40,1	25,8	52,5	29,6	44,6
11	32,8	29,6	35,4	19,8	48,6	24,1	39,8
12	28,1	24,2	31,1	15,0	44,7	19,4	35,3
13	23,9	19,4	27,3	11,3	41,2	15,5	31,1
14	20,1	15,1	23,9	8,8	37,7	12,5	27,3
15	16,9	11,3	21,0	7,5	34,5	10,2	23,8
16	14,1	8,1	18,5	6,8	31,4	8,8	20,6
17	11,8	5,4	16,5	6,3	28,5	7,9	17,7
18	9,9	3,2	14,9	5,8	25,8	7,2	15,2
19	8,6	1,6	13,7	5,5	23,2	6,7	13,0
20	7,7	0,5	12,7	5,1	20,9	6,3	11,1

Tab. 12: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Aufarbeitung ($AL+AU$) für unterschiedliche Höhen von Nachfragesteuerung ρ_D bzw. Lagerkostensatz h und unterschiedliche c_R im dynamischen Szenario.

c_R	Basis	Nachfragesteuerung		Lagerkostensatz	
	$\rho_D=0,2 / h=1$	$\rho_D=0$	$\rho_D=0,4$	$h=0,5$	$h=2$
10	24,8	18,3	27,6	18,8	32,3
11	22,9	15,8	26,5	16,8	30,8
12	21,1	13,3	25,3	14,9	29,4
13	19,4	10,8	24,3	13,2	27,9
14	17,7	8,4	23,2	11,9	26,4
15	16,1	6,0	22,2	11,1	25,0
16	14,6	3,8	21,3	10,5	23,6
17	13,4	2,0	20,4	9,9	22,2
18	12,5	0,9	19,6	9,5	20,8
19	11,8	0,4	18,8	9,0	19,5
20	11,3	0,1	18,1	8,7	18,2

Tab. 13: Relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei Aufarbeitung ($AL+AU$) für unterschiedliche Höhen von Nachfragesteuerung ρ_D , Lagerkostensatz h , Dauer des Servicezeitraumes T bzw. Rückflussquote q_R und unterschiedliche c_R im statischen Szenario.

c_R	Basis: $\rho_D=0,2/h=1/$ $T=12/q_R=46\%$	Nachfragesteuerung		Lagerkostensatz		Servicezeitraum		Rückflussquote	
		$\rho_D=0$	$\rho_D=0,4$	$h=0,5$	$h=2$	$T=8$	$T=16$	$q_R=15\%$	$q_R=76\%$
10	25,5	22,4	26,3	17,8	35,0	19,4	30,3	11,6	33,6
11	23,4	19,9	24,7	15,3	33,3	17,4	28,2	11,1	30,1
12	21,3	17,4	23,0	13,0	31,7	15,4	26,2	10,6	26,6
13	19,2	14,9	21,4	10,8	30,0	13,5	24,2	10,0	23,2
14	17,2	12,4	19,9	8,8	28,4	11,7	22,2	9,6	19,9
15	15,3	10,0	18,5	7,5	26,7	10,1	20,3	9,1	16,8
16	13,4	7,6	17,1	6,8	25,1	8,8	18,3	8,6	14,1
17	11,6	5,4	15,8	6,3	23,5	7,9	16,4	8,2	11,8
18	9,9	3,2	14,6	5,8	21,9	7,2	14,6	7,7	9,9
19	8,6	1,6	13,6	5,5	20,4	6,7	12,8	7,3	8,6
20	7,7	0,5	12,6	5,1	18,9	6,3	11,1	6,9	7,7

III. Ergebnisdaten zu Abschnitt D. IV.

Tab. 14: Größe des Abschlussloses (y), erwartete Gesamtkosten (Z) und relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei $c_P = 20$ und Variation von c_R im dynamischen Szenario.

		AL		$AL+NP (p^{\min}=0)$			$AL+NP (p^{\min}=12)$			
		y	Z	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}	
		76	1216	66	1079	11,3	73	1174	3,5	
c_R		$AL+AU$			$AL+NP+AU (p^{\min}=0)$			$AL+NP+AU (p^{\min}=12)$		
	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}	
10	49	915	24,8	41	881	27,6	46	900	26,0	
11	50	938	22,9	42	909	25,2	46	925	23,9	
12	50	959	21,1	43	937	22,9	47	950	21,9	
13	51	981	19,4	44	965	20,7	48	974	19,9	
14	52	1001	17,7	46	991	18,5	49	997	18,1	
15	53	1021	16,1	48	1016	16,5	51	1019	16,3	
16	55	1039	14,6	53	1038	14,7	54	1038	14,6	
17	60	1054	13,4	59	1053	13,4	60	1054	13,4	
18	63	1064	12,5	63	1064	12,5	63	1064	12,5	
19	65	1072	11,8	65	1072	11,8	65	1072	11,8	
20	66	1079	11,3	66	1079	11,3	66	1079	11,3	

Tab. 15: Größe des Abschlussloses (y), erwartete Gesamtkosten (Z) und relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei $c_P = 20$ und Variation von c_R im statischen Szenario.

		AL		$AL+NP (p^{\min}=0)$			$AL+NP (p^{\min}=12)$			
		y	Z	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}	
		10	75	1243	64	1148	7,7	59	1195	3,9
c_R		$AL+AU$			$AL+NP+AU (p^{\min}=0)$			$AL+NP+AU (p^{\min}=12)$		
	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}	y	Z	ΔZ_{rel}	
10	46	927	25,5	39	891	28,3	44	914	26,5	
11	47	953	23,4	40	922	25,8	44	942	24,2	
12	47	979	21,3	40	953	23,3	44	970	22,0	
13	48	1004	19,2	41	984	20,9	45	997	19,8	
14	48	1029	17,2	42	1014	18,5	46	1023	17,7	
15	49	1053	15,3	43	1043	16,1	47	1050	15,6	
16	50	1077	13,4	45	1071	13,8	48	1075	13,6	
17	51	1100	11,6	48	1097	11,7	50	1099	11,6	
18	54	1120	9,9	53	1120	9,9	54	1120	9,9	
19	59	1136	8,6	59	1136	8,6	59	1136	8,6	
20	64	1148	7,7	64	1148	7,7	64	1148	7,7	

Tab. 16: Größe des Abschlussloses (y), erwartete Gesamtkosten (Z) und relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei $c_R = 10$ und Variation von c_P im dynamischen Szenario.

		<i>AL</i>		<i>AL+AU</i>								
		<i>y</i>	<i>Z</i>	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}						
		76	1216	49	915	24,8						
c_P	<i>AL+NP</i> ($p^{\min}=0$)			<i>AL+NP</i> ($p^{\min}=12$)			<i>AL+NP+AU</i> ($p^{\min}=0$)			<i>AL+NP+AU</i> ($p^{\min}=12$)		
	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}
10	4	751	38,2	4	826	32,1	4	751	38,2	4	762	37,4
11	5	819	32,7	10	895	26,4	5	789	35,1	9	803	34,0
12	13	881	27,6	17	955	21,5	13	820	32,6	17	837	31,2
13	22	935	23,1	27	1008	17,1	22	844	30,6	25	864	29,0
14	32	979	19,5	37	1053	13,5	31	857	29,5	32	881	27,6
15	43	1013	16,7	47	1086	10,7	36	865	28,9	41	889	26,9
16	52	1038	14,7	56	1111	8,6	38	870	28,5	43	893	26,6
17	59	1053	13,4	58	1129	7,2	39	873	28,2	44	895	26,4
18	63	1064	12,5	59	1144	5,9	40	876	28,0	45	897	26,2
19	65	1072	11,8	59	1160	4,7	41	879	27,8	45	899	26,1
20	66	1079	11,3	73	1174	3,5	41	881	27,6	46	900	26,0

Tab. 17: Größe des Abschlussloses (y), erwartete Gesamtkosten (Z) und relative Ersparnis ΔZ_{rel} (in %) bei $c_R = 10$ und Variation von c_P im statischen Szenario.

		<i>AL</i>		<i>AL+AU</i>								
		<i>y</i>	<i>Z</i>	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}						
		75	1243	46	927	25,5						
c_P	<i>AL+NP</i> ($p^{\min}=0$)			<i>AL+NP</i> ($p^{\min}=12$)			<i>AL+NP+AU</i> ($p^{\min}=0$)			<i>AL+NP+AU</i> ($p^{\min}=12$)		
	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}	<i>y</i>	<i>Z</i>	ΔZ_{rel}
10	8	770	38,0	8	830	33,2	8	770	38,0	8	788	36,7
11	10	835	32,8	14	894	28,1	10	802	35,5	14	823	33,8
12	17	894	28,1	21	950	23,6	17	828	33,4	20	851	31,5
13	23	946	23,9	26	1002	19,4	23	847	31,8	27	874	29,7
14	29	993	20,1	34	1045	16,0	29	861	30,7	31	889	28,5
15	35	1034	16,9	37	1084	12,8	33	870	30,0	38	901	27,5
16	41	1068	14,1	46	1115	10,3	35	877	29,5	41	905	27,2
17	47	1097	11,8	48	1143	8,1	37	881	29,1	42	908	27,0
18	53	1120	9,9	58	1164	6,4	38	885	28,8	43	911	26,8
19	59	1136	8,6	59	1180	5,1	39	888	28,6	43	912	26,6
20	64	1148	7,7	59	1195	3,9	39	891	28,3	44	914	26,5