

Working Paper

Über die Anwendung kohärenter Risikomaße in der Austaktungs- planung flexibler Montagelinien bei hoher Variantenvielfalt

Johannes Sternatz

1/2013

**Working Papers
in Supply Chain Management
Friedrich-Schiller-University of Jena**

Prof. Dr. Nils Boysen

Chair of Operations Management
School of Business and Economics
Friedrich-Schiller-University Jena
Carl-Zeiß-Str. 3, D-07743 Jena
Phone ++49 (0)3641 943100
e-Mail: nils.boysen@uni-jena.de

Prof. Dr. Armin Scholl

Chair of Management Science
School of Business and Economics
Friedrich-Schiller-University Jena
Carl-Zeiß-Str. 3, D-07743 Jena
Phone ++49 (0)3641 943170
e-Mail: armin.scholl@uni-jena.de

Über die Anwendung kohärenter Risikomaße in der Austaktungsplanung flexibler Montagelinien bei hoher Variantenvielfalt

Johannes Sternatz^a

^a Volkswagen AG, PMP-M/E Industrial Engineering , Prozessdesign und Digitale Fabrik
Brieffach 1619, D-38436 Wolfsburg

Zusammenfassung:

In Produktionssystemen von Automobilherstellern werden Produkte auf getakteten Montagelinien endmontiert. Durch den gesteigerten Bedarf an Produktdifferenzierung (Mass Customization) steigt die zu beherrschende Variantenkomplexität bei der Planung von Endmontagelinien kontinuierlich an: Zur Vermeidung von Überlastungen der Mitarbeiter wird im Rahmen der Reihenfolgeplanung die Fahrzeugsequenz so gestaltet, dass Zeitspitzen reduziert bzw. die Zeitbedarfe nivelliert werden. Bei der Zuordnung von Arbeitsgängen zu Arbeitsplätzen bzw. Mitarbeitern im Rahmen der Austaktungsplanung (Fließbandabstimmung, Line Balancing) wird üblicherweise das Reihenfolgeproblem auf geeignete Weise antizipiert. In Forschung und Praxis wurden verschiedene Antizipationsmaße entwickelt, welche durch das Ziel der Gleichverteilung (Glättung) der Arbeitsplatzzeiten über alle Arbeitsplätze (vertikale Maße) und/oder alle aufeinanderfolgenden Takte (horizontale Maße) das Reihenfolgeproblem erleichtern bzw. dessen Einfluss auf die Gesamtlösungsgüte reduzieren sollen.

Dieser Beitrag zeigt auf, dass aufgrund mangelnder Berücksichtigung des Entscheidungskontextes und insbesondere der Stochastik des Planungsproblems, die bisher vorgeschlagenen Antizipationsmaße nicht allgemein empfehlenswert sind, da sie Entscheidungen herbeiführen können, welche nicht mit dem Risikoverständnis der Entscheider vereinbar sind. Die in diesem Beitrag dargestellten, aus den Gegebenheiten der Praxis abgeleiteten Anforderungen an eine kontextadäquate Abbildung der Interdependenz zwischen Austaktungs- und Reihenfolgeproblem führen zu der Erkenntnis, dass nur die durch Artzner et al. (1999) als kohärent eingestuftes Risikomaße die Entscheidungen in der Praxis in Abhängigkeit von der Risikoneigung der Entscheider korrekt widerspiegeln können.

Schlüsselworte:

Produktion, Montagelinie, Variantenfließfertigung, Austaktung, Reihenfolgeplanung, kohärente Risikomaße, Portfolio-Theorie, Expected Shortfall

1 Einleitung

In Produktionssystemen von Automobilherstellern werden variantenreiche Produkte auf getakteten Montagelinien endmontiert. Dem Prinzip der Fließfertigung folgend werden die Montagelinien in Stationen unterteilt, welche durch ein Fließ- oder Hängeband verbunden sind. Die zu fertigenden Produkte fließen kontinuierlich durch die Stationen, in denen - innerhalb der durch die Bandgeschwindigkeit definierten Taktzeit - manuelle oder mechanisierte Tätigkeiten am Produkt verrichtet werden. Dazu werden pro Station ein oder mehrere zueinander parallele Arbeitsplätze eingerichtet, denen jeweils ein Mitarbeiter (Werker) zugeordnet ist.

Durch den gesteigerten Bedarf der Absatzmärkte an Produktdifferenzierung und die daraus entstehende Notwendigkeit trotz einer Massenfertigung kundenindividuelle Aufträge zu erfüllen (Mass Customization) steigt die zu beherrschende Variantenvielfalt bei der Planung von Endmontagelinien, die ursprünglich für die Massenfertigung identischer Produkte konzipiert war, kontinuierlich an: Typischerweise kann bei Volkswagen ein Fahrzeug durch über 170 disjunkte Konfigurationsklassen (Ausstattungen wie z.B. Klimatisierung) mit durchschnittlich je vier Auswahloptionen (Ausstattungsmerkmale wie z.B. einfache Lüftung, manuelle Klimaanlage, Klimaautomatik) je Klasse konfiguriert werden. Dies bedeutet praktisch, dass sich jedes herzustellende Fahrzeug von allen anderen unterscheidet (vgl. die enormen Anzahlen an möglichen Varianten bei verschiedenen Automobilherstellern in Boysen et al. 2008).

Hieraus ergeben sich zwei interdependente Problemstellungen, deren Zusammenhänge und mögliche Kopplungen in diesem Beitrag näher betrachtet werden (vgl. Decker 1993; Scholl 1999, Kap. 3.2+3.4; Domschke et al. 1996; Boysen et al. 2009a):

- Bei der mittelfristigen Austaktungsplanung ist das Austaktungsproblem (Abstimmungs- bzw. Line Balancing-Problem) zu lösen (vgl. Abschnitt 2.1). Die zur Montage der Produkte nötigen Arbeitsgänge (Prozessschritte, engl. Tasks) sind zu Arbeitsplätzen (bzw. Stationen) derart zuzuordnen, dass die Gesamtanzahl an Arbeitsplätzen, und damit der Mitarbeiterbedarf, minimiert wird. Die Austaktungsplanung bestimmt somit in wesentlichem Umfang über die Produktivität des Herstellprozesses.
- Im Rahmen der kurzfristigen Reihenfolgeplanung ist ein Reihenfolgeproblem (Sequenzierungsproblem, engl. mixed-model sequencing problem) zu lösen (vgl. Abschnitt 2.2). Für eine Menge an bekannten Kundenaufträgen (Bestellungen konkret ausgestatteter Fahrzeuge) ist eine Abarbeitungsreihenfolge (Fahrzeugsequenz) zu finden, bei der die ausstattungsabhängig schwankende Belastung der Arbeitsplätze möglichst weitgehend geglättet wird, um Überlastungsspitzen und deren negative Folgen zu vermeiden. Die Reihenfolgeplanung hat folglich die operative Durchführbarkeit des Herstellprozesses zu garantieren.

Ziel dieses Artikels ist es, ein neuartiges Konzept zur Kopplung dieser hochgradig interdependenten, jedoch in der Regel nicht simultan lösbaren Problemstellungen zu entwickeln. Die aus Gegebenheiten in der Praxis abgeleiteten Anforderungen an eine kontextadäquate Kopplung führen zu einer Einbeziehung risikotheorietischer Überlegungen in das Abstimmungsproblem. Hierzu beschreibt Abschnitt 2 die Interdependenzen von Austaktungs- und Reihenfolgeproblem sowie die in der Praxis angewandten Grundsätze guten Taktens zur Beherrschung von Variantenvielfalt. Bisherige Planungsansätze werden in Abschnitt 3 auf Vereinbarkeit mit den Anforderungen der Praxis überprüft. Eine neuartige Einordnung der Austaktungsplanung in den Risikomanagementprozess er-

möglicht die Übertragung der Methodik der kohärenten Risikomessung auf die Austaktungsplanung (Abschnitt 4). Es zeigt sich, dass nur kohärente Risikomaße, nicht aber die bisher in der Literatur vorgeschlagenen Antizipationsmaße, den Entscheidungskontext risikothoretisch korrekt abbilden können. Das in Abschnitt 5 für die Austaktungsplanung entwickelte Risikomaß wird anhand von Praxisdaten in Abschnitt 6 empirisch analysiert und bestätigt. Abschnitt 7 schließt mit einer Zusammenfassung und Hinweisen auf weiteren Forschungsbedarf.

2 Interdependenz von Austaktungs- und Reihenfolgeplanung

2.1 Austaktungsproblem

Bei der Endmontage von Fahrzeugen sind viele verschiedene Arbeitsgänge durchzuführen (mehrere hundert bis einige tausend), die zumindest teilweise von den gewählten Ausstattungen des konkreten Fahrzeugauftrags abhängen. Beim zuvor erwähnten Beispiel der Klimatisierung ist der Einbau einer Klimaautomatik viel aufwändiger als der einer einfachen Lüftung. Bei einigen Arbeitsgängen unterscheiden sich lediglich die Dauern, andere sind nur im Fall der Klimaautomatik auszuführen. Daher sind die Bearbeitungsdauern t_{jp} der Arbeitsgänge j ($j = 1, \dots, n$) abhängig vom konkreten Fahrzeugauftrag p ($p = 1, \dots, P$), der für jede Konfigurationsklasse bzw. Ausstattung eine der möglichen Auswahloptionen (inklusive des Verzichts auf eine optionale Ausstattung) definiert (für die einzuführenden Parameter und Variablen s. Tabelle 1).

Parameter	
J	Menge an Arbeitsgängen (Index j)
P	Menge an Produkten (Fahrzeugaufträgen) im Vertriebsprogramm (Index p)
K	Menge an Arbeitsplätzen (Index k)
c	Taktzeit (maximale Bearbeitungszeit pro Arbeitsplatz; abgeleitet aus der gewünschten Produktionsrate)
t_{jp}	Bearbeitungszeit von Arbeitsgang $j \in J$ für Auftrag $p \in P$ ($t_{jp} = 0$, falls Arbeitsgang j für Fahrzeug p nicht ausgeführt werden muss)
t_j	durchschnittliche Bearbeitungszeit von Arbeitsgang $j \in J$ über alle Aufträge; $t_j = \frac{1}{ P } \cdot \sum_{p \in P} t_{jp}$
Entscheidungsvariablen und abgeleitete Größen	
X_k	Menge, der dem Arbeitsplatz k zugeordneten Arbeitsgänge (auch: station load, Arbeitsplatzbelegung)
τ_{pk}	Arbeitsplatzzeit (zeitlicher Aufwand zur Bearbeitung von Auftrag $p \in P$ am Arbeitsplatz $k \in K$); $\tau_{pk} = \sum_{j \in X_k} t_{jp}$
Δ_{pk}	Taktzeitüberschreitung durch Auftrag $p \in P$ am Arbeitsplatz $k \in K$; $\Delta_{pk} = \max\{0, \tau_{pk} - c\}$
τ_k	durchschnittliche Arbeitsplatzzeit; $\tau_k = \frac{1}{ P } \sum_{p \in P} \tau_{pk}$

Tabelle 1: Verwendete Symbole

Über die Variation der Zuordnung von Arbeitsgängen zu Arbeitsplätzen ist im Rahmen der mittelfristigen, in der Regel wöchentlichen, Austaktungsplanung auf Basis eines gegebenen Vertriebsprogrammes P die *minimale Anzahl an benötigten Mitarbeitern* bzw. Arbeitsplätzen zu bestimmen (Mixed-model Assembly Line Balancing Problem;

MALBP-1; vgl. Domschke et al. 1996; Scholl 1999, Kap. 3.2).¹ Die Zuordnung von Arbeitsgängen zu Arbeitsplätzen wird durch die Belegung X_k abgebildet, welche alle dem Arbeitsplatz k zugeordneten Arbeitsgänge enthält. Dabei muss jeder Arbeitsgang vollständig in genau einem Arbeitsplatz durchgeführt werden. Eine Linienbelegung (auch: *Austaktung*) ergibt sich aus der vollständigen Zuordnung aller Arbeitsgänge zu Arbeitsplätzen. Zwei Linienbelegungen stellen Taktungsalternativen dar, wenn sie sich in der Zuordnung von Arbeitsgängen zu Arbeitsplätzen unterscheiden. Die Ermittlung der optimalen Taktungsalternative erfolgt in MALBP-1 anhand eines *durchschnittlichen Auftrags* (Mischmodell)² mit durchschnittlichen Bearbeitungsdauern t_j (zu deren Bestimmung s. Tabelle 1) der Arbeitsgänge j derart, dass die Taktzeit im Mittel eingehalten werden kann, d.h., die benötigte durchschnittliche Arbeitsplatzzeit τ_k jedes eingerichteten Arbeitsplatzes darf die Taktzeit nicht überschreiten. Dadurch wird garantiert, dass die verfügbare Montagekapazität jedes Arbeitsplatzes insgesamt ausreichend ist.

Die in einem topologisch sortierten Vorranggraphen abgebildeten Reihenfolgebeziehungen (Kriterien technischer Baubarkeit) restringieren die Zuordnung. Bevor ein Arbeitsgang ausgeführt werden kann, müssen alle zugehörigen Vorgängertätigkeiten abgeschlossen sein. Ziel der Austaktungsplanung ist es, die Anzahl an installierten Arbeitsplätzen zu minimieren. Zugleich wird hierdurch die Kenngröße der Gesamtfertigungszeit pro Fahrzeug (kurz *F-Zeit*) minimiert, anhand derer man – vor allem in der Automobilindustrie – die Produktivität einer Montagelinie misst und die operativen Kosten je Fahrzeug bestimmt. Die Fertigungszeit ist folglich eine leicht in Geldbeträge überführbare, metrische Größe.

Durch die Betrachtung des durchschnittlichen Auftrags wird das Mehrprodukt-Austaktungsproblem zu einem Einprodukt-Problem und entspricht – ohne Berücksichtigung von parallelen Arbeitsplätzen oder zusätzlichen Zuordnungsbeschränkungen – dem Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP-1). Aufgrund dessen können zur Lösung des Problems die vorhandenen Verfahren für SALBP-1 eingesetzt werden (vgl. zum Problem und verfügbaren Lösungsverfahren u.a. Baybars 1986, Scholl und Klein 1997, 1999; Scholl 1999, Kap. 4+5; Scholl und Becker 2006). Eine detaillierte Übersicht über eine Vielzahl weiterer Varianten des Austaktungsproblems sowie den Stand der Forschung in diesem Gebiet enthalten Becker und Scholl (2006) sowie Boysen et al. (2007).

2.2 Reihenfolgeproblem

Nach der Bestimmung der benötigten Anzahl an Mitarbeitern (Festlegung der regulären Montagekapazität) und der Zuordnung von Arbeitsinhalten zu Arbeitsplätzen durch die taktische Austaktungsplanung für ein Wochenprogramm wird im Rahmen der, in der Regel schichtgenauen, operativen Reihenfolgeplanung die Abarbeitungsreihenfolge der Kundenaufträge auf Basis der gegebenen Austaktung bestimmt. Da die Arbeitsplatzzeiten τ_{pk} der Fahrzeuge p innerhalb eines Arbeitsplatzes k ausstattungsabhängig schwanken (vgl. Tab. 1), wird versucht, durch geschickte Sequenzierung der Fahrzeugaufträge eine Nivellierung der Arbeitsplatzbelastungen im Zeitablauf herbeizuführen. Zwar kann ein Werker geringfügige Überschreitungen der Taktzeit (s. Fahrzeug 2 in Abb. 1) kompensieren, in dem er die Stationsgrenze (Taktgrenze) kurzzeitig überschreitet und in die

¹ Die durch die Einteilung einer Endmontagelinie in feste Takte entstehenden Arbeitsstationen werden in der Literatur häufig synonym zum Begriff Arbeitsplatz verwendet. Da in der Praxis in einer Station in der Regel mehrere Arbeitsplätze installiert sind, welche parallel am gleichen Fahrzeug, jedoch an verschiedenen Anbauorten, Tätigkeiten ausüben, stellt in diesem Artikel der Arbeitsplatz die kleinste arbeitswirtschaftliche Einheit dar (vgl. dazu auch Becker und Scholl 2009).

² Eine Methode zur Bestimmung des Mischmodells auf der Basis von Absatzprognosen für einzelne Ausstattungsmerkmale bei nicht vorliegenden konkreten Kundenaufträgen beschreiben Boysen et al. (2009c).

nächste Arbeitsstation zur Vollen-
dung seiner Arbeitsgänge „driftet“.
Nähern sich jedoch die Über-
schreitungen einer maximalen
Überlastungsgrenze³, so muss der
Werker durch einen zusätzlichen
Mitarbeiter (Springer) unterstützt
werden (s. Fahrzeug 5 und 6 in
Abb. 1). Eine Überlastung bildet
sich folglich immer dann, wenn in
einem Teilbereich der Sequenz
arbeitszeitintensive Aufträge (z.B.
mehrere Fahrzeuge mit Klimaau-

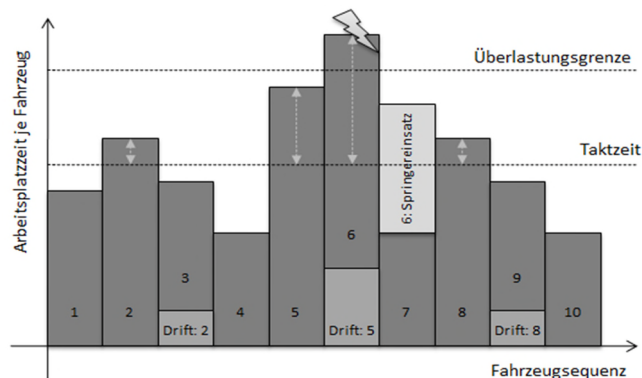


Abbildung 1: Reihenfolgeabhängige Stationsbelastungen

tomatik), deren Bearbeitungszeiten die Taktzeit überschreiten, geblockt auftreten und sich Driftzeiten kumulieren. Driften bedeutet nicht nur, dass der Werker in den räumlichen Bereich der nachfolgenden Station eindringt, sondern vor allem auch, dass die Bearbeitung des nachfolgenden Werkstückes entsprechend verspätet beginnen kann, so dass sich bei hoher Arbeitsplatzzeit folgender Aufträge ständig weiter erhöhende Driftzeiten und -strecken ergeben. Dies führt früher oder später dazu, dass ein nachfolgendes Werkstück nicht mehr bearbeitet werden kann und von einem Springer vollständig oder teilweise übernommen werden muss. Hierbei wird zur Abarbeitung einer Teilsequenz also deutlich mehr Montagezeit verbraucht als im Rahmen der Austaktungsplanung bereitgestellt wurde. Die *Springerzeit* gibt die Einsatzdauer derjenigen flexibel qualifizierten und entsprechend teuren Mitarbeiter (Springer) an, welche kurzfristig zur Überbrückung von Überlastungen in der Sequenz eingesetzt werden, um einen (noch wesentlich teureren) Bandstopp zu vermeiden.

Um den Bedarf an Springereinsätzen oder andere negativen Folgen von Überlastungen zu minimieren, wird im Rahmen des kurzfristigen Reihenfolgeproblems (engl. Mixed-model Sequencing Problem; MSP) eine Sequenz gebildet, bei der Überlastungen möglichst vermieden bzw. gemindert werden. Einen aktuellen Überblick über verschiedene Varianten des MSP und entsprechende Lösungsverfahren geben Boysen et al. (2009b). Typischerweise wird die Summe der Springereinsatzzeiten minimiert (vgl. z.B. Scholl et al. 1998; Cano et al. 2010, Bautista und Cano 2011), jedoch erscheint es aufgrund des hohen Aufwandes zur Durchführung eines Springereinsatzes und der Notwendigkeit, einen ausreichenden Bestand an hoch qualifiziertem Springerpersonal vorzuhalten, sinnvoller die Anzahl an Springereinsätzen zu minimieren, da die reinen, meist sehr kurzen Springereinsatzzeiten den tatsächlichen Aufwand nicht gut abbilden (vgl. Boysen et al. 2011).

2.3 Zusammenhang zwischen beiden Problemen

Zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung stehen prinzipiell alle Kundenaufträge der kommenden Woche fest, so dass eine kapazitätsglättende Verteilung des Wochenprogramms auf die einzelnen Schichten und auch die Reihenfolgebildung für die einzelnen Schichten vorgenommen werden kann. Diese in der Praxis überwiegend erfahrungsgestützt vorgenommene Vorplanung liefert ein vorläufiges Schichtprogramm und eine gewünschte Reihenfolge für jede Schicht, auf deren Grundlage z.B. die Liefertermine für Just-in-Time erfolgende Materialanlieferungen festgelegt werden.

³ Die Überlastungsgrenze des Arbeitsplatzes ist durch die maximale Driftstrecke in angrenzende Stationen definiert, bei der Tätigkeiten anderer Werker im nächsten Takt nicht blockiert werden. Abhängig vom Aufbau der Montagelinie sind in der Praxis Überlastungsgrenzen bis zum Dreifachen der Taktzeit möglich, typischerweise jedoch deutlich kürzer.

Jedoch treten häufig exogen bedingte Störeinflüsse auf, welche die Fertigung von Fahrzeugen in der gewünschten Schicht verhindern. Z.B. müssen durch verspätete Anlieferung einer bestimmten Motorvariante alle entsprechenden Fahrzeugaufträge kurzfristig für die Fertigung gesperrt werden. Informationen über die schichtweise Sperrung von Fahrzeugaufträgen sind zum Zeitpunkt der Wochenprogrammierstellung nicht vorhanden. In der Praxis kann die Reihenfolgeplanung aufgrund unvollständiger Informationen folglich nicht zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung verbindlich durchgeführt werden, da die hierdurch induzierte Zuordnung von Fahrzeugaufträgen zu Schichten durch die zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung unbekanntem Störeinflüsse unzulässig werden kann bzw. in aller Regel wird.

Stattdessen muss die (endgültige) Reihenfolgeplanung zeitnah vor Beginn der betreffenden Schicht vorgenommen werden. Dabei stehen neben den für diese Schicht vorgesehenen und nicht gesperrten Aufträgen sämtliche anderen Aufträge aus dem Wochenprogramm zur Verfügung, für die sämtliche Teile vorhanden bzw. zuverlässig beschaffbar sind. Dadurch kann es während einer Schicht zu einer wesentlich ungünstigeren Kapazitätssituation bzw. Belastungsverteilung innerhalb und zwischen den Arbeitsplätzen kommen als im Rahmen der Wochenplanung vorgesehen. Als Folge steigt die Bedeutung einer guten Reihenfolgeplanung; jedoch können bestimmte Überlastungsspitzen auch in einer optimalen Reihenfolge ggf. nicht mehr ausgeglichen werden. Kommt es z.B. durch die Sperrung aller Fahrzeugaufträge mit einer konventionellen Lüftungsanlage zu einer Häufung von arbeitsaufwändigen Aufträgen mit Klimaautomatik, so wird in dieser Schicht mit unvermeidbaren Springereinsätzen – bzw. der Notwendigkeit der Erhöhung des Personalbestands betroffener Stationen für die gesamte Schicht – zu rechnen sein.

Durch die zeitliche Divergenz von Austaktungs- und Reihenfolgeplanung stellt die mögliche Überlastung zum Zeitpunkt der Reihenfolgeplanung ein Risikoszenario für die Austaktungsplanung dar. Da zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung aufgrund unvollständiger Informationen diese Überlastung nicht antizipiert werden kann, wird im Austaktungsproblem in der Praxis eine Überschreitung der Arbeitsplatzzeit eines Fahrzeugmodells über der Taktzeit als *Risiko* empfunden. Ein vollständig risikoaverser Entscheider taktet einen Arbeitsplatz dabei derart aus, dass alle Fahrzeuge stets nicht mehr Arbeitsplatz- als Taktzeit benötigen, wodurch sich in der Regel hohe Leerzeiten ergeben. Ein risikoneutraler Entscheider nähert die durchschnittliche Arbeitsplatzzeit an die Taktzeit möglichst gut an, ohne sie zu überschreiten. Die Balance zwischen Überlastungsvermeidung einerseits und hoher Arbeitsplatzauslastung andererseits obliegt in der Praxis der strategischen Produktionssystemgestaltung eines Unternehmens, welche als Regulierungsinstanz festlegt, welche Überlastungsrisiken akzeptabel sind.

2.4 Ausgleichszeiten als erfahrungsgestützter Puffer in der Praxis

Die Produktivität von getakteten Endmontagelinien in der Automobilindustrie hängt maßgeblich von der Fertigungszeit pro Fahrzeug (*F-Zeit*) als Produkt aus Arbeitsplatz- bzw. Mitarbeiteranzahl und Taktzeit ab. Ansatzpunkt zur Reduzierung des Personalbedarfs ist nach Ohno (1988) die Überprüfung der durchgeführten Arbeitsgänge auf Verschwendung. Dies umfasst neben Laufwegen der Werker und anderen nicht wertschöpfenden Tätigkeiten auch Leerzeiten. Die *Leerzeit* entspricht der Differenz $c - \tau_k$ zwischen der Taktzeit und der durchschnittlichen Arbeitsplatzzeit des jeweiligen Arbeitsplatzes $k \in K$.⁴ In der *Praxis* werden drei Kategorien unterschieden:

⁴ (D.h. bei einer konstanten Menge an Arbeitsgängen J kann durch eine bessere Taktungsalternative Arbeitsplätze eingespart werden, wenn die Leerzeitsumme der Linienbelegung reduziert wird.)

1. Wenn ein Werkstück durch eine Anlage teilweise automatisiert bearbeitet wird, gibt die *anlagenbedingte Ausgleichszeit* die Wartedauer der Mitarbeiter auf Vollendung der automatisierten Arbeitsgänge an. Die anlagenbedingte Ausgleichszeit kann durch Optimierung des Ablaufplanes der Anlage im Rahmen der technischen Planung reduziert werden.
2. Jeder auszuführende Arbeitsgang verursacht eine ergonomische Belastung des Mitarbeiters (vgl. Otto und Scholl (2011)). Zur Reduktion des Gesundheitsgefährdungspotenzials auf ergonomisch stark anspruchsvollen Arbeitsplätzen können *ergonomisch bedingte Ausgleichszeiten* als erholungswirksame Wartezeiten eingeplant werden. Wirkungsvolle Instrumente zur Reduktion der notwendigen ergonomisch bedingten Ausgleichszeiten sind Prozess- und Produktänderungen.
3. Die *austaktungsbedingte Ausgleichszeit* (auch: Taktausgleichszeit, TAZ) misst die Differenz zwischen der Taktzeit und der durchschnittlichen Arbeitsplatzzeit abzüglich der Ausgleichszeiten der Typen 1 und 2. Sie gibt die durchschnittliche Leerzeit eines Mitarbeiters nach Abschluss seiner Arbeiten bis zum Taktende an, die durch die Güte der Austaktung bestimmt wird. Da bei einer hohen TAZ der Mitarbeiter zusätzliche Kapazität zur Ausführung weiterer Arbeitsgänge vorhanden ist, spiegeln die TAZ den Grad der Ausschöpfung des Kapazitätsangebots wider. Daher besteht das primäre Ziel der Austaktungsplanung in der Minimierung der TAZ. Die tatsächlich eintretenden TAZ sind fahrzeugspezifisch, da je nach einzubauender Ausstattung die Arbeitsplatzzeit variiert.

In der Praxis zeigt sich jedoch, dass eine Minimierung der TAZ zu häufigen Überlastungen im operativen Betrieb führt. Daher werden „künstliche“ TAZ in Höhe von 5-15 % der Taktzeit als erfahrungsbasierter pauschaler Überlastungspuffer eingeplant, d.h. die durchschnittliche Arbeitsplatzzeit darf nur 85-95 % der Taktzeit betragen. Folglich wird das Reihenfolgeproblem zu Lasten einer pauschal erhöhten *F-Zeit* abgeschwächt bzw. bei sehr hohen zeitlichen Puffern vollständig eliminiert, da in letzterem Fall keine Taktzeitüberschreitungen mehr auftreten; dies geht jedoch stark zu Lasten der Produktivität. Die Entscheider agieren offensichtlich risikoavers, indem sie hohe Puffer in Form des tatsächlichen Verzichts auf Produktivität zugunsten der Vermeidung potenzieller Überlastungen zu zahlen bereit sind.

Überlastungen innerhalb der Fahrzeugsequenz werden jedoch wahrscheinlicher, je stärker die Zeit eines Arbeitsplatzes in Abhängigkeit von den Produktvarianten spreizt. In der Praxis haben wir **sechs Grundsätze guten Taktens** beobachtet, welche Austaktungsplaner zur Beherrschung der Variantenvielfalt anwenden. Auf Basis des angesammelten Erfahrungswissens, das durch sogenannte Optimierungsworkshops kontinuierlich verbessert wird, enthalten diese Grundsätze Gestaltungshinweise zur Verteilung von Zeitpuffern zur Minimierung des Überlastungsrisikos:

- A1. **Zulässigkeitsbeitrag:** Jeder risikobehaftete Arbeitsplatz kann durch einen hinreichend großen Zeitpuffer risikofrei gestaltet und somit im Rahmen der Austaktungsplanung zulässig werden. Arbeitsplätzen mit hoher Zeitspreizung werden dabei tendenziell größere Puffer zugewiesen als Arbeitsplätzen mit geringer Spreizung.
- A2. **Auswirkungsbezug:** Arbeitsplätze ohne Überlastungsrisiken erhalten keinen zusätzlichen Zeitpuffer.
- A3. **Dominanztreue:** Bei gleicher Arbeitsplatzanzahl werden dominierte Taktungsalternativen nicht bevorzugt. Allgemein dominiert zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung eine Taktung T1 eine Taktung T2, wenn in allen Arbeitsplätzen mit Taktzeit-

Überschreitung die Arbeitsplatzzeiten für jedes Fahrzeug in T2 nicht geringer als in T1 sind. Dadurch sind auch Driftzeiten und potenzielle Springerzeiten in T1 nicht höher als in T2.

A4. Ausgleichseffekt: Durch die Zusammenlegung mehrerer Einzel-Platz-Arbeitsplätze zu einem Mehr-Platz-Arbeitsplatz, bei dem mehrere Arbeiter rotierend über mehrere Stationen ein Fahrzeug bearbeiten, sinkt das Überlastungsrisiko und somit der Bedarf an zusätzlichen Zeitpuffern, da Überlastungsspitzen innerhalb eines Vielfachen der Taktzeit abgefangen werden können. Eine in eine Werkstattfertigung degenerierte Fließfertigung mit nur einem Arbeitsplatz für alle Arbeitsgänge besitzt folglich das kleinste Überlastungsrisiko.

A5. Skalenäquivalenz: Der Zulässigkeitsbeitrag wird auf der gleichen Skala wie die Dauer von Arbeitsgängen gemessen (Zeitskala). Somit verursacht die Verringerung des Risikos durch die Installation von Zulässigkeitsbeiträgen unmittelbar Produktivitätsverluste. Zeitfaktorzu- oder -abschläge (z.B. MTM-Leistungsfaktor, vgl. Bokranz und Landau (2006), 471-532) wirken sich auf alle in Zeit gemessene Tätigkeiten (neben Arbeitsgängen somit auch auf Wartezeiten und den Zulässigkeitsbetrag) aus.

A6. Änderungsauswirkung: Wird in einem Arbeitsplatz ein Arbeitsgang entfernt, so sinkt das Überlastungsrisiko und der damit verbundene Bedarf an zusätzlichem Zeitpuffer.

Das in der Praxis angewendete Vorgehen der Risikokompensation über zusätzliche Zeitpuffer führt zu einer vierten, bisher in der Literatur nicht betrachteten und in der TAZ untergegangenen Art der Leerzeit:

Spreizungsbedingte Ausgleichszeit (SAZ): Sie gibt die durch die Austaktungsplanung installierte durchschnittliche Leerzeit zur Reduktion von potenziellen Überlastungen von Mitarbeitern an. Sie sollte von der Zeitspreizung eines Arbeitsplatzes abhängen, welche wiederum durch Umtaktungen reduziert werden kann.

Bei der Einplanung von Zeitpuffern handelt es sich bisher in der Praxis um ein nicht methodengestütztes Vorgehen, das keine Formalisierung und Analyse erfahren hat. Vielmehr werden die Grundsätze guten Taktens zur Beherrschung der Variantenvielfalt in den Optimierungsworkshops intuitiv angewendet und erfahrungsgestützt spreizungsbedingte Ausgleichszeiten in den Arbeitsplätzen installiert.

Diese Forschungslücke soll nun geschlossen werden. Ziel dieses Artikels ist es, die in der Praxis angewendeten Grundsätze guten Taktens zur Beherrschung der Variantenvielfalt in einem quantitativen Erklärungsmodell abzubilden und über eine geeignete Messmethodik spreizungsbedingte Ausgleichszeiten gezielt zu bestimmen. Dabei wird zunächst die koppelnde Wirkung der spreizungsbedingten Ausgleichszeiten auf das Austaktungs- und Reihenfolgeproblem auf Übereinstimmung mit bisherigen Planungsansätzen geprüft.

3 Bisherige Planungsansätze und deren Kritik

Dieser Abschnitt beschreibt, welche Konzepte zum Umgang mit der zuvor diskutierten Problematik in Theorie und Praxis vorgeschlagen bzw. verwendet werden. Aufgrund der zuvor geschilderten und im praktischen Betrieb häufig und in relevantem Ausmaß auftretenden Störeinflüsse ist es wichtig, im Rahmen der Austaktungsplanung Zuordnungen von Arbeitsgängen zu Arbeitsplätzen so vorzunehmen, dass auch bei ungünstigem Schichtprogramm eine günstige Reihenfolge gefunden werden kann.

3.1 Übersicht und Beurteilung bestehender Ansätze

In der *Literatur* werden die folgenden prinzipiellen Lösungskonzepte vorgeschlagen:

- **Sukzessive Planung:** Die Austaktung erfolgt allein auf Basis eines mittelfristig ermittelten Durchschnittsauftrags (virtueller Produktauftrag mit durchschnittlicher Ausprägung aller Ausstattungen im Wochenprogramm; vgl. Boysen et al. (2009c)). Die Festlegung des Schichtprogramms und die Bildung der zugehörigen Reihenfolge werden schichtweise unter Beachtung der durch die Austaktung gegebenen Zuordnung von Arbeitsgängen zu Arbeitsplätzen und der verfügbaren Aufträge vorgenommen. Hierbei wird das Gesamtoptimum zumeist verfehlt, da die verfügbaren Aufträge aufgrund der genannten Störeinflüsse zumeist eine deutlich andere Zusammensetzung (Auftragsmix) als das Wochenprogramm haben, wodurch in manchen Schichten hohe Springereinsätze erforderlich werden, während in anderen hohe Leerzeiten der Normalbelegschaft auftreten.
- **Simultanplanung:** Beide Probleme werden simultan gelöst. Simultanmodelle und -verfahren werden in der Literatur in größerer Zahl beschrieben (vgl. die Übersicht in Boysen et al. 2009b). Es entsteht jedoch ein erhebliches Datenproblem, da zwar die Zuordnung von Fahrzeugaufträgen zu Wochen, nicht aber auf Kalendertage und Schichten zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung bekannt ist. Auch für eine vorläufige Einteilung des Auftragsbestandes in Schichtprogramme inklusive der Berechnung gewünschter Reihenfolgen ist die Simultanplanung nicht geeignet, da sie keine Vorkehrungen zum Umgang mit ungünstigen verfügbaren Auftragsbeständen treffen kann.
- **Hierarchische Planung:** Austaktungs- und Reihenfolgeproblem sind in zwei hierarchisch angeordnete Planungsebenen unterteilt (vgl. Decker 1993; Domschke et al. 1996; Scholl 1999, Kap. 3.2+3.4; Boysen et al. 2009a). Im Gegensatz zur Sukzessivplanung wird das Austaktungsproblem nicht isoliert, sondern unter antizipativer Berücksichtigung der Auswirkungen der Zuordnungsentscheidungen auf die aufgrund der Unsicherheit später und in kürzeren Planabständen zu betrachtenden Reihenfolgeprobleme gelöst. Dabei ist es im Unterschied zur Simultanplanung nicht nötig, das Reihenfolgeproblem vollständig vorwegzunehmen. Stattdessen wird mit Hilfe geeigneter *Antizipationsmaße* versucht, potenzielle Überlastsituationen unabhängig von später entstehenden Reihenfolgeproblemen möglichst zu vermeiden bzw. deren Wahrscheinlichkeit zu senken (vgl. Thomopoulos 1970; Domschke et al. 1996; Merengo et al. 1999; Emde et al. 2010). Durch die Hinzunahme von Antizipationsmaßen werden die Zielkriterien des Austaktungsproblems, welche die taktische Produktivität bezogen auf ein Vertriebsprogramm messen (*F-Zeit*), um Kriterien der operativen Durchführbarkeit und der operativen Produktivität (potenziell notwendige Springereinsatzzeiten) erweitert (vgl. Kap. 2.2).

In der *Praxis* werden beide Probleme in der Regel sukzessiv gelöst. Zur Vermeidung von (potenziellen) Überlastungen werden die Produktionskapazitäten für den Durchschnittsauftrag durch spreizungsbedingte Ausgleichszeiten nicht voll ausgelastet. Man erkauft sich die Überlastungsvermeidung also durch Einbußen in der Produktivität (vgl. Kap. 2.3).

3.2 Bestehende Antizipationsmaße und ihre Analyse

Antizipationsmaße dienen der Glättung der Arbeitsplatzzeiten τ_{pk} , um Austaktungen zu erhalten, die robust gegenüber einer Veränderung der Zusammensetzung von Schicht-

programmen im Vergleich zum Wochenprogramm bzw. dem bei der Austaktung verwendeten Durchschnittsauftrag sind (für eine Übersicht aller bisher untersuchten Maße vgl. Emde et al. 2010). Dies kann in zwei Richtungen erfolgen (vgl. Merengo et al. 1999):

- *Horizontale* Antizipationsmaße sollen die Zeitbelastungen zwischen den verschiedenen Fahrzeugen direkt aufeinanderfolgender Takte *ein und desselben* Arbeitsplatzes ausgleichen. Hierdurch werden die Abweichungen der fahrzeugspezifischen Arbeitsplatzzeiten von einem Zielzeitwert (beispielsweise der Taktzeit oder der durchschnittlichen Bearbeitungszeit) innerhalb eines Arbeitsplatzes reduziert. Überlastungen im Rahmen der Reihenfolgeplanung werden durch die Anwendung horizontaler Antizipationsmaße tendenziell unwahrscheinlicher, da weniger fahrzeugspezifische Arbeitsplatzzeiten den kritischen Zielzeitwert überschreiten.
- *Vertikale* Antizipationsmaße verteilen die über alle Fahrzeuge berechnete durchschnittliche Zeit je Arbeitsplatz *über die gesamte Fertigungslinie* gleich. Hierdurch werden Abweichungen von der durchschnittlichen Auslastung aller Arbeitsplätze reduziert.

Beispiel: Die Wirkungsweise solcher Antizipationsmaße soll nun anhand eines sehr einfachen Austaktungsproblems aufgezeigt werden, dessen Daten in Tabelle 2 gegeben sind. Es ist ein Fertigungsprogramm $P = \{P1, P2\}$ gegeben, bei dem jede der beiden Produktvarianten mit einer gewissen Häufigkeit bestellt wurde (letzte Zeile von Tab. 2). Zur Herstellung der Produktvarianten sind insgesamt $n = 5$ Arbeitsgänge ohne relevante Vorrangbeziehungen durchzuführen. Es ist durch Ankreuzen vermerkt, welche Arbeitsgänge für welche Produktvarianten auszuführen sind. Der Einfachheit halber gehen wir davon aus, dass die Arbeitsgänge produktunabhängig die festen Dauern t_j (in Zeiteinheiten; ZE) aufweisen. Die letzte Spalte der Tabelle gibt die Arbeitsgangdauern des daraus abgeleiteten Durchschnittsauftrags \bar{P} an. Die vorletzte Zeile zeigt die gesamten Bearbeitungsdauern je Produktvariante. Bei einer Taktzeit von $c = 10$ ZE lassen sich die Arbeitsgänge für den Durchschnittsauftrag im Rahmen der Austaktung leicht auf die minimale Anzahl von zwei Arbeitsplätzen aufteilen. Wir betrachten zwei unterschiedliche Austaktungen durch Angabe der Mengen $AP1$ und $AP2$ der den beiden Arbeitsplätzen jeweils zugeordneten Arbeitsgänge:

Arbeitsgang j	Dauer t_j [ZE]	Produktvarianten		
		P1	P2	\bar{P}
1	8	x	x	8
2	3	x		0,27
3	1		x	0,91
4	9	x	x	9
5	1	x		0,09
Gesamtzeit [ZE]		21	18	18,27
Häufigkeit [%]		9	91	

Tabelle 2: Arbeitsgänge, Zeiten

Taktung T1: $AP1 = \{1,2\}$ mit $\tau_1 = 8,27$ $AP2 = \{3,4,5\}$ mit $\tau_2 = 10,00$

Taktung T2: $AP1 = \{1,2,3\}$ mit $\tau_1 = 9,18$ $AP2 = \{4,5\}$ mit $\tau_2 = 9,09$

Abb. 2 stellt auf der linken Seite die resultierenden Verteilungen der Arbeitsplatzzeiten für die beiden Taktungen im Arbeitsplatz $AP1$ dar. Die jeweils zugeordneten Arbeitsgänge führen zu unterschiedlicher Zeitbelastung durch die verschiedenen Produkte. In beiden Fällen überschreitet nur P1 mit 11 ZE ($= t_1 + t_2$) die Taktzeit von $c = 10$ ZE. Die Arbeitsplatzzeit von Produkt P2 wird durch den zusätzlichen Arbeitsgang 3 in T2 gegenüber T1 um eine ZE „verteuert“. Insgesamt verschiebt sich die Arbeitsplatzzeitverteilung von $AP1$ in T2 gegenüber T1 nach rechts. Die durchschnittliche Auslastung τ_1/c von $AP1$ steigt von $8,27 \cdot 100\%/10 = 82,7\%$ auf $91,8\%$ (vgl. Tab. 3). Die Leerzeit (Ausgleichszeit; siehe Kap.2.3) $c - \tau_1$ sinkt von 1,73 auf 0,82 ZE.

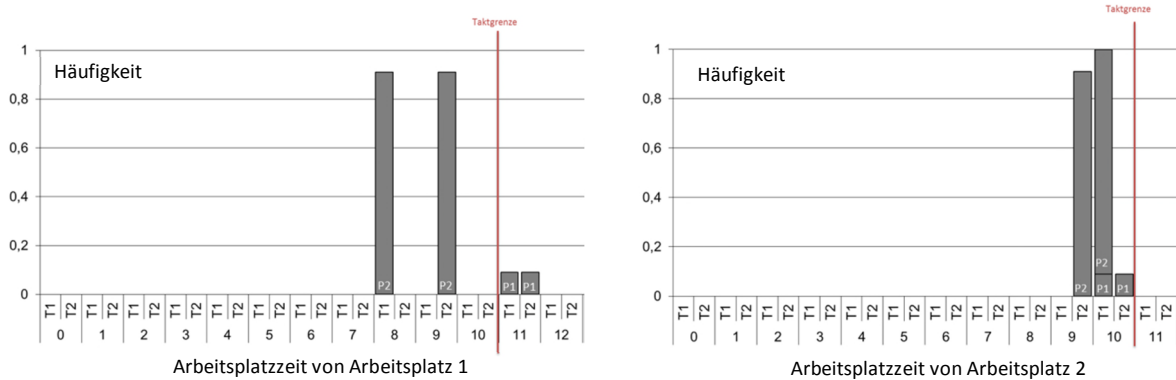


Abbildung 2: Verteilung der Arbeitsplatzzeiten bei beiden Austaktungen

Trotz gleicher Taktzeitüberschreitungen durch P1 führt die Verteuerung von P2 in AP1 tendenziell zu mehr Überlastungen in der Fahrzeugsequenz. Während in T1 eine von zwei aufeinanderfolgenden Einheiten P1 verursachte Überschreitung von 2 ZE durch die nachfolgende Bearbeitung von P2 ausgeglichen werden kann, verbleibt in T2 eine Notwendigkeit zum Drift. Dies kann sich bei ungünstigem Auftragsmix zu einer nicht mehr ausgleichbaren Überlast aufsummieren. Auch steht in T2 ein geringerer Ausgleichszeitpuffer zur Abmilderung des Reihenfolgeproblems zur Verfügung, so dass der Arbeitsplatz AP1 in der Taktung T2 ein höheres operatives Risiko aufweist als die Taktung T1.

Da bei Arbeitsplatz AP2 weder in Taktung T1 noch in T2 ein Produkt zu einer Taktzeitüberschreitung führt (Abb. 2 rechts), stellt AP2 kein Risiko für die operative Durchführbarkeit dar.

Insgesamt ist festzustellen, dass zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung die Taktung T1 gegenüber T2 zu bevorzugen ist, da T1 bei kurzfristigen Variationen des Auftragsmix das deutlich geringere Risiko für Taktzeitüberschreitungen und die Notwendigkeit von Springereinsätzen trägt. T2 kann für keine beliebig aus Einheiten von P1 und P2 zusammengesetzte Fahrzeugreihenfolge geringere Taktzeitüberschreitungen und damit geringere Springereinsatzzeiten generieren als T1, da in dem riskanten Arbeitsplatz AP1 die Bearbeitungszeiten aller Produkte größer als oder gleich denen für T1 sind. Jeder rationale Entscheider sollte somit T1 gegenüber T2 bevorzugen.

Wir prüfen die in Kap. 2.4 vorgestellte Dominanztreue als Bestandteil der Grundsätze guten Taktens anhand der in der Literatur bisher vorgeschlagenen horizontalen und vertikalen Antizipationsmaße. Der Klassifikation nach Emde et al. (2010) folgend, listet Tab. 4 alle bekannten Antizipationsmaße auf, welche die zu minimierende Streuung der Arbeitsplatzzeitverteilung auf unterschiedliche Weise messen. Die Definitionen der Antizipationsmaße können Anhang A entnommen werden. Taktung T1 wird genau dann als echt besser eingeschätzt, wenn das gewählte Antizipationsmaß für T1 einen kleineren Wert annimmt als für T2. Für obiges Beispiel signalisiert *keines* der 28 Antizipationsmaße die Dominanz von T1 gegenüber T2. Im Gegenteil präferieren alle vertikalen sowie 19 von 24 horizontalen Antizipationsmaßen die dominierte Austaktung T2 (rote Färbung). In allen anderen Fällen signalisieren die Antizipationsmaße eine Indifferenz zwischen

	AP1			AP2			Gesamt		
	τ_1	τ_1/c	$c - \tau_1$	τ_2	τ_2/c	$c - \tau_2$	$\bar{\tau}$	$\bar{\tau}/(2c)$	$2c - \bar{\tau}$
Taktung T1	8,27 ZE	82,7%	1,73 ZE	10,00 ZE	100%	0 ZE	18,27 ZE	91,35%	1,73 ZE
Taktung T2	9,18 ZE	91,8%	0,82 ZE	9,09 ZE	90,9%	0,91 ZE			

Tabelle 3: Erwartete Arbeitsplatzzeiten, Auslastungen und Ausgleichszeiten

		Horizontale Maße						Vertikale Maße	
		Kategorie A		Kategorie B		Kategorie C		Kategorie D	
		T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
I. Überschreitung	Ungewichtet	1,00 (1)	1,00	1,50 (9)	0,50	3,60 (17)	2,73	0,87 (25)	0,04
	Gewichtet	0,09 (2)	0,09	0,96 (10)	0,05	1,03 (18)	0,25		
II. Manhattan-Distanz	Ungewichtet	3,00 (3)	3,00	3,00 (11)	1,00	4,73 (19)	3,00	1,73 (26)	0,09
	Gewichtet	1,91 (4)	1,91	1,91 (12)	0,09	2,07 (20)	0,49		
III. Euklidische Distanz	Ungewichtet	2,24 (5)	1,73	1,58 (13)	0,71	2,50 (21)	2,06	1,22 (27)	0,06
	Gewichtet	1,82 (6)	1,29	1,29 (14)	0,06	1,31 (22)	0,25		
IV. Maximale Abweichung	Ungewichtet	2,00 (7)	1,00	1,00 (15)	0,50	1,87 (23)	1,87	0,87 (28)	0,04
	Gewichtet	1,82 (8)	0,91	0,91 (16)	0,05	1,03 (24)	0,17		

Tabelle 4: Antizipationsmaße für T1 und T2 klassifiziert nach Emde et al. (2010)

beiden Austaktungen (gelbe Färbung), ohne jedoch die Risikoneigung der Entscheider zu beachten. Diese Überlegungen führen zu einem weiteren Nachteil eines Großteils der Antizipationsmaße, die nicht ausschließlich an der Überschreitung der Taktzeit (Metriken II, III und IV) messen. Diese bestrafen auch Arbeitsplätze ohne Risiko und erlauben eine Kompensation von Überschreitungen durch Unterschreitungen der Taktzeit, d.h. die gemessenen Abweichungen haben nicht den gewünschten Bezug zu deren potenziellen operativen Auswirkungen. Sie verstoßen damit gegen den in Kap. 2.4 in der Praxis geforderten Auswirkungsbezug.

Da *keines* der 28 Antizipationsmaße alle Bestandteile der Grundsätze guten Taktens erfüllen kann, entwickeln wir nun ein neues Antizipationsmaß, welches den Bedarf an zusätzlichem Zeitpuffer zur Vermeidung des Überlastungsrisikos unter Beachtung der Grundsätze guten Taktens direkt misst. Hierfür leiten wir zunächst Analogien zum Risikomanagementprozess her, um dann etablierte Messinstrumente der Portfoliotheorie auf das Austaktungsproblem anzuwenden.

4 Analogien der Austaktungsplanung zum Risikomanagementprozess

Offensichtlich weist die in Abschnitt 2 dargestellte Kopplungsmethodik, in der Überlastungsspitzen zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung als operationale Unternehmensrisiken antizipiert werden, Analogien zum Risikomanagementprozess auf (vgl. Miller 1992 zur Einordnung von Unternehmensrisiken sowie Kürsten 2008, Schroeck 2002, Kap. 2, und Culp 2001, Kap. 1, zur Einführung in das Risikomanagement). Dabei sind in der Praxis über die Grundsätze guten Taktens zur Beherrschung der Variantenvielfalt qualitative Risikoinstrumente in einem erfahrungsgestützten Entscheidungsmodell implementiert, welche die zum Zeitpunkt der Reihenfolgeplanung tendenziell überlasteten Arbeitsplätze als Risikopositionen fokussieren. Das hier gesuchte Antizipationsmaß lässt sich in diesem Kontext als (asymmetrisches) Risikomaß verstehen, welches diejenige

spreizungsbedingte Ausgleichszeit eines Arbeitsplatzes misst, die das Risiko der operativen Durchführbarkeit in Übereinstimmung mit der Risikoeinstellung des Planers bzw. des Unternehmens bringt. Das gesuchte Antizipationsmaß kann somit als eine in Fertigungszeit gemessene *Risikoprämie* angesehen werden.

Die vorhergehende Analyse des Entscheidungsproblems legt nahe, dass das Austaktungsproblem MALBP Analogien zur Portfoliotheorie mit asymmetrischen Risikomaßen aufweist (vgl. Markowitz (1952), Roy (1952), Kataoka (1963)). Inhalt der Portfoliotheorie ist die Bildung eines Portfolios durch die geeignete Auswahl riskanter Assets (z.B. Aktien). Abhängig von Art und Ausmaß der Risikoneigung des Entscheiders gehen durchschnittliche Rendite des Portfolios sowie das durch die Streuung (Varianz) der Renditen der enthaltenen Assets gemessene Risiko in die Zielfunktion des Entscheiders gewichtet ein. Durch geschickte Kombination negativ korrelierter Assets kann das Risiko für einen risikoaversen Entscheider reduziert werden. Im MALBP muss der Entscheider einen Arbeitsplatz (Portfolio) durch Auswahl geeigneter Arbeitsgänge (Assets) bilden. Die Auslastung eines Mitarbeiters als Quotient zwischen Zeitbedarf und -angebot sollte als Portfoliorendite maximiert, die Varianz aller fahrzeugbezogenen Arbeitsplatzzeiten als Portfoliorisiko minimiert werden. Um das Überlastungsrisiko eines Arbeitsplatzes (Auslastung über 100 %) zu reduzieren, können neben negativ korrelierten Arbeitsgängen auch zusätzliche (spreizungsabhängige) Ausgleichszeiten als Risikoprämie dem Portfolio hinzugefügt werden. Dies entspricht den Instrumenten der Portfoliotheorie zur Risikoverwässerung bzw. -vernichtung sowie der Risikoüberwälzung durch eine Investition in eine sichere Anlage (Ausgleichszeit) mit geringer Rendite (schlechter Mitarbeiterauslastung).

Über die Portfoliotheorie hinaus bestehen bei der Austaktungsplanung zusätzliche Anforderungen an ein Entscheidungsmodell unter Risiko. So muss jedes Asset (Arbeitsgang) zwingend in ein zu wählendes Portfolio (Arbeitsplatz) einer Portfoliomenge (Endmontagelinie) aufgenommen werden. Dabei kann die Portfoliomenge durch ein Zusammenlegen der Portfolios nicht beliebig verkleinert und diversifiziert werden, da eine Endmontagelinie der Fließfertigung und somit der festen Einteilung in Takte und Arbeitsplätze unterliegt. Zur Minimierung der Arbeitsplatzanzahl muss im Rahmen der Austaktungsplanung eine Zuordnung aller Arbeitsgänge zu bestehenden Arbeitsplätzen gefunden werden, die das Risiko der einzelnen Arbeitsgänge, zu einer (zu) hohen Zeit spreizung des Arbeitsplatzes beizutragen, möglichst vernichtet. Darüber hinaus werden bei der Austaktungsplanung Aspekte der technischen Baubarkeit berücksichtigt, welche Zwangsreihenfolgen bestimmter Arbeitsgänge in Form eines Vorranggraphen vorgeben. Auch weitere Vorgaben (z.B. hinsichtlich bauraumfokussierter Arbeiten) beschränken die kombinatorische Vielfalt möglicher Zuordnungen. Einen Überblick hierzu liefern z.B. Boysen et al. (2007). In der Portfoliotheorie entsprechen solche Restriktionen einer Auswahlabhängigkeit zwischen den Assets.

Die Auswahl eines für den Risikokontext adäquaten Risikomaßes ist für eine abgesicherte Risikomessung entscheidend. Eine unbedachte, nicht an den Erfordernissen des Entscheiders angepasste Auswahl kann irrationale Entscheidungen herbeiführen (Kürsten und Brandtner (2009)). Ein axiomatisch fundiertes Konzept zur Risikomessung liefern Artzner et al. (1999) zuvorderst für die Portfoliotheorie, welches sich als anerkannter Standard zur Risikomessung etabliert hat. Das Konzept basiert auf individuellen Akzeptanzmengen der Regulierungsinstanz, welches Risiken als akzeptabel oder inakzeptabel klassifiziert. Ein Risikomaß nach Artzner et al. (1999) misst denjenigen kleinsten sicheren Betrag (Risikoprämie), welcher ein inakzeptables Risiko zuzüglich der Risikoprämie akzeptabel macht. Das Risikomaß akzeptabler Risiken ist kleiner oder gleich Null.

Anstelle der über individuelle Akzeptanzmengen gebildeten Risikomaße ist es nach Artzner et al. (1999) auch möglich, auf die axiomatisch äquivalent formulierte Klasse an kohärenten Risikomaßen direkt zurückzugreifen. Die Kriterien für eine kohärente Risikomessung sind dabei nicht an konkrete individuelle Akzeptanzmengen gekoppelt und können somit Akzeptanzmengen induzieren, die möglicherweise nicht mit dem individuellen Risikoverständnis des Regulierers übereinstimmen (Kürsten und Brandtner (2009)). Vor der Anwendung kohärenter Risikomaße ist somit eine Überprüfung des individuellen Risikoverständnisses (hier: die Grundsätze guten Taktens) erforderlich. Artzner et al. formulierten fünf Axiome an ein kohärentes Risikomaß RM zur Messung einer als risikoreich erachteten Position Y , die wir nun auf Übereinstimmung mit den Grundsätzen guten Taktens prüfen:⁵

K1. Translationsinvarianz: Für alle sicheren Beträge a gilt: $RM(Y + a) = RM(Y) - a$. Beinhaltet die zu messende Risikoposition $Y + a$ sichere Rückflüsse, so reduzieren diese vollumfänglich die Risikomaßzahl. Dadurch gilt, dass ein kohärentes Risikomaß jenen sicheren Betrag misst, welcher das Risiko des Gesamtportfolios bestehend aus Y und $RM(Y)$ auf Null reduziert ($RM(Y + RM(Y)) = 0$). Ein kohärentes Risikomaß muss zwingend den Wert Null annehmen können. Für $RM(Y) > 0$ misst $RM(Y)$ den zusätzlichen, sicheren Betrag, der mindestens der Risikoposition Y hinzugefügt werden muss, so dass eine risikofreie Position erreicht wird. Für $RM(Y) < 0$ kann der risikofreien Position Y ein sicherer Betrag in Höhe von bis zu $|RM(Y)|$ abgezogen werden, so dass Y weiterhin risikofrei ist.

Bezogen auf das Austaktungsproblem lässt sich K1 wie folgt formulieren: Für alle Arbeitsgänge mit fahrzeugunabhängiger Prozesszeit a gilt: $RM(Y + a) = RM(c - (X - a)) = RM(Y) - a$. Das heißt, wird in einer Arbeitsplatzbelegung X ein Arbeitsgang mit fahrzeugunabhängiger Prozesszeit a , welche für alle Fahrzeuge mit derselben Dauer ausgeführt wird, entfernt, so sinkt die Risikomaßzahl $RM(Y)$ um a . Ein translationsinvariantes Maß bildet folglich Anforderung A6 (**Änderungsauswirkung**) korrekt ab. Darüber hinaus gilt mit $RM(Y + RM(Y)) = RM(c - (X - RM(Y))) = 0$: Wird in X zusätzliche (spreizungsbedingte) Ausgleichszeit $\Delta SAZ(X)$ in Höhe von $RM(Y)$ ohne Veränderung der Risikostruktur (d.h. durch Verschieben von Arbeitsgängen mit einer fahrzeugunabhängigen Prozesszeit in Höhe von $RM(Y)$) installiert, so ist X risikofrei. Mögliche Taktzeitüberschreitungen in $X - RM(Y)$ stuft der Entscheider als akzeptabel mit seinem Risikoverständnis ein. Ein kohärentes Risikomaß stellt somit den geforderten **Zulässigkeitsbeitrag** (A1) dar ($RM(Y) = \Delta SAZ(X)$).

K2. Subadditivität: Für alle Risikopositionen Y_1 und Y_2 gilt: $RM(Y_1 + Y_2) \leq RM(Y_1) + RM(Y_2)$. Bei einer Verschmelzung von Risikopositionen darf ein kohärentes Risikomaß kein höheres Risiko messen als vor der Verschmelzung (Risikoverwässerung und -vernichtung). Eine Verschmelzung wirkt diversifizierend. Eine riskante Risikoposition darf nicht allein dadurch risikofrei werden, dass sie in mehrere Unterpositionen aufgeteilt wird.

Bezogen auf das Austaktungsproblem lässt sich K2 wie folgt formulieren: Für alle Risikopositionen $Y_1 = c - X_1$ und $Y_2 = c - X_2$ gilt: $RM(Y_1 + Y_2) = RM(2c - (X_1 + X_2)) = \Delta SAZ(X_1 + X_2) \leq \Delta SAZ(X_1) + \Delta SAZ(X_2)$. Dieses Axiom entspricht der Anforderung A4 (**Ausgleichseffekt**).

⁵ Hinweis: Da sich die Risiken der Arbeitsplatzzeitverteilung oberhalb der Taktzeit c befinden, ist für eine Übertragung der Axiome auf das Austaktungsproblem eine mit $Y = c - X$ abgeleitete Schreibweise notwendig. Im Austaktungsproblem stellt jede Arbeitsplatzbelegung X eine Risikoposition dar.

K3. Positive Homogenität: Für alle $k > 0$ gilt: $RM(k \cdot Y) = k \cdot RM(Y)$. Eine Vervielfachung der Risikoposition hat keinen Einfluss auf die gemessene Risikostruktur. Dieses Axiom entspricht der Anforderung A5 (**Skalenäquivalenz**).

K4. Relevanz: Für alle $Y \geq 0$ gilt: $RM(Y) \leq 0$. Das Risikomaß ist nicht positiv bei Risikopositionen, welche kein Risiko im engeren Sinne beinhalten.

Bezogen auf das Austaktungsproblem lässt sich K4 wie folgt formulieren: Für alle $Y \geq 0$ resp. $X \leq c$ gilt: $RM(Y) = \Delta SAZ(X) \leq 0$. D.h. in einem nicht riskanten Arbeitsplatz ohne Taktzeitüberschreitungen können ohne Veränderung der Risikostruktur Arbeitsgänge mit einer fahrzeugunabhängigen Prozesszeit von bis zu $|RM(Y)|$ zusätzlich eingeplant werden, ohne dass die Belegung als riskant eingestuft wird. X enthält Taktausgleichszeit, welche nicht spreizungsbedingt ist.

Dieses Axiom entspricht der Anforderung A2 (**Auswirkungsbezug**).

K5. Monotonie: Für alle Risikopositionen $Y_1 \leq Y_2$ gilt: $RM(Y_1) \geq RM(Y_2)$. Für dominierte Risikopositionen Y_1 , welche in keinem Szenario bessere Ergebnisse als die Risikopositionen Y_2 liefern, darf das gemessene Risiko nicht geringer sein.

Dieses Axiom sichert die Vorzugswürdigkeit einer Arbeitsplatzbelegung X_1 gegenüber X_2 zu, wenn für jedes Fahrzeug die Arbeitsplatzzeit in X_1 nicht höher als in X_2 ist (X_1 dominiert X_2). Dies ist jedoch nur eine notwendige Bedingung für die Dominanztreue (A3) zur Bewertung von Taktungsalternativen, da es bei der Verschiebung von Arbeitsgängen im Rahmen der Austaktungsplanung für jeden arbeitsplatzzeitreduzierten Arbeitsplatz mindestens einen arbeitsplatzzeiterhöhten weiteren Arbeitsplatz gibt. Eine solche Verschiebung eines Arbeitsganges reduziert Überlastungsrisiken, wenn der arbeitsplatzzeiterhöhte Arbeitsplatz auch nach dem Zufügen des Arbeitsganges kein Risiko beinhaltet. Risikomaße, welche gegen die Relevanzeigenschaft K4 verstoßen, können jedoch auch Risiko bei risikofreien Arbeitsplätzen messen. Folglich ist die **Dominanztreue** (A3) nur dann hinreichend zugesichert, wenn das Risikomaß tatsächlich relevantes Risiko (K4) monoton (K5) misst.

Für die Klasse der kohärenten Risikomaße wird Risiko als mindestens notwendige Risikoprämie quantifiziert, um eine riskante Position in eine risikofreie zu überführen. Die Translationsinvarianz nach Artzner et al. (1999) führt zu einer Lageabhängigkeit der kohärenten Risikomaße, so dass auch Erhöhungen des Erwartungswertes $E(Y)$ das gemessene Risiko verändern. Die Klasse an kohärenten Risikomaßen stellen risikoadjustierte Performancemaße dar (vgl. Albrecht (2003)). Änderungen an der durchschnittlichen Arbeitsplatzzeit einer Belegung (und somit an der Leerzeit) wirken sich folglich auf die Höhe zusätzlich zu installierender spreizungsbedingter Ausgleichszeit aus.

Die Kriterien für eine kohärente Risikomessung bilden die im Kap. 2.3 dargestellten Zusammenhänge zwischen Austaktungsplanung, Reihenfolgeplanung und Ausgleichzeitpuffer ab. Die Klasse der kohärenten Risikomaße ist arbeitsplatzspezifisch und misst als minimale, der Taktung hinzuzufügende spreizungsbedingte Ausgleichszeit $\Delta SAZ(X)$ Arbeitszeiten und somit Lohnkosten. Sie bilden die Grundsätze guten Taktens zur Beherrschung von Variantenvielfalt in der Praxis ab.

Antizipationsmaße	Kategorie A								Kategorie B								Kategorie C								Kategorie D			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Translationsinvariant	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Subadditiv	J	J	J	J	N	N	J	J	J	J	J	J	N	N	J	J	J	J	J	J	N	N	J	J	J	J	N	J
Positiv homogen	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J
Monoton	J	J	N	N	N	N	N	N	J	J	N	N	N	N	N	N	J	J	N	N	N	N	N	N	J	N	N	N
Relevant	J	J	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Abbildung 3: Antizipationsmaße nach Emde et al. (2010) und Kriterien zur kohärenten Risikomessung

Folglich scheint es für die methodische Unterstützung der Kopplung von Austaktungs- und Reihenfolgeplanung geeignet zu sein, ein Antizipationsmaß aus der Klasse kohärenter Risikomaße zu wählen.

Um die Eigenschaft der Kohärenz bisher in der Literatur zu findender Antizipationsmaße zu analysieren und damit Aussagen über die theoretische Eignung der Maße zu generieren, wird die Klassifikation nach Emde et al. (2010) abermals verwendet (zu deren Definition siehe Anhang A).

Keines der in Emde et al. (2010) aufgeführten Antizipationsmaße ist kohärent, da in keinem Fall Translationsinvarianz vorliegt (vgl. Abbildung 3, Beweis s. Anhang B). Keines der Maße kann folglich das Instrument der Risikoüberwälzung durch gezielte Schaffung zusätzlicher Ausgleichszeitpuffer zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung abbilden. Dies bestätigt die im Abschnitt 3.2 über ein Gegenbeispiel aufgezeigte Ungeeignetheit bisheriger Antizipationsmaße. Darüber hinaus messen nur die Maße 1 und 2 tatsächlich relevantes Risiko (vgl. Domschke et al. (1996)). Die restlichen 26 nicht relevanten Maße signalisieren auch bei unbedenklichen, nicht riskanten Arbeitsplätzen ggf. eine Notwendigkeit zur Umtaktung, obwohl keine Überlastungskosten zum Zeitpunkt der Reihenfolgeplanung entstehen können (Widerspruch gegen den Auswirkungsbezug). Erschwerend tritt hinzu, dass durch die mangelnde Relevanz dieser Maße auch dominierte Alternativen mit höheren Überlastungskosten zum Zeitpunkt der Reihenfolgeplanung bevorzugt werden können (Widerspruch gegen die Dominanztreue).

Alle bisherigen Antizipationsmaße sind aus risikotheorietischen Gesichtspunkten wenig für eine kontextadäquate Risikomessung geeignet, da keines von ihnen allen Axiomen zur kohärenten Risikomessung und somit den Grundsätzen guten Taktens der Praxis gerecht wird. Eine praktische Anwendung der bisher empfohlenen, nicht kohärenten Maße kann, wie im Abschnitt 3.2 beispielhaft dargestellt, irrationale Entscheidungen herbeiführen. Deshalb greifen wir nun auf etablierte kohärente Risikomaße der Portfoliotheorie zur Kopplung von Austaktungs- und Reihenfolgeproblem zurück.

5 Ein kohärentes Risikomaß für die Austaktungsplanung

Über die Basel-II-Regeln kodifiziert hat sich in der Bankenregulierung der **Value-at-Risk (VaR)** als Risikomaßstandard durchgesetzt (Herring (2002)). Dieser misst das Risiko eines Portfolios Y als denjenigen kleinsten *Verlust*, welcher mit Wahrscheinlichkeit $\alpha \cdot 100\%$ nicht überschritten wird. Der VaR entspricht betragsmäßig dem α -Quantil der Verteilungsfunktion $F(Y)$. Artzner et al. (1999) zeigten, dass der VaR nicht subadditiv und somit nicht kohärent ist. Als Alternative hierzu wird der **Conditional-Value-at-Risk (CVaR)** diskutiert. Dieser misst denjenigen erwarteten Verlust, welcher den VaR zum Konfidenzniveau α (kurz VaR_α) übersteigt und bezieht somit auch die Risikostruktur der Verluste größer dem VaR in die Risikomessung mit ein. Problematisch an der Definition des $CVaR$ ist die Abhängigkeit vom zugehörigen α -Quantil VaR_α (Definition nach Pflug (2000)). Bei diskreten Verteilungen wie der Arbeitsplatzzeitverteilung eines Arbeitsplatzes entstehen durch kleine Änderungen am Konfidenzniveau α große Änderungen im $CVaR$ (Acerbi und Tasche (2002)). Als Ausweg bietet sich die direkte Messung des

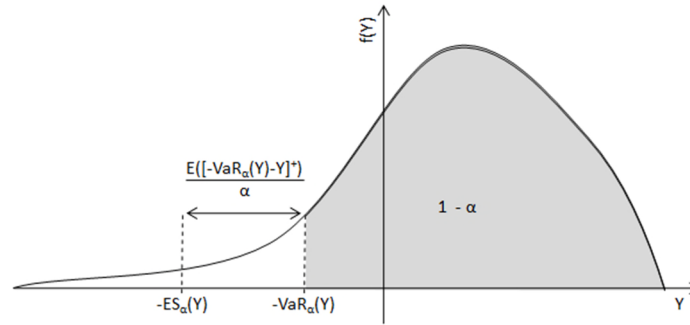


Abbildung 4: Value-at-Risk und Expected Shortfall

$CVaR$ ohne Bezugnahme zum VaR in Form des **Expected Shortfalls (ES)** an (Acerbi et al. (2001)).⁶ Der ES misst denjenigen *erwarteten Verlust*, welcher in den $\alpha \cdot 100\%$ ungünstigsten Fällen auftritt.⁷ Sowohl der $CVaR$ als auch der ES sind kohärent (Pflug (2000), Acerbi und Tasche (2002)). Ogryczak und Ruszczyński (2002) sowie Mansini et al. (2007) zeigten über die Bildung der Umkehrfunktion

$$F^{-2}(\alpha) = \sup_{\eta} (\eta \cdot \alpha - F^2(\eta)) = \sup_{\eta} (\eta \cdot \alpha - E([\eta - Y]^+)), \quad (1)$$

dass der Expected Shortfall mit

$$ES_{\alpha}(Y) = E(-Y|Y \leq \eta(\alpha)) = -\frac{F^{-2}(\alpha)}{\alpha} = -\sup_{\eta} (\eta - \frac{E([\eta - Y]^+)}{\alpha}) \quad (2)$$

linearisierbar ist, wobei $\eta(\alpha)$ das gesuchte α -Quantil der Verteilungsfunktion $F(Y)$ ist. Da das α -Quantil der Verteilungsfunktion $F(Y)$ betragsmäßig den Value-at-Risk $VaR_{\alpha}(Y)$ definiert, gilt im Supremum von Formel (2) offensichtlich:

$$ES_{\alpha}(Y) = VaR_{\alpha}(Y) + \frac{E([-VaR_{\alpha}(Y) - Y]^+)}{\alpha} \quad (3)$$

Der Expected Shortfall ist folglich stets größer als der Value-at-Risk zum selben Niveau (vgl. Abbildung 4). Die Differenz stellt die mittlere Verlustüberschreitung oberhalb des Value-at-Risks dar.

Das Risikomaß Expected Shortfall ist verträglich mit der im Abschnitt 2.3 dargestellten Dominanztreue: Aus der Relevanzeigenschaft (K4) des Expected Shortfalls folgt, dass für alle Alternativen Y ohne potenzielle Risiken $ES(Y) \leq 0$ gilt. Da sich die Risiken der Arbeitsplatzzeitverteilung am oberen Ende der Verteilung befinden, wird der Expected Shortfall $\overline{ES}_{1-\alpha}(X)$ der Arbeitsplatzzeitverteilung $F(X)$ über die Risiken oberhalb des $\eta(1-\alpha)$ -Quantils definiert:

$$\overline{ES}_{1-\alpha}(X) = E(-X|X \geq \eta(1-\alpha)) = -\inf_{\eta} (\eta + \frac{E([X - \eta]^+)}{\alpha}) \quad (4)$$

$\overline{ES}_{1-\alpha}(X)$ misst betragsmäßig den Arbeitsplatzzeitdurchschnitt der $\alpha \cdot 100\%$ arbeitsplatzzeitintensivsten Fahrzeuge eines Arbeitsplatzes. Ein *nicht riskanter* Arbeitsplatz beinhaltet (höchstens) so viel Arbeitsumfang bzw. (mindestens) so viel spreizungsbedingte Ausgleichszeit $SAZ(X)$, dass der *Erwartungswert* der $\alpha \cdot 100\%$ arbeitsplatzzeitintensivsten Fahrzeuge nicht die Taktzeit überschreitet (vgl. Abbildung 5). Die hier nicht für Sicherungszwecke benötigte (restliche) Taktausgleichszeit $TAZ(X) > 0$ ist als Differenz zwischen Taktzeit und Expected Shortfall ein Maß für die Güte (Effizienz, Produktivität) der Austaktung.

⁶ Da für stetige Verteilungen der Expected Shortfall dem $CVaR$ gleicht, werden in der Literatur beide Risikomaße häufig synonym verwendet.

⁷ Es ist zu beachten, dass sowohl der Expected Shortfall als auch der Value-at-Risk Verluste der Verteilungsfunktion messen. Nimmt Y nur positive Werte an, sind folglich beide Maße negativ.

Da bei einer *riskanten* Arbeitsplatzbelegung $\overline{ES}_{1-\alpha}(X)$ betragsmäßig die Taktzeit überschreitet, misst hier der Zulässigkeitsbeitrag $\Delta SAZ(X) > 0$ diejenige zusätzliche Ausgleichszeit, welche dem Arbeitsplatz zur als ausreichend angesehenen Risikokompensation durch Umtaktungen hinzugefügt werden muss (vgl. Abbildung 6). Da nur durch die Verschiebung von sicheren Arbeitsgängen, welche für alle Fahrzeuge mit derselben Dauer ausgeführt werden, die Risikostruktur des Arbeitsplatzes unverändert bleibt, muss bei Verschiebung unsicherer Arbeitsgänge der Expected Shortfall neu berechnet werden.

Der Expected Shortfall der Arbeitsplatzzeitverteilung darf also die Taktzeit nicht überschreiten ($-\overline{ES}_{1-\alpha}(X) \leq c$), da sonst die Belegung X als ungewünscht riskant bezüglich der operativen Durchführbarkeit eingeschätzt wird. Gleichwohl erlaubt der Expected Shortfall jedoch, dass einzelne Fahrzeuge die Taktzeit überschreiten können. Der erlaubte Anteil ebendieser Fahrzeuge kann über das Konfidenzniveau α beeinflusst werden: Je kleiner α , desto höher ist das über $\overline{ES}_{1-\alpha}(X)$ gemessene Risiko, desto mehr spreizungsbedingte Ausgleichszeit $SAZ(X)$ muss durch Umtakten von Arbeitsgängen geschaffen werden und desto weniger Fahrzeuge überschreiten die Taktzeit. Für $\alpha = 0\%$ wird das Risiko anhand des arbeitsplatzzeitintensivsten Fahrzeuges eines Arbeitsplatzes gemessen. Dies entspricht dem Falle absoluter Risikoaversion (Min-Max-Kriterium). Für $\alpha = 100\%$ misst $\overline{ES}_{1-\alpha}(X)$ betragsmäßig den Arbeitsplatzzeitdurchschnitt $E(X)$ aller Fahrzeuge (Risikoneutralität); spreizungsbedingte Ausgleichszeiten werden nicht eingeplant.⁸

Der Entscheider akzeptiert – abhängig von seiner Risikoeinstellung – eine mögliche Überlastung zum Zeitpunkt der Reihenfolgeplanung. Diese Überlastungswahrscheinlich-

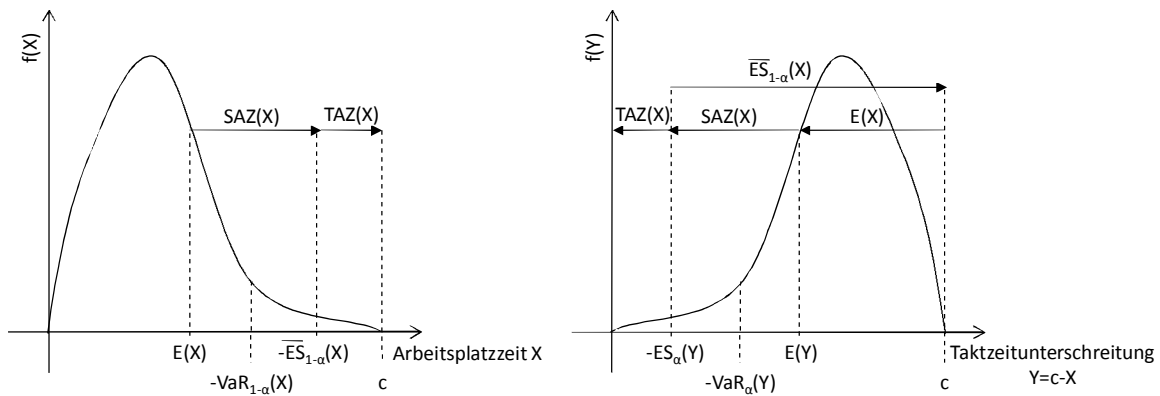


Abbildung 5: Arbeitsplatzzeit- und Taktzeitunterschreitungsverteilung bei einer risikofreien Belegung X

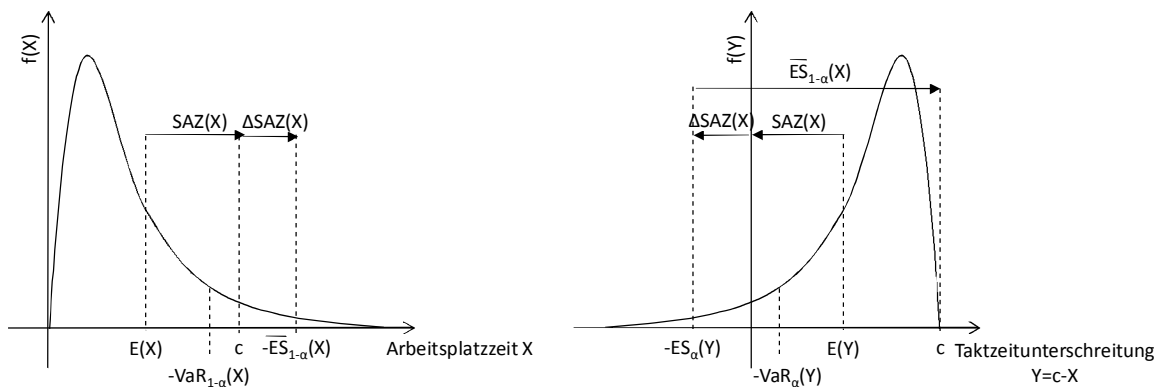


Abbildung 6: Arbeitsplatzzeit- und Taktzeitunterschreitungsverteilung bei einer riskanten Belegung X

⁸ Der Fall der Risikoneutralität entspricht der bisherigen methodischen Unterstützung durch theoretische Modelle zur Fließbandabstimmung wie SALBP-1 (vgl. Abschnitt 2.1).

keit nimmt mit steigendem α (und damit abnehmenden spreizungsbedingten Ausgleichszeiten) zu. Die Differenz zwischen dem Expected Shortfall $-\overline{ES}_{1-\alpha}(X)$ und der durchschnittlichen Arbeitsplatzzeit $E(X)$ stellt dabei als Risikoprämie $RP(X) = -\overline{ES}_{1-\alpha}(X) - E(X)$ denjenigen (durch die Taktung induzierten) spreizungsbedingten Auslastungsabschlag dar, der einen bezüglich der operativen Durchführbarkeit als riskant eingeschätzte Arbeitsplatzbelegung durch Hinzufügen von Ausgleichszeit (d.h. durch Entfernen von Arbeitsgängen) akzeptabel macht (vgl. Abbildung 5). Bei als riskant empfundenen Arbeitsplatzbelegungen ist weniger Ausgleichszeit als für eine als angemessen empfundene Risikokompensation notwendige spreizungsbedingte Ausgleichszeit eingeplant ($\Delta SAZ(X) > 0$; vgl. Abbildung 6).

Im Rahmen der Austaktungsplanung, das heißt bei Zuordnung von Arbeitsgängen zu Arbeitsplätzen, sind bei gegebener Risikoneigung die Arbeitsplatzanzahl zu minimieren und gleichzeitig die operative Durchführbarkeit mit $-\overline{ES}_{1-\alpha}(X) \leq c$ zu garantieren. Da die Arbeitsplatzanzahl von den installierten Leerzeiten der Linienbelegung abhängt, beeinflussen die spreizungsabhängigen Ausgleichszeiten $SAZ(X)$ als Risikokosten und (zusätzliche, darüber hinausgehende) Taktausgleichszeiten $TAZ(X)$ als Ressourcenverschwendungskosten die Produktivitätsberechnung. Dabei können spreizungsbedingte Ausgleichszeiten über eine optimierte Kombination negativ korrelierender Arbeitsgänge und Taktausgleichszeiten über eine bessere Auslastung der Arbeitsplätze, d. h. durch Hinzufügen zusätzlicher Arbeitsgänge, gesenkt werden. Eine schlechte Verteilung der Überlastungsrisiken von Arbeitsgängen führt folglich zu einem höheren Mitarbeiterbedarf.

Durch die lineare Transformation $Y = c - X$ der Arbeitsplatzzeitverteilung $F(X)$ lässt sich die Taktzeitunterschreitungsverteilung $F(Y)$ und das kohärente Risikomaß $ES_\alpha(Y)$ ableiten. $ES_\alpha(Y) = ES_\alpha(c - X) = -\overline{ES}_{1-\alpha}(X) - c$ misst Risiken am linken Verteilungsende von $F(Y)$ und entspricht somit betragsmäßig der durchschnittlichen Taktzeitunterschreitung der $\alpha \cdot 100$ % größten Taktzeitüberschreitungen. Gilt $ES_\alpha(Y) > 0$, so enthält die Arbeitsplatzbelegung zu wenig spreizungsbedingte Ausgleichszeit, so dass der Entscheider die Taktungsalternative als unvereinbar mit seinem Risikoempfinden einstuft (Unzulässigkeit; vgl. Abbildung 6). $ES_\alpha(Y)$ entspricht dann der Differenz zwischen der durch die Arbeitsplatzzeitspreizung induzierten und der tatsächlich eingeplanten Ausgleichszeit ($ES_\alpha(Y) = \Delta SAZ(X)$). Bei $ES_\alpha(Y) < 0$ misst der Expected Shortfall betragsmäßig denjenigen Taktausgleichspuffer $TAZ(X)$, welcher dem Entscheider für eine Erhöhung der Produktivität (durch Einplanung weiterer Arbeitsgänge) noch zur Verfügung steht (mangelnde Ressourcenausnutzung; vgl. Abbildung 5). Im theoretischen Optimum eines Austaktungsproblems werden alle Arbeitsgänge ohne spreizungsbedingte Ausgleichs- oder Taktausgleichszeiten auf die Stationen verteilt. Dann gilt für jede Belegung X : $ES_\alpha(Y) = TAZ(X) = 0$ resp. $-\overline{ES}_{1-\alpha}(X) = E(X) = c$.

Eine detaillierte Beschreibung der Anwendung des Expected Shortfalls auf ein reales Taktungsproblem folgt in Abschnitt 6.3, nach dem wir in der Praxis beobachtbare Risikoneigungen ermittelt haben.

6 Empirische Analyse

6.1 Betrachtungsgegenstand

Die Eignung des Expected Shortfalls als Erklärungsvariable für durch erfahrene Planer festgelegte spreizungsabhängige Ausgleichszeiten wird im Folgenden anhand einer realen Problemstellung bei der Volkswagen AG getestet. Hierbei werden zwei Montagelinien MA und MB hinsichtlich der Wirkung der Arbeitsplatzzeitspreizung auf die eingeplanten Ausgleichszeiten untersucht. Beide Montagelinien sind unterschiedlich konfiguriert.

Während auf Montagelinie MA nur das Produkt PA gefertigt wird, ist Montagelinie MB eine Mehr-Produkt-Linie, auf der neben Produkt PA auch Produkt PB endmontiert wird. Bis dato wurden Auswirkungen der Reihenfolgeplanung nicht im Rahmen der Austaktungsplanung quantitativ antizipiert. Um mögliche schädliche Auswirkungen einer auslastungsmaximalen Austaktungsplanung im operativen Betrieb zu vermeiden, werden zusätzliche spreizungsbedingte Ausgleichszeiten als erfahrungsbasierter Überlastungspuffer intuitiv eingeplant. Im Rahmen der Durchführung zahlreicher Optimierungsworkshops werden diese Puffer arbeitsplatzspezifisch subjektiv adjustiert, wobei Arbeitsplätze mit höherer Arbeitsplatzzeitspreizung tendenziell höhere Ausgleichszeitzuschläge zugewiesen bekommen. Die Anforderungen A1-A6 werden folglich durch eine selbstlernende Organisation des Planungsprozesses implizit eingehalten, jedoch nicht methodisch im Sinne einer gezielten Ermittlung spreizungsbedingter Ausgleichszeiten unterstützt. Diese Quantifizierung soll nun mit Hilfe des Expected Shortfall erfolgen. Gesucht ist dabei diejenige im α -Quantil kodierte Risikoneigung, welche die subjektiven Ausgleichszeitzuschläge der Entscheider am besten erklärt.

6.2 Numerischer Test

Für die empirische Analyse werden 24.000 (MA: 8.000, MB: 16.000) Fahrzeugdatensätze verwendet, welche Ausstattungsoptionen aus 172 disjunkten Konfigurationsklassen mit durchschnittlich je 4,7 Auswahloptionen je Klasse besitzen. Aus der Gesamtanzahl der Arbeitsplätze je Endmontagelinie werden diejenigen entfernt, deren Arbeitsplatzzeit je Fahrzeug nie die Taktzeit überschreiten oder deren eingeplante Ausgleichszeiten technisch oder ergonomisch begründet sind. Der höheren technischen Varianz der Mehr-Produkt-Linie MB geschuldet, verteilen sich die verbleibenden zeitspreizenden Arbeitsplätze nicht gleichmäßig zwischen den beiden Linien (MA: 55, MB: 110). Die Arbeitsplatzzeit eines Arbeitsplatzes ermittelt sich aus durchschnittlich 20 verschiedenen Arbeitsgängen.

Für jeden Arbeitsplatz k wird über die Arbeitsplatzzeitverteilung der Fahrzeuge $\overline{ES}_{k,1-\alpha_i}(X_k)$ und $ES_{k,\alpha_i}(Y_k)$ für eine Reihe an Konfidenzniveaus $\alpha_i = i \cdot 0,5\%$ ($i = 1, 2, \dots, 20$) bestimmt. Die Forschungsnullhypothese H_0 , dass der Entscheider spreizungsbedingte Ausgleichszeiten zum Konfidenzniveau α_i eingeplant hat, kann dann als widerlegt angesehen werden, wenn $ES_{k,\alpha_i}(Y_k)$ signifikant von 0 verschieden ist und somit zu viel oder zu wenig spreizungsbedingte Ausgleichszeit als getestet tatsächlich in der Praxis installiert wurde. Dies wird im Rahmen eines zweiseitigen t-Tests ermittelt.

Wie Tabelle 5 zu entnehmen ist, liefert der zweiseitige t-Test für beide Linien ähnliche Ergebnisse. Bei einem Signifikanzniveau von 5 % kann bei Linie MB H_0 erstmalig

α_i	Linie MA		Linie MB	
	T	Sig. (2-seitig)	T	Sig. (2-seitig)
0,5%	5,378	0,000	5,197	0,000
1,0%	4,965	0,000	4,854	0,000
1,5%	4,686	0,000	4,364	0,000
2,0%	4,646	0,000	4,229	0,000
2,5%	4,474	0,000	4,140	0,000
3,0%	4,873	0,000	3,843	0,000
3,5%	4,647	0,000	3,722	0,000
4,0%	4,167	0,000	3,492	0,001
4,5%	4,032	0,000	3,392	0,001
5,0%	3,991	0,000	3,218	0,002
5,5%	3,797	0,000	3,135	0,002
6,0%	2,810	0,007	3,110	0,002
6,5%	2,706	0,009	2,946	0,004
7,0%	2,622	0,011	2,424	0,017
7,5%	2,516	0,015	2,287	0,024
8,0%	2,424	0,019	2,252	0,026
8,5%	2,129	0,038	2,190	0,03
9,0%	2,055	0,045	2,042	0,044
9,5%	1,578	0,120	1,998	0,048
10,0%	1,527	0,133	1,895	0,06

Tabelle 5: T-Test-Ergebnis für die Nullhypothese $ES_{k,\alpha_i}(Y_k) = 0$ mit 54 (MA) und 109 (MB) Freiheitsgraden

für das ES-Konfidenzniveau 10 % statistisch abgesichert abgelehnt werden. Auf der Linie MA gilt dies für das ES-Konfidenzniveau 9,5 %.⁹

6.3 Anwendbarkeit des Expected Shortfalls

Es konnte gezeigt werden, dass die in den Linien MA und MB eingeplanten Ausgleichszeiten größtenteils spreizungsbedingt sind und über den Expected Shortfall der Arbeitsplatzzeitverteilung zu $\alpha = 9,0\%$ (MA) resp. $\alpha = 9,5\%$ (MB) am besten angenähert werden können. Zum Zeitpunkt der Austaktungsplanung empfinden hier die Entscheider diejenigen Fahrzeuge bzgl. der operativen Durchführbarkeit des Prozesses als zu riskant, deren Arbeitsplatzzeit höher ist als der Durchschnitt der 9,0 % (MA) resp. 9,5 % (MB) arbeitsplatzzeitintensivsten Fahrzeuge.

Die Linienkonfiguration (Ein-Produkt- versus Mehr-Produkt-Linien) wirkt sich erwartungsgemäß nicht auf die Risikoneigung der Entscheider aus: Bei beiden Linien liegen die gemessenen ES-Konfidenzniveaus nur 0,5 Prozentpunkte auseinander. Gleichwohl wirkt sich die höhere technische Varianz von MB gegenüber MA auf eine erhöhte Einplanung spreizungsbedingter Ausgleichszeiten in Höhe von + 22 % aus. Diese lassen sich jedoch vollständig aus der Verteilungsstruktur der Arbeitsplätze und deren Wirkung auf den Expected Shortfall erklären. Somit konnte mit dem Expected Shortfall ein Risikomaß gefunden werden, welches für beide Linien einerseits spreizungsbedingte Ausgleichszeiten erklärt sowie andererseits in Übereinstimmung mit der Risikoneigung der Entscheider das Risiko kontextadäquat misst.

Darüber hinaus löst der Expected Shortfall die im Beispiel von Abschnitt 3.2 gestellte Problemstellung des Vergleichs der Taktungen T1 und T2 korrekt auf. Tabelle 6 zeigt, dass bei einem Konfidenzniveau von $\alpha = 9,5\%$ die Summe der positiven Expected Shortfalls $ES(Y)$ mit 0,84 ZE bei T1 um 0,05 ZE geringer ist als in T2. Ein ES-Entscheider präferiert somit im Gegensatz zu allen im Abschnitt 3.2 getesteten Antizipationsmaßen die weniger riskante Taktung T1.

AP2 stellt für den ES-Entscheider in T1 zugleich einen zulässigen als auch optimalen Arbeitsplatz mit minimaler Leerzeit dar, da die für eine Akzeptanz zusätzlich notwendige spreizungsbedingte Ausgleichszeit $ES(Y_2)$ null Zeiteinheiten beträgt. In T2 ist AP2 weiterhin zulässig, jedoch nicht mehr optimal ($ES(Y_2) < 0$). Er beinhaltet Taktausgleichszeiten in Höhe von $TAZ(Y_2) = -ES(Y_2) = 0,05$ ZE. Weder in T1 noch in T2 stellt AP1 einen für den ES-Entscheider zulässigen Arbeitsplatz dar, da der risikoadjustierte Kapazitätsbedarf inklusive spreizungsbedingter Ausgleichszeiten mit $-ES(X_1) = \tau_1 + RP(X_1) = 10,84$ ZE die Taktzeit überschreitet.

Das Gesamtrisiko aller Arbeitsgänge $ES(Y_1 + Y_2)$, welches durch Umtaktungen nicht reduziert werden kann, entspricht bei einem Wert von 0,84 ZE einer risikoadjustierten Kapazitätsgrenze von 20,84 ZE. Folglich beinhaltet jede Taktung mit nur zwei Arbeitsplätzen bei einer Taktzeit von 10 ZE für den ES-Entscheider unzulässige Belegungen, weil bei zwei Arbeitsplätzen maximal 20 ZE an Kapazität installiert werden kann. Da das in T1 gemessene Risiko dem Gesamtrisiko aller Arbeitsgänge entspricht, stellt T1 die risikominimale Taktung aus zwei Arbeitsplätzen bei einer Taktzeit von 10 ZE dar. Weiter kann Risiko nur durch die Schaffung eines zusätzlichen Arbeitsplatzes reduziert werden.

⁹ Das Testergebnis der Bestätigung der Forschungshypothese H_0 für das ES-Konfidenzniveau 9,0 % für MA (resp. 9,5 % für MB) produziert bei einer Effektdifferenz von 0,06 mit 81,8 % (resp. 81,1 %) die gegenüber kleineren ES-Konfidenzniveaus größte Power. Der Fehler zweiter Art, also dass die Forschungshypothese H_0 für die ES-Konfidenzniveaus 9,0 % für MA und 9,5 % für MB durch den Test bestätigt wird, obwohl diese nicht zutrifft, liegt mit 18,2 % (resp. 18,9 %) für beide Linien unter 20 %. Da die Anzahl an zeitspreizenden Arbeitsplätzen auf den Linien MA und MB aufgrund der Endlichkeit der Montagelinie auf 55 resp. 110 beschränkt ist, lässt sich die Power des t-Tests und somit der Fehler zweiter Art nicht durch Erhöhung des Stichprobenumfangs verbessern.

	AP1			AP2			Gesamt	
	τ_1	$\overline{ES}(X_1)$	$ES(Y_1)$	τ_2	$\overline{ES}(X_2)$	$ES(Y_2)$	$\bar{\tau}$	$\sum_{k \in K} \max(ES(Y_k), 0)$
Taktung T1	8,27 ZE	-10,84 ZE	0,84 ZE	10,00 ZE	-10,00 ZE	0,00 ZE	18,27 ZE	0,84 ZE
Taktung T2	9,18 ZE	-10,89 ZE	0,89 ZE	9,09 ZE	-9,95 ZE	-0,05 ZE	18,27 ZE	0,89 ZE
						Gesamtrisiko $ES(Y_1 + Y_2)$		0,84 ZE

Tabelle 6: Der Expected Shortfall im Beispiel von Abschnitt 3.2

6.4 Einbindung in Entscheidungsmodelle

Der dargestellte Ansatz zur risikoadäquaten Kopplung von Austaktungs- und Reihenfolgeproblem durch den Expected Shortfall lässt sich in bestehende quantitative ALBP-Modelle einfach einbinden, in dem die SALBP-Taktzeitrestriktion $\tau_k \leq c$ (vgl. Baybars 1986) um den Expected Shortfall risikoadjustiert wird. Dabei muss für alle zulässigen Arbeitsplatzbelegungen X_k gelten: $-\overline{ES}_{1-\alpha}(X_k) \leq c$. Je nach Ausprägung und Umfang des Entscheidungsmodells können wesentliche Instrumente der Praxis zur Risikosenkung abhängig vom Konfidenzniveau der Entscheider abgebildet werden (eine detaillierte Übersicht von ALBP-Entscheidungsmodellen enthalten etwa Becker und Scholl (2006) sowie Boysen et al. (2007); zu verbreiteten Risikoinstrumenten siehe z.B. Miller 1992, Kürsten 2008):

1. Durch die Einplanung (spreizungsbedingter) Ausgleichszeiten, welche mit Hilfe des Expected Shortfalls berechnet werden können, kann in riskanten Arbeitsplätzen das Risiko durch Zahlen einer Risikoprämie überwältzt werden. Dies garantiert (im Gegensatz zu bisherigen MALBP-Modellen) die Zulässigkeit der Linienbelegung für einen risikoaversen Entscheider.
2. Ein Zusammenlegen von mehreren Einzel-Platz-Arbeitsplätzen zu einem Mehr-Platz-Arbeitsplatz wirkt *risikoverwässernd*, da die Eintrittswahrscheinlichkeit hoher Taktzeitüberschreitungen gesenkt wird. Durch die Subadditivität des Expected Shortfalls werden in Mehr-Platz-Arbeitsplätzen tendenziell weniger spreizungsbedingte Ausgleichszeiten als in Einzel-Platz-Arbeitsplätzen installiert.
3. Eine Kombination vieler Arbeitsgänge mit teils positiv, teils negativ korrelierenden Ausstattungsoptionen wirkt *diversifizierend*, so dass eine Bündelung von Arbeitsgängen verschiedener Ausstattungen in einem Arbeitsplatz angestrebt wird.
4. Eine Bündelung von Arbeitsgängen in einem Arbeitsplatz, die dieselbe Ausstattung (z.B. Schiebedach) bei verschiedenen Optionen (z.B. manuelles, automatisches Schiebedach) betreffen, kann *Risiko vernichten*, wenn die Zeitbedarfe (nahezu) identisch sind, da die Arbeitsgänge einer Ausstattung für unterschiedliche Optionen negativ korreliert sind (Hedging).
5. Risiko kann *vermieden* werden, in dem die Produktvarianz (d.h. die Anzahl an unterschiedlichen Ausstattungsoptionen je Linie) reduziert wird. Dies kann sowohl durch eine konstruktionsseitige Verringerung der Ausstattungsoptionen je Modell als auch durch das Auftrennen von Mehr-Produkt-Linien in mehrere Ein-Produkt-Linien erreicht werden.
6. Die Auslagerung variantenreicher Modulgruppen an Zulieferer oder an nicht an die Fließfertigung gebundene, losgrößenbasierte Fertigungsabschnitte (z.B. Vormontagebereiche) kann *Risiko reduzieren*.

Während die Maßnahmen 5 und 6 taktisch-strategische Designentscheidungen für das gesamte Produktionssystem darstellen, können die Instrumente 1-4 in der Austaktungsplanung berücksichtigt werden.

7 Fazit

Der dargestellte Ansatz zur antizipativen Kopplung von Austaktungs- und Reihenfolgeproblem ermöglicht erstmalig eine risikoadäquate Messung der Arbeitsplatzzeitspreizung getakteter Endmontagelinien. Im Rahmen des aufgezeigten Risikokontextes wurden Parallelen zwischen der Portfoliotheorie und dem Austaktungsproblem aufgezeigt. Methoden und Werkzeuge der Austaktungsplanung wurden in den Risikomanagementprozess eingeordnet. Das Antizipationsmaß wurde zum Risikomaß weiterentwickelt, dessen Anforderungen hinsichtlich der Abbildbarkeit spreizungsbedingter Ausgleichszeiten als Risikoprämie zur Milderung des Reihenfolgeproblems die Klasse der axiomatisch fundierten kohärenten Risikomaße gerecht wird. Die Theorie kohärenter Risikomaße von Arztner et al. (1999) konnte auf die Produktionsplanung sinnvoll übertragen werden. Nur diese Klasse an Maßen kann mit den in der Praxis vorzufindenden Grundsätzen guten Taktens zur Beherrschung der Variantenvielfalt in Einklang gebracht werden.

Bisherige Ansätze zur antizipativen Planung genügen dieser Anforderung nicht in ausreichendem Maß. Es konnte gezeigt werden, dass bisherige Antizipationsmaße zu Entscheidungen führen können, welche nicht mit der Risikoeinstellung der Entscheider in Übereinstimmung gebracht werden können. Sie sind für die Anwendung in der Praxis daher nicht vorbehaltlos empfehlenswert.

Das in der Portfoliotheorie verbreitete kohärente Risikomaß „Expected Shortfall“ wurde auf Anwendbarkeit als Antizipationsmaß hin überprüft. Als Erwartungswert der Bearbeitungszeiten derjenigen $\alpha \cdot 100$ % zeitintensivsten Fahrzeuge eines Arbeitsplatzes erlaubt es, die individuelle Risikoneigung der Entscheider in ein Antizipationsmaß mit einzubeziehen: Je risikoaverser der Entscheider ist, desto kleiner ist α und desto höher sind die im Rahmen der Austaktungsplanung einzuplanenden spreizungsbedingten Ausgleichszeiten. Der „Expected Shortfall“ der Taktzeitunterschreitungsverteilung misst als Differenz zwischen der durch die Arbeitsplatzzeitspreizung induzierten und der tatsächlich eingeplanten Ausgleichszeit jenen zusätzlichen Ausgleichszeitbetrag, der durch Umtaktungen (sowie ggf. der Installation zusätzlicher Arbeitsplätze) einen bezüglich der operativen Durchführbarkeit als riskant eingeschätzten Taktungsvorschlag akzeptabel macht. Im Rahmen einer empirischen Analyse anhand zweier realer Endmontagelinien in der Automobilindustrie konnte für die Praxis die Eignung des Expected Shortfalls als Erklärungsvariable für durch erfahrene Planer festgelegte spreizungsabhängige Ausgleichszeiten bestätigt werden.

Da einzuplanende spreizungsbedingte Ausgleichszeiten Personalkapazitäten binden, kann die neu vorgeschlagene Methodik Abschätzungen zu Produktivitätskosten der Variantenvielfalt im operativen Betrieb geben, welche auch bei Fragestellungen zur strategischen Beeinflussung der Variantenvielfalt angewendet werden können. So können im Rahmen der Produktdesignphase dem Nutzen zusätzlicher Ausstattungsoptionen die verursachten zusätzlichen Produktivitätskosten gegenübergestellt werden. Auch die Verlagerung variantenreicher Module an Zulieferer oder an nicht an die Fließfertigung gebundene, losgrößenbasierte Fertigungsabschnitte (z.B. Vormontagebereiche) kann Überlastungsrisiko und somit Kosten reduzieren. Darüber hinaus ergeben sich aufgrund steigender Modellvielfalt und der zunehmenden Lokalisierung von Endmontagefabriken im Rahmen der Linienbelegung, d.h. der Zuordnung von Produkten zu Montagelinien, ver-

mehrt Bedarfe zur Berechnung von Komplexitätskosten durch Variantenvielfalt in der Praxis.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Untersuchung der Wirkung zusätzlich installierter Ausgleichszeiten auf die Höhe der Absenkung des vorzuhaltenden Springerpersonals durch eine Reihenfolgesimulation analog Emde et. al (2010).

Anhang A

Es folgt nun eine Auflistung bisher in der Literatur zu findender Antizipationsmaße – klassifiziert nach Emde et al. (2010) und aufbauend auf der Einteilung in horizontale und vertikale Maße nach Merengo et al. (1999). Die Antizipationsmaße der Kategorien A, B und C messen je Arbeitsplatz k Abweichungen der aktuellen Bearbeitungszeit τ_{pk} je Modell p von einem Zielzeitwert. Dieser Zielzeitwert ist in Kategorie A die Taktzeit c , in Kategorie B die durchschnittliche Bearbeitungszeit T_p von Modell p je Arbeitsplatz sowie in Kategorie C die durchschnittliche Arbeitsplatzzeit \bar{T} aller Modelle. Die Antizipationsmaße der Kategorie D messen Abweichungen der *durchschnittlichen* Arbeitsplatzzeit T_k von \bar{T} .

P	Menge an Produkten (Fahrzeugaufträgen) im Vertriebsprogramm (Index p)
K	Menge an Arbeitsplätzen (Index k)
c	Taktzeit
τ_{pk}	Arbeitsplatzzeit von Fahrzeug p in Arbeitsplatz k
b_p	Produktionsanteil von Fahrzeug p im Vertriebsprogramm, mit $\sum_{\forall p} b_p = 1$
T_k	Durchschnittliche Arbeitsplatzzeit von Arbeitsplatz k , mit $T_k = \sum_{\forall p} b_p \cdot \tau_{pk}$
\bar{T}	Durchschnittliche Arbeitsplatzzeit aller Arbeitsplätze, mit $\bar{T} = K ^{-1} \cdot \sum_{\forall k} T_k$
T_p	Durchschnittliche Fertigungszeit von Modell p , mit $T_p = K ^{-1} \sum_{\forall k} \tau_{pk}$

		Horizontale Maße			Vertikale Maße
		Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C	Kategorie D
I. Überschreitung	Ungewichtet	$\sum_{p,k} \max\{0, \tau_{pk} - c\}$ (1)	$\sum_{p,k} \max\{0, \tau_{pk} - T_p\}$ (9)	$\sum_{p,k} \max\{0, \tau_{pk} - \bar{T}\}$ (17)	$\sum_k \max\{0, T_k - \bar{T}\}$ (25)
	Gewichtet	$\sum_{p,k} \max\{0, b_p \cdot (\tau_{pk} - c)\}$ (2)	$\sum_{p,k} \max\{0, b_p \cdot (\tau_{pk} - T_p)\}$ (10)	$\sum_{p,k} \max\{0, b_p \cdot (\tau_{pk} - \bar{T})\}$ (18)	-
II. Manhattan-Distanz	Ungewichtet	$\sum_{p,k} \tau_{pk} - c $ (3)	$\sum_{p,k} \tau_{pk} - T_p $ (11)	$\sum_{p,k} \tau_{pk} - \bar{T} $ (19)	$\sum_k T_k - \bar{T} $ (26)
	Gewichtet	$\sum_{p,k} b_p \cdot \tau_{pk} - c $ (4)	$\sum_{p,k} b_p \cdot \tau_{pk} - T_p $ (12)	$\sum_{p,k} b_p \cdot \tau_{pk} - \bar{T} $ (20)	-
III. Euklidische Distanz	Ungewichtet	$\sqrt{\sum_{p,k} (\tau_{pk} - c)^2}$ (5)	$\sqrt{\sum_{p,k} (\tau_{pk} - T_p)^2}$ (13)	$\sqrt{\sum_{p,k} (\tau_{pk} - \bar{T})^2}$ (21)	$\sqrt{\sum_k (T_k - \bar{T})^2}$ (27)
	Gewichtet	$\sqrt{\sum_{p,k} (b_p \cdot (\tau_{pk} - c))^2}$ (6)	$\sqrt{\sum_{p,k} (b_p \cdot (\tau_{pk} - T_p))^2}$ (14)	$\sqrt{\sum_{p,k} (b_p \cdot (\tau_{pk} - \bar{T}))^2}$ (22)	-
IV. Maximale Abweichung	Ungewichtet	$\max_{p,k} \{ \tau_{pk} - c \}$ (7)	$\max_{p,k} \{ \tau_{pk} - T_p \}$ (15)	$\max_{p,k} \{ \tau_{pk} - \bar{T} \}$ (23)	$\max_k \{ T_k - \bar{T} \}$ (28)
	Gewichtet	$\max_{p,k} \{b_p \cdot \tau_{pk} - c \}$ (8)	$\max_{p,k} \{b_p \cdot \tau_{pk} - T_p \}$ (16)	$\max_{p,k} \{b_p \cdot \tau_{pk} - \bar{T} \}$ (24)	-

Tabelle 7: Klassifikation bisheriger Antizipationsmaße nach Emde et al. (2010)

Anhang B

Im Folgenden wird die Eigenschaft der Kohärenz bisher in der Literatur zu findender Antizipationsmaße analysiert.

Translationsinvarianz

- Die Antizipationsmaße 1 und 2 der Kategorie A sind nicht translationsinvariant: In Antizipationsmaß 1 [2] werden alle Taktzeitüberschreitungen $\max(0; \tau_{pk} - c)$ ungewichtet [mit ihrer Verbauhäufigkeit gewichtet] aufsummiert. Eine Entfernung eines sicheren Arbeitsganges mit einer Prozesszeit von a ZE, welcher für alle Fahrzeuge mit der gleichen Dauer ausgeführt wird, führt ebenso zur Absenkung aller fahrzeugspezifischen Arbeitsplatzzeiten mit $\tau_{pk} > c$ um a ZE. Sofern mehrere Modelle die Taktzeit überschreiten, verringert sich Maß 1 um ein Vielfaches von a . Sofern nicht alle Modelle die Taktzeit überschreiten, verringert sich Maß 2 nur um ein Bruchteil von a . 1 und 2 sind somit nicht translationsinvariant.
- Die Antizipationsmaße 3 – 8 der Kategorie A sind ebenfalls nicht translationsinvariant, da sie nur im trivialen den Wert Null annehmen können: Absolute Abweichungen der Arbeitsplatzzeiten von der Taktzeit können nur dann Null werden, wenn alle Arbeitsplatzzeiten aller Modelle auf allen Arbeitsplätzen der Taktzeit entsprechen. Folglich können nur im trivialen Fall ohne Arbeitsplatzzeitspreizung die Antizipationsmaße 3 – 8 den Wert Null annehmen.
- Die Antizipationsmaße der Kategorie B, C und D sind nicht translationsinvariant: Eine sichere Erhöhung aller Bearbeitungszeiten τ_{pk} um a ZE führt ebenso zur Erhöhung von T_k, T_p und \bar{T} um a ZE. Folglich wird die Erhöhung bei der Differenzenbildung vollständig kompensiert. Die Antizipationsmaße bleiben nach einer Translation unverändert.

Subadditivität

- Die Antizipationsmaße der Metrik I, welche die Abweichungen vom Zielzeitwert in Form von Überschreitungen messen, sind subadditiv: Seien v, w und u reelle Zahlen, so gilt leicht ersichtlich: $\max\{0; (v - u) + (w - u)\} \leq \max\{0; v - u\} + \max\{0; w - u\}$.
- Die Antizipationsmaße der Metrik II, welche Abweichungen vom Zielzeitwert in Form der Manhattan-Distanz messen, sind subadditiv: Seien v, w und u reelle Zahlen, so gilt leicht ersichtlich: $|(v - u) + (w - u)| \leq |v - u| + |w - u|$.
- Die Antizipationsmaße der Metrik III, welche Abweichungen vom Zielzeitwert in Form der Euklidischen Distanz messen, sind nicht subadditiv: Seien v, w und u reelle Zahlen, so gilt $((v - u) + (w - u))^2 = (v - u)^2 + (w - u)^2 + 2 * (v - u) * (w - u) \leq (v - u)^2 + (w - u)^2$ nur dann, wenn $(v - u) * (w - u) < 0$ gilt. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit ist die Euklid'sche Distanzmessung folglich nicht subadditiv.

Die Antizipationsmaße der Metrik IV, welche die maximale Unter- und Überschreitung vom Zielzeitwert über alle Arbeitsplätze messen, sind subadditiv: Es gilt leicht ersichtlich: $\max_{u \in U} \{v_u + w_u\} \leq \max_{u \in U} \{v_u\} + \max_{u \in U} \{w_u\}$.

Positive Homogenität

- Alle Antizipationsmaße sind positiv homogen, da innerhalb der Differenzenbildung sowohl die Arbeitsplatzzeiten als auch die Zielzeitwerte mit demselben Faktor beaufschlagt werden.

Monotonie

- Die Antizipationsmaße der Metrik I, welche die Abweichungen vom Zielzeitwert in Form von Überschreitungen messen, sind monoton: Seien v, w und u reelle Zahlen mit $v < w$, so gilt leicht ersichtlich: $\max\{0; v - u\} \leq \max\{0; w - u\}$.
- Die restlichen Antizipationsmaße, welche Abweichungen vom Zielzeitwert mit Hilfe der Manhattan-Distanz, der Euklidischen Distanz oder über die maximale Unter- bzw. Überschreitung messen, sind nicht monoton. Da auch Unterschreitungen von der Taktzeit, welche kein Risiko im engeren Sinne darstellen, in die Bildung des Antizipationsmaßes einfließen, können auch echt bessere Risikopositionen schlechter eingeschätzt werden.¹⁰

Relevanz

- Die Antizipationsmaße 1 und 2 der Kategorie A sind relevant: Wenn Arbeitsplätze kein Risiko im engeren Sinne darstellen, da ihre Bearbeitungszeiten nicht die Taktzeit überschreiten, nehmen die Antizipationsmaße 1 und 2 den Wert Null an.
- Die restlichen Antizipationsmaße sind nicht relevant. Antizipationsmaße der Kategorien B, C und D messen das Risiko nicht über den relevanten Zielzeitwert Taktzeit. Antizipationsmaße der Metriken II-IV, welche Abweichungen vom Zielzeitwert mit Hilfe der Manhattan-Distanz, der Euklidischen Distanz oder über die maximale Unter- bzw. Überschreitung messen, beziehen auch irrelevante Unterschreitungen von der Taktzeit in die Risikomessung mit ein

¹⁰ Die weit verbreiteten Streuungsmaße Varianz ($\sigma^2(X)$) und Standardabweichung ($\sigma(X)$), welche Abweichungen vom Erwartungswert $E(X)$ messen, sind ebenfalls nicht monoton, da auch hier sowohl Unter- als auch Überschreitungen vom Zielzeitwert in die Bildung der Maße eingehen. Im Kontext des Austaktungsproblems würde ein Entscheider mit Performancemaß $E(X)$ und Risikomaß $\sigma(X)$ ggf. irrationale Entscheidungen treffen.

Literaturverzeichnis

- Acerbi, C.; Nordio, C.; Sirtori, C. (2001): Expected shortfall as a tool for financial risk management. *Quantitative Finance Papers*.
- Acerbi, C.; Tasche, D. (2002): On the coherence of expected shortfall. *Journal of Banking & Finance* 26, 1487-1503.
- Agnetis, A.; Ciancimino, A.; Lucertini, M.; Pizzichella, M. (1995): Balancing flexible lines for car components assembly. *International Journal of Production Research* 33, 333-350.
- Albrecht, P. (2003): Zur Messung von Finanzrisiken. *Mannheimer Manuskripte zu Risikotheorie, Portfolio Management und Versicherungswirtschaft*, Nr. 143.
- Artzner, P.; Delbaen, F.; Eber, J. M.; Heath, D. (1999): Coherent measures of risk. *Mathematical Finance* 9, 203-228.
- Bautista, J.; Cano, A. (2011): Solving mixed model sequencing problem in assembly lines with serial workstations with work overload minimisation and interruption rules. *European Journal of Operational Research* 210/3, 495-513.
- Cano-Belmán, J.; Ríos-Mercado, R.; Bautista, J. (2010): A scatter search based hyper-heuristic for sequencing a mixed-model assembly line. *Journal of Heuristics* 16, 749-770.
- Becker, C.; Scholl, A. (2006): A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168, 694-715.
- Becker, C.; Scholl, A. (2009): Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: Problem definition and effective solution procedure. *European Journal of Operational Research* 199, 359-374.
- Bhattacharjee, T. K.; Sahu, S. (1988): A heuristic approach to general assembly line balancing. *International Journal of Operations & Production Management* 8, 67-77.
- Bokranz, R.; Landau, K. (2006): *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch*. Schäffer-Poeschel.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2007): A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research* 183, 674-693.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2008): Assembly line balancing: Which model to use when?. *International Journal of Production Economics* 111/2, 509-528.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2009a): Production planning of mixed-model assembly lines: Overview and extensions. *Production Planning & Control* 20, 455-471.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2009b): Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research* 192, 349-373.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2009c): Assembly line balancing: Joint precedence graphs under high product variety. *IIE Transactions* 41/3, 183-193.
- Boysen, N.; Kiel, M.; Scholl, A. (2011): Sequencing mixed-model assembly lines to minimise the number of work overload situations. *International Journal of Production Research* 49/16, 4735-4760.
- Culp, M. L. (2001): *The risk management process: business strategy and tactics*. Wiley.
- Decker, M. (1993): Capacity smoothing and sequencing for mixed-model lines. *International journal of production economics* 30, 31-42.
- Domschke, W.; Klein, R.; Scholl, A. (1996): Antizipative Leistungsabstimmung bei moderner Variantenfließfertigung. *Zeitung für Betriebswirtschaft* 66, 1465-1490.
- Eller, R.; Heinrich, M.; Perrot, R.; Reif, M. (2010): *Risikomanagement in Unternehmen*. Kompaktwissen Risikomanagement, 147-153. Springer.
- Emde, S.; Boysen, N.; Scholl, A. (2010): Balancing mixed-model assembly lines: a computational evaluation of objectives to smoothen workload. *International Journal of Production Research* 48, 3173-3191.
- Hanisch, J.; Kürsten, W. (2006): *Risikomessung mit dem Conditional Value-at-Risk*. Verlag Dr. Kovac.
- Herring, R. J. (2002): The Basel 2 approach to bank operational risk: Regulation on the wrong track. *The Journal of Risk Finance* 4, 42-45.
- Kataoka, S. (1963): A Stochastic Programming Model. *Econometrica* 31, 181-196.
- Klindworth, H.; Otto, C.; Scholl, A. (2012): On a learning precedence graph concept for the automotive industry. *European Journal of Operational Research*.
- Kürsten, W. (2008): Risikomanagement, in: *Corsten, H.; Gössinger, R.: Lexikon der Betriebswirtschaft*. 5. Aufl. München. 716-718.
- Kürsten, W.; Brandtner, M. (2009): Kohärente Risikomessung versus individuelle Akzeptanzmengen - Anmerkungen zum impliziten Risikoverständnis des Conditional Value at Risk. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung* 61/6, 358-381.
- Mansini, R.; Ogryczak, W.; Speranza, M. G. (2007): Conditional value at risk and related linear programming models for portfolio optimization. *Annals of Operations Research* 152/1, 661-680.

- Markowitz, H. (1952): Portfolio Selection. *Journal of Finance* 7, 77-91.
- Merengo, C.; Nava, F.; Pozzetti, A. (1999): Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* 37, 2835-2860.
- Miller, K. D. (1992): A framework for integrated risk management in international business. *European Journal of international business studies*, 311-331.
- Ogryczak, W.; Ruszczyński, A. (2002): Dual stochastic dominance and quantile risk measures. *International Transactions in Operational Research* 9/5, 661-680.
- Ohno, T. (1988): *The Toyota Production System: Beyond Large Scale Production*. Portland. Productivity Press.
- Otto, A.; Scholl, A. (2011): Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 212/2, 277-286.
- Pflug, G. C. (2000): Some remarks on the value-at-risk and the conditional value-at-risk. *Probabilistic Constrained Optimization: Methodology and Applications* 38, 272-281.
- Roy, A. D. (1952): Safety First and the Holding of Assets, *Econometrica* 20, 431-449.
- Rudolph, B.; Schäfer, K. (2010): *Derivative Finanzmarktinstrumente: Eine anwendungsbezogene Einführung in Märkte, Strategien und Bewertung*. Springer.
- Scholl, A. (1999): *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*. 2. Aufl., Physica, Heidelberg.
- Scholl, A.; Becker, C. (2006): State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168, 666-693.
- Scholl, A.; Klein, R.; Domschke, W. (1998): Pattern based vocabulary building for effectively sequencing mixed model assembly lines. *Journal of Heuristics* 4/4, 359-381.
- Scholl, A.; Klein, R. (1997): SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing* 9, 319-334.
- Scholl, A.; Klein, R. (1999): Balancing assembly lines effectively - A computational comparison. *European Journal of Operational Research* 114/1, 50-58.
- Schroek, G. (2002): *Risk management and value creation in financial institutions*. Wiley.
- Thomopoulos, N. T. (1970): Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Science* 16, 593-603.
- Wiendahl, H. P.; Hegenscheidt, M. (2006): Verfügbarkeit von Montagesystemen. *Montage in der industriellen Produktion*, 369-406.