

Taktische Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit

Der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der
Universität Paderborn
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Wirtschaftswissenschaften
- Doctor rerum politicarum -
vorgelegte Dissertation
von

Diplom Volkswirt, Dipl.Wirt.Ing (FH) Marcus Westerwald

2018

Inhaltsverzeichnis

1	Karosserieverfügbarkeit	7
1.1	Karosserieverfügbarkeit im Rahmen der automobilen Produktion mit stabiler Auftragsfolge	7
1.2	Taktische Produktionsplanung der Karosserieverfügbarkeit	10
2	Gegenstand und Ziel der Arbeit	12
2.1	Planungsprobleme der Produktion mit stabiler Auftragsfolge	12
2.2	Problemstellung	17
2.3	Stand der Wissenschaft im engeren Zusammenhang	19
2.4	Forschungslücken und Forschungsfragen	23
2.5	Wissenschaftliche Ziele und Erkenntnisgewinn	24
2.6	Vorgehensweise	26
3	Produktionstheoretische Einordnung	28
3.1	System der Karosserieverfügbarkeit	28
3.2	Charakteristika der untersuchten Produktionsstruktur	31
4	Wirkmodell	41
4.1	Grundmodell des Systems der Karosserieverfügbarkeit	41
4.2	Formales Modell des Systems der Karosserieverfügbarkeit	67
4.3	Trace Driven Simulation zur Validierung des Wirkmodells	78
5	Analyse des Wirksystems	87
5.1	Untersuchung der Variantenstruktur	87
5.2	Untersuchung der Positionsverschiebungen	94
5.3	Untersuchung der Sortierkapazität	101
5.4	Untersuchung der Autokorrelation	102
5.5	Untersuchung der gemeinsamen Wirkung von Quer- und Längsstruktur	108
6	Planungsmodelle	113
6.1	Analytische Modelle	113
6.2	Simulationsmodelle	127
7	Zielsystem	140
8	Zusammenfassung und weiterführende Fragestellungen	147
A	Formales Modell	151
B	Test auf Stationarität	154
C	Ein- und Ausschwingphase	159

Abbildungsverzeichnis

1	Das System der Karosserieverfügbarkeit im Kreislauf der Produktionsplanung . . .	8
2	Schema der Produktion mit stabiler Auftragsfolge	9
3	Modell des Zusammenhangs von Planung und Umsetzung	18
4	Systeme im Allgemeinen	29
5	Modellendogener und -exogener Wirkmechanismus	32
6	Charakteristik der untersuchten Produktionsstruktur	35
7	Grafisches Modell zur Darstellung des Wirkprinzips	41
8	Grundstruktur des Fabrikmodells	43
9	Modell gemäß der Beiträge von Inman und Gushikin et.al.	44
10	Theoretische Ergebnisfolgen und Übergänge im Modell	45
11	Karosserieverfügbarkeit im Grundmodell	47
12	Durchlaufzeit einer Karosserie	48
13	Geplante und realisierte Vorlaufzeit eines Auftrags	52
14	Reduzierung der VLZ durch Erhöhung der Stückzahl in der Montage	53
15	Reduzierung der Vorlaufzeit durch Rückstellung von Vorgängeraufträgen	54
16	Veränderung der geplanten Vorlaufzeit durch abweichenden Start in den Karosseriebau	55
17	Unterschiedliche geplante Vorlaufzeiten	56
18	Karosserieverfügbarkeit als Vorlaufzeit-Durchlaufzeit-Vergleich	57
19	Karosserietausch bei variabler Zuordnung von Auftrag und Karosserie	58
20	Sortierbestand dargestellt in einem Fortschrittszahlendiagramm	60
21	Geplanter Karosseriebestand im Sortierer durch Vorproduktion im Karosseriebau	61
22	Zusammenfassung des Wirksystems	65
23	Modell mit zwei Tauschpunkten	66
24	Betrachtung des Systems der Karosserieverfügbarkeit in der Dimension der Positionen	68
25	Darstellung der Karosserieverfügbarkeit in der Dimension der Positionen	73
26	Ermittlung der Karosserieverfügbarkeit mit Hilfe der OPC	76
27	Vergleich der NVK der empirischen und der „Trace Driven“ Ergebnisse	81
28	Zeitreihe der empirischen NVK in 1000er Abschnitten	84
29	Zeitreihe der simulierten NVK in 1000er Abschnitten	85
30	Die Variantenstruktur der Auftragsreihenfolge als Ergebnis aus Produktentstehungs- und Kundenauftragsprozess	90
31	Vergleich der zufälligen und der äquidistanten Reihenfolge	91
32	Vergleich der zufälligen Reihenfolge und der Blockreihenfolge	92
33	Kumulierte Anzahl nicht verfügbarer Karosserien eines Blocks; Aufträge in der eingeplanten Reihenfolge geordnet	93
34	Dynamik in den Positionsverschiebungen - Änderungen in der Wochenstruktur	95
35	Ergebniswirksamkeit des empirischen und des zufälligen Stroms der Positionsverschiebungen im Vergleich	96

36	Vergleich der Anzahl der NVK aus unterschiedlichen Blockverteilungen	98
37	Zusammenhang der Positionsverschiebung mit der Rohbauvariante	99
38	Zusammenhang der Positionsverschiebung mit der Lackvariante	99
39	Vergleich von mit der Karosserievariante abhängigen und unabhängigen Posi- tionsverschiebungen	100
40	Standardabweichung der NVK bei steigender Sortierkapazität, im Modus der Auftrags- und der Variantenproduktion	101
41	Gegenüberstellung der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien mit und ohne Au- tokorrelation der Ergebnisse bei Auftragsproduktion	103
42	Differenzenreihe der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien mit und ohne Auto- korrelation bei Auftragsproduktion	104
43	Anteil der Differenzen an der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien unter Berück- sichtigung der Autokorrelation bei Auftragsproduktion	104
44	Gegenüberstellung der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien mit und ohne Au- tokorrelation der Ergebnisse bei Variantenproduktion	105
45	Differenzenreihe der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien mit und ohne Auto- korrelation bei Variantenproduktion	106
46	Anteil der Differenzen der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien unter Berück- sichtigung der Autokorrelation bei Variantenproduktion	106
47	Anzahl nicht verfügbarer Karosserien im Modus der Variantenproduktion bei veränderter Prioritätenregel	107
48	Anzahl der NVK unter Beibehaltung der Querstruktur und Auflösung der Längs- struktur im Vergleich mit den Trace Driven Ergebnissen	111
49	Bedarf und Angebot erzeugende Ereignisse	117
50	Gegenüberstellung der distanzbasierten NVK und der empirischen NVK	121
51	Upper-Bound der Karosserieverfügbarkeit - Methodenvergleich bei Variantenan- teil 0,1%	122
52	Upper-Bound der Karosserieverfügbarkeit - Methodenvergleich bei Variantenan- teil 0,5%	123
53	Upper-Bound der Karosserieverfügbarkeit - Methodenvergleich bei Variantenan- teil 1%	124
54	Upper-Bound der Karosserieverfügbarkeit - Methodenvergleich bei Variantenan- teil 5%	125
55	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Inman-Methode und der Simulationsergeb- nisse	125
56	Fabrikmodell mit zwei Tauschpunkten	126
57	Ablaufdiagramm I: Ermittlung der Positionsverschiebungen	129
58	Ablaufdiagramm II: Erzeugung der Montage-Start-Reihenfolge	130
59	Anzahl NVK je 1000 Aufträge in den empirischen Ergebnissen	140
60	Aggregation der NVK über einen langen Zeitraum im Vergleich zur Aggregation über einen kurzen Zeitraum	142

61	Montagemodell mit Teilebelieferung in der Sequenz der geplanten Start-Reihenfolge der Montage	143
62	Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge	144
63	Kumulierte Anzahl NVK vs. tägliche NVK	145
64	KPSS-Statistik der simulierten Ergebnisreihe	156
65	KPSS-Statistik der empirischen Ergebnisreihe	156
66	ACF der empirischen NVK bei einer Abschnittsgröße von 50	157
67	ACF der empirischen NVK bei einer Abschnittsgröße von 1000	158
68	Zusammenfassung der Ergebnisse des Dickey-Fuller-Tests	159
69	Gleitende Mittelwerte bei variierender Sortierkapazität und einem Indexbereich von 1000	161
70	Mittelwerte und Varianzen bei einem Indexbereich von 500 Positionen und einer Sortierkapazität von 150	161
71	Mittelwerte und Varianzen bei einem Indexbereich von 100 Positionen und einer Sortierkapazität von 150 und einer Beschränkung auf frühe Werte	162
72	Mittelwerte und Varianzen für einen Indexbereich von 500 Positionen und einer Sortierkapazität von 350	162
73	Mittelwerte und Varianzen für einen Indexbereich von 2500 und einer Sortierkapazität von 600	163
74	Mittelwerte und Varianzen für einen Indexbereich von 1000 und einer Sortierkapazität von 600	163

Tabellenverzeichnis

1	Ziele der Wissenschaft	25
2	Vergleich der Verteilungen der Blocklängen zwischen der empirischen Reihenfolge der PosV und einer zufällig erzeugten Reihenfolge	97
3	Statistik des Modells unter Auflösung der Längsstruktur	111
4	NBS Konstellationen	119
5	Ergebnisse bei Auflösung von Quer- und Längsstruktur	138
6	Histogramm der empirischen NVK in Abschnitten von je 1000 Aufträgen	140
7	Formales Modell	154
8	Kritische Werte der KPSS-Statistik	155
9	Kritische Werte der t-Statistik für das Modell mit Achsenabschnitt und ohne Trend	159

1 Karosserieverfügbarkeit

„Karosserieverfügbarkeit“ bezeichnet das Ergebnis einer Koinzidenzprüfung – und benennt das Erkenntnisobjekt dieser Arbeit im engeren Sinne. Diese Koinzidenzprüfung dient, im Rahmen der automobilen Produktionsplanung und Steuerung, der Klärung, ob für einen Fahrzeugproduktionsauftrag zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort eine dem auftragsgemäßen Bedarf angemessene Karosserie vorhanden ist, oder eben nicht. Wie im Folgenden noch ausgeführt wird, kann diese Prüfung für den weiteren Ablauf der Produktion von so großer Bedeutung sein, dass eine intensive akademische und praktische Auseinandersetzung gerechtfertigt ist. Das „System der Karosserieverfügbarkeit“ bezeichnet den Prozess und dessen Struktur, der ursächlich die Ergebnisse der Prüfung bestimmt, und die Prüfung selbst, und fasst beide zum Erkenntnisobjekt im weiteren Sinne zusammen, dem Gegenstand der Betrachtung, der Untersuchung und des Erkenntnisgewinns.

Diese Arbeit ist im Wesentlichen auf der Idee eines Planungskreislaufs aufgebaut, der das System der Karosserieverfügbarkeit zum Gegenstand hat, wie er in Abbildung 1 gezeigt ist. Der zentrale Vorgang in der Planung ist demnach die Modellbildung. In dieser Arbeit stehen zwei Modelltypen im Vordergrund, das Wirk- oder Erklärungsmodell und das Planungsmodell. Fundament und Ausgangspunkt jeder Planung ist ein Wirkmodell, welches die Zusammenhänge im zu planenden System zutreffend beschreibt. Mit einem validen Wirkmodell als Basis kann ein Planungsmodell aufgebaut werden, in dem Planungsvarianten erzeugt und bewertet werden. In diese Planungsmodelle gehen Daten ein, die für den zu planenden Zustand des Systems erwartet werden. Die Planungsmodelle wiederum liefern Planungsergebnisse, die ihrerseits zur Gestaltung des Systems der Karosserieverfügbarkeit herangezogen werden und zu veränderten beziehungsweise neuen Daten der Produktion führen. Bei allen diesen Aktivitäten ist das Zielsystem zu berücksichtigen, welches die geforderte Qualität der Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit in Gegenwart und Zukunft definiert. Dieses Zielsystem muss sowohl im realen System, als auch im Wirk- und Planungsmodell entsprechend Niederschlag finden. In dieser Art idealisiert ist der Planungsprozess ein iterativer Vorgang, dessen Ergebnisse wiederum die Eingangsdaten für den nächsten eigenen Prozessdurchlauf liefern oder zumindest beeinflussen.

1.1 Karosserieverfügbarkeit im Rahmen der automobilen Produktion mit stabiler Auftragsfolge

Fahrzeughersteller bewegen sich in einem Spannungsfeld aus Flexibilitätsansprüchen und Flexibilitätskosten, welches seinen Ausdruck unter anderem in dem steigenden Anspruch an die logistische Servicequalität findet.¹Die Zunahme der Angebotskomplexität ist ein wichtiges Phänomen in diesem Zusammenhang. Produktseitig drückt sich dieses aus in einer Zunahme der Fahrzeugvarietät, die sich zum einen an einer Zunahme der Programmbreite, zum anderen an einer Zunahme der Programmtiefe zeigt, es werden also mehr Fahrzeugtypen und je Typ mehr Varianten angeboten. Neben der Varietät nimmt die Dynamik der Lebenszyklen von Typen, Varianten und Technologien zu.²Neben der Angebotskomplexität steigt auch der Anspruch an die

¹Vgl. Meißner (2009), S.1ff.

²Vgl. Reichhuber (2010), S.48ff.

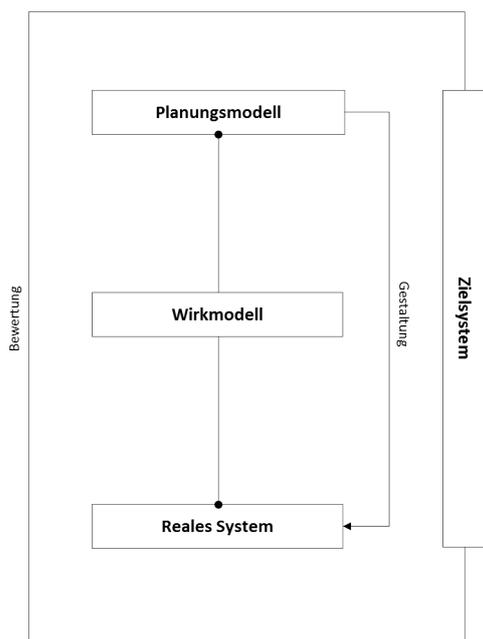


Abbildung 1: Das System der Karosserieverfügbarkeit im Kreislauf der Produktionsplanung

Reaktionsfähigkeit auf Änderungen konkreter Kundenwünsche. Änderungen der vom Kunden vorgenommenen Konfiguration eines Auftrags sollten möglichst kurzfristig noch berücksichtigt werden können. Gleichzeitig werden kurze Lieferzeiten und verbindlich vereinbarte und eingehaltene Liefertermine als Differenzierungsmerkmal im Wettbewerb wahrgenommen, neben den klassischen Wettbewerbsfaktoren wie Preis und Qualität.³

Die Produktion mit stabiler Auftragsfolge ist Bestandteil eines Logistikkonzepts, dessen Ziel es ist, bei kurzen Lieferzeiten und hoher Reaktionsfähigkeit bezüglich der Kundenwünsche eine variantenreiche Produktion stabil und effizient zu betreiben. Sie ist ein logistischer Ansatz, Flexibilität gegenüber den Absatzmärkten bei gleichzeitiger Stabilität in der Produktion zu ermöglichen. Das Spannungsfeld aus Flexibilität und Stabilität manifestiert sich in der Festbeschreibung eines Teils der Auftragsstrecke, in der sogenannten „Frozen Zone“.⁴ Die Funktionsweise der Produktion mit stabiler Auftragsfolge und ihre koordinierende Funktion wird anhand der Abbildung 2 erläutert. Die Abbildung zeigt schematisch, wie das Produktionssystem mit Fokus auf die Produktion mit stabiler Auftragsfolge in den Prozess von Auftragsannahme bis Fahrzeugübergabe eingebunden ist. Im Rahmen der Auftragseinplanung werden aus Kundenaufträgen die Produktionsaufträge erzeugt, die Inhalte der Aufträge werden festgeschrieben. Die Produktionsaufträge werden sequenziert und die geplante Auftragsreihenfolge wird in der Weite der Frozen Zone festgelegt. Die Auftragseinplanung ist ein rollierender Planungsprozess, der der bestehenden geplanten Auftragsreihenfolge neu eingeplante Aufträge hinzufügt. Durch Fertigstellung in der Produktion werden Aufträge aus der geplanten Auftragsreihenfolge entfernt. Zyklische Neueinplanung und Fertigstellung halten die Länge der Auftragskette stabil. Die Festbeschreibung von Inhalt und Reihenfolge und die möglichst genaue Einhaltung der geplan-

³Vgl. zur Bedeutung der Liefertreue im „Kunde zu Kunde“ Prozess bei der Volkswagen AG beispielhaft Herold (2005), S.15ff.

⁴Vgl. Klug (2010), S.391ff.

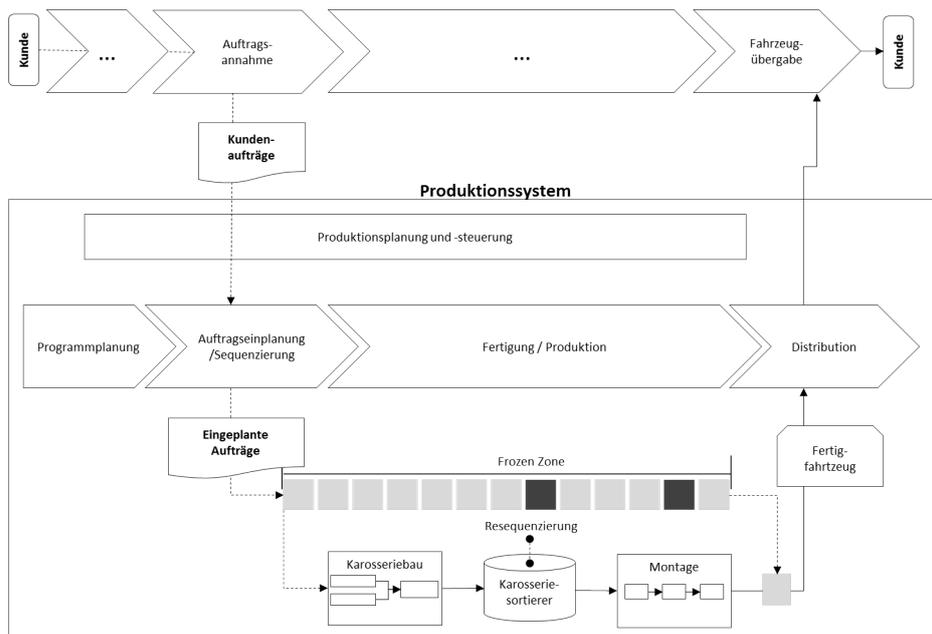


Abbildung 2: Schema der Produktion mit stabiler Auftragsfolge

ten Termine erzeugen Stabilität in der Produktion im Sinne von Planungssicherheit. In dieser Art Stabilität für die Produktion zu schaffen bedeutet im Umkehrschluss, die Flexibilität in Bezug auf die Wünsche des Kunden einzuschränken. Konkret heißt dies, in der Frozen Zone kann der Kunde seinen Auftrag nicht mehr ändern. Es ist deshalb wichtig, in dieser Trade-Off-Situation über die Weite der Frozen Zone den richtigen Kompromiss zwischen Produktionsstabilität und Kundenflexibilität zu definieren. Nichts desto trotz verlangt dieses Konzept noch ein hohes Maß an Flexibilität in den Prozessketten. Bevor die Frozen Zone beginnt, muss die gesamte Produktvarietät handhabbar sein. Dies impliziert also die Integration verschiedener Flexibilitätskonzepte, vor allem in der Teilebelieferung.

Auf Basis der Informationen aus der geplanten Auftragsreihenfolge können Materialbelieferungsprozesse gesteuert werden. Sie fungiert als zeitlicher Informationsvorlauf der später am Verbauort realisierten Materialbedarfe. Je nach Supply Chain Konzept können unterschiedlich große Teile des Wiederbeschaffungsprozesses innerhalb der Frozen Zone abgewickelt werden. Beispielsweise könnte eine Produktion in Plansequenz erfolgen und die Lieferung in produzierter Sequenz direkt an das Montageband stattfinden (i.e. Just in Sequence).

Im Prozess des Karosseriebaus werden die Karosserien entsprechend der geplanten Auftragssequenz aufgebaut. Durchlaufzeitschwankungen in der Karosserieproduktion werden in Entkopplungspuffern, beziehungsweise Karosseriesortierern, kompensiert. Im Prozess der Resequenzierung wird die finale Auftragssequenz festgelegt. Wenn ein Auftrag dann in die Montage geschickt werden soll, wird die entsprechende Karosserie im Sortierer abgerufen, die entsprechenden Teile stehen an ihrem jeweiligen Verbauort für die Montage bereit.

Im Rahmen der Produktion mit stabiler Auftragsfolge nimmt die Karosserieverfügbarkeit eine besondere Rolle ein. Damit die Produktion mit stabiler Auftragsfolge ihre angestrebte Wirkung entfalten kann, muss diese verlässlich in der definierten Qualität umgesetzt werden. Im Prozess

der Resequenzierung wird die finale Auftragsreihenfolge für den Start der Montage festgelegt. Hier bestimmt sich demnach die Qualität der Umsetzung der geplanten Auftragsfolge. Es wird in diesem Prozessschritt anhand verschiedener Kriterien geprüft, ob ein eingeplanter Auftrag gemäß geplanter Auftragsreihenfolge in die Montage gesendet werden kann. Besonders wichtige Kriterien sind:

- die Verfügbarkeit aller kritischen Materialien
- die Verfügbarkeit der Karosserie.

Ohne eine verfügbare Karosserie kann ein Auftrag nicht in die Montage gesendet werden, die Karosserieverfügbarkeit bestimmt also die grundsätzliche Machbarkeit. Alle weiteren Kriterien, wie beispielsweise Reihenfolgeentscheidungen, können als nachgelagerte Kriterien betrachtet werden.

1.2 Taktische Produktionsplanung der Karosserieverfügbarkeit

Planung kann als ein Prozess aufgefasst werden, der dazu dient, Lösungen für Entscheidungsprobleme zu finden, die darin bestehen, dass derzeitige oder erwartete Zustände von einem angestrebten Zustand abweichen. Dabei sieht sich der Planende mit einer bestimmten Ausgangssituation oder einer Entwicklung des betrachteten Systems konfrontiert, was gleichsam seine Planungsprämissen darstellt. Eine Zielsetzung charakterisiert den angestrebten Zustand. Es sind Handlungsalternativen zu entwerfen, die auf beeinflussbare Tatbestände einwirken, die in einem Wirkungszusammenhang stehen, bestimmte Handlungsergebnisse hervorbringen und vor dem Hintergrund der Zielsetzung zu bewerten sind.⁵

„[...] Produktionsplanung umfasst dabei jene Phasen, in deren Mittelpunkt die systematische Suche und Festlegung der gegenwärtigen Handlungsmöglichkeiten steht, um die zukünftigen Zustände im Produktionsbereich festzulegen. Sie entspricht dem Willensbildungsprozess. [...] Steuerung ist die Willensdurchsetzung der gedanklichen Ordnung, des Plans, in die Realität. [...] Da aber Abweichungen eher die Regel als die Ausnahme sind, müssen Kontroll- und Sicherungsmaßnahmen vorgesehen werden.“⁶ Der zitierte Zusammenhang von Planung, Steuerung und Kontrolle beschreibt treffend die Problemstellung des operativen Systems der Karosserieverfügbarkeit: ausgehend von einer geplanten Auftragsreihenfolge für die Montage und gegebenenfalls weiterer Reihenfolgeaspekte in der Produktion die Einplanung der Produktionstermine der zugehörigen Karosserien und die Steuerung der Abläufe, um diese Karosserien für die entsprechenden Aufträge durch Planung und Steuerung verfügbar zu machen, sowie die Kontrolle des Erfolgs.

Die operative Aufgabe, die Verfügbarkeit einer Karosserie sicherzustellen, soll deshalb im Folgenden als Aufgabe der Produktionsplanung und Steuerung (PPS) verstanden werden.

In Abgrenzung zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS), die Teil der operativen Perspektive auf die Produktion ist, kann man mit dem Begriff der Produktionsplanung die mittel- und

⁵Vgl. Arnold et.al. (2008), S.35.

⁶Zäpfel, Günther in Kern et.al. (1996), S.1391.

langfristigen gestalterischen Maßnahmen in Bezug auf die Produktion differenzieren. Zäpfel unterscheidet hier die strategische und die taktische Perspektive, wobei erstere dem Zweck dient, eine wettbewerbsfähige Produktion zu schaffen und zu erhalten. Zur taktischen Produktionsplanung zählt er die Gestaltung der Produktionsorganisation, der Betriebsmittelkapazitäten, des Personaleinsatzes und Maßnahmen zu den Produkten selbst.⁷ Wenn es im Rahmen dieser Arbeit inhaltlich um die Gestaltung der Struktur des Systems der Karosserieverfügbarkeit geht, dann handelt es sich im dargelegten Sinne um eine taktische Fragestellung der Produktionsplanung, dazu gehören unter anderem Überlegungen zu der möglichen Anzahl der Karosserievarianten, der Kapazität des Karosseriesortierers und den Planungs- und Steuerungsalgorithmen; zusammengefasst alle Maßnahmen, die die Struktur des Systems betreffen, in der der operative Betrieb stattfindet.

Robuste Produktionsplanung und Sensitivität

Planungsaktivitäten führen zwangsläufig zu einer Auseinandersetzung mit den Phänomenen der „Unsicherheit“ und der „Robustheit“. Unsicherheit in den Informationen über zukünftige Zustände und die Robustheit des Systems werden entweder explizit im Planungsprozess berücksichtigt, oder nicht, was einer impliziten Annahme oder Unterstellung von sicheren zukünftigen Zuständen entspricht. Bezüglich der Unsicherheit können verschiedene Arten unterschieden werden. Jahnke differenziert zwei Formen der Unsicherheit aus statistischer Perspektive: strukturelle Unsicherheit und informatorische Unsicherheit. Strukturelle Unsicherheit liegt vor, wenn bestimmte Sachverhalte als Zufallsvariable abzubilden sind, und wenn alle notwendigen Informationen zur Bestimmung der Verteilung der Zufallsvariablen bekannt sind. Informatorische Unsicherheit unterscheidet sich hierzu darin, dass Informationen über die Verteilungen der Zufallsvariablen fehlen, diese also geschätzt oder angenommen werden müssen.⁸ Die Frage nach Ursprung und Regelmäßigkeit von Störungen, die zu Unsicherheit über zukünftige Informationen führen, erlaubt weitere sinnvolle Differenzierungen. Liegt die Quelle der Unsicherheit im Unternehmen, kann man von interner Unsicherheit sprechen, liegt sie außerhalb des Unternehmens, dementsprechend von externer Unsicherheit. Bezüglich der Regelmäßigkeit kann man jene Störungen klassifizieren nach regelmäßigen, periodischen und einmaligen Störungen.⁹

Die Sensitivität oder Kondition eines Planungsproblems spielt in Verbindung mit der Unsicherheit auch eine wichtige Rolle. In der Numerik beschreiben diese Begriffe synonym die Empfindlichkeit der Resultate eines Problems gegenüber Schwankungen in den Eingangsdaten.¹⁰ Diese Definition wird in dieser Arbeit auf Planungsprobleme im Allgemeinen angewendet.

Wie empfindlich die Erreichung der für einen Prozess gesetzten Ziele auf die Schwankung der Prozessergebnisse reagiert, ist eine weiterführende Frage. Der Begriff, mit dem in dieser Arbeit die Fähigkeit eines Produktionssystems benannt wird, geforderte Ergebnisse zu erzeugen, obwohl die Eingangsdaten Schwankungen unterliegen, ist der Begriff der „Robustheit“. Scholl definiert in Bezug auf die Planung die Robustheit als die Eigenschaft eines Plans, auch bei sich ändernden

⁷Vgl. ebd., S.1394.

⁸Vgl. Jahnke (1995), S.19ff.

⁹Vgl. Gebhard (2009), S.40ff.

¹⁰Vgl. Bungartz et.al.(2009), S.50.

Umwelteinflüssen zu guten oder zumindest akzeptablen Ergebnissen zu führen.¹¹ Diese Definition wird für diese Arbeit sinngemäß auch auf andere Objekte übertragen, wie beispielsweise das reale Produktionssystem oder das modellierte Produktionssystem eines Planungsmodells. „Unsicherheit“ und „Robustheit“ sind im Produktionsplanungsprozess gemeinsam zu gestalten und zu berücksichtigen: die Unsicherheit drückt aus, dass zukünftige Eingangsdaten nur bis zu einem gewissen Grad determiniert sind, also mit einer bekannten oder unbekanntem Verteilung schwanken können. Ferner kann es im Betrieb zu Störungen kommen, die in Ihrer Art oder Intensität planerisch bis zu einem bestimmten Grad berücksichtigt wurden und ebenfalls zu Schwankungen in den Eingangsdaten führen. Die Robustheit ist dann ein Ausdruck dafür, wie das System in Hinsicht auf die Zielerreichung auf diese Schwankungen reagiert, seien diese planerisch berücksichtigt oder nicht. Dieser Zusammenhang erhält eine weitere Dimension durch die Art und Weise, wie restriktiv die Einhaltung der Ziele gefordert wird. Der qualitative Zusammenhang ist, dass je restriktiver die Ziele einzuhalten sind, desto robuster muss das System ausgelegt werden.

Das Ziel, eine bestimmte Prozessqualität in der geforderten Zuverlässigkeit zu erreichen, ist mit dem ökonomischen Prinzip in Einklang zu bringen. Hiernach ist entweder ein gegebenes Ziel mit minimalen Mitteln oder mit gegebenen Mitteln das Maximale zu erreichen.¹² Da Robustheit im System im Allgemeinen mit Kosten verbunden ist, beispielsweise durch Installation von Prozesspuffern, ist bei gegebenem Ziel der Prozessqualität, die Lösung, maximale Robustheit zu erzeugen, nicht im Einklang mit dem ökonomischen Prinzip. Die Herausforderung in der Produktionsplanung ist es, für ein gegebenes Ziel der Prozessqualität die Prozessstruktur mit geringst möglichem Mitteleinsatz zu gestalten. Je größer die Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Eingangsdaten ist und je größer die Sensitivität ist gegenüber Schwankungen in den Eingangsdaten, desto herausfordernder wird dieses Vorhaben.

2 Gegenstand und Ziel der Arbeit

Es wird zunächst ein Überblick über wesentliche Planungsaufgaben im Bereich der Produktion mit stabiler Auftragsfolge gegeben. In diesen Kontext wird das Problem der Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit eingeordnet, bevor der Stand der Wissenschaft im engeren Sinne dargestellt wird.

2.1 Planungsprobleme der Produktion mit stabiler Auftragsfolge

Boysen et.al. fassen Aufgaben der Produktionsplanung bezogen auf eine Produktion im Modus der Variantenfließfertigung zusammen und ordnen diese in einem Modell als hierarchisches Planungssystem.¹³ Dieses Modell beinhaltet sowohl Aufgaben der operativen Planung, nämlich die *Programmplanung*, die *Sequenzierung* (Einplanung) und die *Resequenzierung*,¹⁴ als auch

¹¹Vgl. Scholl, Armin: Robuste Planung und Optimierung: Grundlagen - Konzepte und Methoden - Experimentelle Untersuchungen. 1. Auflage. Physica-Verlag, 2001, S.93 in Gebhard (2009), S.34.

¹²Vgl. Weber; Kabst (2009), S.4.

¹³Vgl. zur Variantenfließfertigung Abschnitt 3.2.

¹⁴siehe auch Abbildung 2.

die Aufgabe der *Fließbandabstimmung*, die je nach Art und Umfang im Bereich der taktischen oder der operativen Produktionsplanung angesiedelt sein können.¹⁵ Dörmer et.al. fokussieren sich auf ein weiteres Planungsproblem, das *Master Production Scheduling*, welches zeitlich vor der Einplanung (dort: „Production Sequencing“) anzuordnen ist.¹⁶

Die Fließbandabstimmung bezieht sich auf ein flussorientiertes Produktionssystem, in dem die Arbeitsstationen nacheinander angeordnet sind und die Werkstücke mittels eines Transportsystems von Arbeitsstation zu Arbeitsstation transportiert werden. Dieses Planungsproblem beinhaltet nach Boysen et.al. allgemein: „Configuration planning generally comprises all tasks and decisions which are related to equipping and aligning the productive units for a given production process, before the actual assembly can start“.¹⁷ Die Zuordnung der Arbeitsinhalte zu den Arbeitsstationen erfolgt dabei unter verschiedenen Restriktionen, beispielsweise aus der vorgegebenen Folge der Arbeitsvorgänge, die sich aus dem Vorranggraphen ergibt.¹⁸

Die Fließbandabstimmung ist ein Planungsproblem, welches in der wissenschaftlichen Literatur große Beachtung gefunden hat, die zahlreichen Modelle behandeln Spezialfälle des hier kurz beschriebenen allgemeinen Basisfalls. Differenzierungskriterien sind beispielsweise die

- Produktvarianz (homogenes Produkt vs. variantenreiches Produkt)
- Stabilität der Taktzeit (konstante Taktzeit vs. variierende Taktzeit)
- Zuordnungsrestriktionen aus dem Vorranggraphen und aus anderen Quellen
- Möglichkeit für Prozessalternativen für die einzelnen Arbeitsinhalte.¹⁹

Eine Klassifizierung der Beiträge, der Modelle und Lösungsansätze zu dem Problem des „Assembly Line Balancing“ nehmen Boysen et.al. (2007b) für Assembly Line Balancing Probleme (ALB) im Allgemeinen sowie Becker und Scholl (2006a) für das Generalized Assembly Line Balancing (GALB) vor. Bei Becker und Scholl (2006b) findet sich eine Zusammenstellung exakter und heuristischer Lösungsverfahren für die Aufgabe des Simple Assembly Line Balancing (SALB). Auf die genannten Beiträge sei für weiterführende Details verwiesen.

Die Aktivität der „Rekonfiguration“ findet, im Gegensatz zur Fließbandabstimmung, in Verbindung mit der Produktionsprogrammplanung statt, liegt im Bereich der operativen Planung und erfolgt somit quasi im laufenden Betrieb.²⁰ Ein entscheidungsunterstützendes Verfahren zur Lösung des komplexen Planungsproblems der Rekonfiguration stellen Altmeier et.al. vor. Die Autoren zeigen den Trade Off auf, zwischen möglicher Kostenreduktion durch „re-balancing“ und Kosten der Rekonfigurationen. „Re-balancing“ bezieht sich hier auf die Umverteilung von Arbeitsinhalten zwischen den Stationen. Das von den Autoren vorgeschlagene Lösungsverfahren soll Entscheidungen in dieser Trade Off Situation unterstützen.²¹

Aus Perspektive der zeitlichen Folge der Planungsaufgaben folgt auf die Fließbandabstimmung

¹⁵Vgl. Boysen et.al. (2007a), S.769.

¹⁶Vgl. Dörmer et.al. (2015).

¹⁷Boysen et.al. (2007b), S.675.

¹⁸Vgl. Becker, Scholl (2006), S.695.

¹⁹Vgl. Boysen et.al. (2007b), S.677 und Becker, Scholl (2006a), S.695ff und (2006b), S.667.

²⁰Vgl. Boysen et.al. (2007a), S.671ff.

²¹Vgl. Altmeier et.al.(2010).

die Produktionsprogrammplanung. Im Zuge der Produktionsprogrammplanung werden Aufträge auf Wochen, Tage und Schichten verteilt. Dies geschieht in der Regel nicht in einem Planungsschritt, sondern in einer hierarchischen und sukzessiven Folge von Planungsvorgängen.²² Ziele der Programmplanung sind beispielsweise die Einhaltung der (vereinbarten) Kundentermine zur Auslieferung der Fahrzeuge und die Einhaltung bestimmter Kapazitätsgrenzen für bestimmte Varianten.²³ Boysen et.al. (2007a) zeigen ein Modell, welches darauf abzielt, die Kosten, die durch eine Abweichung vom avisierten Fertigstellungstermin entstehen, zu minimieren.

Die Planungsaufgabe des Master Production Scheduling (MPS) beinhaltet die Zuordnung von Produktionsaufträgen zu Produktionszeiträumen, in einem kurzfristigen Planungshorizont von wenigen Tagen oder Schichten vor Start der Produktion der Aufträge. Dabei wird die Planung im Hinblick auf die Restriktionen der nächsten Planungsebene, der Einplanung, vollzogen: „Hence in order to guarantee feasible production sequences with high performance, the MPS at the top level has to anticipate the characteristics and capacities of the assembly line as well as the employed sequencing rules in a thoughtful way.“²⁴ In der Regel findet auf Basis des Master Production Scheduling im Rahmen des Prozesses der Auftragsplanung die Sequenzierung der Aufträge für die Produktionsgewerke statt.

Boysen et.al. (2009) führen aus, dass es für das Problem der Auftragssequenzierung im Wesentlichen zwei zentrale Zielstellungen gibt:

1. Die Vermeidung der Überlastung an einer Arbeitsstation, beziehungsweise die gleichmäßige Auslastung der Arbeitsstationen im zeitlichen Verlauf.
2. Just-in-Time-Ziele, beziehungsweise die Erzeugung zeitlich möglichst gleichmäßig verteilter Materialbedarfe.

Diese beiden Hauptziele werden in der Literatur in den folgenden drei Sequenzierungsansätzen verfolgt:

1. Mixed-model Sequencing: Berücksichtigung detaillierter Informationen wie Dauer der Arbeitsvorgänge, Bewegung der Arbeiter, Stationsgrenzen und Berechnung einer möglichst optimalen Sequenz.
2. Car sequencing: Formulierung von Sequenzierungsregeln, die, sofern sie eingehalten werden, die Überlastung reduzieren sollen (Beispielsweise wäre nur für jeden dritten Auftrag ein Schiebedach zugelassen) und Berechnung einer Sequenz, die diese Regeln so weit wie möglich einhält.
3. Level scheduling: Ideale Produktionsraten der Teile werden ermittelt, beziehungsweise festgelegt und die Sequenz wird dergestalt aufgebaut, dass die Abweichung zwischen der erreichten Produktionsrate und den idealen Produktionsraten möglichst gering ist.

Einen Überblick über zahlreiche Ansätze der oben genannten drei Kategorien bieten Boysen et.al. (2009), für weitere Details sei auf diesen Beitrag verwiesen.

²²Vgl. Decker (1993), S.19.

²³Vgl. ebd., S.7.

²⁴Dörmer et.al. (2015), S.7.

Resequenzierung benennt den Schritt im Prozess, in dem die tatsächliche Reihenfolge für den Start in die Montage festgelegt wird. Es findet hier die endgültige Zuordnung von Auftrag und Karosserie statt. Dieser Prozessschritt ist notwendig, weil es im Laufe des Produktionsprozesses zahlreiche Einflüsse gibt, die dazu führen können, dass die ursprünglich für die Montage geplante Reihenfolge nicht umgesetzt werden kann. Boysen et.al. schreiben: „However, in real-world, the sequence of cars in each department can not be arbitrarily changed but depends on the sequence in previous departments and disturbances like machine breakdowns, rush orders, or material shortages. Therefore, in reality the sequencing problem often turns into a resequencing problem.“²⁵

Beiträge zum Resequenzierungsproblem finden sich bei Franz et.al. (2014) und (2015). Sie beschreiben den praktischen Zusammenhang zwischen Planungsprozess (Master Program Scheduling, Sequencing) und der operativen Steuerung. Im Rahmen der operativen Steuerung muss in einem dynamischen Umfeld, unter Zeitdruck situationsadäquat die Entscheidung getroffen werden, welche Aufträge in welcher Reihenfolge in die Montage gestartet werden. Damit legt die operative Steuerung die tatsächliche Montagesequenz als Ergebnis der Resequencing-Aufgabe fest. Aufträge in der ursprünglich geplanten Montagesequenz können aus mannigfachen Gründen gesperrt, beziehungsweise „geblockt“ sein.²⁶ Beispiele hierfür sind eine fehlende Karosserie im Karosseriesortierer und fehlende kritische Teile, ohne die eine Montage nicht stattfinden kann. Wird ein Auftrag geblockt, kann er nicht in die Montage gesendet werden und wird damit verzögert. Sobald die Ursache für die Sperre nicht mehr besteht, kann die Sperre entfernt werden und es stellt sich die Frage, wann der entsperrte Auftrag in die Montage gesendet werden soll. Die Autoren stellen statische Ansätze zur Minimierung der Überlastung an den betrachteten Arbeitsstationen vor und vergleichen diese. Statisch heißt in diesem Zusammenhang, dass ein Ausschnitt aus der gesamten geplanten Montagesequenz betrachtet wird, und eine bestimmte Menge zusätzlicher Aufträge in jenen betrachteten Sequenzabschnitt einzuarbeiten ist.²⁷

Zunächst wird mittels „Sequential Insertion“ eine gültige Ausgangslösung erzeugt. Diese Ausgangslösung wird mittels vier Meta-Heuristiken verbessert. Die erste ist ein Simulated Annealing Ansatz (SA), die zweite und dritte (VNS & VTS) basieren auf Variable Neighbourhood Search und Tabu Search Verfahren, mit jeweils unterschiedlichen Schwerpunkten. Die vierte verwendet für eine geringe Anzahl einzuordnender Aufträge den VTS-, und für eine größere Anzahl den VNS-Ansatz (VTS+).²⁸ Ein Vergleich mit der optimalen Lösung zeigt, dass der VTS+ Ansatz die besten Ergebnisse erzeugt.²⁹

Franz et.al. (2015) erweitern diesen statischen Ansatz, um eine dynamische Betrachtung zu ermöglichen. Dabei können Soll-Termine der Aufträge berücksichtigt werden, so dass Aufträge in einem bestimmten zeitlichen Rahmen auf die Resequenzierung warten, um weitere Optimierungspotenziale zu realisieren (Wait). Außerdem kann die bereits geplante Sequenz zum Zwecke weiterer Optimierung umgeplant werden (Replanning). Sie zeigen, dass eine Anwendung des Replanning in der Testumgebung durchgehend positive Effekte hat, die Anwendung von Wait

²⁵Boysen (2010), S.1.

²⁶Anmerkung: in dieser Arbeit wird von „zurückgestellten Aufträgen“ gesprochen.

²⁷Vgl. Franz et.al.(2014), S.5826.

²⁸Vgl. ebd., S.5833ff.

²⁹Vgl. ebd., S.5838ff.

in Abhängigkeit vom Szenario vorteilhaft sein kann.

Einen anderen Fokus setzen Gujjula und Günther. Die Autoren stellen einen Ansatz vor, der das Problem des Resequencing unter den Einschränkungen einer JiS-Belieferung betrachtet.³⁰ Boysen et.al. zeigen auf, wie die üblicherweise im Bereich des Sequencing verorteten Planungsansätze des „Level Scheduling“, also die möglichst weitgehende Glättung der Materialbedarfe, auf das Resequencing übertragen werden können.³¹

Einordnung der Karosserieverfügbarkeit

Es wurden die Planungsaufgaben Fließbandabstimmung, Programmplanung, Master Production Scheduling, Sequencing und Resequencing kurz beschrieben, sowie Aspekte aus dem Stand der Wissenschaft zu diesen Problemstellungen skizziert. Fraglich ist nun, in welcher Beziehung diese Planungsaufgaben zu der Karosserieverfügbarkeit stehen?

Die Karosserieverfügbarkeit im engeren Sinne und das System der Karosserieverfügbarkeit im weiteren Sinne als Gegenstand der taktischen Produktionsplanung beeinflussen die Ergebnisse der genannten Planungsaufgaben und werden von diesen beeinflusst. Ebenfalls im taktischen Zeithorizont fallen die Aufgaben der Fließbandabstimmung und gegebenenfalls einer langfristigen Programmplanung im Sinne einer Vertriebsplanung auf Fahrzeug- und Modellebene an. Da die Fließbandabstimmung die Leitplanken für die später folgenden operativen Prozesse des Sequencing und Resequencing festlegt, beeinflusst diese auch das System der Karosserieverfügbarkeit, beispielsweise wenn Merkmale der Karosserievariante mit kritischen Arbeitsinhalten der Montage zusammenfallen, wie dies beispielsweise bei einer Schiebedach-Cabrio- und Rechts- oder Linkslenkervariante - Auftragsattribute, die „klassischerweise“ restriktiv in der Produktion gesteuert werden - der Fall sein kann.

Master Production Scheduling, Sequencing und Resequencing sind klar operative Planungsprobleme, die mit dem operativen System der Karosserieverfügbarkeit eng verflochten sind: durch die operative Programmplanung, Master Production Scheduling und Sequencing wird die zu produzierende Reihenfolge festgelegt. Im Rahmen des Einplanungsprozesses werden i.d.R. auch Reihenfolgen für die anderen Produktionsgewerke, wie Rohbau und Oberfläche, bestimmt. Die festgelegte Montagereihenfolge ist gleichsam das Ziel der Produktion mit stabiler Auftragsfolge, die Karosserieverfügbarkeit ist die wesentliche Voraussetzung dafür, dass die geplante Reihenfolge umgesetzt werden kann. Gleichzeitig wirken die geplanten Reihenfolgen für die Produktionsgewerke, insbesondere die der Montage, auf die Karosserieverfügbarkeit, indem diese festlegen, welche Varianten benötigt werden und in welcher Reihenfolge welche Varianten produziert werden.³² Die Karosserien, die nicht verfügbar sind, führen zu einem Bedarf an Resequencing. Gleichzeitig führt das Kalkül im Resequencingprozess zu einem Karosseriebedarf, der unter Umständen zeitlich von dem ursprünglich geplanten Bedarf abweicht, weil die endgültige Montagesequenz im Resequencing-Prozess Gegenstand der Planung ist und sich hier Auftragspositionen nochmals ändern können.

Die Relevanz der Karosserieverfügbarkeit für eine möglichst hohe Prozessqualität wird im Zu-

³⁰Vgl. Gujjula, Günther (2009).

³¹Vgl. Boysen et.al. (2010b).

³²Vgl. hierzu beispielsweise die Kapitel 4 und 5 dieser Arbeit.

sammenhang mit dem Resequencing auch durch die Darstellung in Franz et.al. deutlich: die Autoren zeigen, dass in der Testumgebung die von ihnen entwickelten Verfahren der Resequenzierung das Vergleichsverfahren aus der industriellen Praxis größtenteils deutlich dominieren. Aber selbst diese Verfahren sind gegenüber der ursprünglich geplanten Auftragssequenz nur zweite Wahl, teilweise deutlich. Der Qualitätsunterschied nimmt mit zunehmender Zahl geblockter Aufträge zu.³³ Die Autoren schreiben hierzu treffend: „Due to the complexity of the analysed problem and the size of the test instances, it is not possible to calculate optimal solutions. Therefore, reasonable lower bounds are calculated based on the original sequence. One drawback is that this sequence has been constructed using a heuristic. However, this heuristic ran several hours to generate a good sequence, and it should not be possible to improve this sequence by reacting only to disturbances and using only seconds for the calculations. Thus, any derived objective function value is taken to be the practical lower bound, although it is no lower bound in a strict mathematical sense“.³⁴ Wenn also das Qualitätsniveau der ursprünglich geplanten Montagesequenz durch Resequencing nicht erreicht werden kann, dieses Niveau aber erreicht werden soll, dann ist eine entsprechend hohe Karosserieverfügbarkeit eine notwendige Bedingung dafür.

Obwohl es, wie dargestellt, eine offensichtliche Wechselwirkung zwischen der Karosserieverfügbarkeit und den Ergebnissen der genannten Planungsprobleme gibt, war die Karosserieverfügbarkeit nach Kenntnis des Autors noch nicht Teil einer Zielfunktion, eines Zielkriteriensets oder ähnlichem. Sie wurde zwar als Einflußgröße im Rahmen der genannten Planungsaufgaben berücksichtigt, aber noch nicht als Ergebnisgröße geplant.

2.2 Problemstellung

In dieser Arbeit wird das System der Karosserieverfügbarkeit aus der Perspektive der taktischen Produktionsplanung untersucht. Die Leitfrage ist: ist das Problem der taktischen Produktionsplanung der Karosserieverfügbarkeit im aktuellen Stand der Wissenschaft gelöst? Dazu wird anhand Abbildung 3 zunächst dargestellt, welche Voraussetzungen aus Sicht des Autors erfüllt sein müssen, damit taktische Produktionsplanung gelingen kann.³⁵ wie bereits eingangs erwähnt, liegt dieser Arbeit das Verständnis zugrunde, dass die taktische Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit und die realen Systemergebnisse in einem dynamischen, kreislaufartigen Zusammenhang stehen. Dieser Zusammenhang entsteht zusammengefasst dadurch, dass das reale System mit Hilfe der Planungsergebnisse gestaltet wird, welche aus Planungsmodellen resultieren, welche ihrerseits auf dem Wirkmodell basieren.

Die Produktion wird als ein System aufgefasst, welches durch eine bestimmte Input-Output-Beziehung charakterisierbar ist. Im System der Karosserieverfügbarkeit ist der Output die zeitliche Folge von Ereignissen der Verfügbarkeit oder Nicht-Verfügbarkeit von Karosserien. Zum Input gehören beispielsweise die Soll-Daten der Produktionssteuerung oder Ist-Ereignisse aus angeschlossenen Prozessen, wie beispielsweise Ergebnisse von Qualitätsprüfungen. Input und

³³Vgl. Franz et.al. (2015), S.3445ff.

³⁴ebd., S.3444.

³⁵Der grundsätzliche Zusammenhang von Planungsmodell und realer Produktion ist angelehnt an die Darstellung „Modellwelt und Realität“ in Dangelmaier (2009), S.6.

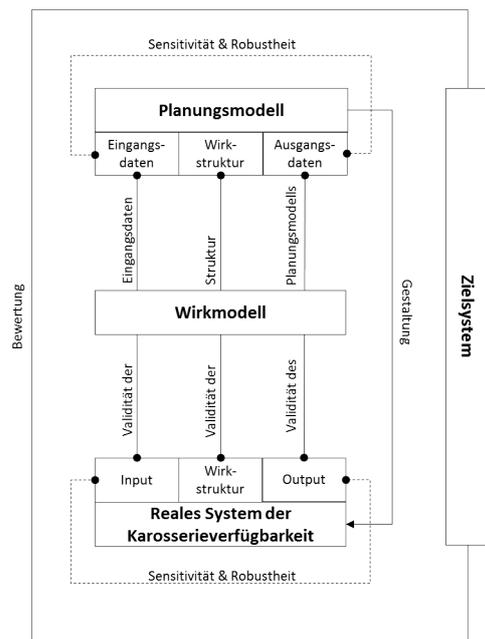


Abbildung 3: Modell des Zusammenhangs von Planung und Umsetzung

Output stehen in einem Ursache-Wirkungszusammenhang, dem Wirksystem. Das vorherrschende Verständnis vom Wirksystem ist im Wirkmodell zusammengefasst. Das Wirkmodell bildet das Fundament der Planungsmodelle, es wird dort nach den Erfordernissen des konkreten Planungsproblems ganz oder teilweise berücksichtigt.

Damit die zukünftige Produktion zielgerichtet gestaltet werden kann, ist ein Zielsystem notwendig, in welchem Vorgaben für die zukünftigen Ergebnisse der Produktionsprozesse gemacht werden. Das Zielsystem beinhaltet auch die Ziele für die gegenwärtige Produktion. Die Ziele für die zukünftige Produktion sind in den Planungsmodellen dergestalt zu berücksichtigen, dass deren zukünftige Einhaltung im geforderten Maß gewährleistet ist.

Entscheidend dafür, ob die Ziele der zukünftigen Produktion tatsächlich eingehalten werden, ist die Validität des Planungsmodells. Hier kann zwischen zwei Perspektiven unterschieden werden: der strukturellen Validität und der Validität der Eingangsdaten.

Die erste Perspektive ist die der strukturellen Abbildungsgüte des Planungsmodells in Bezug auf die reale Produktion. Geht man davon aus, dass die zukünftigen Einflüsse exakt den in der Planung unterstellten entsprechen würden, dann wäre die Qualität der Zielerreichung der zukünftigen Ergebnisse allein von der strukturellen Validität der Planungsmodelle abhängig, was im Kontext dieser Arbeit bedeutet, dass die richtigen Größen auf die richtige Art und Weise in der Modellbildung berücksichtigt werden. Sauerbier formuliert in Bezug auf Simulationsmodelle: „Die entscheidende Frage bei der Überprüfung des (Simulations-) Modells lautet: Ist die Abbildung des realen Systems geeignet, die gestellten Fragen zu beantworten. Dazu muss zunächst geklärt werden, ob überhaupt alle relevanten Objekte, Beziehungen, Größen und Ereignisse enthalten sind. Weiterhin ist zu prüfen, ob der gewählte Detaillierungsgrad und die Genauigkeit der Größen der Problemstellung angemessen sind“.³⁶

³⁶Sauerbier (1999), S.104.

Die zweite Perspektive betrifft die Validität der Eingangsdaten, hier aber nicht der Zusammenhang zwischen den Daten, sondern die konkreten Werte. Wenn diese grundlegend in eine ungünstige Richtung von den in der Planung angenommenen abweichen, können die Ziele, die für die zukünftige Produktion formuliert wurden, im Allgemeinen nicht eingehalten werden. Planungsmodelle sind Abbilder des betrachteten beziehungsweise geplanten Zustands und Ausschnitts des Produktionssystems. Sie enthalten den in der Planung berücksichtigten Wirkmechanismus des Systems und Eingangsdaten. Grundsätzlich können über die konkreten Werte zukünftiger Einflußgrößen nur unsichere Informationen vorliegen. Nichts desto trotz müssen Annahmen getroffen werden. Wenn zukünftige Einflüsse strukturell oder in den realisierten Werten von den im Planungsmodell angenommenen Zustand abweichen, ist es eine Frage der Robustheit des Systems der Karosserieverfügbarkeit, ob die anvisierten Ziele noch erreicht werden können. Wie die Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit bei Variation in den Eingangsdaten schwanken, ist eine Frage der Sensitivität des Systems. Beide Aspekte des geplanten Systems, Robustheit und Sensitivität, können sinnvoll nur auf Basis valider Modelle beurteilt werden. Bezogen auf die Leitfrage heißt dies: Ein wesentlicher Teil des Problems der taktischen Produktionsplanung der Karosserieverfügbarkeit wäre gelöst, wenn ein Wirkmodell existierte und es eines oder mehrere Planungsmodelle in der Literatur gäbe, die valide Ergebnisse erzeugten; dann könnte taktische Produktionsplanung mit dem Ziel einer robusten Gestaltung des Systems der Karosserieverfügbarkeit durchgeführt werden. Eine wichtige Anforderung ist, dass die Modelle generisch sind und auf die Spezialfälle der Praxis angepasst werden können, und nicht umgekehrt nur in ganz speziellen Planungskontexten gültig sind. Welche Planungsmodelle und Lösungsverfahren dem aktuellen Stand der Wissenschaft entnommen werden können, wird im Folgenden dargestellt.

2.3 Stand der Wissenschaft im engeren Zusammenhang

Beiträge, die sich explizit mit der Verfügbarkeit der Karosserie beschäftigen und operative oder produktionsplanerische Aspekte zu dem Themenfeld behandeln, werden hier als Teil des engeren Zusammenhangs betrachtet - im Gegensatz zu den unter Abschnitt 2.1 dargestellten Planungsproblemen.

Ein früher Beitrag zur Auslegung eines Karosseriesortierers ist der Aufsatz „ASRS sizing for recreating automotive assembly sequences“ von Robert R. Inman. Inman stellt in diesem Aufsatz verschiedene Methoden vor, die im Zusammenhang mit der Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit besonders interessant sind, da sie sich der Problemstellung analytisch nähern. Das zentrale Thema des Aufsatzes ist die Berechnung des Servicegrads eines wahlfreien Karosseriepuffers oder alternativ dessen nötige Kapazität, um einen gegebenen, beziehungsweise gewünschten Servicegrad zu erreichen. Der „Servicegrad“ stellt als Kennzahl aus dem Kontext der Lagerhaltung den Anteil der sofort befriedigten Anfragen an allen Anfragen in einem bestimmten Zeitraum dar.³⁷ Dieser entspricht im speziellen Zusammenhang dieser Arbeit sinngemäß dem hier verwendeten Begriff der „Karosserieverfügbarkeit“. Ausgangspunkt seiner Überlegung ist eine Produktion nach dem Built-to-Order-Prinzip, mit stabiler geplanter Auftragsfolge und dem

³⁷Vgl. H.-P.Wiendahl, Fertigungsregelung, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1997 in Lödding (2008), S.27.

Push-Prinzip folgend, mit einer einstufigen Karosserieproduktion (Rohbau und Lackierung), die durch einen wahlfreien Karosseriepuffer (ASRS³⁸) von der Montage entkoppelt ist. Ferner geht er in diesem Verfahren davon aus, dass für jeden Produktionsauftrag genau diejenige Karosserie bereitzustellen ist, die für diesen Auftrag im Karosseriebau gestartet wurde, es ist also eine Neuordnung von Auftrag und Karosserie nicht zulässig.³⁹ Inman benennt als die „primary drivers“ der Kapazität des Karosseriesortierers

- die Positionsverschiebungen der Karosserien,
- die Anzahl der Karosserievarianten und
- deren jeweiliger Anteil.⁴⁰

Das von ihm vorgestellte Verfahren ist eine Methode, mit der man auf Basis von statistischen Verteilungen der Positionsverschiebungen der Karosserien, die Karosserieverfügbarkeit berechnen kann. Diese Positionsverschiebungen sind ein Maß für die Schwankung der Durchlaufzeit in der Karosserieproduktion. Die Basisdaten für die Verteilungen sind Positionsverschiebungen, die jeweils an einer Karosserie, zwischen deren Position in der Eingangssequenz und der Ausgangssequenz des Karosseriebaus gemessen werden. Dieser Ansatz dient dazu, von den eigentlichen Fertigungsprozessen zu abstrahieren und sich nur auf die Charakteristik der Durchlaufzeiten im Karosseriebauprozess zu konzentrieren. Ein Unterverfahren welches Inman vorstellt, beschreibt einen Algorithmus zur Herstellung jener verwendeten Verteilung von Positionsverschiebungen. Außerdem stellt Inman eine Erweiterung zu oben genannter Methode vor, in der er die Neuordnung von Auftrag und Karosserie zulässt und eine „Upper Bound“ für den Service Grad des Karosseriesortierers berechnet. In diese Berechnung gehen dann neben den Positionsverschiebungen und der Kapazität des Karosseriesortierers auch die Anteile der zu berücksichtigenden Karosserievarianten ein.

Die beiden nachfolgenden genannten Veröffentlichungen beschäftigen sich ebenfalls mit der Karosserieverfügbarkeit, beziehungsweise mit der Teilverfügbarkeit, allerdings werden hier thematisch andere Schwerpunkte gesetzt. Gushikin, Caprihan und Stecke haben in ihrem Aufsatz „Least in-sequence probability for mixed-volume production lines“ ein heuristisches Verfahren entwickelt, um die geplante Produktionsreihenfolge eines Vorgängerprozesses auf Basis der geplanten Produktionsreihenfolge des Nachfolgeprozesses dergestalt zu manipulieren, dass die Verfügbarkeit der Teile für den Nachfolgeprozess erhöht wird. Hierfür wird ein gegenüber Inman erweitertes Modell des Produktionssystems verwendet, in welchem auf der Ebene der geplanten Auftragsreihenfolgen zwischen der Reihenfolge für den Vorgängerprozess und der Reihenfolge für den Nachfolgeprozess unterschieden wird. Diese Unterscheidung macht es möglich, Unterschiede bestimmter Teile bezüglich der Durchlaufzeit im Vorgängerprozess durch eine Manipulation der geplanten Auftragssequenz dieses Vorgängerprozesses zu kompensieren. Der Mechanismus ist dabei grundlegend wie folgt: in der Ausgangsplanung wird davon ausgegangen, dass die Pro-

³⁸ Automated storage and retrieval system

³⁹ Zur Neuordnung von Auftrag und Karosserie vgl. Inman (2003), S.858 als „order decoupling“ oder Klug (2010), S.392 unter dem Begriff der „späten Auftragszuordnung“.

⁴⁰ Vgl. Inman (2003), S.849.

zessdurchlaufzeit aller Varianten im Vorgängerprozess identisch ist. Da auch sonst keine, die geplante Reihenfolge des Vorgängerprozesses beeinflussenden, Sachverhalte berücksichtigt werden, sind die geplante Eingangsreihenfolge des Vorgängerprozesses und die des Nachfolgeprozesses identisch. Ist nun bekannt, dass die Annahme einer über die Varianten homogenen Durchlaufzeit systematisch nicht zutrifft, können Varianten, die eine systematisch längere Durchlaufzeit aufweisen, früher in den Vorgängerprozess gestartet werden, diejenigen, die eine systematisch kürzere Durchlaufzeit aufweisen, dementsprechend später. Auf diese Weise werden die Karosserien analog der Vorgehensweise einer Vorlaufrechnung gemäß der erwarteten Durchlaufzeit in den Vorgängerprozess gestartet, so dass die Karosserien termingerecht, nicht zu früh und nicht zu spät für den Nachfolgeprozess verfügbar sind. Die Autoren zeigen in ihrem Artikel, dass die vorgestellte Methode im Rahmen eines Simulationsmodells die Karosserieverfügbarkeit insgesamt erhöht. Sie sprechen in Zusammenhang mit diesem Verfahren aber von einer Trade Off Problematik, das heißt, der Nutzen, der bezüglich der einen Teilevariante entsteht, erhöht das Risiko bei den anderen Teilevarianten. Dies wird deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass das Vorziehen eines Teiles in einer Sequenz immer das Verzögern mindestens eines anderen Teils zur Konsequenz hat, beispielsweise würden bei einem Vorziehen um 10 Positionen 10 andere Teile um je eine Position verzögert werden. Es wird also ein Zeitbonus beim Start in den Vorgängerprozess der einen Variante, durch einen Zeitmalus für andere Varianten erzeugt. Würde man alle Varianten früher in den Vorgängerprozess steuern, um den Malus zu verhindern, dann müsste der Puffer zwischen Vorgänger- und Nachfolgeprozess eine höhere Kapazität aufweisen. Da diese Methode eine konkrete Reihenfolge manipuliert, kann sie in erster Linie nur in Zeiträumen angewendet werden, in denen konkrete Reihenfolgen vorliegen, also im Bereich der operativen Produktionsplanung. Im Rahmen der taktischen Produktionsplanung ist relevant, ob diese Methode operativ eingesetzt wird, und wenn ja, welchen Effekt diese hat.

Ding und Sun stellen in ihrem Aufsatz „Sequence alteration and restoration related to sequenced parts delivery on an automobile mixed-model assembly line with multiple departments“ Methoden vor, die zwei verschiedene Problemstellungen behandeln: die erste betrifft die gezielte Herstellung einer bestimmten Sequenz für einen Nachfolgeprozess, wenn Vorgänger und Nachfolgeprozess unterschiedliche Eingangssequenzen benötigen (sequence alteration). Die zweite Problemstellung betrifft die Wiederherstellung einer Teilesequenz, die durch ungeplante beziehungsweise unbeabsichtigte Sequenzänderungen im Produktionsprozess nicht mehr der ursprünglich in den Produktionsprozess gestarteten Sequenz entspricht (sequence restoration). Hier wirkt das gleiche Prinzip der Positionsverschiebung, welches schon bei Inman und Gushikin et.al. thematisiert wurde. Für die Wiederherstellung der geforderten Sequenz nennen die Autoren zwei unterschiedliche Verfahren, zum einen die Nutzung eines „Reservoir Systems“, ein wahlfreier Karosseriepuffer, wie er auch von Inman verwendet wurde, zum anderen ein „Spare Unit System“, dessen Funktionsprinzip der Ersatz einer fehlenden Karosserie durch vorproduzierte Ersatzkarosserien ist. Zweites Verfahren bedingt, dass eine bestimmte Anzahl dieser Ersatzkarosserien in einem Karosseriepuffersystem vorgehalten wird. Neben der Vorstellung eines Ersatzteilsystems ist auch der Ansatz neu, mit dem die Durchlaufzeitschwankung der Karosserien modelliert wird, es wird hier nicht von abstrakten Positionsverschiebungen mit vielfältigen

Ursachen ausgegangen, sondern davon, dass Positionsverschiebungen ursächlich durch Nacharbeit im Produktionsprozess entstehen. Somit hängen sowohl die notwendigen Plätze in einem Reservoirsystem, als auch die Anzahl der Ersatzteile in einem Ersatzteilsystem direkt von der Ergebnisverteilung des Nacharbeitsprozesses ab.⁴¹ Um die notwendige Anzahl der Ersatzteile abzuschätzen, verwenden die Autoren ein Warteschlangenmodell des Nacharbeitsprozesses. Die Autoren vergleichen die beiden Verfahren zur Wiederherstellung der Sequenz in einer Simulationsstudie, mit dem Ergebnis, dass bei einer täglichen Produktionsmenge von 960 Einheiten bei 50 berücksichtigten Teilevarianten für einen 99%igen Servicelevel, also eine 99%ige Karosserieverfügbarkeit, die Anzahl der benötigten Pufferplätze in einem Ersatzteilsystem niedriger ist, als in einem Reservoirsystem.⁴² Kritisch anzumerken ist hier, dass die Anzahl der berücksichtigten Karosserievarianten mit 50 als gering anzusehen ist. Da sich Karosserievarianten für die Montage aus der Kombination von Karosseriegeometrievariante und Lackfarbe ergeben, sollten im Allgemeinen mehr als 50 Varianten zu berücksichtigen sein. Ferner ist anzumerken, dass Ersatzkarosserien im Ersatzteilsystem fehlende Karosserien ersetzen, im Reservoir-System aber kein Variantentausch stattfindet.

In Meißners Arbeit „Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung“ ist das System der Karosserieverfügbarkeit auch Gegenstand der Betrachtung. Schwerpunkt dabei ist die Stabilität im Produktionsprozess, vor allem in Bezug auf die Produktion mit stabiler Auftragsfolge; dazu gehören Ausführungen zur Messung der Stabilität, Kennzahlen zur Stabilität und Maßnahmen, um die Stabilität in der Produktion zu steigern. Der Autor betrachtet den Untersuchungsgegenstand aus der Perspektive eines „integrierten Planungs- und Steuerungsregelkreises“.⁴³ Er zeigt Ursachen der Instabilität in einem Wirkmodell auf der Basis eines „Ishikawa-Diagramms“, in dem er die Ursachen für Instabilität im Produktionsprozess benennt, kategorisiert und später beschreibt.⁴⁴ Er schlägt vor, den Produktionsprozess mit der Methode der „Wertstromanalyse“ zu modellieren, um tatsächliche und potentielle negative Einflüsse auf die Stabilität der Reihenfolge besser erkennen zu können. Zuletzt geht er auch auf Verfahren zur Kompensation von Instabilität ein; dazu gehören auch Methoden zur Auslegung von Karosseriepuffern. Er erweitert Inmans Ansatz, zur Entwicklung von Positionsverschiebungsprofilen, indem er Priorisierungen bei der Wiedereinsteuerung der zurückgestellten Aufträge einführt.⁴⁵ Fournier und Agard behandeln in ihrem Aufsatz „Improvement of earliness and lateness by postponement on an automotive production line“ den Aspekt der späten Variantenbildung, beziehungsweise des „Postponements“ und der positiven Wirkung auf das downstream folgende Problem des „resequencing“. Außerdem verknüpfen die Autoren diese Fragestellung mit unterschiedlichen Puffertypen (Strangpuffer und wahlfreier Puffer). Die Autoren verwenden ein Modell aus Rohbau-, Oberflächen- und Montageprozess und sehen zwei Tauschpunkte zwischen Auftrag und Karosserie vor: zwischen Rohbau und Oberfläche und zwischen Oberfläche und Montage.⁴⁶ Die Autoren verwenden als Kennzahlenset Indikatoren basierend auf kumulierten

⁴¹ Vgl. Ding, Sun (2004), S.1534ff.

⁴² Vgl. Ding, Sun (2004), S.1537.

⁴³ Meißner (2009), S.56.

⁴⁴ Vgl. Meißner (2009), S.59.

⁴⁵ Vgl. Meißner (2009), S.159ff.

⁴⁶ Fournier, Agard (2007), S.113ff.

Verzögerungen, beziehungsweise kumulierten Beschleunigungen von Montageaufträgen gegenüber einer „Initial Order List“.⁴⁷ In ihrer Simulationsstudie weisen sie eine deutliche Verbesserung der Indikatoren durch Berücksichtigung von zwei Tauschpunkten nach. Ebenso zeigen die Autoren, dass der Puffertyp „Wahlfreier Puffer“ die besten Ergebnisse erzeugt.⁴⁸

2.4 Forschungslücken und Forschungsfragen

Aus Sicht des Autors bietet der aktuelle Stand der Wissenschaft keine adäquate Lösung für das Problem der taktischen Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit, weder aus der Perspektive der einzelnen Beiträge, noch aus der der Gesamtheit aller. Es bestehen folgende Forschungslücken:

- Die Beiträge, die sich im engeren Sinne mit der Karosserieverfügbarkeit beschäftigen, behandeln einige Aspekte des Systems der Karosserieverfügbarkeit, teils aus der operativen Perspektive, teils aus der Perspektive der taktischen Produktionsplanung: In allen Beiträgen wird die Kapazität des Karosseriesortierers berücksichtigt. Diese ist bei Inman Gegenstand der taktischen Produktionsplanung, beispielsweise bei Gushikin et.al. der operativen Produktionsplanung. Die Positionsverschiebungen, die Karosserien in der Karosserieproduktion erfahren, werden bei Inman aus Sicht der taktischen Produktionsplanung, bei Gushikin et.al. aus Sicht der operativen Produktionsplanung betrachtet. Letztere Autoren berücksichtigen in Ihrem Modell auch die Soll-Reihenfolge des Eingangs in den Karosseriebau. Meißner berücksichtigt, dass Aufträge bei der Entscheidung über die Wiedereinsteuerung von zurückgestellten Aufträgen priorisiert werden können, auch aus der Perspektive der taktischen Produktionsplanung. Es bleibt festzustellen, dass es in der Literatur kein abstraktes Produktionsmodell gibt, welches alle genannten Aspekte enthält, so dass damit der Zusammenhang von Ursache und Wirkung im System der Karosserieverfügbarkeit allgemein erklärt werden könnte. Ferner wurden in der Literatur nicht alle relevanten Aspekte explizit genannt und berücksichtigt, wie im weiteren Verlauf der Arbeit noch im Detail gezeigt werden wird. Es fehlt also ein integriertes und generisches Wirkmodell, welches die in der Literatur genannten und nicht genannten, aber relevanten Aspekte berücksichtigt.
- In keinem der Beiträge haben die Autoren die Validität ihrer Modelle am realen Praxisfall untersucht. Im Allgemeinen wurde die Wirkung der vorgestellten Methoden im Simulationsmodell betrachtet. Klar ist, wenn Modelle keine validen Ergebnisse liefern, dann wird die Produktion unter falschen Annahmen geplant und letztendlich gestaltet. Arnold et.al. schreiben hierzu: „Vernachlässigt man jedoch wesentliche Systemkomponenten, so kann dies zu ungünstigen Planungsergebnissen führen. Daher ist es stets erforderlich, die mit Hilfe eines (homomorphen) Modells gewonnenen Ergebnisse anhand des realen Systems oder eines weniger abstrahierenden Modells zu evaluieren“.⁴⁹ Da kein integriertes Wirkmodell

⁴⁷Vgl. ebd., S.111.

⁴⁸Vgl. ebd., S.120.

⁴⁹Arnold et.al. (2008), S.36.

existiert, kann auch kein valides integriertes Wirkmodell existieren. Die existierenden Modelle bezüglich der Teilaspekte des Systems der Karosserieverfügbarkeit wurden ebenfalls nicht validiert, wobei dies besonders bei den Modellen zu kritisieren ist, die explizit für die taktische Produktionsplanung verwendet werden sollen.

- Wenn kein valides Wirkmodell existiert, können keine validen Schlüsse darüber gezogen werden, welche Wirkmechanismen im Rahmen der taktischen Produktionsplanung berücksichtigt werden sollten und auf welche Art dies geschehen sollte. Dies beinhaltet die Wirkgrößen im Einzelnen und deren Zusammenwirken im Wirksystem.
- Aus der Perspektive der Modellkategorie wurden sowohl analytische, als auch Simulationsmodelle angewendet. Es fehlt eine kritische Reflexion, welche Modellkategorie in welchem Kontext für die Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit geeignet ist, also das Wirkmodell und das Zielsystem adäquat abbilden kann.
- Die Beiträge behandeln das Zielsystem des Systems der Karosserieverfügbarkeit nicht explizit. Natürlich werden Zielwerte in den Modellen berücksichtigt, wie beispielsweise der Servicegrad bei Inman. Da das System der Karosserieverfügbarkeit ein Teilsystem übergeordneter Systeme ist, ist es entscheidend, die Ziele aus diesen übergeordneten Systemen abzuleiten und damit auch den Anspannungsgrad zur Zielerreichung abzuschätzen. Die Anforderungen an die Modellvalidität hängen maßgeblich von der Gestaltung der Zielwerte ab: Ein Soll-Wert in Form eines Jahres-Mittelwerts erfordert eine andere Planungsgenauigkeit als in Form eines Tages-Werts. Ohne Reflektion des Zielsystems fehlt ein Maßstab für die Modellvalidität und es kann taktische Produktionsplanung nicht zielorientiert durchgeführt werden.

Auf Basis der dargestellten Forschungslücken werden die folgenden Forschungsfragen zur Schließung der Forschungslücken gestellt:

1. Wie kann ein integriertes, generisches und valides Wirkmodell aufgebaut sein?
2. Welche grundlegenden Aussagen über die Einflußgrößen im Einzelnen und deren Zusammenwirken im Wirksystem können aus dem Wirkmodell abgeleitet werden?
3. Wie sind analytische und simulative Ansätze zur taktischen Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit vor dem Hintergrund der Antworten auf die ersten beiden Forschungsfragen und unter der Forderung robuster Ergebnisse zu beurteilen?

2.5 Wissenschaftliche Ziele und Erkenntnisgewinn

Tabelle 1 zeigt die drei Ziele der Wissenschaft in der Reihenfolge, wie diese im Forschungsprozess durchlaufen werden:⁵⁰ Nach Töpfer ist das Primärziel der Realwissenschaften das pragmatische Ziel, das hiervon abgeleitete Ziel ist das theoretische Ziel. Das deskriptive Ziel ordnet er dem

⁵⁰Töpfer (2010), S.52.

Wissenschaftsziele	Erläuterung
Deskriptives Ziel	Begriffsbildung / Klassifikation und Beschreibung
Theoretisches Ziel	Erkenntnisgewinnung durch Erklärung und Prognose
Pragmatisches Ziel	Praktische Gestaltung auf der Basis gewonnener Erkenntnisse

Tabelle 1: Ziele der Wissenschaft

vorwissenschaftlichen Bereich zu.⁵¹ Im Rahmen dieser Arbeit werden Ziele aus allen drei Zielgebieten verfolgt: Der Aufbau und die Validierung eines Wirkmodells folgen dem theoretischen Ziel (Forschungsfrage 1), wobei Definition, Klassifikation und Beschreibung natürlich die Grundlage für das Wirkmodell bilden, beziehungsweise parallel mit dem Modell entwickelt werden. Die Analyse des Wirksystems auf Basis des Wirkmodells erfolgt dann ebenfalls mit dem Ziel theoretischen Erkenntnisgewinns, genauso wie die Reflexion der Planungsansätze. Handlungsempfehlungen für die Praxis werden im Forschungsprozess zu allen Forschungsfragen abgeleitet. Die Arbeit ist für das Erkenntnisfeld der taktischen Produktionsplanung der Karosserieverfügbarkeit als anwendungsinspirierte Grundlagenforschung⁵² konzipiert; in diesem Sinne werden Handlungsempfehlungen grundsätzlicher Natur gegeben, aber keine konkreten Ablauf- oder Vorgehensweisen vorgeschlagen.

Es wird nun noch ein Überblick über den in dieser Arbeit geleisteten Forschungsbeitrag gegeben, bezogen auf die drei Forschungsfragen im Einzelnen:

1. Es wird auf Basis der Analyse des Systems der Karosserieverfügbarkeit und der existierenden Literatur erstmals ein integriertes und generisches, sowie validiertes Wirkmodell erstellt. Integriert heißt, es ist in Bezug auf die wesentlichen Einflußgrößen vollständig. Durch den Grad der Abstraktion ist es einerseits in unterschiedlichen Planungszusammenhängen als Basismodell einsetzbar, zum anderen auf verschiedene Produktionsstrukturen erweiterbar. Das Modell wird formalisiert und mittels einer Trace Driven Simulationsstudie validiert. Im Rahmen dieser Validierung wird das Modell mit realen Produktionsdaten konfrontiert, um festzustellen, ob die Annahmen über die zu berücksichtigenden Einflußgrößen und die Zusammenhänge von Ursache und Wirkung haltbar sind. Es geht hier um die strukturelle Validität des Wirkmodells. Die Ergebnisse dienen allen drei Wissenschaftszielen: dem deskriptiven, weil im Rahmen der Modellierung die wesentlichen Zusammenhänge im System der Karosserieverfügbarkeit beschrieben und Begriffe definiert werden. Sie dienen auch dem theoretischen Ziel, weil das resultierende Modell die Basis zur Erklärung des Systems der Karosserieverfügbarkeit bildet. Dem pragmatischen Ziel dienen die Ergebnisse, weil ein solches Wirkmodell einen validierten Rahmen für die Modellierung des System im realen Planungskontext bietet.
2. Die Basis für die weiterführenden Untersuchungen zu der Forschungsfrage 2 bildet das validierte Wirkmodell. Es wird verwendet im Rahmen von Simulationsstudien, um Effekte aus der Datenstruktur, also dem Zusammenhang der Eingangsdaten, zu isolieren und nachzuweisen, die zwar im Rahmen des Wirkmodells erklärt und beschrieben wer-

⁵¹Vgl. Töpfer (2010), S.53ff.

⁵²Vgl. Töpfer (2010), S.61ff.

den können, in der Trace Driven Simulation aber nicht im Einzelnen sichtbar sind, weil sich dort die Wirkungen aller Einflußgrößen überlagern. Dabei können keine allgemeinen Aussagen über die Stärke der einzelnen Effekte gemacht werden, weil diese von der konkreten Systemstruktur und dem konkreten Systemzustand abhängig sind. Allerdings kann gezeigt werden, ob sich diese Effekte in den Ergebnissen signifikant nachweisen lassen. Wenn sich die Effekte nachweisen lassen, dann ist die Kenntnis über die Möglichkeit der Effekte gemäß dem pragmatischen Wissenschaftsziel von anwendungsorientiertem Nutzen, verfeinert diese doch das Bild des Systems der Karosserieverfügbarkeit zur Modellierung im Prozess der taktischen Produktionsplanung, und erlaubt ein höheres Maß an Validität zu erreichen.

3. Die dritte Forschungsfrage beschäftigt sich mit Ansätzen zur taktischen Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit. Es wurde bereits geschrieben, dass ein Modell für einen analytischen Ansatz zur taktischen Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit existiert, nämlich das von Robert R. Inman, auf welches auch in der übrigen Literatur Bezug genommen wird. Dieses Modell wird auf Validität untersucht, mittels einer Simulationsstudie. Dieses Modell wird im Rahmen dieser Arbeit als Basis verwendet und wesentlich weiterentwickelt, indem die Aspekte der geplanten Auftragsreihenfolge und der Tauschbarkeit gleicher Karosserievarianten integriert werden. In Bezug auf die Tauschbarkeit gleicher Karosserievarianten hat Inman ein Modell zur Berechnung einer „Upper-Bound“ des Servicegrads des Karosseriesortierers vorgestellt, auch dieses Modell wird auf Validität untersucht. Die realen Produktionsdaten, die für die Validierung des Wirkmodells in dieser Arbeit verwendet werden, finden auch Eingang in die Untersuchung dieses existierenden Modells. Dieser Schritt sorgt nicht nur für theoretischen Erkenntnisgewinn, sondern ist auch für die Praxis relevant, wenn es darum geht, geeignete Modelle für die taktische Produktionsplanung zu gestalten. In diesem Vorgang der Modellierung spielen die Schritte der Abstraktion und Idealisierung eine wichtige Rolle. Im Allgemeinen führen diese zu Informationsverlust in den Daten. Methoden, die in der Literatur zur Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit Anwendung finden, werden auf mögliche Effekte auf die Ergebnisse des Systems untersucht. Dies unterstützt die theoretische Beurteilung dieser Methoden. Ferner ist die Kenntnis über mögliche Effekte, die der Vorgang der Modellierung auf die Modellvalidität haben kann, relevant für die Praxis der taktischen Produktionsplanung. Schließlich werden Überlegungen zur Simulation des Systems der Karosserieverfügbarkeit vorgestellt, vor allem in Bezug auf die Analyse der Simulationsergebnisse. Diese Überlegungen werden literaturgestützt geleitet, ein ganz praktischer Nutzen, ergibt sich hieraus durch die Übertragung auf die Anwendung für das System der Karosserieverfügbarkeit, nicht zuletzt für die Anwendungsfälle in dieser Arbeit.

2.6 Vorgehensweise

Zunächst wird in Kapitel 3 die modelltheoretische Perspektive erläutert, aus der der Forschungsgegenstand betrachtet wird. Außerdem erfolgt hier die inhaltliche Beschreibung. Nach Abgrenzung des Themengebiets werden Antworten auf die Forschungsfragen in der bereits vorgestellten

Reihenfolge dargestellt:

Wie kann ein integriertes, generisches und valides Wirkmodell aufgebaut sein?

In Kapitel 4 wird ein Wirkmodell entwickelt. Hierfür wird zunächst die grafische Modellierungsmethode beschrieben, mit deren Hilfe danach ein Modell des Wirksystems der Karosserieverfügbarkeit aufgebaut wird, welches die wesentlichen Wirkgrößen und Wirkmechanismen enthält. Dieses qualitative Modell wird darauf folgend mathematisch formalisiert. Es wird dann zur Beurteilung der Erklärungsmacht auf die Validierung des Wirkmodells eingegangen, wofür die Technik der „Trace Driven Simulation“, eingesetzt wird.

Welche grundlegenden Aussagen über die Einflußgrößen im Einzelnen und deren Zusammenwirken im Wirksystem können aus dem Wirkmodell abgeleitet werden? Wenn man von der Validität dieses Wirkmodells ausgeht, können einige grundsätzliche Zusammenhänge untersucht und deren Bedeutung für eine robuste Planung herausgearbeitet werden. Mit Hilfe eines validen Wirkmodells werden dann in Kapitel 5 die Wirkgrößen und Wirkmechanismen des Systems der Karosserieverfügbarkeit konkretisiert und deren Wirksamkeit in einer Laborumgebung isoliert untersucht.

Wie sind analytische und simulative Ansätze zur taktischen Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit vor dem Hintergrund der Antworten auf die ersten beiden Forschungsfragen und unter der Forderung robuster Ergebnisse zu beurteilen? Die Forschungsfragen eins und zwei bilden gleichsam das Fundament, um den veröffentlichten Stand der Planungsmethoden zu beurteilen, weiterzuentwickeln und die Methoden untereinander zu vergleichen, mit dem Zweck, Möglichkeiten und Grenzen sowie Stärken und Schwächen der Methoden in Bezug auf die taktische Produktionsplanung herauszuarbeiten. In den Abschnitten 6.1 und 6.2 werden analytische und simulative Ansätze betrachtet. Abschließend wird in Kapitel 7 das Zielsystem reflektiert, welches Bezugspunkt für die Bewertung der Systemergebnisse ist.

Abschließen werden diese Arbeit eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Blick auf den Bedarf für weiterführende Forschung im Kapitel 8.

3 Produktionstheoretische Einordnung

3.1 System der Karosserieverfügbarkeit

Nach Bossel ist „System“ ein Begriff, den der Mensch als Beobachter zur Beschreibung bestimmter Objekte einsetzt. Er nennt drei Merkmale, die gleichzeitig gegeben sein müssen, um die Bezeichnung „System“ zu rechtfertigen: Erstens muss ein konkreter Zweck erkennbar sein, der Systemzweck. Zweitens muss das Objekt eine Struktur aufweisen, d.h. es muss über Elemente und deren Wirkungsverknüpfung verfügen, die Systemstruktur. Drittens muss eine Systemidentität vorhanden sein: ein System verliert durch Teilung die Fähigkeit, den Systemzweck zu erfüllen. Diese letzte Eigenschaft heißt auch Systemintegrität.⁵³ Sind also Zweck, Struktur und Integrität gegeben, dann kann man von einem System sprechen und die Eigenschaften heißen Systemzweck, Systemstruktur und Systemintegrität.

Die Größen, mit denen man den Zustand eines Systems zu jedem Zeitpunkt vollständig beschreiben kann, heißen Zustandsgrößen. Eine Zustandsgröße unterscheidet sich durch einige wichtige Eigenschaften von anderen Systemgrößen. Alle Zustandsgrößen eines Systems sind unabhängig voneinander und zur Beschreibung des Systems notwendig, somit kann keine Zustandsgröße durch eine andere oder eine Kombination von mehreren anderen Zustandsgrößen dargestellt werden. Die Anzahl der Zustandsgrößen wird die Dimensionalität des Systems genannt. Zustandsgrößen werden auch Speichergrößen genannt, weil ihr aktueller Wert sich aus der Summe der Veränderungen in der Vergangenheit ergibt. Ein System heißt dynamisch, wenn sich die Zustandsgrößen im betrachteten Zeitraum verändern. Alle Systeme sind grundsätzlich dynamisch, bei entsprechender Wahl des Betrachtungszeitraums. Systeme sind umschlossen von einer Systemgrenze, welche die Systemumwelt und das System trennt. System und Systemumwelt stehen in einer gegenseitigen Ursache-Wirkungsbeziehung: Die Umwelt wirkt auf das System durch Einwirkungen, das System wirkt auf die Umwelt durch Auswirkungen. Die Einwirkungen aus der Umwelt sind nicht von dem Verhalten des Systems abhängig. Die einwirkenden Größen heißen deshalb auch Umweltparameter. Diejenigen Zustandsgrößen, die zu Auswirkungen führen, heißen auch Verhaltensgrößen oder Ausgangsgrößen. Für die Ziehung der Systemgrenze können drei Kriterien angeführt werden. Erstens sollten die Kopplungen innerhalb des Systems deutlich stärker sein, als zwischen dem System und seiner Umwelt. Zweitens sollte eine Grenze dort gezogen werden, wo Kopplungen nicht funktionsrelevant für den Systemzweck sind. Drittens sollten Systemgrenzen dort gezogen werden, wo Wirkungen nicht durch das System selbst beeinflusst werden. Änderungen von Zustandsgrößen können durch Einwirkungen oder durch systeminterne Prozesse verursacht werden. Die Wirkung wird bestimmt durch die Systemstruktur, in der die Reaktionsweise auf Änderungsimpulse festgelegt ist. Man kann deshalb auch von der Wirkungsstruktur des Systems sprechen. Die Wechselwirkungen zwischen den Zustandsgrößen innerhalb des Systems heißen Rückkopplungen. In einem System kann es neben den Umweltparametern auch systeminterne Größen geben, die eine Rolle in der Wirkungsstruktur spielen, selbst aber vom System nicht beeinflusst werden. Die Größen heißen Systemparameter.⁵⁴

Reale Systeme sind häufig komplex, das heißt, sie weisen zahlreiche Wechselwirkungen auf, was

⁵³Vgl. Bossel (2004), S.35.

⁵⁴Vgl. Bossel (2004), S.35ff.

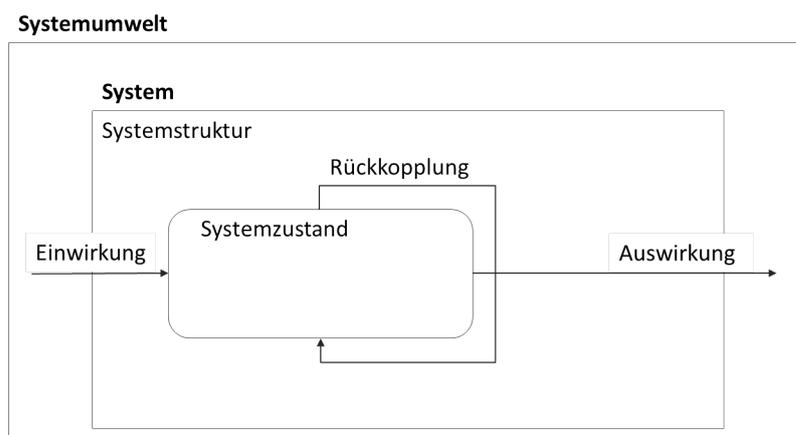


Abbildung 4: Systeme im Allgemeinen

ihr Verhalten schwer vorhersehbar macht. Ein Verfahren zur Reduktion der Komplexität ist die Modularisierung von Systemen, also die Bildung von Teilsystemen. Für jedes Teilsystem ist das übrige System Systemumwelt. Die Einwirkungsgrößen der Systemumwelt werden durch das Verhalten des Teilsystems nicht beeinflusst. Die Analyse eines solchen Teilsystems ist in der Regel einfacher.⁵⁵ Dyckhoff bezeichnet diesen Prozess gedanklichen Zerlegens in einfachere Module und Wiederaufbaus als Systemanalyse und Systemsynthese.⁵⁶

Manche Systemgebilde weisen eine hierarchische Struktur von Teilsystemen auf, in der die jeweils übergeordnete Stufe der untergeordneten Stufe als Umwelt dient und die Führungsgrößen, beziehungsweise die Oberziele, vorgibt.

In der Literatur ist es ein nicht unüblicher Ansatz, die Produktion als System zu betrachten. So spricht beispielsweise Dangelmaier von der Produktion als einem Input-Output-System, dessen In- und Output Güter sind.⁵⁷ Der systemtheoretische Ansatz wird auch in dieser Arbeit als Werkzeug eingesetzt, um das komplexe Gebilde der Automobilproduktion zu analysieren und den untersuchten Sachverhalt der Karosserieverfügbarkeit als Modell und Teil der Produktion darzustellen. Um sich dem Begriff des Produktionssystems zu nähern, soll zunächst der Kern des Begriffs der Produktion definiert werden, um daraus die charakteristischen Merkmale eines Produktionssystems abzuleiten. Weber definiert die Produktion als "der betriebliche Umwandlungs- bzw. Transformationsprozess, durch den aus den Einsatzgütern andere Güter oder Dienstleistungen erstellt werden".⁵⁸ Güter können auf vielfältige Weise unterschieden werden, für die Produktion verwendete Güter werden spezifiziert als Inputgüter und Outputgüter, wobei Inputgüter die eingesetzten Güter sind, Outputgüter die ausgebrachten Güter.⁵⁹ Die Güter können materieller oder immaterieller Natur sein. Wenn in diesem Zusammenhang von Produktion gesprochen wird, dann geht es stets um die betriebliche Produktion im Speziellen. Der Betrieb sei hier nach Weber definiert als eine gesellschaftliche Einrichtung mit dem Ziel der

⁵⁵Vgl. Bossel (2004), S.43ff.

⁵⁶Vgl. Dyckhoff (2006), S.10.

⁵⁷Vgl. Dangelmaier (2009), S.1ff.

⁵⁸Weber (2009), S.14.

⁵⁹Vgl. Weber (2009), S.4.

Fremdbedarfsdeckung.⁶⁰ Damit wird betriebliche Produktion abgegrenzt, beispielsweise von der Produktion eines Ökosystems oder der Produktion zum Eigenverbrauch.

Eine nähere Betrachtung der Transformationen in einem Produktionssystem findet sich bei Dangelmaier, der die Transformation von Zustand, Zeit und Ort der Güter unterscheidet. Zustandstransformationen sind Änderungen der Qualität oder des Status der Güter. Die Zeittransformation bezieht sich auf die zeitliche Differenz zwischen dem Eingang in ein System und dem Ausgang aus einem System, ohne dass eine Transformation des Zustands stattfindet. Lager- und Warteprozesse fallen unter diese Kategorie. Schließlich sind Ortstransformationen zu nennen, bei denen der Zustand des Gutes selbst nicht verändert wird, wohl aber der Ort der Bereitstellung für den folgenden Prozess.⁶¹ Dyckhoff spricht in diesem Zusammenhang von einer weiten Auslegung des Begriffs der Transformation, worunter er die qualitative, quantitative, räumliche oder zeitliche Veränderung subsumiert.⁶²

Bezieht man nun die Begriffsbestimmungen von Systemen im Allgemeinen auf die Produktion, so ergeben sich folgende Analogien: Das Produktionssystem ist ein Teilsystem des übergeordneten Systems „Betrieb“. Dieses übergeordnete System gibt die Oberziele vor. Einwirkungen und Auswirkungen heißen im Produktionssystem Input und Output und sind grundsätzlich Güter, materielle oder immaterielle. Der Systemstruktur entspricht die Produktionsstruktur, in deren Rahmen der Transformationsprozess abläuft. Oben wurde definiert, dass Zustandsgrößen Speichergrößen sind, deren zeitpunktbezogener Wert sich aus der Summe der Veränderungen der Vergangenheit ergibt. Für die Anwendung des Systemkonstrukts auf die Produktion sollen die Zustandsvariablen und deren Veränderungen näher spezifiziert werden: die Zustandsvariablen in der Produktion sind als Bestandsgrößen zu verstehen, die Veränderungen der Bestandsgrößen als Stromgrößen. Bestandsgrößen sind grundsätzlich zeitpunktbezogen, Stromgrößen sind zeitraumbezogen.⁶³

Modellbildung

Mit dem Werkzeug der Systembildung wird der untersuchte Bereich definiert, mittels Modellbildung werden zweckgebundene Abbilder des Systems erzeugt. Modelle seien hier nach Roski definiert als „eine für einen bestimmten Zweck gebildete, vereinfachende Abbildung eines als System aufgefassten Realitätsausschnitts“.⁶⁴ Modelle werden im Prozess der Modellierung erzeugt, bei dem ein reales System abstrahiert und idealisiert wird.⁶⁵ Nach VDI-Richtlinie 3633 ist Abstraktion ein „Verfahren zur Reduzierung der Komplexität eines Problems durch Trennung der für bestimmte Aspekte der Problemlösung wichtigen und unwichtigen Details“.⁶⁶ Idealisieren ist ein Verfahren, bei dem ein System auf die relevanten Eigenschaften reduziert wird.⁶⁷ Arnold et. al klassifizieren Modelle nach drei Kriterien: Einsatzzweck, Art der Information

⁶⁰Vgl. Weber (2009), S.6.

⁶¹Vgl. Dangelmaier (2009), S.4.

⁶²Vgl. Dyckhoff (2006), S.3.

⁶³Vgl. Dyckhoff (2006), S.26.

⁶⁴Roski, R: Einsatz von Aggregaten - Modellierung und Planung, Duncker und Humblot, Berlin 1986, in Bandow, Holzmüller (2010), S.8.

⁶⁵Vgl. Bandow, Holzmüller (2010), S.18.

⁶⁶VDI-Richtlinie 3633.

⁶⁷Vgl. Bandow, Holzmüller (2010), S.18.

und Art der Abstraktion. Nach dem Einsatzzweck werden beispielsweise Beschreibungsmodelle, Erklärungs- und Kausalmodelle, Simulationsmodelle und Entscheidungs- bzw. Optimierungsmodelle unterschieden. Beschreibungsmodelle werden zur Darstellung von Elementen und deren Beziehungen verwendet. Erklärungs- und Kausalmodelle untersuchen den Zusammenhang von Ursache und Wirkung im System. Simulationsmodelle werden eingesetzt um komplexe Ursache-Wirkungszusammenhänge zu untersuchen, die analytisch schwer oder gar nicht darstellbar sind. Entscheidungs- und Optimierungsmodelle erweitern die Ursache-Wirkungszusammenhänge um eine Zielfunktion, die eine Bewertung der Szenarien ermöglicht und die günstigste Lösung zur Erreichung definierter Ziele auszuwählen hilft. Nach Art der Information unterscheiden die Autoren zwischen quantitativen und qualitativen Modellen. Dabei beinhalten die quantitativen Modelle ausschließlich kardinal messbare Daten. Die Ursache-Wirkungszusammenhänge sind durch Gleichungen und Ungleichungen abgebildet. Qualitative Modelle hingegen beinhalten auch ordinal und nominal messbare Informationen. Schließlich wird nach Art der Abstraktion zwischen deterministischen und stochastischen Modellen, statischen und dynamischen Modellen, sowie Total- und Partialmodellen unterschieden. Bei einem deterministischen Modell sind alle dem Modell zugrunde liegenden Informationen bekannt, bei einem stochastischen Modell gibt es unsichere Daten, die durch Zufallsvariablen abgebildet werden. In dynamischen Modellen wird die Zeit explizit modelliert, in statischen ist dies nicht der Fall. In einem Totalmodell wird der abzubildende Sachverhalt vollständig modelliert, in einem Partialmodell werden Teilbereiche dargestellt, die nur einen Ausschnitt zeigen und untereinander in einer definierten Beziehung stehen.⁶⁸

Abbildung 5 zeigt schematisch, wie die Struktur des Wirksystems im Planungsmodell berücksichtigt werden kann. Zunächst ist festzustellen, dass nur derjenige Teil des Wirksystems im Planungsmodell berücksichtigt werden kann, der bekannt ist, also Teil eines Wirkmodells ist. Der erklärte Teil des Wirksystems kann dann im Planungsmodell berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung der Wirkmechanismen kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen, nämlich modellendogen und modellexogen, wobei diese beiden Formen nicht grundsätzlich als gleichwertig zu betrachten sind. Eine endogene Berücksichtigung von Wirkmechanismen bedeutet, dass der datengenerierende Prozess Teil des Planungsmodells ist, und die Ergebnisse dieses datengenerierenden Prozesses keine Eingangsdaten sind, sondern im Modell durch Ursache und Wirkung erzeugt werden. Es gibt bestimmte Wirkmechanismen, die sowohl endogen, als auch exogen berücksichtigt werden können. So könnte beispielsweise ein schwankender Bestand im Karosseriesortierer als Datenreihe exogen in das Modell integriert werden, oder die Ursache für die Schwankung, beispielsweise verschiedene Schichtmodelle der Produktionsgewerke oder Störungen im Produktionsablauf (siehe hierzu Abschnitt 4.1.6) explizit modelliert werden.

3.2 Charakteristika der untersuchten Produktionsstruktur

Es wurde beschrieben, dass die Karosserieverfügbarkeit als Ausgangsgröße eines Produktionssystems betrachtet werden kann. Dieses System ist wiederum Bestandteil eines übergeordneten Produktionssystems, der Produktion mit stabiler Auftragsfolge.⁶⁹ Die wesentlichen strukturellen

⁶⁸Vgl. Arnold et al. (2008), S.36ff.

⁶⁹siehe Abschnitt 1.1.

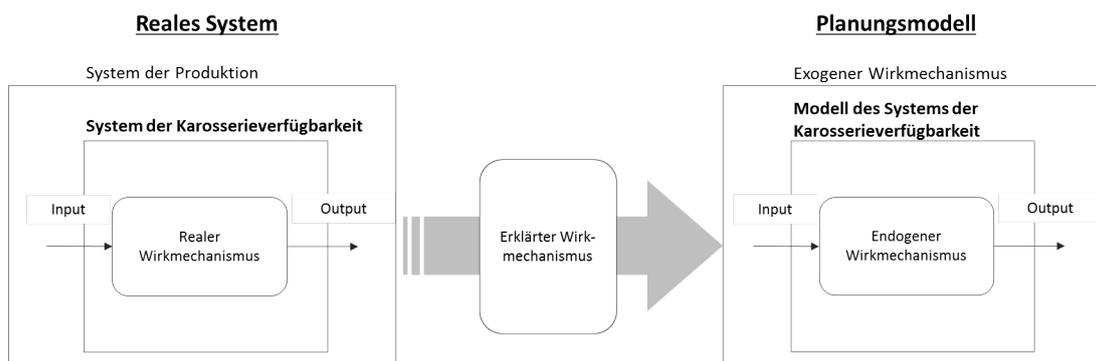


Abbildung 5: Modellendogener und -exogener Wirkmechanismus

Merkmale und Prinzipien dieser Systeme werden im Folgenden erläutert. Ziel der Darstellung ist es, die Prämissen zu definieren, unter denen das System der Karosserieverfügbarkeit funktioniert, wie es später beschrieben wird. Dieses hier dargestellte, übergeordnete Regelwerk bildet die Grundlage für die Abläufe im Wirkzusammenhang der Karosserieverfügbarkeit und dient der Abgrenzung des hier betrachteten Produktionssystems von anderen Produktionssystemen. Versteht man Produktionssysteme als Input-Output-Systeme, so lassen sich nach Dyckhoff anhand des Inputs, des Outputs und der Transformation Produktionstypen charakterisieren. Für diese Arbeit von besonderer Relevanz ist die Einteilung nach den Kriterien des Outputs und der Transformation, wie sie im Folgenden vorgenommen wird: Bezogen auf den Output, die Prozessausbringung, gibt es zahlreiche Merkmale, nach denen sich Produktionstypen charakterisieren lassen. Für das System der Karosserieverfügbarkeit sind vor allem die Ausbringungsmerkmale „Produktspezifizierung“ und „Auslösung der Produktion“ relevant. Die hier untersuchte automobiler Produktion produziert ausschließlich als „Bestellproduktion“⁷⁰, beziehungsweise als „Auftragsfertiger“, es ist also ein externer Auftrag, der die Produktion eines Fahrzeugs auslöst.⁷¹ Ferner erfolgt die Spezifizierung des Fahrzeugs, beziehungsweise des Auftrags, weitgehend kundenindividuell, das heißt, ein Kunde kann in einem vorgegebenen Rahmen von Möglichkeiten sein Fahrzeug nach Wunsch konfigurieren. Diese beiden Charakteristika haben entscheidenden Einfluss auf das System der Karosserieverfügbarkeit, führen sie doch dazu, dass zum einen die Anzahl der Karosserien im System der Anzahl der Aufträge im System entspricht, eine wichtige Feststellung für das Wirksystem, zum anderen sind Anzahl und Art der Karosserien, die in einem bestimmten Zeitraum im System enthalten sind, natürlich im Rahmen der möglichen Karosserievarianten, abhängig von der Kundennachfrage. Für eine weitergehende Spezifizierung der untersuchten Produktion wird nun der Blick auf den Transformationsprozess gerichtet, für den nach Dyckhoff die Innenstruktur des Produktionssystems entscheidend ist. Die Elemente dieser Struktur sind die sogenannten Produktiveinheiten, die zu Produktionssegmenten zusammengefasst werden können. Mit Hilfe der Merkmale der Natur-/Ingenieurwissenschaftlichen Prozesscharakteristika, nämlich der Vergenz⁷², der Stufigkeit, dem Repetitionstyp und dem

⁷⁰ Vgl. Dyckhoff (2010), S.15ff.

⁷¹ Vgl. Gudehus (2012), S.285.

⁷² „Unter Vergenz wird die Struktur der wesentlichen Materialflüsse innerhalb des Produktionssystems verstanden, die in durchgängig (glatt), konvergierend (synthetisch), divergierend (analytisch) und umgruppierend

Anordnungstyp kann die Innenstruktur charakterisiert werden. Die Produktion als Ganzes ist segmentiert in drei Produktionsgewerke, den Rohbau, die Lackierung und die Montage. Diese drei Gewerke werden als Produktionsstufen interpretiert, zwischen den Materialflussbeziehungen herrschen, worin der Output eines Vorgängergewerks gleichzeitig den Input eines Nachfolgewerks darstellt. Jedes Gewerk ist wiederum eine Zusammenfassung verschiedener Produktionssegmente und Produktiveinheiten. Die Einteilung erfolgt zum einen aufgrund der Ähnlichkeit der angewendeten Produktionsverfahren, zum anderen aufgrund der Vergenz: für den Rohbau ist das Fügen der einzelnen Karosserieteile zu einer ganzen Karosserie charakteristisch. Aus der Perspektive der Vergenz sind die Materialflüsse im Wesentlichen konvergent. In der Lackierung wird die gewünschte Oberfläche der Karosserie hergestellt, dieser Prozess ist als durchgängig anzusehen. Im Montageprozess wird das Fahrzeug schließlich aufgebaut. Obwohl es hier auch divergierende Prozesse gibt, beispielsweise wenn die Türen der Karosserie zur separaten Montage demontiert werden, ist das bestimmende Wesensmerkmal der Montageprozesse die Konvergenz. Bezüglich des Repetitionstyps liegt im Wesentlichen die sogenannte Serienproduktion vor. Auch wenn eine tatsächlich kundenindividuelle Herstellung eines Fahrzeugs nicht ausgeschlossen ist, werden im Allgemeinen erhebliche Mengen einer bestimmten Produktart über einen definierten Zeitraum hergestellt, ohne dass zwischenzeitlich die Produktart gewechselt wird. Zuletzt wird das betrachtete Produktionssystem noch bezüglich der räumlichen Anordnung als Fließproduktion charakterisiert. Dies begründet sich daraus, dass Produktiveinheiten, Produktionssegmente und Produktionsstufen analog ihrer Reihenfolge im Arbeitsplan linear hintereinander angeordnet sind. Die Prozesse in den Gewerken unterliegen im Allgemeinen einem gemeinsamen Takt. Im Gegensatz zu einer echten Fließbandproduktion mit starrer Kopplung des Materialflusses sind die Prozesse im hier betrachteten Produktionssystem durch Puffer entkoppelt, diese können einzelne Förderplätze nach einzelnen Arbeitsstationen sein, oder große Förderstrecken oder Hochregallager zwischen den Produktionsstufen. Nach Dyckhoff spricht man deshalb in diesem Fall von einer Reihenproduktion.⁷³

Dieser allgemeinen Einordnung des Produktionssystems folgt nun die Betrachtung einiger spezieller Aspekte, die der Abgrenzung innerhalb des gesteckten Rahmens dienen und gerade in der Automobilindustrie wichtige Unterscheidungsmerkmale darstellen.

Überblick

Abbildung 6 zeigt die Zusammenhänge grafisch. Es wird zum Einen das Produktionssystem gezeigt, zum anderen der Kunde, der Ausgangspunkt und Ziel des Kundenauftragsprozesses ist. Der Kundenauftragsprozess (synonym Kunde-zu-Kunde-Prozess) beinhaltet in einer groben Einteilung die folgenden Prozessschritte:⁷⁴

- Auftragsannahme
- Auftragseinplanung

(austauschend) unterschieden wird“ (Dyckhoff (2010), S.21.).

⁷³Vgl. Dyckhoff (2010), S.19ff.

⁷⁴Vgl. zum K to K Prozess Herold (2005), S.24ff.

- Fertigung/Produktion
- Distribution
- Fahrzeugübergabe

Im Produktionssystem ist die koordinierende Instanz für den Kundenauftragsprozess die Organisationseinheit der Produktionsplanung und -steuerung. Für das Produktionssystem beginnt der Kundenauftragsprozess mit dem Zugang der Kundenaufträge aus dem Prozess der Auftragsannahme. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass Produktionsaufträge ausschließlich auf Kundenaufträgen basieren, das also *Built-to-Order* praktiziert wird. Jenem Prozess geht in diesem Modell ein Prozess der Programmplanung voraus, in dem auf Basis von Bedarfsprognosen und unter Berücksichtigung der Produktionskapazitäten ein strategisches, taktisches und operatives Produktionsprogramm festgelegt wird. Dieses Produktionsprogramm stellt die Primärbedarfsplanung dar, enthält also Art, Anzahl und zeitliche Verteilung der zu produzierenden Fertigfahrzeuge. Aus diesem Primärbedarfsplan wird der Sekundärbedarf, also der Bedarf an Produktionsmaterialien abgeleitet. Der Input aus der Produktionsprogrammplanung und der Auftragsannahme bildet den Rahmen, in dem im Prozess der *Auftragseinplanung* letztendlich die zu produzierende Montagereihenfolge und gegebenenfalls weitere geplante Reihenfolgen gebildet werden.

Bezogen auf die tatsächliche Fahrzeugproduktion (i.e.S.) wird die Soll-Reihenfolge für den Karosseriebau auch aus dem Prozess der Auftragseinplanung vorgegeben. Die Steuerung der Produktion erfolgt in Bezug auf die Karosserien und in der Montage auf die Fahrzeuge im Wesentlichen nach dem *Push-Prinzip*, die Koordination welche Karosserie als nächste zu produzieren ist, erfolgt also nicht aus dem Karosseriefluss selbst, sondern einer übergeordneten Instanz. Der Montageprozess ist eine Ausprägung des Typus der *Variantenfließfertigung*, es werden also kundenindividuelle Produkte in einer getakteten Fließfertigung hergestellt, bei der die Arbeitsstationen in der Reihenfolge der Arbeitsschritte angeordnet sind. Ein wichtiges logistisches Ziel der Produktion ist es, eine *stabile Auftragsfolge* (s. Abschnitt 1.1) in der Montage sicherzustellen. Produktionsaufträge und Karosserien können bis zum Fertigungspunkt, an dem die Montage beginnt, *variabel oder fest zugeordnet* sein, das heißt Aufträge können die zugehörigen Karosserien im Produktionsverlauf tauschen, oder es ist im Gegensatz hierzu von Beginn an festgelegt, welchem Auftrag welche individuelle Karosserie zugeordnet ist. Die logistische Entkopplung zwischen dem Karosseriebau und der Montage erfolgt mit Hilfe eines *wahlfreien Karosseriesortierers*, in den die Karosserien nach Abschluss des Karosseriebaus eingelagert und aus dem die Karosserien für die Montage ausgelagert werden. Der wahlfreie Karosseriesortierer erlaubt, auf jede beliebige Karosserie des Bestands zuzugreifen.

Auftragsproduktion - Built to Order

Ein wichtiges Spezifikum eines Produktionssystems ist die Art und Weise, wie ein Produktionsauftrag ausgelöst wird. Analog zu Dyckhoff⁷⁵ unterscheidet Lödning zwei grundsätzliche Formen der Auftragsauslösung, die Auftragsfertigung und die Lagerfertigung. In Ergänzung differenziert

⁷⁵Vgl. Dyckhoff (2010), S.15ff.

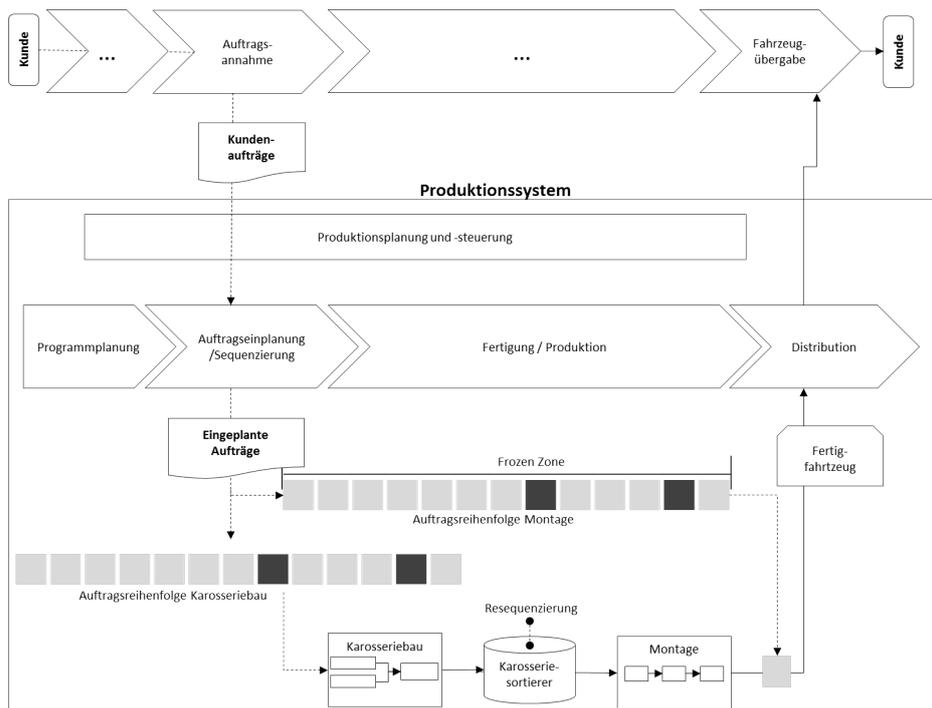


Abbildung 6: Charakteristik der untersuchten Produktionsstruktur

der Autor innerhalb der Auftragsfertigung die Auslösearten nach dem Verhältnis der durch den Kundenauftrag bestellten Menge, und der im Produktionsauftrag umgesetzten Menge. Es könnte die Bestellmenge eines Kundenauftrags in mehrere Produktionsaufträge, oder auch umgekehrt, die Bestellmengen mehrerer Kunden in einen Produktionsauftrag umgesetzt werden.⁷⁶

In der Lagerfertigung sind Kundenauftrag und Produktionsauftrag entkoppelt, der Bedarf des Kunden, die Bestellmenge, wird im Allgemeinen aus einem Bestand an Fertigprodukten gedeckt.⁷⁷ Aufgrund der hohen Anzahl der Fertigfahrzeugvarianten in Verbindung mit hohen Fertigfahrzeugkosten ist eine Strategie zur Auftragsauslösung im Sinne der Lagerfertigung im Allgemeinen nicht sinnvoll, wenngleich es durchaus Mischsysteme gibt.

Klug beschreibt eine Mischform von Built to Order und Built to Forecast (i.e. Lagerfertigung), bei der der sogenannte „Kundenentkopplungspunkt“ den Übergang von einer prognoseorientierten zu einer kundenauftragsorientierten Planung markiert.⁷⁸ In diesem Sinne wird in dieser Arbeit von der Auslöseart „Auftragsproduktion“ ausgegangen. Es ist der modellhafte Fall gemeint, in dem ein Kunde ein Fahrzeug bestellt, und dieser Kundenauftrag mit der Bestellmenge gleich eins in genau einen Produktionsauftrag überführt wird. Für die in dieser Arbeit verwendete Systematik ist letztere Einschränkung nicht notwendig, sie dient lediglich der vereinfachten Darstellung. Eine Programm- und Materialbedarfsplanung die zeitlich vor dem Kundenentkopplungspunkt liegt, wird prognoseorientiert durchgeführt.

⁷⁶ Vgl. Lödding (2004), S.134ff. oder auch Schuh (2006), S.122 und 136ff.

⁷⁷ Vgl. Lödding (2004), S.136.

⁷⁸ Vgl. Klug (2010), S.362ff.

Variantenfließfertigung

Eine Produktion nach dem Prinzip der Variantenfließfertigung vereint Eigenschaften einer kundenindividuellen Einzelfertigung und einer Großserienproduktion mit getakteter Fließfertigung.⁷⁹ Charakteristisch für ein solches Produktionssystem ist die Produktion einer Vielzahl von Produktvarianten in einer Produktionsstruktur, in der die Bearbeitungsstationen in der Reihenfolge der Bearbeitungsschritte angeordnet sind; letzteres ist, wie oben bereits beschrieben, eine wichtige Eigenschaft der Fließband- und Reihenproduktion. Ein prominentes Beispiel für eine Variantenfließfertigung ist der automobiler Montageprozess.

In einer Variantenfließfertigung kommt dem Abgleich von Arbeitsbedarf und Arbeitskapazität eine besondere Bedeutung zu.⁸⁰ Das System ist taktgebunden und die Arbeitsstationen sind in der Regel durch ein Fördersystem gekoppelt.⁸¹ Nicht zuletzt durch die Installation vielseitig einsetzbarer Anlagen und Maschinen können unterschiedliche Produkte gleichzeitig produziert werden. Dafür werden an einzelnen Arbeitsstationen unterschiedliche Arbeitsvorgänge zusammengefasst, das heißt, bei variierenden Produktspezifika variieren auch die an einer Station auszuführenden Tätigkeiten. Dies kann zu Schwankungen in den Bearbeitungszeiten an den Arbeitsstationen führen.⁸²

Man kann bezogen auf das Planungsproblem des Bedarfs-Kapazitätsabgleichs zwischen dem kurzfristigen oder operativen Prozess der Reihenfolgeplanung und dem eher in der taktischen Frist verorteten Bandabgleich, also der Planung der Folge der Arbeitsstationen und Puffer in einem Band der Variantenfließfertigung, unterscheiden.⁸³ Obwohl die Reihenfolgeplanung ein operativer Prozess ist, sind beide Problemstellungen bedeutende Aspekte bei der Gestaltung der Produktionsstruktur im Rahmen der taktischen Produktionsplanung, stehen diese doch in enger Wirkungsbeziehung. Durch die Verteilung der Arbeitsvorgänge auf eine Folge von Arbeitsstationen und die Festlegung der Kapazität der Arbeitsstationen wird der Rahmen bestimmt, in dem später die Arbeitsbelastung durch die (geplante) Folge der Arbeitsaufträge entsteht.⁸⁴ Das Ziel der Reihenfolgeplanung ist dann in dem durch den Bandabgleich gesteckten Rahmen eine bezüglich der Planungskriterien möglichst optimale Reihenfolge zu bilden. Das operative Ziel im System der Karosserieverfügbarkeit ist, für diese geplante Reihenfolge (der Montage) die passenden Karosserien bereitzustellen. Dies ist umso wichtiger, je weniger flexibel der nachfolgende Prozess auf einer Veränderung der Auftragsreihenfolge reagieren kann. Da Flexibilität in der Variantenfließfertigung im allgemeinen mit Kosten verbunden ist, wird ein bestimmtes Maß an Flexibilität installiert werden, so viel wie nötig und so wenig wie möglich, dem wirtschaftlichen Prinzip folgend. Auch auf dieses installierte oder zu installierende Maß an Flexibilität ist die Leistungsfähigkeit des Systems der Karosserieverfügbarkeit auszulegen.

⁷⁹Vgl. Boysen et.al.(2007), S.759.

⁸⁰Vgl. dazu auch Kapitel 2.

⁸¹Vgl. Boysen et.al. (2007), S.760.

⁸²Decker (1993), S.9.

⁸³Vgl. Boysen et.al. (2007), S.760 oder Emde et.al. (2010), S.3174.

⁸⁴Vgl. Emde et.al. (2010), S.3174.

Auftragseinplanung

Die Auftragseinplanung ist ein für das System der Karosserieverfügbarkeit sehr bedeutsamer Prozess, da dieser als Output die Soll-Daten für die Bereitstellung der Karosserien für den Start des Montageprozesses liefert.

Wenn ein Kunde ein Fahrzeug bestellt, wird im Allgemeinen bei der Erstellung des Kundenauftrags die Übergabe des fertigen Fahrzeugs terminiert, unter Berücksichtigung der notwendigen Kapazitäten und zeitlichen Vorläufe für Teilebeschaffung, Fertigung und Distribution. Ferner wird vor der Annahme eines Kundenauftrags die technische Baubarkeit der ausgewählten Fahrzeugkonfiguration geprüft. Entscheidend für die Produktion ist, dass aus dem Prozess der Auftragsannahme nach Maßgabe der vorgegebenen Restriktionen technisch und logistisch baubare Kundenaufträge resultieren.

Die Auftragseinplanung ist gleichsam der Startpunkt des Kundenauftragsprozesses für das Produktionssystem. Der Umwandlung der Kundenaufträge zu Produktionsaufträgen und der Einplanung der Produktionsaufträge in die Auftragsreihenfolgen geht ein rollierender Prozess der Produktionsprogramm- und Kapazitätsplanung voraus. Zwei unterschiedliche Ansätze, diese beiden aufeinanderfolgenden Planungsprozesse zu integrieren, stellen Arnold et.al. dar: die hierarchische und die sukzessive Planung. Bei der sukzessiven Planung werden die unterschiedlichen Planungsaufgaben (Programmplanung, Auftragseinplanung) nacheinander und strikt getrennt durchgeführt. Bei der hierarchischen Planung stehen die Planungsprobleme zwar in einem Über- und Unterordnungsverhältnis, allerdings ist die Möglichkeit der Rückkopplung von unten nach oben vorgesehen, so dass Planungsprobleme der unteren Ebene unter Umständen früher erkannt und bei der Planung der oberen Ebenen berücksichtigt werden können.⁸⁵

Im Prozess der Auftragseinplanung erhalten schließlich alle Produktionsaufträge unter Berücksichtigung der Einplanungsrestriktionen einen Montagestarttermin und eine Reihenfolgennummer, wodurch die geplante Montagereihenfolge festgelegt wird.⁸⁶ Solche Einplanungsrestriktionen können beispielsweise aufgrund begrenzter Kapazitäten bestimmter Ressourcen notwendig sein. Mögliche konkrete Anwendungsfälle sind die Beschränkung der Anzahl von Rechtslenkern in einem bestimmten Zeitraum wegen des erhöhten Montageaufwands oder das Verbot, dass überlange Fahrzeuge direkt hintereinander in die Montage einlaufen, damit der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen vorgeschriebene Mindestmaße nicht unterschreitet.

Entscheidend für diese Arbeit ist, dass es einen Planungskontext der Programmplanung gibt, der gemeinsam mit der Anbahnung und Annahme der Kundenaufträge wesentliche Prämissen für die Erstellung der geplanten Montagesequenz definiert, nämlich welche Fahrzeuge in welchen Zeiträumen zu produzieren sind. Damit ist auch festgelegt, welche Karosserien in diesen Zeiträumen für die Fahrzeugmontage benötigt werden. Ferner werden bei der Auftragseinplanung weitere Restriktionen berücksichtigt, die neben den geplanten Fertigstellungsterminen der Fahrzeuge die Freiheitsgrade zur Erstellung der geplanten Montagesequenz weiter einengen.

⁸⁵Vgl. Arnold et.al.(2008), S.194ff.

⁸⁶Vgl. Grill-Kiefer in Engelhardt-Nowitzki et al., Supply Chain Network Management, (2010), S.357.

Push-Prinzip in der Karosseriefertigung

Bezüglich der Steuerungsmethode in Produktionssystemen lassen sich zwei gegensätzliche Ansätze unterscheiden, die Steuerung nach dem „Push-Prinzip“ und die Steuerung nach dem „Pull-Prinzip“. Zur theoretischen Abgrenzung seien zunächst einige allgemeine Aspekte aufgeführt, die im Anschluss auf das System der Karosserieverfügbarkeit übertragen werden. Hopp und Spearman unterscheiden die beiden Prinzipien anhand zweier Ansätze: Erstens nach der Zugehörigkeit der Informationsquelle zum Steuerungssystem, zweitens nach den Auswirkungen auf die Bestände im Produktionssystem. Beide Ansätze sollen zur Beschreibung des „Push-Prinzips“ kurz erläutert werden. Liegt die Informationsquelle, die die Produktion im gesteuerten System antreibt, außerhalb des gesteuerten Systems selbst, so spricht man von „Push-Steuerung“. Es gibt also einen übergeordneten Produktionsplan, der die Arbeit im System koordiniert. Der aktuelle Systemzustand kann in den Plan eingehen, muss dies aber nicht zwingend; dies ist eine Frage der Organisation der Planung. In jedem Fall steuert der Plan direkt die Produktion, die Zustandsgrößen wirken, wenn überhaupt, indirekt auf die Steuerung ein. In einem nach dem „Pull-Prinzip“ gesteuerten System gibt es einen solchen Plan nicht. Die Zustandsgrößen innerhalb des Systems regeln die Produktion direkt. Das Unterscheidungsmerkmal wird noch deutlicher, wenn man die Definition heranzieht, die die beiden Autoren für die „Pull-Produktion“ verwenden: „A pull system establishes an a priori limit on the work in process, while a push system does not“.⁸⁷ Ein nach dem „Pull-Prinzip“ gesteuertes System wird über die Veränderung einer Zustandsgröße gesteuert, zum Beispiel über den Materialbestand. Verringert sich ein bestimmter Bestand um eine Größe, so dass eine bestimmte Meldegrenze unterschritten wird, dann wird die Nachproduktion zur Wiederauffüllung des Bestandes gestartet. Hat der Bestand seine ursprüngliche Größe wieder erreicht, wird die Materialproduktion gestoppt. Ein ex ante festgelegter Bestand kann nicht überschritten werden, wenn nur die Menge nachproduziert wird, die vorher entnommen wurde. Schwankungen nach unten, in Richtung eines Absinkens des Bestandes, sind hingegen durchaus möglich. Im Gegensatz dazu wird die Nachproduktion in einem nach dem „Push-Prinzip“ gesteuerten System nicht durch Entnahme, sondern durch Anweisung gesteuert. Die Bestandsmenge wird nach oben lediglich durch die Pufferkapazität beschränkt. Erfüllt beispielsweise ein Vorgängerprozess sein Produktionsziel, der Nachfolgeprozess, der die Rolle des Kunden oder Abnehmers innehat, ist aber gestört, so muss das Material zwischen den Prozessen gepuffert werden. Ist die maximale Pufferkapazität erreicht, kann der Vorgängerprozess kein Material mehr abliefern. Bezogen auf das Management der Karosserieverfügbarkeit impliziert eine „Pull-Steuerung“, dass es für jede Karosserievariante mindestens einen Vertreter im Lager, dem Karosseriesortierer, gibt. Wird eine bestimmte Variante für einen Montageauftrag entnommen, dann würde durch die Entnahme die Wiederbeschaffung im Sinne der Neufertigung angestoßen werden. Es wäre nun denkbar, dass es zwischen vielen Prozessschritten Läger gäbe, die bestimmte Aufbauvarianten vorhalten und die wiederum gemäß der „Pull-Steuerung“ die vorgelagerten Prozesse mit der Nachlieferung beauftragen. Es wäre aber auch denkbar, dass solch ein Auftrag zur Wiederbeschaffung lediglich als Impuls zum Start einer neuen Rohbaukarosse verwendet wird.

⁸⁷Hopp, Spearman (2008), S.358.

In dieser Arbeit wird von einer Steuerung des Karosserieflusses im Modus der „Push-Steuerung“ ausgegangen.

Variable und feste Auftragszuordnung

Die variable Zuordnung von Auftrag und Karosserie ist eine Methode, die der Strategie der späten Variantenbildung beziehungsweise des „Postponement“ folgt.⁸⁸ Die variable Zuordnung von Auftrag und Karosserie, die in dieser Arbeit „Variantenproduktion“ genannt wird, ermöglicht prinzipiell an jeder Stelle im Produktionsprozess einem Auftrag eine passende Karosserie und umgekehrt, einer Karosserie einen passenden Auftrag zuzuordnen. Dieses aus der Perspektive der Aufträge „Tauschen von Karosserien“ kann dazu genutzt werden, Verzögerungen in der Karosserieproduktion auszugleichen und ceteris paribus die Karosserieverfügbarkeit zu erhöhen. Der „Order Penetration Point“, welcher die kundenauftragsneutrale und die kundenspezifische Fertigung voneinander trennt, wurde vom Karosseriebau „downstream“ zur Montage verschoben. Bis zur Montageauflage wird die Karosserie als neutrales und flexibel verwendbares Zulieferteil behandelt. Damit ergibt sich eine relativ variantenneutrale Fertigung bis zur Montage, ab der die Spezifizierung und somit die Variantenbildung überproportional zunimmt.⁸⁹ Der Nutzen der variablen Auftragszuordnung wird deutlich, wenn man sich die Konsequenzen der gegenläufigen Strategie verdeutlicht, der „Auftragsproduktion“: Die feste Zuordnung von Anfang an, führt dazu, dass eine geplante Auftragsreihenfolge nur dann eingehalten werden kann, wenn die zu dem Auftrag gehörende Karosserie im Karosseriesortierer vor der Montage verfügbar ist. Das heißt, es ist genau auf eine bestimmte Karosserie zu warten, wenn ein bestimmter Auftrag in die Montage gesendet werden soll. Kommt die beschriebene Karosserie beispielsweise eine Stunde zu spät, muss der Auftrag eben diese Stunde warten, bevor er frühestens in die Montage geschickt werden kann. Intuitiv ist klar, dass ein Tauschprozess umso leichter stattfinden kann, je weniger Karosserievarianten es gibt und je früher der Tausch im Prozess des Karosseriebaus durchgeführt wird. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass eine einzige Neuordnung von Auftrag und Karosserie stattfindet und zwar zwischen Ende des Karosseriebauprozesses und Beginn des Montageprozesses. Es kann einem Auftrag dann jede Karosserie mit passender Variante zugeordnet werden, die im Karosseriesortierer verfügbar ist. Von einer endgültigen Zuordnung von Auftrag und Karosserie vor physischer Verfügbarkeit der Karosserie wird hier abgesehen.

Wahlfreier Karosseriesortierer

Der wahlfreie Karosseriesortierer übernimmt die Funktion eines Prozesspuffers oder auch Karosserielagers zwischen dem Karosseriebau- und dem Montageprozess. „Die Notwendigkeit, innerhalb eines Materialflusssystemes ein Lager vorzusehen, entsteht, wenn zwischen verschiedenen Bereichen unterschiedliches Quellen- und Senkenverhalten besteht, das unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten weder technisch noch organisatorisch synchronisierbar ist“.⁹⁰ Das die Syn-

⁸⁸Vgl. Meißner (2009), S.21ff.

⁸⁹Klug (2010), S.393.

⁹⁰Arnold (2009), S.173.

chronisierbarkeit von Karosseriebau und Montage unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten im Allgemeinen nicht immer möglich ist, liegt daran, dass der Einsatz von Produktionsressourcen grundlegend verschieden ist. Während beispielsweise in der Lackiererei ein hoher Grad an Automatisierung vorliegt und die Produktion sehr anlagenintensiv organisiert ist, ist die Produktion in der Fahrzeugmontage deutlich personalintensiver. Klug schreibt, der Automatisierungsgrad in der Montage liege lediglich bei 5-40%.⁹¹ Es gibt einen systematischen Anreiz, die Betriebsmodelle der aufeinanderfolgenden Gewerke unterschiedlich zu gestalten, je nachdem, wie die Ressourcen „Anlage“ und „Personal“ kostenmäßig zu bewerten sind; die Bewertung kann beispielsweise in Abhängigkeit vom Produktionsstandort unterschiedlich ausfallen.

Es können Karosserien, die den Karosseriebauprozess verlassen, aufgenommen und gezielt bestimmte Karosserien in die Montage gesteuert werden. Es wird davon ausgegangen, dass es für die Steuerung des Sortierers ein Lagerverwaltungssystem gibt, welches stets das aktuelle Lagerabbild enthält und welches mit der übergeordneten Systemarchitektur der Produktionsplanung und -steuerung korrespondiert, von dort also Aufträge zur Ein- und/oder Auslagerung bestimmter Karosserien erhält. Der Sortierer hat eine bestimmte Anzahl von Plätzen, in welche Karosserien eingelagert werden können, er kann also eine bestimmte Anzahl von Karosserien aufnehmen. Diese Eigenschaft heißt hier auch die Kapazität des Sortierers. Der Sortierer kann schematisch für unterschiedliche Funktionen unterteilt werden, diese können beispielsweise sein:

- die Auswahl der Karosserien für die Produktion mit stabiler Auftragsfolge
- die Entkopplung unterschiedlicher Arbeitszeitmodelle in Karosseriebau und Montage
- die Entkopplung gegenüber Anlagenstörungen in Karosseriebau und Montage.

Entscheidend für den Kontext dieser Arbeit ist, dass faktisch jede Karosserie, welche sich im Sortierer befindet, im möglichen Zugriff ist, also ausgewählt werden könnte. Deshalb heißt der Karosseriepuffer „wahlfrei“.

⁹¹Klug (2010), S.420.

4 Wirkmodell

Das Wirkmodell ist eine Abbildung des Ursache-Wirkungszusammenhangs im System der Karosserieverfügbarkeit. Es ist im Prozess der taktischen Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit die Basis für die Planungsmodelle. In Kapitel 2 wurde dargestellt, dass es ein Ziel dieser Arbeit ist, ein integriertes und generisches Wirkmodell zu gestalten. Im Folgenden wird zunächst eine Hypothese über das Wirkmodell entwickelt. Dafür wird der Stand der Wissenschaft zu Modellen des Systems der Karosserieverfügbarkeit konsolidiert, und darauf aufbauend erweitert. Im Anschluss wird das zunächst qualitative Modell mathematisch formalisiert. Das formalisierte Wirkmodell wird seinerseits wiederum verwendet, um eine Validitätsstudie durchzuführen.

4.1 Grundmodell des Systems der Karosserieverfügbarkeit

Grafische Darstellung

Es wurde erläutert, dass die Karosserieverfügbarkeit das Ergebnis einer Koinzidenzprüfung ist, nämlich der Prüfung der Verfügbarkeit der richtigen Karosserie zur richtigen Zeit am richtigen Ort. Die zeitliche Folge der Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit entspricht der zeitlichen Folge dieser Prüfungsergebnisse. Die Folge der Prüfungsergebnisse ergibt sich aus der zeitlichen Folge der Ereignisse in der Struktur des Systems, also aus der konkreten Folge der Werte der Einflußgrößen, sowie deren Zusammenwirken. Dieses zeitliche Zusammenwirken von Ereignisfolgen kann dargestellt werden, wie in Abbildung 7 gezeigt.⁹²

In diesem grafischen Modell werden Produktionsaufträge als Quadrate mit einer eindeutig

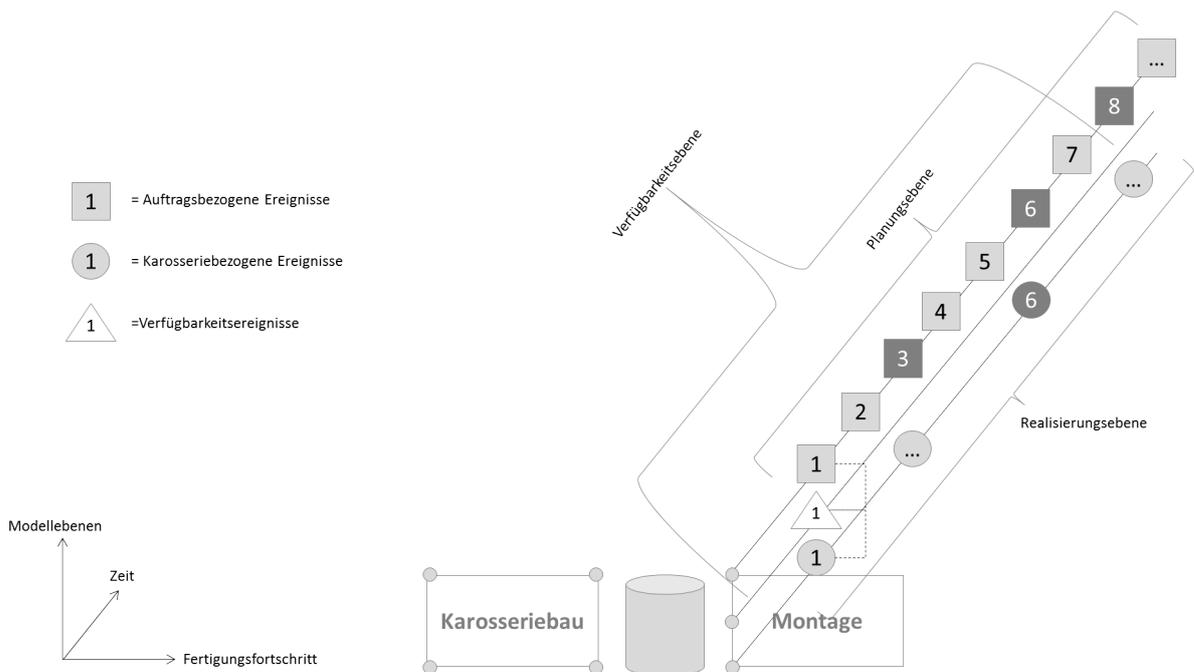


Abbildung 7: Grafisches Modell zur Darstellung des Wirkprinzips

⁹²Grafiken angelehnt an Dangelmaier (2009), S.56ff.

identifizierenden Auftragsnummer dargestellt. Die Füllfarbe kennzeichnet eine bestimmte Karosserieart, die Karosserievariante, die für die Realisierung eines bestimmten Auftrags benötigt wird. Die Symbole für Karosserien sind gefüllte Kreise. Die Füllfarbe kennzeichnet die Karosserievariante, analog zu der Auftragsfarbe. Die Zahl kennzeichnet die Zugehörigkeit zu einem bestimmten Auftrag, der gemäß der Push-Fertigung die Erzeugung dieser speziellen Karosserie angestoßen hat. Die Dreiecke symbolisieren die Ereignisse der Prüfung der Karosserieverfügbarkeit für einen bestimmten Auftrag, letzterer wird durch die Nummer zugeordnet. Die Farbe steht für das Prüfungsergebnis: weiß entspricht „Karosserie verfügbar“, schwarz entspricht „Karosserie nicht verfügbar“. Ferner enthält das Modell die Produktionsgewerke und den Karosseriesortierer, erstere durch Rechtecke, zweitere durch eine zylindrische Form repräsentiert.

Aufträge und Karosserien werden in drei Dimensionen beziehungsweise auf drei Achsen positioniert: dem Fertigungsfortschritt, der Zeit und allgemein den „Modellebenen“. Jede Positionierung eines Auftrags oder einer Karosserie stellt die Beschreibung eines Ereignisses in den drei genannten Dimensionen dar.

Die Kreise zu Beginn und Ende des Karosseriebaus und der Montage sind Bezugspunkte des Fertigungsfortschritts, die den „Start“ beziehungsweise das „Ende“ der Gewerkeprozesse markieren. Auf der diagonalen Zeitachse werden Aufträge und Karosserien zeitlich eingeordnet. Die „Modellebenen“ erlauben ganz grundsätzlich eine Klassifizierung der Ereignisse als Ergebnisse bestimmter Prozessklassen. Es wird zwischen der Planungs-, der Verfügbarkeits- und der Realisierungsebene unterschieden. Die Planungsebene dient der Darstellung geplanter Ereignisse beziehungsweise der Ergebnisse von Planungsprozessen an bestimmten Objekten. Der Planungszustand der Objekte entspricht dem nach dem Prozess der Auftragseinplanung, das heißt, die Aufträge der Planungsebene wurden bereits „eingeplant“. Die Realisierungsebene dient der Darstellung realisierter Ereignisse an bestimmten Objekten. Die Verfügbarkeitsebene dient der Darstellung der Ereignisse der realisierten Verfügbarkeitsprüfung.

Dieses Modellkonstrukt dient dazu, Ereignisse an bestimmten Objekten zu klassifizieren und in ihrer zeitlichen Folge darzustellen. Der Folge der Objekte auf einer Zeitachse einer bestimmten Modellebene entspricht eine konkreten Ereignisfolge. Beispielsweise ist die Folge der Aufträge auf der diagonalen Achse auf der Planungsebene am Punkt des Starts der Montage die geplante Folge der Startereignisse der Aufträge in die Montage mit den korrespondierenden geplanten Startterminen. Die Folge der Aufträge auf der Zeitachse am Punkt des Starts in die Montage auf der Ebene der Verfügbarkeit ist die zeitliche Folge der Karosserieverfügbarkeitsprüfungen. Die Folge der Karosserien auf der Zeitachse am Punkt des realisierten Starts in den Karosseriebau ist die zeitliche Folge der realisierten Startereignisse des Karosseriebaus.

Jedes Ereignis ist Ergebnis eines Prozesses. Beispielsweise ist das geplante Startereignis eines Montageauftrags Ergebnis des Einplanungsprozesses. Das Endereignis des Karosseriebaus ist Ergebnis des Karosseriebauprozesses. Der Abstand zwischen zwei Ereignissen auf der Zeitachse entspricht dem Zeitraum, der zwischen dem Eintritt der beiden Ereignisse verstreicht. Die Prozesse können rein auf der Planungsebene, der Verfügbarkeitsebene oder der Realisierungsebene erfolgen, also horizontal, oder vertikal zwischen den Ebenen. Ein horizontaler Übergang auf einer Ebene zeigt den geplanten Start und das geplante Ende eines Prozesses, beziehungsweise

den realisierten Start und das realisierte Ende eines Prozesses. Der vertikale Übergang zeigt die Umsetzung eines geplanten Ereignisses.

4.1.1 Fabrik- und Produktionsstruktur

Die Fabrikstruktur, die in diesem Modell berücksichtigt wird, entspricht weitestgehend dem Modell, welches Inman verwendet hat.⁹³ Rohbauprozess und Oberflächenprozess werden in dieser Arbeit zusammengefasst zu dem Karosseriebauprozess; der Karosseriebauprozess und der Montageprozess sind entkoppelt durch einen wahlfreien Karosseriesortierer. Dargestellt wird die Grundstruktur in Abbildung 8.

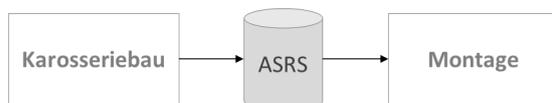


Abbildung 8: Grundstruktur des Fabrikmodells

Inman geht davon aus, dass es eine geplante Montagereihenfolge gibt, die „Final Assembly Sequence“. Er verwendet in seinem Fabrikmodell die „Body Sequence“, die Eingangsreihenfolge des Karosseriebaus, und die „Post-Paint Sequence“, die Ausgangsreihenfolge des Oberflächenprozesses.⁹⁴ Die „Body Sequence“ unterscheidet sich nicht von der geplanten Montagesequenz.

Gushikin et.al. verwenden neben der „Final Assembly Sequence“ auch eine Eingangssequenz in den Karosseriebau und eine Ausgangssequenz aus dem Karosseriebau. Sie unterscheiden als Ergänzung zu Inman aber bewusst zwischen der geplanten Eingangssequenz in den Karosseriebau und der geplanten Montagesequenz, in dem sie vorschlagen, unterschiedliches Durchlaufverhalten durch den Karosseriebau von unterschiedlichen Karosserievarianten bei der Gestaltung der Eingangssequenz des Karosseriebaus zu berücksichtigen.⁹⁵

In einem ersten Schritt werden die von den genannten Autoren berücksichtigten Sachverhalte auf die Modellierungsform übertragen, welche in dieser Arbeit angewendet wird. Die geplante Start-Reihenfolge wird als Folge von Aufträgen auf der Zeitachse in der Planungsebene am Punkt „Start-Montage“ platziert. Interpretieren lässt sich diese Position als die geplante Folge der Start-Ereignisse für die Montageaufträge. Die geplante Start-Reihenfolge des Karosseriebaus wird analog als Folge von Aufträgen auf der Zeitachse in der Planungsebene am Punkt „Start-Karosseriebau“ abgetragen. Auch hier lautet die Interpretation, dass die Folge der geplanten Start-Ereignisse der Aufträge in den Karosseriebau gezeigt wird. Allerdings ist in diesem Fall der Auftrag als „Karosseriebauftrag“ zu interpretieren, der für einen bestimmten Montageauftrag die Produktion einer bestimmten Karosserie anstößt. Die realisierte Start-Reihenfolge des Karosseriebaus wird als Folge von Karosserien auf der Realisierungsebene am Punkt „Start-Karosseriebau“ positioniert, die realisierte Ende-Reihenfolge analog am Punkt „Ende-Karosseriebau“. Die Ereignisse der Verfügbarkeitsprüfung werden am Punkt „Start-Montage“ auf der Verfügbarkeitsachse positioniert. Zusammengefasst enthält das Modell die folgenden Ereignisfolgen:

⁹³Vgl. Inman (2003), S.847ff.

⁹⁴Vgl. Inman (2003), S.849.

⁹⁵Vgl. Gushikin et.al. (2008), S.655ff.

- geplante Start-Reihenfolge der Montage als Ergebnis des Einplanungsprozesses
- geplante Start-Reihenfolge des Karosseriebaus als Ergebnis des Einplanungsprozesses
- realisierte Start-Reihenfolge des Karosseriebaus als Ergebnis des Karosseriebauprozesses
- realisierte Ende-Reihenfolge des Karosseriebaus als Ergebnis des Karosseriebauprozesses
- realisierte Ergebnisse der Verfügbarkeitsprüfung
- realisierte Start-Reihenfolge der Montage als Ergebnis des Re-Sequencing-Prozesses.

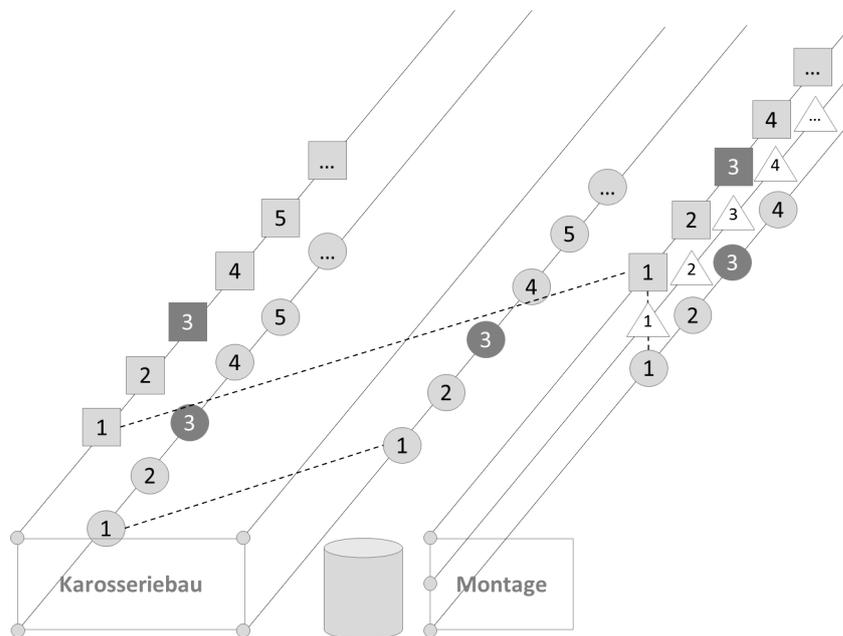


Abbildung 9: Modell gemäß der Beiträge von Inman und Gushikin et.al.

Abbildung 9 zeigt die genannten Punkte grafisch. Die gestrichelten Linien skizzieren die Übergänge von einer Ereignisfolge zur nächsten, die in den genannten Beiträgen behandelt werden:

- Übergang vom geplanten Start-Ereignis zum realisierten Start-Ereignis des Montageauftrags
- Übergang vom geplanten Start-Ereignis der Montage zum geplanten Start-Ereignis im Karosseriebau eines Auftrags
- Übergang vom realisierten Start-Ereignis in den Karosseriebau zum realisierten Ende-Ereignis aus dem Karosseriebau.

Der Füllstand und der genaue Inhalt im Karosseriesortierer wurden hier nicht explizit modelliert, sondern ergeben sich implizit zu jedem Zeitpunkt aus den Karosserien, die ein Ende-Ereignis des Karosseriebaus aufweisen, aber kein Start-Ereignis der Montage.

Abbildung 10 zeigt als potentielle Ergänzung der in Abbildung 9 gezeigten Sachverhalte die möglichen Ergebnisfolgen und Übergänge, die sich direkt aus dem Modellierungsansatz ableiten

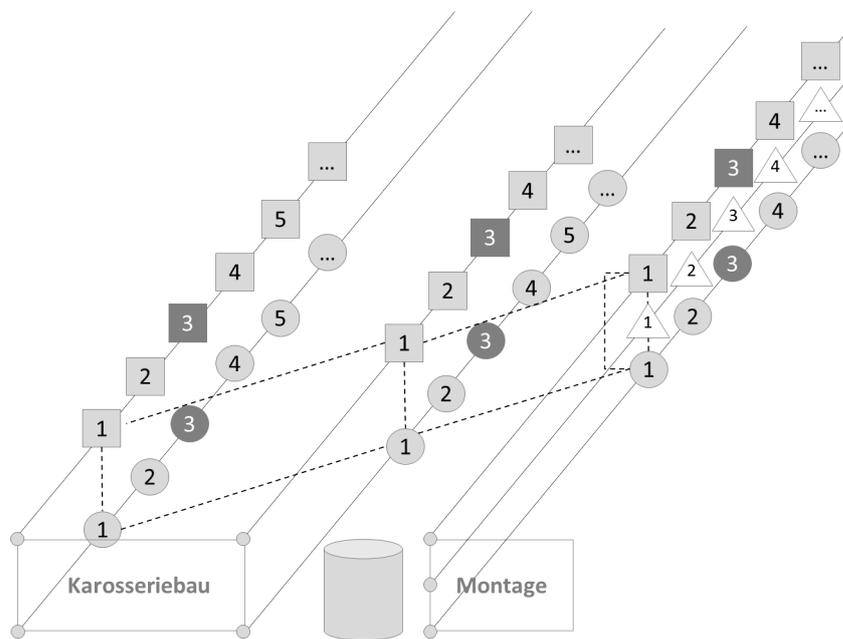


Abbildung 10: Theoretische Ergebnisfolgen und Übergänge im Modell

lassen. Durch einen Vergleich der bereits in der Literatur berücksichtigten Sachverhalte aus Abbildung 9 mit den theoretisch möglichen aus Abbildung 10 wird deutlich, in welcher Hinsicht der Stand der Literatur prinzipiell unvollständig ist, denn es ist grundsätzlich möglich, dass es zu jedem betrachteten Zustand im Fertigungsfortschritt auf der Realisierungsebene auch ein Pendant auf der Planungsebene geben könnte. Das vervollständigte Grundmodell in Abbildung 10 enthält die folgenden Ereignisfolgen:

- Die geplanten Start-Ereignisse der Montageaufträge
- Die realisierten Start-Ereignisse der Montageaufträge
- Die geplanten Ende-Ereignisse des Karosseriebaus
- Die geplanten Start-Ereignisse des Karosseriebaus
- Die realisierten Start-Ereignisse des Karosseriebaus
- Die realisierten Ende-Ereignisse des Karosseriebaus
- Die realisierten Ereignisse der Verfügbarkeitsprüfung und deren Ergebnis.

Es ergeben sich daraus die folgenden potentiellen Übergänge zwischen den Ereignisfolgen:

- Übergang von den geplanten Start-Ereignissen zu den realisierten Start-Ereignissen der Montage
- Übergang von den geplanten Start-Ereignissen der Montage zu den geplanten Ende-Ereignissen des Karosseriebaus

- Übergang von den geplanten Ende-Ereignissen des Karosseriebaus zu den realisierten Ende-Ereignissen des Karosseriebaus
- Übergang von den geplanten Ende-Ereignissen des Karosseriebaus zu den geplanten Start-Ereignissen des Karosseriebaus
- Übergang von den geplanten Start-Ereignissen des Karosseriebaus zu den realisierten Start-Ereignissen des Karosseriebaus
- Übergang von den realisierten Start-Ereignissen des Karosseriebaus zu den realisierten Ende-Ereignissen des Karosseriebaus
- Übergang von den realisierten Ende-Ereignissen des Karosseriebaus zu den realisierten Start-Ereignissen der Montage.
- Übergang von den geplanten Start-Ereignissen der Montage zu den realisierten Verfügbarkeitsprüfungen
- Übergang von den realisierten Verfügbarkeitsprüfungen zu den realisierten Start-Ereignissen der Montage

Die Verfügbarkeit beziehungsweise Nicht-Verfügbarkeit einer Karosserie ergibt sich im Grundmodell aus der Verfügbarkeit der passenden Karosserie oder Karosserievariante zu dem Zeitpunkt, zu dem die Verfügbarkeitsprüfung erfolgt. Zeitlich ist also relevant,

- wann die Karosserieverfügbarkeit geprüft wird, und
- wann eine Karosserie den Karosseriebauprozess verlässt.

Grafisch ist dies in Abbildung 11 dargestellt. Die horizontale gestrichelte Linie stellt gleichsam die Grenze der Verfügbarkeit dar. Alle Karosserien, die zu diesem Zeitpunkt im Bestand des Karosseriesortierers enthalten sind und der passenden Variante angehören, könnten verwendet werden. Da der Karosseriebestand hier nicht explizit dargestellt wird, sind dies alle Karosserien, die zum Zeitpunkt der Verfügbarkeitsprüfung den Karosseriebau verlassen haben, bei denen also das Ereignis des Endes des Karosseriebauprozesses zeitlich vor dem Ereignis der Verfügbarkeitsprüfung eingetreten ist, aber noch kein Start-Ereignis in die Montage. Im Folgenden wird dargestellt, wie die Ereignisfolgen im System der Karosserieverfügbarkeit zusammenwirken und wie sich daraus im Detail die Verfügbarkeit oder Nicht-Verfügbarkeit einer Karosserie ergibt. Es werden bei der Darstellung jeweils nur die für einen bestimmten Aspekt relevanten Teile des grafischen Modells verwendet.

4.1.2 Durchlaufzeit einer Karosserie im Karosseriebauprozess

Jede Karosserie einer bestimmten Karosserievariante muss ihren variantenspezifischen Karosseriebauprozess vollständig und erfolgreich in der definierten Qualität durchlaufen. Die Zeit, die dieser Durchlauf durch den Prozess „Karosseriebau“ in Anspruch nimmt, ist die Durchlaufzeit. Die Durchlaufzeit $[DLZ]$ sei allgemein definiert als der Zeitraum, der zwischen dem Zeitpunkt

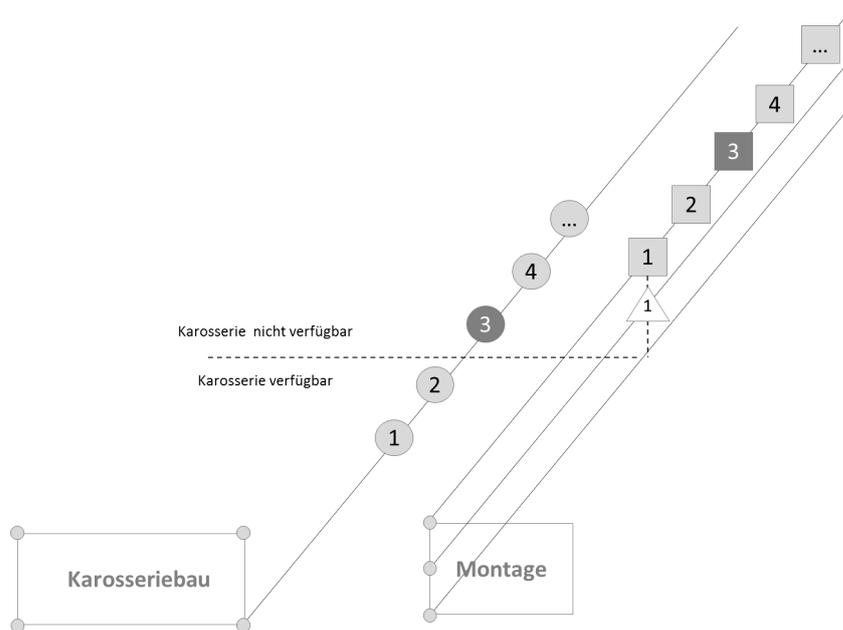


Abbildung 11: Karosserieverfügbarkeit im Grundmodell

des Starts eines Prozesses $[t^{Start}]$ und dem Zeitpunkt des Endes eines Prozesses $[t^{Ende}]$ verstreicht. Die Durchlaufzeit des Karosseriebauprozesses ergibt sich für eine Karosserie $[b]$ aus der Differenz der Eintrittszeitpunkte der Start- und Ende-Ereignisse, formal: $[DLZ_b^{KB} = t_b^{KB,Ende} - t_b^{KB,Start}]$. Im grafischen Modell entspricht die Durchlaufzeit dem Abschnitt auf der Zeitachse zwischen dem Start- und Ende-Ereignis einer bestimmten Karosserie, wie in Abbildung 12 gezeigt. Die Durchlaufzeit kann auf der Planungs- und auf der Realisierungsebene ermittelt werden als

- geplante Durchlaufzeit,
- realisierte Durchlaufzeit.

Sie kann ferner danach differenziert werden, ob diese bereinigt oder unbereinigt betrachtet wird, das heißt, ob bestimmte Zeitarten, beispielsweise arbeitsfreie Zeiten, herausgerechnet werden, oder nicht. Es können sich demnach ergeben die

- netto Durchlaufzeit, die bereinigt wurde, und die
- brutto Durchlaufzeit.

Abbildung 12 zeigt grafisch im Modell die Durchlaufzeit einer Karosserie als einen markierten Abschnitt auf der diagonalen Achse. Die geplante Durchlaufzeit aus der ex ante Perspektive ist die für einen Prozess und eine bestimmte Karosserie festgelegte oder angenommene Durchlaufzeit, die gemäß Planung zwischen den zukünftigen Ereignissen „Prozessbeginn“ und „Prozessende“ liegen wird, oder zwischen dem vergangenen Ereignis „Prozessbeginn“ und dem zukünftigen Ereignis „Prozessende“. Eine geplante Durchlaufzeit kann auch ex post betrachtet werden, wenn diese sich auf einen Planungsstand bezieht, also Planung, die in der Vergangenheit gültig war, bei der die geplanten Eintrittszeitpunkte der Ereignisse aus damaliger Perspektive aber noch in der

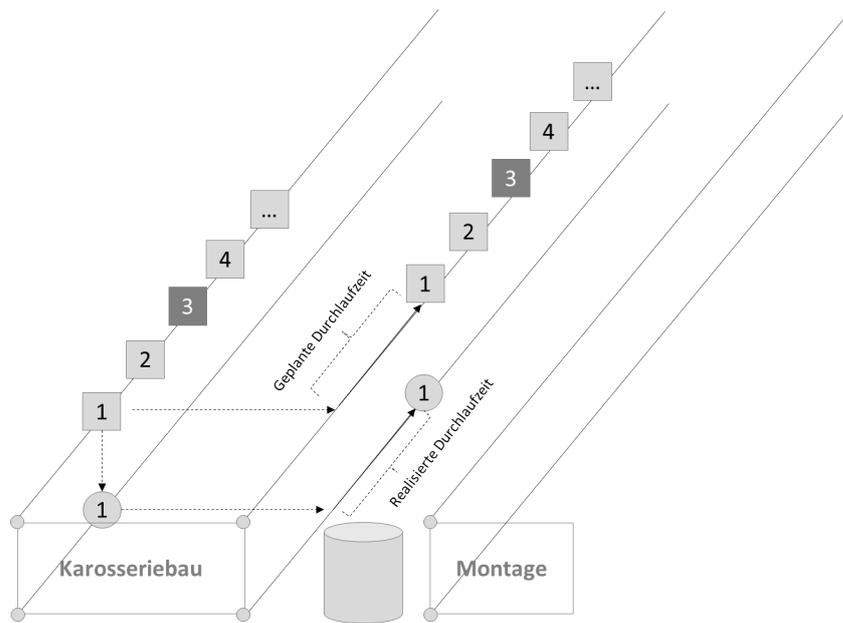


Abbildung 12: Durchlaufzeit einer Karosserie

Zukunft lagen, mittlerweile aber in der Vergangenheit liegen. Charakteristisch für die Planung ist die *ex ante* Perspektive, bei der zum Zeitpunkt der Planung mindestens das Ereignis „Prozessende“ in der Zukunft liegt oder lag. Konkret bezieht sich die geplante Durchlaufzeit im Modell auf die Differenz des geplanten Start- und geplanten Ende-Ereignisses des Karosseriebaus. Es wird in diesem Modell davon ausgegangen, dass eine Karosserie, die den Lackierungsprozess verlässt, unmittelbar im Sortierer verfügbar ist, der Prozess der Einlagerung also noch Bestandteil der Durchlaufzeit des Karosseriebauprozesses ist.

Die realisierte Durchlaufzeit ist der Zeitraum, bei dem Prozessbeginn und –ende auf der Realisierungsebene in der Vergangenheit liegen, es werden also hier nicht die geplanten Ereignisse für die Berechnung herangezogen, sondern die tatsächlich eingetretenen; im Modell das realisierte Start- und Endeereignis des Karosseriebaus.

Charakterisierung der Ergebnisfolge der Durchlaufzeiten

Eine Ergebnisfolge der realisierten Durchlaufzeiten entsteht durch Messung der Durchlaufzeiten an den Objekten, also den Karosserien im Karosseriebau, durch Vergleich der Start- und Ende-Ereignisse und zeitliche Ordnung der Messwerte in der zeitlichen Reihenfolge der Start- oder der Endereignisse. Die Werte innerhalb der Ergebnisfolge der Durchlaufzeiten werden im Allgemeinen nicht identisch sein, sondern verschieden, mal höher, mal niedriger, dies wird in dieser Arbeit als Schwankung oder Dynamik der Durchlaufzeit bezeichnet. Die Art und Weise wie die Durchlaufzeiten im Zeitverlauf schwanken, ist ein Charakteristikum der Struktur des Karosseriebauprozesses. Es soll hier unterschieden werden zwischen

- struktureller Dynamik und
- Dynamik in der Struktur des Prozesses.

Strukturelle Dynamik beschreibt die Schwankung der Durchlaufzeitwerte, die sich bei gleichbleibender Prozessstruktur ergibt. Die Dynamik in der Struktur der Prozesse beschreibt die Schwankung der Durchlaufzeitwerte, die sich durch eine Änderung der Struktur der Prozesse ergibt.

Die strukturelle Dynamik kann verschiedene Gründe haben und bei der Netto-, der Brutto- oder beiden Durchlaufzeitarten auftreten und sie kann ganz, teilweise oder auch gar nicht planerisch berücksichtigt sein. Zunächst werden Schwankungen der Netto-Durchlaufzeit betrachtet. Diese setzt sich grob aus den Zeitkomponenten der Bearbeitungszeit, Transportzeit, sowie Warte- und Liegezeit zusammen.⁹⁶ Jeder dieser Bestandteile kann eine Ursache für die Schwankung der Durchlaufzeit des Prozesses sein. Hinzu kommt, dass Prozesse unter Umständen ganz oder teilweise mehrfach durchlaufen werden, was im Folgenden kurz erläutert wird. Der Karosseriebauprozess wird hier sehr abstrakt betrachtet, als übergeordneter Prozess, der in viele Teilprozesse detailliert werden kann. Im ersten Schritt wären hier der Rohbauprozess und der Lackierungsprozess zu nennen. Innerhalb des Rohbaus unterscheidet man zwischen verschiedenen Aufbaustufen, innerhalb der Lackierung zwischen unterschiedlichen Prozessen der Oberflächenbehandlung.⁹⁷ Wenn eine Karosserie einen Prozess nicht erfolgreich durchläuft, dann muss diese nachgearbeitet werden. Deshalb sei zu den Prozessbestandteilen aus der Perspektive eines übergeordneten Prozesses die Wiederholung oder der Sonderprozess auf der Ebene der untergeordneten Prozesse hinzugefügt.

Die tatsächliche Durchlaufzeit ist in der realen Produktion Ergebnis eines komplexen Zusammenspiels unterschiedlicher Faktoren im Produktionssystem. Um den Charakter der Durchlaufzeitschwankung im System der Karosserieverfügbarkeit als Wirkung bestimmter Impulse aus der Systemumwelt deutlich zu machen, wird auf einige dieser Impulse im Folgenden kurz eingegangen:

Um die Prozessqualität zu kontrollieren, müssen regelmäßig Qualitätsprüfungen am Prozessprodukt durchgeführt werden. Bezogen auf die Durchlaufzeit ist es relevant, ob die Prüfungen in den Produktionsfluss integriert werden, oder ob die Karosserien für die Prüfungen aus dem Produktionsfluss ausgeschleust werden müssen.⁹⁸ Prüfungen im Fluss verlängern die Durchlaufzeit aller Karosserien. Die geprüfte Karosserie „erleidet“ die Prüfzeit, nicht geprüfte Karosserien müssen entsprechend der Prüfzeit warten. Prüfungen, bei denen eine Karosserie ausgeschleust wird, verlängern sicher die Durchlaufzeit der ausgeschleusten Karosserie und können die verbleibende Durchlaufzeit der nicht ausgeschleusten Karosserien verkürzen, weil letztere überholen und sich deren Wartezeit vor den nächsten Bearbeitungsschritten verkürzt. Eine solche Reduzierung ist natürlich nur möglich, wenn es Wartezeiten im Produktionsfluss gibt, denn die Bearbeitungs- und Transportzeit einer Karosserie werden durch solche ausschleusenden Prüfprozesse nicht beeinträchtigt.

Eine weitere Ursache für die Schwankung der Durchlaufzeit ist die Nacharbeit.⁹⁹ Nacharbeitsmaßnahmen werden an einem fehlerhaften Produkt ausgeführt, um die festgelegten Produk-

⁹⁶ Vgl. Küpper zitiert in Meißner (2008), S.73.

⁹⁷ Vgl. für die Unterprozesse in der Automobilproduktion: Klug (2010), S.404ff.

⁹⁸ Vgl. Meißner (2008), S.65.

⁹⁹ Vgl. Meißner (2008), S.64.

tanforderungen zu erfüllen.¹⁰⁰ Nacharbeiten, die in der Linie ausgeführt werden, können zur Durchlaufzeitverlängerung der nachgearbeiteten Karosserie und aller nachfolgenden Karosserien führen, wenn sie als zusätzliche Prozesszeit wirken und nicht eine andere Prozesszeitkomponente ersetzen. Beispielsweise könnte Nacharbeit während eines Warteprozesses durchgeführt werden, so dass sich die Nacharbeit nicht durchlaufzeitverlängernd auswirkt. Werden Karosserien zur Nacharbeit ausgeschleust, kann dieser Vorgang die Durchlaufzeit aller nachfolgenden Karosserien verkürzen bis zur Wiedereinschleusung. Weitere Gründe für Durchlaufzeitschwankungen finden sich in der Prozessstruktur. Gibt es beispielsweise parallele Subprozesse, dann können diese Schwankungen auslösen durch unterschiedliche Durchlaufzeiten, unterschiedliche Schichtmodelle, Störungen auf einer der Linien und ungeeignete Steuerung in den Sub-Prozess und aus dem Sub-Prozess nach anderen Logiken als FIFO oder FISFO.¹⁰¹ Aus der Produktperspektive können sich unterschiedliche Durchlaufzeiten für unterschiedliche Produktvarianten ergeben. Unterschiedliche Varianten können unterschiedliche Prozesszeiten aufweisen.¹⁰² Außerdem können Varianten in der Prozessqualität voneinander abweichen, so dass eine Variante anfälliger ist für Nacharbeit als eine andere. Durch diesen Effekt kann auch aus der Eingangsfolge der Karosserievarianten in den Karosseriebau eine wechselseitige Wirkung auf die Durchlaufzeit entstehen. Unabhängig von den oben genannten Einflüssen auf die Durchlaufzeit, gibt es aus der Perspektive der Brutto-Durchlaufzeit weitere Quellen der Schwankung. Hier sind vor allem unterschiedliche Schichtmodelle zu nennen, die sich in Pausen, Schichtanzahl und Schichtlänge sowie in der Anzahl und Wahl der Arbeitstage unterscheiden.

Im Fall der Dynamik in der Struktur der Prozesse ändert sich die Prozessstruktur eines endogenen oder exogenen Prozesses dergestalt, dass sich diese Änderung in den Prozessergebnissen niederschlägt. Beispiele hierfür sind:

- eine Änderung in den Arbeitszeitmodellen, die zu einer Veränderung im Füllstandsverlauf des Karosseriesortierers führt
- die Änderung der Nacharbeitsorganisation, beispielsweise veränderte Priorisierungen in der Abarbeitungsreihenfolge, die zu einer systematisch veränderten Durchlaufzeit bestimmter Karosserievarianten führt
- eine sich verbessernde Prozessqualität durch Lernkurveneffekte für einige oder alle Karosserievarianten, die die Nacharbeitsquote senkt
- eine sich verschlechternde Prozessqualität durch Anlagenabnutzung für einige oder alle Karosserievarianten, die die Nacharbeitsquote erhöht
- ein sich änderndes Käuferverhalten bezüglich bestimmter Fahrzeugvarianten, die Karosserievarianten darstellen, welches die Karosserievariantenzusammensetzung des Produktionsprogramms verändert.

Zusammenfassend ergibt sich die Folge der realisierten Durchlaufzeiten im Modell aus dem Karosseriebauprozess, welcher nicht modellendogen dargestellt ist, sondern modellexogen. Lediglich

¹⁰⁰ Vgl. DIN EN ISO 8402 S.27.

¹⁰¹ Vgl. Meißner (2008), S.67.

¹⁰² Vgl. Meißner (2008), S.66.

die Eingangs- und Ausgangsereignisse der Karosserien finden sich in diesem sehr abstrakten Modell als Eingangsdaten wieder. Welche Durchlaufzeit an der einzelnen Karosserie entsteht und wie die Folge der Durchlaufzeiten aufgebaut ist, hängt unter anderem von der strukturellen Dynamik ab: einerseits von exogenen Größen, die im Modell nicht sichtbar sind, wie beispielsweise den Subprozessen des Karosseriebauprozesses, andererseits von endogenen Größen, wie beispielsweise der Karosserievariante.¹⁰³ Neben der strukturellen Dynamik kann es eine Dynamik in der Struktur der Prozesse geben, so dass es zu Änderungen der Prozessergebnisse im Zeitverlauf kommen kann. Ändern sich verschiedene Prozesse gleichzeitig, können sich die Wirkungen dieser Änderungen gegebenenfalls gegenseitig verstärken oder abschwächen.

Da die Durchlaufzeiten schwanken, stellt sich die Frage, wie eine Annahme über die zu erwartenden Durchlaufzeiten für die Planung getroffen werden kann. Wenn man davon ausgeht, dass Bearbeitungszeit, Transportzeit und Liegezeit in einer getakteten Fließfertigung annähernd konstant sind, dann ist die Durchlaufzeit einer Karosserie abhängig von der Wartezeit. Die konstante Bearbeitungszeit an jeder Station im Prozess wird ausgedrückt durch die konstante Taktzeit $[TT]$. Die Wartezeit in einem System wird maßgeblich von dessen Füllstand beeinflusst. Reduziert man die Durchlaufzeitschwankungen auf die Wartezeitkomponente, dann lässt sich ein linearer Zusammenhang aus dem mittleren Systemfüllstand $[WIP = \text{work in process}]$ und der mittleren Durchlaufzeit ableiten, welcher „Little´s Law“ genannt wird:¹⁰⁴

$$\overline{DLZ} = WIP \times TT$$

Die Durchlaufzeiten aus der ex post Perspektive können als Messdaten erhoben werden. Für Planungsaktivitäten ist aber auch die erwartete Durchlaufzeit einer Karosserie relevant. Die erwartete Durchlaufzeit einer Karosserie $[b]$ zu einem bestimmten Planungszeitpunkt $[t]$ ergibt sich gemäß obigem „Gesetz“ aus dem aktuellen Umlaufbestand im Prozess $[WIP_t]$ und der erwarteten mittleren Taktzeit $[TT^E]$:¹⁰⁵

$$DLZ_{b,t}^E = WIP_t \times TT^E$$

In der operativen Produktionsplanung und -steuerung ist in jedem Fall eine wie auch immer geartete Annahme über eine erwartete Durchlaufzeit der Karosserien zu treffen, diese kann der obigen Darstellung folgen, oder ein anderes Konzept verwenden.

4.1.3 Vorlaufzeit eines Auftrags

Allgemein beschreibt die Vorlaufzeit $[VLZ]$ den Zeitraum zwischen dem Eintreten zweier Ereignisse: eines, welches den Beginn der Vorlaufzeit markiert, ein zweites, welches das Ende der Vorlaufzeit darstellt, wobei das zweite Ereignis, gegenüber welchem die Vorlaufzeit besteht, be-

¹⁰³Vgl. hierzu beispielsweise Abschnitt 4.1.7.

¹⁰⁴Vgl. Hopp, Spearman (2008), S.239.

¹⁰⁵Vgl. Meißner (2008), S.74.

tont wird. Die Vorlaufzeit bezieht sich auf den Auftrag, nicht wie die Durchlaufzeit auf die

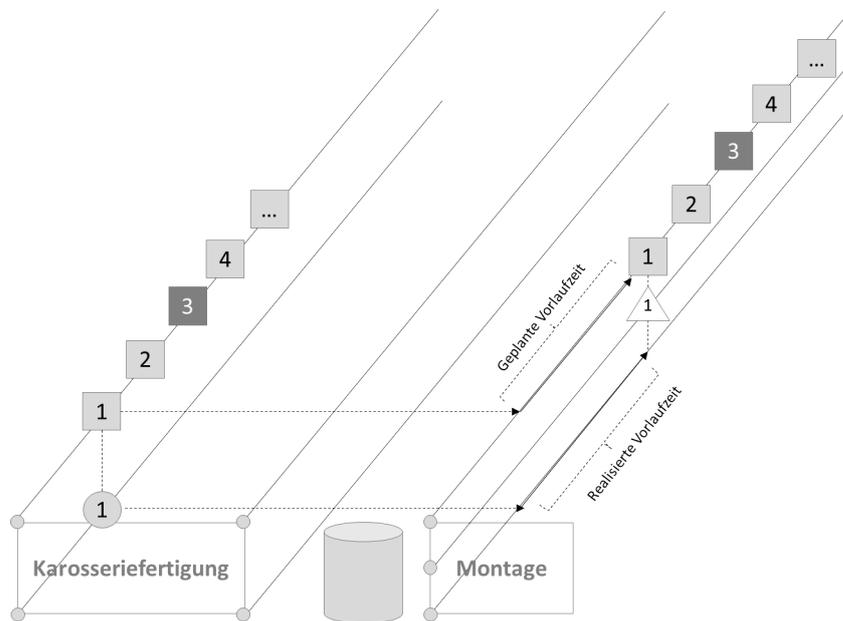


Abbildung 13: Geplante und realisierte Vorlaufzeit eines Auftrags

Karosserie. Die Kategorien, nach denen man die Vorlaufzeit differenzieren kann, sind gleich denen der Durchlaufzeit.

- Geplante Vorlaufzeit
- Realisierte Vorlaufzeit
- Brutto Vorlaufzeit
- Netto Vorlaufzeit

In diesem Modell ist, wie in der Abbildung 13 gezeigt, der Beginn der geplanten Vorlaufzeit eines geplanten Montageauftrags der korrespondierende geplante Start-Termin im Karosseriebau. Der Ende-Termin der geplanten Vorlaufzeit entspricht dem geplanten Start-Termin in die Montage. Die Aussagen zur ex ante und ex post Perspektive für die Durchlaufzeit gelten für die Vorlaufzeit analog. Die geplante Vorlaufzeit setzt sich zusammen aus

- der geplanten Durchlaufzeit
- der geplanten Wartezeit im Karosseriesortierer.

Somit ist der geplante Füllstand im Karosseriesortierer der Teil, der die geplante Wartezeit im Karosseriesortierer determiniert und eine wichtige Komponente der geplanten Vorlaufzeit. Die realisierte Vorlaufzeit ergibt sich aus dem Ereignis der realisierten Verfügbarkeitsprüfung einerseits und dem realisierten Start-Ereignis der zugeordneten Karosserie für den Karosseriebauprozess andererseits. Auch wenn die Konzepte von Vorlaufzeit und Durchlaufzeit ähnlich sind, ist die begriffliche Unterscheidung sinnvoll, um klar zwischen den Zeiträumen in der Ebene der Aufträge und der Ebene der Karosserien unterscheiden zu können. Die Unterscheidung zwischen Brutto- und Netto-Vorlaufzeit wird analog der Durchlaufzeit vorgenommen.

Charakterisierung der Ergebnisfolge der Vorlaufzeit

Die zeitliche Folge der realisierten Vorlaufzeiten entsteht wie auch die Folge der realisierten Durchlaufzeiten durch Messung der tatsächlichen Vorlaufzeiten, allerdings am Auftrag, nicht an der Karosserie. Welche Sachverhalte können nun dazu führen, dass die Vorlaufzeit schwankt? Zur Beantwortung dieser Frage wird zunächst unterschieden, ob die Vorlaufzeit planmäßig oder unplanmäßig schwankt, ob sich also Schwankungen in der realisierten Vorlaufzeit gleichermaßen auf der Ebene der planmäßigen Vorlaufzeit abspielen.

Eine Quelle für Schwankung in der Vorlaufzeit ist die unplanmäßige Verschiebung des Zeitpunkts der Verfügbarkeitsprüfung. Dieser Zeitpunkt hängt wesentlich von zwei Prozessgrößen ab: die planmäßige Erfüllung der Produktionsstückzahl und die planmäßige Einhaltung der Auftragsreihenfolge in der Montagesequenz. Wenn die Produktionsstückzahl in der Montage vom Plan abweicht, dann schwankt auch der Grad der Abarbeitung der Montageaufträge, die vor einem bestimmten Montageauftrag in der Montagesequenz stehen. Dies zeigt anschaulich die Abbildung 14: die gesamte Ereignisfolge der Verfügbarkeitsprüfungen ist gegenüber den geplanten Vorlaufzeiten auf der Zeitachse nach vorne verschoben, die Verfügbarkeitsprüfungen fanden für alle betroffenen Aufträge früher statt, als geplant. Es herrscht also eine Vorgriff-Situation.

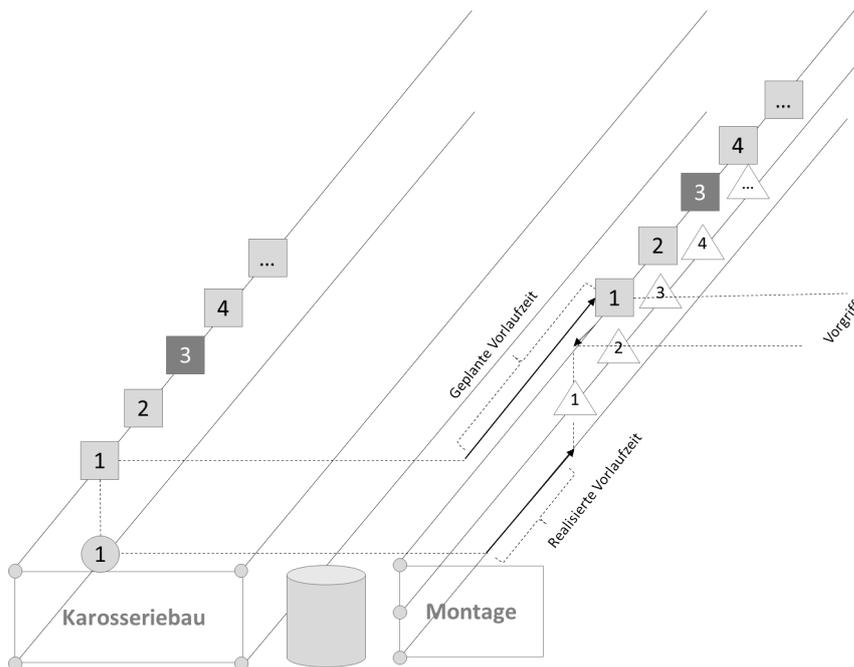


Abbildung 14: Reduzierung der VLZ durch Erhöhung der Stückzahl in der Montage

Ein weiterer Grund für die unplanmäßige Verschiebung des Startzeitpunkts eines Auftrags in die Montage ist die Nicht-Einhaltung der planmäßigen Auftragsreihenfolge, dargestellt in Abbildung 15: wenn ein Auftrag nicht in die Montage gesendet werden kann (im Beispiel Auftrag [2]), dann ist dieser zwangsläufig wegen des Push-Prinzips zurückzustellen und der nächste Auftrag gemäß eingetragener Montagereihenfolge wird auf Verfügbarkeit der Karosserie geprüft (im Beispiel Auftrag [3]). Dadurch entsteht ein Vorgriff für die nachfolgenden Aufträge, der so lange wirkt, bis der zurückgestellte Auftrag wieder eingesteuert wird, weil der Rückstellgrund nicht

mehr vorliegt. Liegt die Ursache für die Rückstellung im System der Karosserieverfügbarkeit (ist eine passende Karosserie nicht verfügbar), dann kann man von einer positiven Rückkopplung sprechen, weil sich negative Ergebnisse der Verfügbarkeitsprüfung auf die Verfügbarkeitsprüfung der folgenden Aufträge auswirken: die Nicht-Verfügbarkeit verstärkt sich also selbst. Es wird in diesem Zusammenhang in dieser Arbeit von „Allgemeiner Autokorrelation“ gesprochen. Allerdings kann der Grund für die Rückstellung eines Auftrags auch ein anderer sein, als die Nicht-Verfügbarkeit einer Karosserie, beispielsweise ein Problem im System der Teileverfügbarkeit. Alle Systeme, die auf die Möglichkeit wirken, einen Auftrag in die Montage zu senden, treten über den Prozess der Auftragsrückstellung an dieser Stelle in Wechselwirkung miteinander. Für jeden zurückgestellten Auftrag reduziert sich die Vorlaufzeit um einen Takt. Die Anzahl der Aufträge, die zu einem bestimmten Zeitpunkt gleichzeitig zurückgestellt sind, heißt „Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge“ $[AGZA_t]$. Die Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge entspricht immer einer bestimmten Verkürzung der Vorlaufzeit $[\Delta VLZ_t]$. Die Verkürzung der Vorlaufzeit zu einem bestimmten Zeitpunkt $[t]$ ist bei Annahme einer konstanten Taktzeit $[\overline{TT}]$ der Montage gleich:

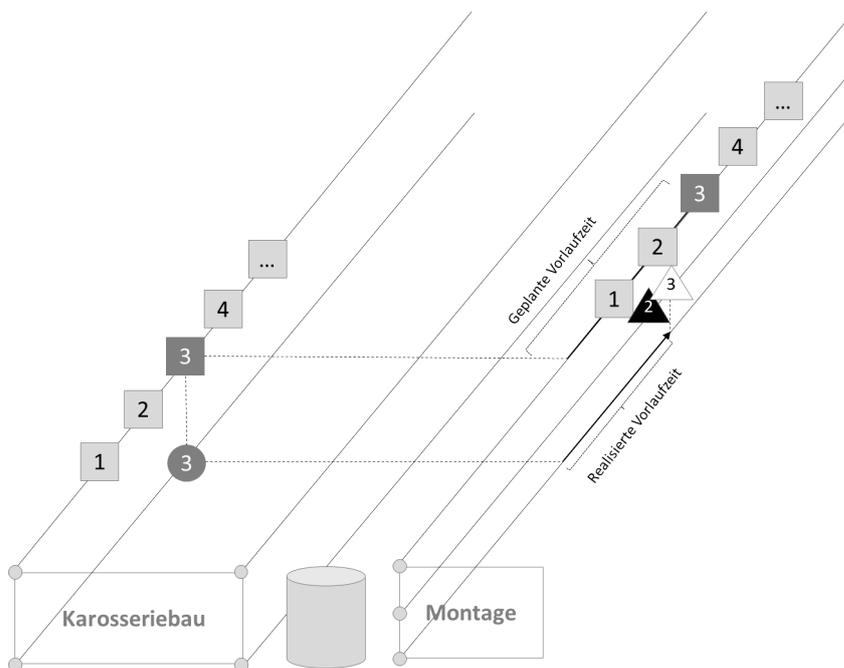


Abbildung 15: Reduzierung der Vorlaufzeit durch Rückstellung von Vorgängeraufträgen

$$\Delta VLZ_t = AGZA_t \times \overline{TT}$$

Eine weitere Quelle für die unplanmäßige Schwankung der Vorlaufzeit ist die faktische Verkürzung oder Verlängerung der Vorlaufzeit durch einen von der Planung abweichenden Start in den Karosseriebau. Die Abweichung vom geplanten Start in den Karosseriebau führt bei der Produktion mit stabiler Auftragsreihenfolge dazu, dass sich die zu erwartende Vorlaufzeit dementsprechend ändert, denn die Planung der Auftragsreihenfolge für die Montage muss konzeptgetreu stabil bleiben. Abbildung 16 verdeutlicht dies: die Karosserie zu Auftrag [3] wird

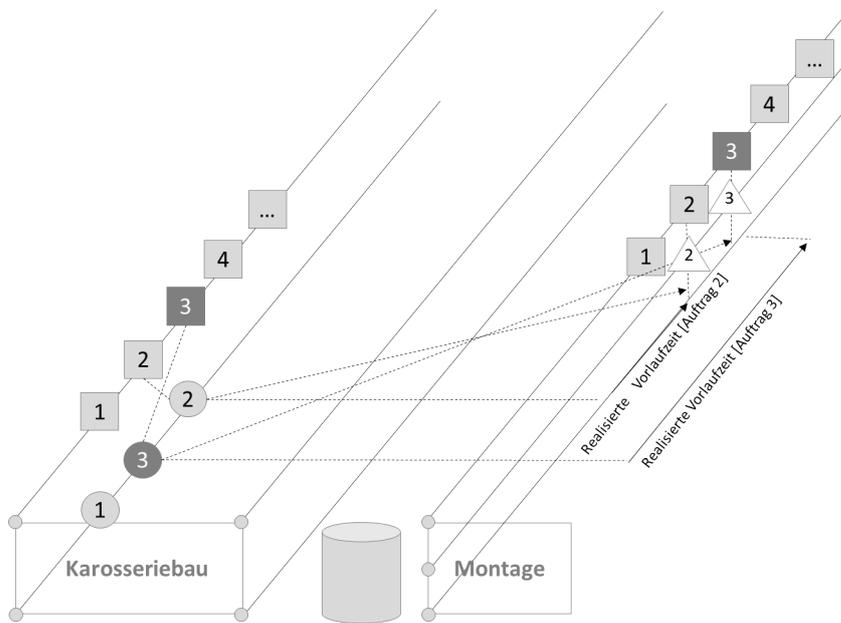


Abbildung 16: Veränderung der geplanten Vorlaufzeit durch abweichenden Start in den Karosseriebau

früher in die Karosseriefertigung gestartet, die Position des Auftrags [3] in der Montagesequenz bleibt aber erhalten. Dadurch verlängert sich die realisierte Vorlaufzeit um den Zeitraum, den die Karosserie früher in die Karosseriefertigung gestartet wurde (Gleichzeitig verkürzt sich natürlich die realisierte Vorlaufzeit für Auftrag [2] um den gleichen Betrag).

Vergleicht man die Vorlaufzeiten unterschiedlicher Aufträge, so lassen sich auch geplante Schwankungen in den Vorlaufzeiten identifizieren. Geht man davon aus, dass im Rahmen der Produktionsplanung und Steuerung Aufträge so eingeplant werden, dass Ihre geplante Vorlaufzeit mindestens der mittleren Durchlaufzeit entspricht, dann unterscheiden sich die Vorlaufzeiten unterschiedlicher Aufträge genauso, wie sich die mittleren Durchlaufzeiten der Karosserietypen unterscheiden, die durch diese Aufträge beauftragt werden. Hat beispielsweise ein Karosserietyp eine systematisch kürzere mittlere Durchlaufzeit als die allgemeine mittlere Durchlaufzeit über alle Karosserietypen, dann wird die Vorlaufzeit des entsprechenden Auftrags in einer akkuraten Planung ebenso kürzer sein. Abbildung 17 verdeutlicht dies: Wenn die Durchlaufzeit der Karosserie vom Typ „hellgrau“ systematisch länger als die vom Typ „dunkelgrau“ ist, dann wird sich bei Berücksichtigung in der Planung ein Reihenfolgeunterschied zwischen der geplanten Auftragsreihenfolge für den Start des Karosseriebaus und dem Start in die Montage ergeben. Hier wird dies daran deutlich, dass Auftrag [3] und Auftrag [4] die Position in der geplanten Start-Reihenfolge des Karosseriebaus getauscht haben, die geplante Vorlaufzeit für Auftrag [4] deshalb deutlich länger ist, als die des Auftrags [3]. Eine weitere Quelle für geplant schwankende Vorlaufzeiten sind unterschiedliche Arbeitszeitmodelle in den Gewerken.

Analog zu den Durchlaufzeiten ist in der Planung eine Annahme über die zu erwartenden Vorlaufzeiten $[VLZ_{a,t}^E]$ eines Auftrags $[a]$ zum Planungszeitpunkt $[t]$ zu treffen. Ein möglicher Ansatz ist, dass die erwartete Vorlaufzeit der Summe von erwarteter Durchlaufzeit und erwartetem Bestand im Karosseriesortierer $[SC^E]$ entspricht, hierbei ist $[b]$ die assoziierte Karosserie

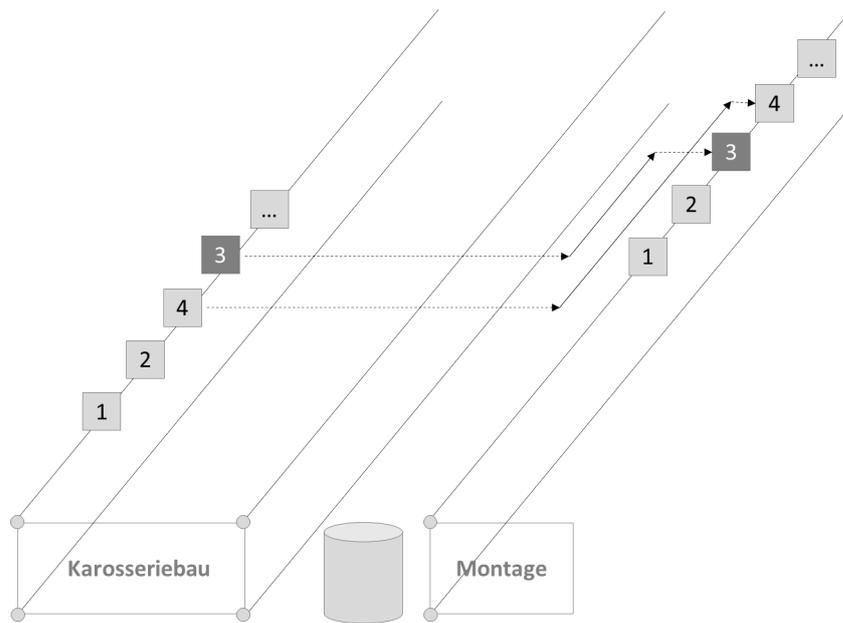


Abbildung 17: Unterschiedliche geplante Vorlaufzeiten

des Auftrags $[a]$:¹⁰⁶

$$VLZ_{a,t}^E = DLZ_{b,t}^E + SC_t^E \times TT^E .$$

4.1.4 Karosserieverfügbarkeit bei fester Zuordnung von Auftrag und Karosserie

Wie in Abbildung 18 gezeigt, sind diejenigen Karosserien verfügbar, die zum Zeitpunkt der Verfügbarkeitsprüfung das Ende-Ereignis des Karosseriebaus erreicht haben und sich damit im Karosseriesortierer befinden. Mit der Definition von Vorlauf- und Durchlaufzeit lässt sich präzisieren, dass eine Karosserie genau dann rechtzeitig im Sortierer vorhanden ist, wenn die realisierte Vorlaufzeit zwischen dem Start der Karosserie in den Karosseriebau und dem Start des Auftrags in die Montage mindestens so groß ist wie die realisierte Durchlaufzeit einer Karosserie vom Start in den Karosseriebau bis zum Ende des Karosseriebaus: $[VLZ \geq DLZ]$. Beide, Vorlaufzeit und Durchlaufzeit, sind hier als Brutto-Zeiträume zu verstehen. Um die Verfügbarkeit einer Karosserie zu erreichen, werden Vorlaufzeit und Durchlaufzeit im Produktionsplanungsprozess berücksichtigt.

4.1.5 Karosserieverfügbarkeit bei variabler Zuordnung von Auftrag und Karosserie

Die Verfügbarkeit einer Karosserie wurde definiert als das Vorhandensein einer passenden Karosserie im Bedarfszeitpunkt am Bedarfsort. Bei variabler Auftragszuordnung muss dies nicht mehr diejenige Karosserie sein, die passend zu dem Montageauftrag in der Karosseriefertigung gestartet wurde, sondern lediglich eine gleichartige. Dieser Prozess wird im Folgenden Tauschprozess genannt. Zur Erläuterung der Systematik dieses Prozesses werden einige neue Begriffe definiert:

¹⁰⁶zum Begriff der „assozierten Karosserie“ siehe Abschnitt 4.1.5.

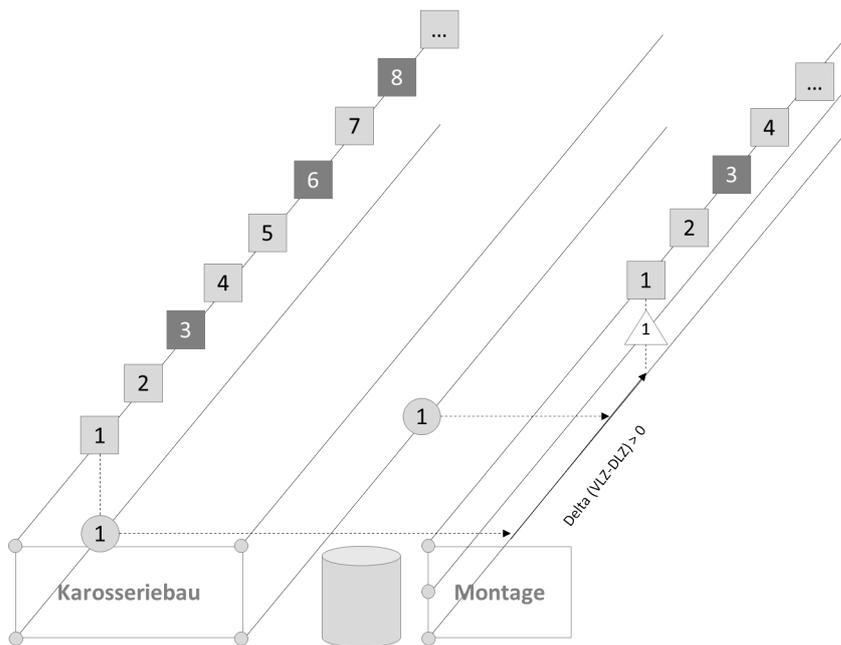


Abbildung 18: Karosserieverfügbarkeit als Vorlaufzeit-Durchlaufzeit-Vergleich

Grundsätzlich können nur Aufträge ihre Karosserien tauschen, die die gleiche Karosserievariante benötigen. Der Auftrag, der gerade in der geplanten Auftragssequenz der Montage betrachtet wird, heißt Fokusauftrag. Aufträge, mit der gleichen Karosserievariante, die in Reihenfolge früher eingeplant sind, werden Vorgängeraufträge genannt, diejenigen, die später eingeplant sind, Nachfolgaufträge. Die Karosserie, die ein Auftrag zur Produktion in einem Gewerk gestartet hat, wird die assoziierte Karosserie genannt, der Auftrag ist zu dieser Karosserie der assoziierte Auftrag. Die assoziierten Karosserien von Vorgänger- und Nachfolgaufträgen heißen Vorgänger- und Nachfolgekarsserien. Kern des Tauschprozesses ist, dass ein Fokusauftrag sich jeder Karosserie im Sortierer bedienen kann, die für jenen verfügbar ist. Der Begriff der Verfügbarkeit wird in Zusammenhang mit dem Tauschen semantisch erweitert, er steht dann nicht mehr nur für die physische Verfügbarkeit, sondern auch für die Verfügbarkeit gemäß Bedarfsrangfolge. Grundsätzlich gilt für die geplante Montagesequenz das FIFO-Prinzip: derjenige Auftrag, der in der Montagereihenfolge früher eingeplant ist, genießt Vorrang beim Zugriff auf die Karosserievarianten, steht also höher in der Bedarfsrangfolge. Kommt es also dazu, dass die assoziierte Karosserie für einen Fokusauftrag nicht verfügbar ist, besteht die Chance, dass eine Vorgänger- oder Nachfolgekarsserie verfügbar ist. Die Abbildung 19 zeigt einen solchen Tauschvorgang, bei dem Auftrag [1] die Karosserie des Auftrags [2] verwendet, und umgekehrt. Ob nun eine Karosserie im Karosseriesortierer verfügbar ist, hängt offensichtlich von zwei Faktoren ab:

- der Verteilung der Aufträge und deren Karosseriebedarfen in der geplanten Auftragssequenz, in dieser Arbeit genannt die Variantenstruktur, und
- den individuellen Verhältnissen von Vor- und Durchlaufzeit der assoziierten Aufträge und Karosserien.

Intuitiv ist klar, dass Varianten, die häufiger in der geplanten Montagereihenfolge vorkommen

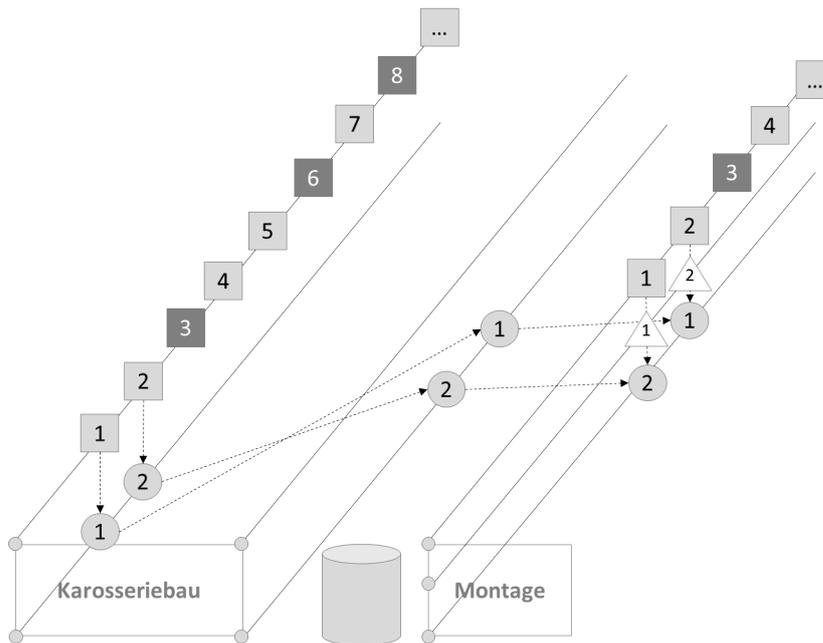


Abbildung 19: Karosserietausch bei variabler Zuordnung von Auftrag und Karosserie

und näher beieinander liegen als andere, tendenziell besser getauscht werden können. Varianten, die nur einmal in einer Reihenfolge vorkommen, können überhaupt nicht getauscht werden. Hinzu kommt, dass es natürlich nicht nur relevant ist, wie weit gleiche Karosserievarianten planmäßig in der Montagereihenfolge voneinander entfernt liegen, sondern welche Ergebnisse das Verhältnis von Vorlaufzeit und Durchlaufzeit der Aufträge zeigt. Liegen beispielsweise zwei Aufträge mit dem gleichen Karosseriebedarf dicht beieinander und die Karosserien werden im Karosseriebau zu stark verzögert, dann wird keine Karosserie, weder die assoziierte des Fokusauftrags, noch die des Nachfolgers für den Fokusauftrag verfügbar sein.

Bei der Variantenproduktion wirkt in Ergänzung zu der allgemeinen Autokorrelation noch eine variantenspezifische Autokorrelation. Der Auslöser für den Effekt der variantenspezifischen Autokorrelation sind Rückstellung von Vorgängeraufträgen, die definitionsgemäß in der Bedarfsrangfolge priorisiert werden: wird ein Vorgängerauftrag zurückgestellt, wird diesem die nächste physisch im Karosseriesortierer verfügbare Karosserievariante zugeordnet. Dies kann dazu führen, dass für einen Nachfolgeauftrag eine Karosserie nicht verfügbar ist (i.e. das Tauschrisiko). Somit kann das Verfügbarkeitsergebnis des Vorgängerauftrags auf die Verfügbarkeitsergebnisse der Nachfolgeaufträge wirken. Die Rückstellung eines Vorgängerauftrags kann also unter Umständen auf Nachfolgeaufträge zweifach wirken: mit der allgemeinen Autokorrelation bedingt durch die Rückstellung und den daraus resultierenden Vorgriff und die variantenspezifische Autokorrelation, die dazu führt, dass eine physisch verfügbare Karosserie dem Vorgängerauftrag zugeordnet wird.

4.1.6 Funktion und Wirkungsweise des Sortierers

Der Sortierer erfüllt im System der Karosserieverfügbarkeit eine Warte- und eine Tauschfunktion. Die Wartefunktion ergibt sich aus der Möglichkeit, Karosserien einen zeitlichen Vorlauf

gegenüber den Montageaufträgen einzuräumen. Die Tauschfunktion ergibt sich aus der gleichzeitigen physischen Anwesenheit gleicher Karosserievarianten im Sortierer, die einen Tauschvorgang ermöglicht. Die Funktion des Sortierers wird im Folgenden mit einem einfachen Modell aus der Warteschlangentheorie erläutert, welches die Grundlage für die Ausführungen über die Warte- und Tauschfunktion bildet. Ein Wartesystem ist in einem Prozess-Modell der Bereich, in dem ein Ankunftsprozess $[A]$ und ein Abgangsprozess durch einen Warteprozess $[W]$ und einen Bedienprozess $[B]$, welcher auf $[m]$ parallelen und identischen Bedienstationen abläuft, voneinander entkoppelt werden. Dieser Charakterisierung nach Kendall folgend, kann man ein Wartesystem mit der folgenden Notation beschreiben: $\langle A | B | m \rangle$. Der Ankunftsprozess bringt Fördereinheiten mit einer bestimmten Ankunftsrate in das System ein, mit der systemeigenen Bedienrate der Bedienstation $[B]$ wird der Abgangsprozess versorgt. Die Raten beschreiben die Anzahl der Fördereinheiten, die im Mittel pro Zeiteinheit die Systemgrenze in der jeweiligen Richtung überschreiten. Für die Bildung der Raten wird der Erwartungswert der Zwischenankunftszeit $[E(t^{Ankunft})]$, beziehungsweise der Bedienzeit $[E(t^{Bedienung})]$ verwendet: $[Ankunftsrate \lambda = 1/E(t^{Ankunft})]$, beziehungsweise $[Bedienrate \mu = 1/E(t^{Bedienung})]$.¹⁰⁷ Der Erwartungswert einer diskreten Verteilung, am Beispiel der Zwischenankunftszeit, wird mit Hilfe der Eintrittswahrscheinlichkeit $[p]$ definiert als $[E(t^{Ankunft}) = \sum_{i=1}^n t_i^{Ankunft} p_i]$.¹⁰⁸ Mit Hilfe dieser Raten kann man den Ankunftsprozess und den Bedienprozess charakterisieren.

Bezogen auf das hier betrachtete System der Karosserieverfügbarkeit ist der Ankunftsprozess der Ausgang des Karosseriebaus, die Ankunftsrate ergibt sich aus dem Ausgangstakt $[TT^B = \frac{E(t^{Ankunft})}{1}]$, der Bedienprozess ist die Versorgung einer Montage aus dem Sortierer heraus, die Bedienrate ergibt sich aus dem Eingangstakt in die Montage $[TT^A = \frac{E(t^{Bedienung})}{1}]$. Die Raten ergeben sich jeweils aus dem Kehrwert der Taktzeit.

In einem idealisierten System der Karosserieverfügbarkeit sind die Taktzeiten der Gewerke, und damit auch die erwähnten Raten, konstant, also determiniert, und identisch: $[E(t^{Ankunft}) = t^{Ankunft}]$, $[E(t^{Bedienung}) = t^{Bedienung}]$ und $[t^{Ankunft} = t^{Bedienung}]$. Es gibt eine Bedienstation, nämlich diejenige in Richtung der Montage. In der Kendall'schen Notation lässt sich dies folgendermaßen darstellen: $\langle D | D | 1 \rangle$. Hierbei steht $[D]$ für Diracverteilung, eine Verteilung für getaktete Prozesse mit konstanter Ankunfts- und Bedienrate. Ein solches Wartesystem ist stationär und es gibt streng genommen keine Warteschlange.¹⁰⁹ Ein Bestand im Sortierer entsteht erst dadurch, dass über einen bestimmten Zeitraum Karosserien aus dem Karosseriebau in den Sortierer eingelagert werden, ohne dass die Montage bedient wird. Dies geschieht solange, bis der gewünschte Füllstand im Sortierer erreicht ist. Ab dem Zeitpunkt, an dem die Montage bedient wird, mit einer Bedienrate, die gleich der Ankunftsrate ist, bleibt der Bestand im Sortierer konstant, der Warteprozess ist stationär.

In einem realen System sind Ankunftsrate und Bedienrate im Sortierer nicht konstant, sie schwanken mit einer von den Systemeigenschaften abhängigen Verteilung um den Erwartungswert der jeweiligen Rate. Die stochastische Natur der Raten führt dazu, dass der Sortierbestand beständig schwankt, in der Höhe begrenzt durch die minimale und maximale Kapazität. Aus

¹⁰⁷Vgl. Arnold; Furmans (2009), S.112ff.

¹⁰⁸Vgl. ebd., S.17ff.

¹⁰⁹Vgl. ebd., S.123ff.

ex post Sicht kann der Sortierbestand formal als kumulierte Differenz zeitdiskreter Zugangsfunktion und Abgangsfunktionen beschrieben werden, mit der Zugangsfunktion $[I_t = I(t)]$ und der Abgangsfunktion $[O_t = O(t)]$, die für jeden Zeitpunkt $[t]$ die Zu- oder Abgangsmenge ausgeben: $[SC_T = SC_0 + \sum_{t=0}^T I_t - \sum_{t=0}^T O_t]$. $[SC_0]$ ist hierbei der Term für eine etwaige Initialbefüllung, diese sei im weiteren Verlauf der Ausführung als $[0]$ angenommen. Die Schwankungen im In- und Output des Sortierers lassen sich anschaulich an einem Fortschrittszahlen-Diagramm darstellen, welches die kumulierten Zu- und Abgänge des Systems „Sortierer“ als Kurven zeigt und in dem sich der Bestand im Sortierer als vertikale Differenz zwischen der Zugangsfunktion und Abgangsfunktion ergibt. Ist es das Ziel, im System der Karosserieverfügbarkeit einen Mindestbestand zum Zweck

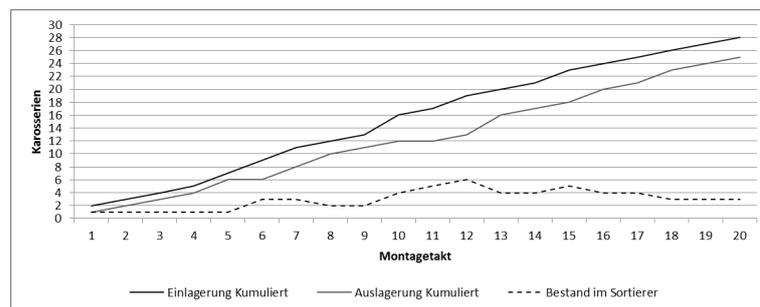


Abbildung 20: Sortierbestand dargestellt in einem Fortschrittszahlendiagramm

der Sortierung vorzuhalten, dann müssen die Effekte aus der Schwankung der Taktzeiten separat kompensiert werden, also eine zusätzliche Kapazität im Sortierer zur Absicherung des Sortierbestands gegen Taktzeitschwankungen eingeplant werden (auch diese Absicherungen wirken als Vorproduktion, die dynamisch ist und den aktuellen und die vergangenen Zustände der Taktzeiten abbildet). In den weiteren Erläuterungen wird davon ausgegangen, dass die Kapazität zur Sortierung stabil ist. Die Interpretation des Füllstandes des Sortierers als Ergebnis eines Warteprozess zwischen Vorgänger- und Nachfolgeprozesses ist für die theoretische und praktische Anwendung relevant. Der Füllstand des Sortierers beinhaltet nämlich die Information über alle vergangenen Zu- und Abgänge, und damit über das dynamische Verhalten der Vorgänger- und Nachfolgeprozesse bezogen auf die Output- und Inputmenge. Es kann zwar anhand einer Füllstanddarstellung nicht exakt auf die Ursachen eines bestimmten Füllstandes geschlossen werden, aber die Wirkung ist exakt definiert. Somit lassen sich die Effekte unterschiedlicher Schichtmodelle, Ausbringungsschwankungen, Einbringungsschwankungen, Störungen, etc., im Füllstandsverlauf aggregieren. Dies impliziert für die Modellbildung der Karosserieverfügbarkeit, dass die Berücksichtigung des Füllstandes alle Informationen über die Output-Input-Verhältnisse des Vorgänger- und Nachfolgeprozesses enthält, das Wirksystem hierfür aber nicht abgebildet werden muss, sofern es nicht andere Effekte auf die Karosserieverfügbarkeit, neben den Mengenströmen selbst, beinhaltet.

Für die Erfüllung der im Folgenden erläuterten Wartefunktion zur Sicherstellung der Karosserieverfügbarkeit ist eine Eigenschaft des Sortierers besonders wichtig: der wahlfreie Zugriff. Im Gegensatz zu bestimmten Bedienstrategien wie FIFO oder LIFO ermöglicht die Wahlfreiheit den Zugriff auf jede Karosserie, die physisch im Sortierer vorhanden ist, sei sie als erste im Sortierer angekommen, oder als letzte.

Wartefunktion des Karosseriesortierers Den Vorgang, bei dem Karosserien den Karosseriebau verlassen, ohne dass Montageaufträge in die Montage gestartet werden, kann man als Vorproduktion des Karosseriebaus interpretieren. In dem Maß, in dem der Karosseriebau vorproduziert und den Sortierer füllt, wartet die Montage auf den Produktionsbeginn. Wenn der Produktionsprozess in Oberfläche und Montage gestartet ist, das System also einen stationären Zustand erreicht hat, wirkt der Bestand im Sortierer wie eine Verzögerungstoleranz für jede Karosserie; die Verzögerungstoleranz, den assoziierten Auftrag rechtzeitig zu erreichen. Denn jede Karosserie kann exakt das Zeitäquivalent des Sortierbestands zu spät im Sortierer ankommen, und trotzdem noch für den assoziierten Auftrag rechtzeitig verfügbar sein. Denn in dem Zeitpunkt, in dem die verzögerte Karosserie in den Sortierer eingelagert wird, kann diese aufgrund der wahlfreien Bedienstrategie sofort wieder ausgelagert werden, wenn man von notwendigen Ein- und Auslagerprozesszeiten einmal absieht. Das Zeitäquivalent ist bei konstanter Taktzeit der Montage der Sortierbestand zu dem Zeitpunkt, zu dem der Auftrag in die Montage geschickt werden soll, multipliziert mit der Taktzeit der Montage. Abbildung 21 verdeutlicht dies: Karosserie [1] und [2] treffen geplant im Sortierer ein, bevor überhaupt der erste Montagetak beginnt. Die geplante Vorlaufzeit stellt sicher, dass eine Karosserie die erwartete Durchlaufzeit zur Verfügung gestellt bekommt, um im Karosseriebau fertiggestellt zu werden. Zusätzlich wird durch die Vorproduktion sichergestellt, dass, wenn die erwartete Durchlaufzeit innerhalb eines bestimmten Toleranzrahmens überschritten wird, die Karosserie noch für den assoziierten Auftrag verfügbar ist.

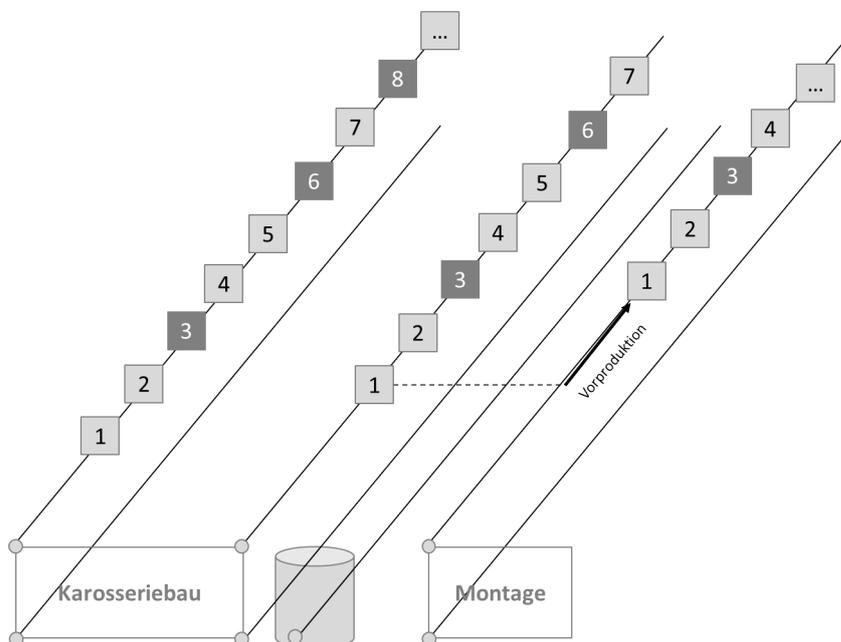


Abbildung 21: Geplanter Karosseriebestand im Sortierer durch Vorproduktion im Karosseriebau

Tauschfunktion des Karosseriesortierers Wenn in einem Sortierer ein Bestand an Karosserien vorhanden ist, dann kann theoretisch aufgrund des wahlfreien Zugriffs auf jede Karosserie im Bestand zugegriffen werden. Wenn es gleichzeitig möglich ist, einem Auftrag jede Karosserie

zuzuordnen, die der geforderten Karosserievariante gemäß Auftragsinformation entspricht, dann kann ein Karosserietausch vollzogen werden. Es gilt der allgemeine qualitative Zusammenhang, je größer der Karosseriebestand im Sortierer ist, desto größer ist das Auswahlvolumen, aus dem eine passende Karosserievariante ausgewählt werden kann, desto leichter hat ein Auftrag eine Karosserie durch Tausch verfügbar. Formal wird die Wirkung des Tauschs dadurch ausgedrückt, dass für die Verfügbarkeit nicht mehr $[VLZ > DLZ]$ gelten muss, sondern $[VLZ \leq DLZ]$ im Allgemeinen ausreichen kann. In Abbildung 21 sind beide Karosserien, die im geplanten Montagetakt des Auftrags [1] zur Verfügung stehen, Repräsentanten der gleichen Karosserievariante (grau). Auftrag [1] hat also in jedem Fall eine Karosserie verfügbar, er könnte Karosserie [1] oder [2] wählen.

Die Abgrenzung zwischen Warte- und Tauschfunktion kann man durch folgende Überlegung verdeutlichen: Die Wartefunktion fokussiert das rechtzeitige Eintreffen der assoziierten Karosserien und wirkt sowohl im Modus der Auftragsproduktion, als auch im Modus der Variantenproduktion. Die Tauschfunktion bezieht sich auf die Verfügbarkeit von Vorgänger- und Nachfolgekaro-serien. Erhöht man c.p. die Kapazität im Karosseriesortierer, werden mehr Vorgängerkarosserien im Sortierer als Tauschpartner für den Fokusauftrag verfügbar sein, weil zunehmend Durchlaufzeitverzögerungen kompensiert werden. Außerdem werden Nachfolgekaro-serien eher verfügbar sein, weil diese entweder weniger zu früh oder sogar etwas später im Karosseriesortierer eintreffen können, um für den Fokusauftrag zur Verfügung zu stehen. Die Tauschfunktion wirkt ausschließlich im Modus der Variantenproduktion.

4.1.7 Vorgezogene Auftragsfreigabe im Karosseriebau

Das Prinzip der vorgezogenen Auftragsfreigabe wurde in der Einleitung und bei der Entwicklung des Grundkonzepts implizit schon angesprochen. In der Literatur wurde diese beispielsweise bereits bei Gushikin et.al. thematisiert. Das Funktionsprinzip wird hier nochmal anhand des entwickelten Wirkmodells analysiert. Ausgangspunkt der Überlegung ist Abbildung 17. Diese zeigt die geplante Start-Reihenfolge des Karosseriebaus und die geplante Start-Reihenfolge der Montage. Der Kerngedanke der vorgezogenen Auftragsfreigabe ist, systematische Unterschiede bezüglich des Durchlaufzeitverhaltens der unterschiedlichen Karosserievarianten oder bei bestimmten Karosserien dergestalt zu antizipieren, dass diese Unterschiede bei der Planung der Start-Reihenfolge des Karosseriebaus berücksichtigt werden. Die geplante Start-Reihenfolge der Montage wird dabei aber nicht verändert. Dadurch entsteht eine Verschiebung der Aufträge zwischen den geplanten Start-Reihenfolgen von Montage und Karosseriebau. Diese Verschiebung kann als virtueller Puffer der Einzelkarosserie verstanden werden, der positiv ist, wenn eine Karosserie in der geplanten Start-Reihenfolge des Karosseriebaus gegenüber der geplanten Start-Reihenfolge der Montage vorgezogen wird. Der virtuelle Puffer ist negativ, wenn die Karosserie in der geplanten Start-Reihenfolge des Karosseriebaus gegenüber der geplanten Start-Reihenfolge der Montage verzögert wird. Ist der virtuelle Puffer positiv, dann verlängert sich die Vorlaufzeit des betrachteten Auftrags um einen dem virtuellen Puffer entsprechenden Zeitraum und die Karosserie hat eine Größere Chance, auch bei relativ längerer Durchlaufzeit ihr Ziel zu oder vor dem richtigen Zeitpunkt zu erreichen. Ist der virtuelle Puffer negativ, verringert sich die

Vorlaufzeit dementsprechend. Karosserien mit einem negativen virtuellen Puffer müssen dessen Zeitäquivalent kompensieren, um rechtzeitig am Ziel anzukommen.

Die Summe aller virtuellen Puffer durch vorgezogene Auftragsfreigabe muss zwangsläufig immer Null sein¹¹⁰, die Begünstigung einer Gruppe von Karosserievarianten führt also immer zu einer Benachteiligung der anderen Karosserievarianten. Abbildung 17 verdeutlicht diesen Effekt durch die offensichtlich verlängerte geplante Vorlaufzeit des Auftrags [4] und die offensichtlich verkürzte Vorlaufzeit des Auftrags [3].

Eine mögliche Unterscheidung der Einsatzfelder der vorgezogenen Auftragsfreigabe kann nach der Kompensation von ungeplanten Durchlaufzeitschwankungen und geplanten Durchlaufzeitschwankungen vorgenommen werden. Geplante Durchlaufzeitschwankungen seien hier verstanden als solche, die durch Sondermaßnahmen, wie eine längere planbare Qualitätsprüfung oder ähnliches entstehen.¹¹¹

Damit die vorgezogene Auftragsfreigabe wirksam sein kann, muss zum einen das Durchlaufzeitverhalten der Karosserien so stabil sein, dass eine Prognose auf dieser Basis eine gute Qualität aufweisen kann. Das heißt, die variantenspezifische stochastische Verteilung der Positionsverschiebungen muss sich zur Diskriminierung der Karosserievarianten eignen. Zum anderen muss der Plan, die Soll-Eingangsreihenfolge des Karosseriebaus, auch konsequent umgesetzt werden, i.e. Soll-Eingangsreihenfolge ist gleich Ist-Eingangsreihenfolge, sonst können die Effekte der Methode ausbleiben, oder das Gegenteil des Erwünschten erreichen. Dies kann gerade dann passieren, wenn Karosserien, die mit einem negativen virtuellen Puffer belegt sind, zusätzlich beim Start in den Karosseriebau noch verzögert werden. Weisen auch diese Verschiebungen beim Eingang in den Karosseriebau eine notwendige Regelmäßigkeit, beziehungsweise in diesem konkreten Fall, eine variantenspezifische Verteilung auf, dann können diese natürlich bei der Anwendung, der Planung der vorgezogenen Auftragsfreigabe, berücksichtigt werden.

4.1.8 Verwendung von Tauschkarosserien

Ding und Sun schlagen die Verwendung von Tauschkarosserien vor, die für den kalkulierten Bedarf eines Produktionsintervalls (Schicht / Tag) vorproduziert werden und gegen Ende dieses Produktionsintervalls verbraucht werden: „At the beginning of each shift or day, spare units of various models can be produced first based on calculated quantities. [...] All spare units will re-join the line at the end of the shift or day according to the production schedule.“¹¹² Die Autoren vergleichen diese Methode mit einer Pufferung der Karosserien am Ende des Karosseriebauprozesses in einem wahlfreien Sortierer. Den Tausch von Auftrag und Karosserie sehen die Autoren nur für die Ersatzkarosserien vor, nicht für die fertiggestellten im wahlfreien Karosseriesortierer. Diese Form der nach dem Push-Prinzip gesteuerten Produktion von Ersatzkarosserien birgt neben dem Vorteil, eine aus dem Produktionsfluss genommene Karosserie zu ersetzen, einige Nachteile, die hier kurz skizziert seien:

Wenn am Ende des definierten Produktionsintervalls die Anzahl der Ersatzkarosserien gleich Null, und der Puffer, der für die Ersatzkarosserien zu Beginn des nächsten Produktionszeitraums

¹¹⁰ vgl. dazu auch Abschnitt 4.2.

¹¹¹ Vgl. zu Anwendungsfällen Meißner (2008), S.153.

¹¹² Ding, Sun (2004), S.1534.

wieder befüllt sein soll, dann gibt es immer eine Phase zum Ende des Produktionszeitraums, in der sich der Puffer sukzessive leert, der Puffer kann also nicht durchgängig voll ausgelastet sein. Ferner stehen Ersatzkarosserien in vollem Umfang dann nur einem Teil der in dem Produktionsintervall produzierten Karosserien zu Verfügung, sind also nur für einen bestimmten Anteil von Vorteil. Wenn der Bestand an Ersatzkarosserien zum Ende jedes Produktionsintervalls gleich Null sein soll, dann können natürlich nur für diejenigen Varianten Ersatzkarosserien gelagert werden, die mehr als einmal im Produktionsprogramm dieses Produktionsintervalls produziert werden. Für seltene Varianten kann diese Methode also keinen Vorteil bringen. Wenngleich dies auch für den Tauschvorgang bei fertiggestellten Karosserien im wahlfreien Karosseriepuffer nach dem Ende des Karosseriebaus gilt, besteht noch ein wichtiger Unterschied: der Karosseriesortierer am Ende des Karosseriebaus wirkt sowohl mit der Tauschfunktion, wie der Ersatzkarosseriepuffer auch, als auch mit der Wartefunktion, das heißt, der Bestand im Karosseriesortierer wirkt sowohl für Karosserien mit höherer Auftretenshäufigkeit, als auch für seltene Karosserievarianten. Ferner steigt bei einem Ersatzkarosseriekonzept der Pufferbedarf stark mit steigender Anzahl der Karosserievarianten. Geht man davon aus, dass mindestens von jeder Variante zwei Karosserien gepuffert werden sollen, dann führt eine Verdopplung der Variantenzahl, stets zu einer Verdopplung der Anzahl der benötigten Pufferplätze, ohne dass sich ein Bereich der Sättigung einstellt. Bei einem Sortierer, der wie hier beschrieben zusätzlich mit der Wartefunktion wirkt, erreicht man bei einer stetigen Erhöhung der Variantenzahl in Abhängigkeit von den anderen Parametern des Systems der Karosserieverfügbarkeit einen Sättigungsbereich, in dem die nötige Pufferkapazität mit steigender Variantenzahl nur noch stark unterproportional wächst.¹¹³

4.1.9 Zusammenfassung des Wirkmodells

Im System der Karosserieverfügbarkeit gibt es zwei wesentliche, direkt wirkende, Aspekte, die die Ergebnisse des Systems bestimmen (im Modus der Variantenproduktion):

- die Folge der Karosserievarianten in der geplanten Auftragsreihenfolge der Montage und insbesondere die Distanz gleicher Karosserievarianten (Variantenstruktur)
- das Verhältnis der realisierten Vorlaufzeiten der Aufträge zu den realisierten Durchlaufzeiten der assoziierten Karosserien.

Die Distanz gleicher Karosserievarianten in der geplanten Auftragsreihenfolge bestimmt wesentlich die Tauschbarkeit der Karosserien. Das Verhältnis von Vorlaufzeit und Durchlaufzeit, bezogen auf einen bestimmten Auftrag und dessen assoziierte Karosserie, bestimmt die Pünktlichkeit und letztendlich die Verfügbarkeit der Karosserien. Bezogen auf alle Aufträge ist das Verhältnis von Durchlaufzeit und Vorlaufzeit in Verbindung mit der Variantenstruktur auch maßgeblich für die Tauschbarkeit der Karosserien, denn auch die Karosserien von Vorgänger- und Nachfolgeaufträgen, die die gleiche Karosserievariante benötigen, müssen im Karosseriesortierer vorhanden sein, bevor diese zum Tausch verwendet werden können. Grafisch zusammengefasst werden die Ergebnisse nochmal in Abbildung 22. Diese Abbildung zeigt schematisch den Zusammenhang

¹¹³Vgl. hierzu Kapitel 5.

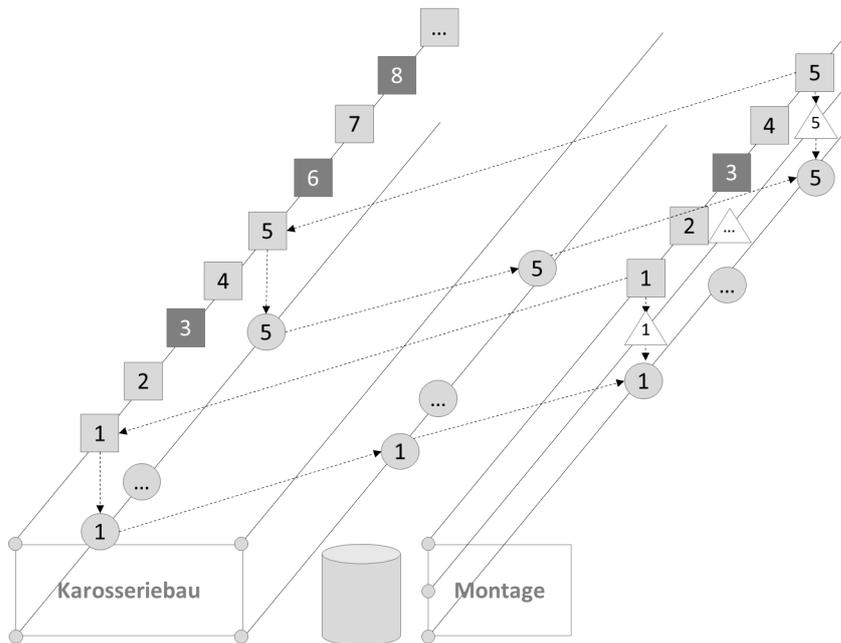


Abbildung 22: Zusammenfassung des Wirksystems

von Variantenstruktur und dem Verhältnis von Vor- und Durchlaufzeit, individuell je assoziiertem Auftrag und assoziierter Karosserie und die Wirkung auf die Verfügbarkeitssituation im Karosseriesortierer.

Der Füllstand im Karosseriesortierer ist ein wichtiger Aspekt im System der Karosserieverfügbarkeit, allerdings wirkt dieser nicht direkt auf die Ergebnisse, sondern indirekt, durch die Warte- und Tauschfunktion. Je größer der Füllstand im Sortierer ist, desto eher sind Karosserien tauschbar und pünktlich, der Sortierer wirkt immer auf beide direkten Einflußgrößen. Man kann sagen, über den Bestand im Karosseriesortierer wird die Sensitivität bezüglich der beiden direkten Einflußgrößen bestimmt. Der Bestand im Karosseriesortierer ist auch unter den beiden direkten Einflußgrößen subsumierbar, denn dieser ist eine wichtige Komponente der Vorlaufzeit. Wenn die Vorlaufzeit durch einen steigenden Bestand im Karosseriesortierer zunimmt, werden ceteris paribus die Warte- und Tauschfunktion des Karosseriesortierers stärker wirken.

Nach diesem Wirkmodell ist eine Karosserie genau dann nicht verfügbar, wenn sowohl Warte- als auch Tauschfunktion im Sortierer nicht ausreichen, um eine passende Karosserie im Bedarfszeitpunkt im Zugriff zu haben. Beide Voraussetzungen müssen für die Nicht-Verfügbarkeit gegeben sein, es müssen also ungünstige Umstände gleichzeitig zutreffen: eine Karosserievariante findet in der Variantenstruktur keinen passenden Tauschpartner und die eigene Karosserie erreicht den Sortierer zu spät beziehungsweise wird von einem Vorgänger mit vorrangigem Bedarf verwendet. Ein Teil des endogenen Wirkmechanismus im System ist die Autokorrelation, die die Komplexität des Systems begründet. Es wurden zwei Arten der Autokorrelation identifiziert:

- allgemeine Autokorrelation durch Vorlaufzeitverkürzung bei Nicht-Verfügbarkeit von Vorgängeraufträgen
- variantenspezifische Autokorrelation bei Nicht-Verfügbarkeit von Vorgängeraufträgen, die

die gleiche Karosserievariante benötigen.

Die allgemeine Autokorrelation benennt den Sachverhalt, dass durch die Zurückstellung von Vorgängeraufträgen die Vorlaufzeit verkürzt wird, soweit ein Vorgriff in der geplanten Auftragsreihenfolge stattfindet. Die Vorlaufzeitreduktion beeinträchtigt die Chance zur Pünktlichkeit der Karosserien für die nachfolgenden Aufträge. Die variantenspezifische Autokorrelation ist ein zusätzlicher Effekt, der im Falle der Nicht-Verfügbarkeit einer bestimmten Karosserievariante nur direkt auf Aufträge wirkt, die die gleiche Karosserievariante benötigen. Dieser führt dazu, dass zurückgestellte Aufträge einen vorrangigen Bedarf an Karosserien ihrer bestimmten Karosserievariante haben (in Abhängigkeit von der Prioritätenregel). Zusammengefasst können die Effekte der Autokorrelation dazu führen, dass Aufträge Karosserien nicht verfügbar haben, die ohne Wirkung der Autokorrelation verfügbar gewesen wären: die Nicht-Verfügbarkeit verstärkt sich also selbst.

Ex post lässt sich anhand der Produktionsdaten gut nachvollziehen, welche Karosserie wann im Karosseriesortierer verfügbar war, wie viele Aufträge zurückgestellt waren und wie groß der Bestand im Karosseriesortierer war. Ex ante werden Karosserievarianten oder Karosserien, die eine Disposition zur Nichtverfügbarkeit aufweisen, „Risikokarosserien“ genannt. Beispielsweise könnte eine Karosserievariante mit großer Distanz über die eingeplante Montagereihenfolge verteilt sein und diese Karosserievariante weist erwartungsgemäß ein ungünstiges Verhältnis von Vorlaufzeit und Durchlaufzeit auf. Im Rahmen der taktischen Produktionsplanung wird im Zuge der Modellbildung die Anzahl der Risikokarosserien implizit festgelegt, in dem die direkten Einflußgrößen und die Größe des Karosseriesortierers determiniert werden.

4.1.10 Erweiterung des Grundmodells

Das vorgestellte Wirkmodell, welches einen Punkt der Neuuzuordnung von Auftrag und Karosserie berücksichtigt, kann ohne weiteres beliebig viele dieser Tauschpunkte integrieren. Beispielsweise könnte das Modell für eine mehrstufige Produktion im Karosseriebau, die sich auf den Rohbauprozess und den Oberflächenprozess aufteilt, die durch einen Sortierspeicher entkoppelt sind, dargestellt werden wie in Abbildung 23.¹¹⁴ Das Grundmodell würde dann erweitert um

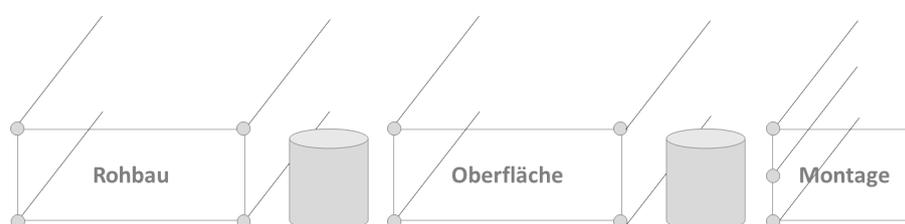


Abbildung 23: Modell mit zwei Tauschpunkten

die geplante Rohbau-Ende-Sequenz, die realisierte Rohbau-Ende-Sequenz, die geplante Rohbau-Start-Sequenz und die realisierte Rohbau-Start-Sequenz. Wenn die Karosserieverfügbarkeit zwischen Rohbau und Oberfläche von Interesse ist, dann wäre analog zur Montage für den Start der Oberfläche eine Verfügbarkeitsebene zu integrieren. Der Begriff der assoziierten Karosserie

¹¹⁴Ein solches Modell mit zwei Tauschpunkten findet sich bspw. bei Fournier, Agard (2007).

wäre bei mehreren Tauschpunkten generischer zu formulieren: die assoziierte Karosserie eines Auftrags wird abschnittsbezogen definiert, beispielsweise wäre die assoziierte Karosserie für die Verfügbarkeitsprüfung am Punkt „Oberfläche-Start“ diejenige, welche der Auftrag in den Rohbau gestartet hat, und die assoziierte Karosserie für den Punkt der Verfügbarkeitsprüfung „Montage-Start“ wäre diejenige, die der Auftrag in den Oberflächenprozess gestartet hat, es würden also im Fall mit zwei Tauschpunkten im Produktionsverlauf auch zwei assoziierte Karosserien existieren.

Des Weiteren kann die bis hier gewählte Ebene eines „Makro-Modells“ ohne weiteres Verlassen werden, in dem die Prozesse detailliert werden. So könnte ein Produktionsgewerk, beispielsweise die Oberfläche, als Detailmodell integriert werden, welches als Subsystem des Systems der Karosserieverfügbarkeit das Durchlaufzeitverhalten durch den Oberflächenprozess endogen hervorbringt. Wie detailliert das Produktionsmodell letztendlich aufgebaut wird, hängt von der konkreten Planungsaufgabe ab.

4.2 Formales Modell des Systems der Karosserieverfügbarkeit

In dieser Arbeit werden zahlreiche quantitative Untersuchungen an Modellen von Systemen der Karosserieverfügbarkeit durchgeführt. Nicht zuletzt hierfür wird deshalb in diesem Abschnitt ein formales Modell des Systems der Karosserieverfügbarkeit formuliert. Dieses Modell enthält die Variablen, die notwendig sind, um das Wirkmodell abzubilden. Vollständige Lösungsverfahren zur Erzeugung von Ergebnissen werden in diesem Kapitel nicht präsentiert. Diese folgen in Kapitel 6, in welchem konkrete Planungsmodelle untersucht werden. Das formale Modell bildet das Bindeglied zwischen den qualitativen Überlegungen der vorangegangenen Kapitel und den zunehmend quantitativen der nachfolgenden. Es ist die Basis für die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsmodelle und das analytische Modell, welches in Abschnitt 6.1.2 vorgestellt wird.¹¹⁵

Übergang von der Zeitbetrachtung in die Positionsbetrachtung

Die Betrachtung des Systems der Karosserieverfügbarkeit in der Dimension „Zeit“ bringt für die Analyse einen entscheidenden Nachteil mit sich, weshalb diese aufgegeben, beziehungsweise der Ansatz vereinfacht wird. Dieser Nachteil liegt in der ex post Betrachtung der Ist-Daten, genauer, in der Berücksichtigung von arbeitsfreien Zeiten. Bei der Betrachtung, insbesondere dem Vergleich von Durchlauf- und Vorlaufzeiten sind Pausen, arbeitsfreie Tage, Wochenenden etc. in der Modellbildung herauszurechnen, sonst kommt man unter Umständen zu falschen Schlüssen. Eine Möglichkeit von der Dimension der „Zeit“ (weitgehend) zu abstrahieren, ist die Betrachtung des Systems der Karosserieverfügbarkeit in der Dimension der Positionen. Positionen beschreiben die Lage eines Objekts, Auftrag oder Karosserie, in einer bestimmten Reihenfolge. Man geht davon aus, dass die Position der Objekte innerhalb jeder Reihenfolge eindeutig ist, indem die Menge aller Objekte mit einer strikt aufsteigenden Nummerierung in Reihe gebracht wird. Somit lässt sich die Stellung eines Objekts zu allen anderen Objekten in einer Reihenfolge beobachten, beziehungsweise angeben. Dieser Ansatz wird auch im aktuellen Stand der Literatur so verfolgt

¹¹⁵Für die Beispiele in diesem Kapitel wird das in Abschnitt 6.2 vorgestellte Lösungsverfahren verwendet.

und wird auch im Folgenden in dieser Arbeit angewendet werden.¹¹⁶ Die Ergebnisse aus der Entwicklung des Wirkmodells sind auch in der Dimension der Positionen ohne Einschränkung gültig.

Die Betrachtung auf der Ebene der Positionen führt dazu, dass die Information über die Veränderung eines bestimmten Objekts in der zeitlichen Dimension verloren geht, es bleibt lediglich die Information über die Position eines Objekts in unterschiedlichen Reihenfolgezusammenhängen. Da es in einer realen Produktion aber unterschiedliche Schichtmodelle, Taktzeiten, etc. aufeinanderfolgender und paralleler Produktionsgewerke gibt, muss es eine Information darüber geben, in welchem zeitlichen Verhältnis die Reihenfolgen wechselseitig stehen. Träger dieser Information sind die Bestände in Entkopplungspuffern zwischen den Gewerken. Abbildung 24 verdeutlicht

Positionen		8	7	6	5	4	3	2	1
Realisierte Start-Reihenfolge Montage	Auftrag	8	7	6	5	4	3	2	1
	Karosserie	8	7	6	5	4	3	2	1
Geplante Start-Reihenfolge Montage	Auftrag	8	7	6	5	4	3	2	1
Reihenfolge der Verfügbarkeitsprüfungen	Auftrag	8	7	6	5	4	3	2	1
Realisierte Reihenfolge Ende-Karosseriebau	Karosserie	8	7	6	5	4	3	2	1
Bestand im Karosseriesortierer	Karosserien	2	2	2	2	2	2	2	2

Abbildung 24: Betrachtung des Systems der Karosserieverfügbarkeit in der Dimension der Positionen

das Prinzip. Die Darstellung zeigt die realisierte Start-Reihenfolge der Montage (mit denen bei Montage-Start gebildeten Paaren von Auftrag und Karosserie), die geplante Start-Reihenfolge der Montage, die Folge der Verfügbarkeitsprüfungen und die Ende-Reihenfolge der assoziierten Karosserien, die den Karosseriebau verlassen. Außerdem wird der Bestand im Karosseriesortierer dargestellt. In diesen Reihenfolgen sind bestimmte Objekte, Auftrag oder Karosserie, bestimmten Positionen zugeordnet. In der geplanten Montage Start-Sequenz steht beispielsweise Auftrag [1] an Position [1], Auftrag [2] an Position [2], usw. Der Bestand im Karosseriesortierer an der Position der Abfrage für Auftrag [1] beträgt [2]. Dies bedeutet, dass an der Position der Verfügbarkeitsprüfung der Karosseriebau gegenüber der Montage mit [2] Positionen in Vorproduktion ist und die Karosserien [1] und [2] zur Verfügung stehen.

Objekte im Modell

Für die Objekte im Modell wird Folgendes formal definiert: es gibt $[M]$ Aufträge $[a]$ mit $a \in \{1, \dots, M\}$ und $[M]$ Karosserien $[b]$ mit $b \in \{1, \dots, M\}$. $[a]$ bezeichnet die Reihenfolgeposition des Auftrages in der geplanten Montagesequenz. Für die Karosserie $[b]$, die von einem Auftrag $[a]$ in den Karosseriebau gestartet wurde, gilt $[b = a]$. Diese Karosserie wird die assoziierte Karosserie von Auftrag $[a]$, der Auftrag der assoziierte Auftrag von Karosserie $[b]$ genannt. Aufträge und Karosserien tragen ein Variantenmerkmal. Es gibt $[V]$ Varianten, die mit $v \in$

¹¹⁶Vgl. beispielsweise Inman (2003), S.849ff. und Gushikin et.al.(2008), S.651ff.

$\{1, \dots, V\}$ bezeichnet werden. Die Zugehörigkeit eines Auftrages und einer Karosserie zu einer Variante $[v]$ wird mit einem Index markiert, sofern die Information relevant ist: $[a_v]$ oder $[b_v]$. Umgekehrt wird die Variante eines Auftrags oder einer Karosserie mit $[v_a]$, beziehungsweise $[v_b]$ angegeben.

Positionen und Positionsverschiebungen

Die Position, die ein Auftrag oder eine Karosserie in einer Sequenz einnehmen kann, ist als $[SP = Sequence Position]$ definiert. Ändert ein Auftrag oder eine Karosserie die Position von einer Sequenz zu einer anderen, liegt eine Positionsverschiebung vor, die mit $[PC = Position Change]$ bezeichnet wird. Positionsverschiebungen ergeben sich als Differenz zwischen einer betrachteten Position in einer Sequenz $[A]$, nämlich $[SP^A]$, und einer Referenzposition $[SP^B]$, in einer Sequenz $[B]$. Wenn die Positionsverschiebungen für eine bestimmte Objektgruppe, beispielsweise die Karosserien im Karosseriebau, ermittelt werden, dann muss die Summe der Positionsverschiebungen über alle Objekte dieser Gruppe immer Null sein, es gibt keine Positionsverschiebung eines Objektes, ohne eine entsprechende gegenläufige Reaktion eines oder mehrerer anderer Objekte der betrachteten Gruppe. Deshalb gilt für $[M]$ Objekte mit der individuellen Positionsverschiebung $[PC_m]$ zwischen den Sequenzen $[A]$ und $[B]$ mit $[m \in \{1, \dots, M\}]$:¹¹⁷

$$\sum_{m=1}^M PC_m^{A,B} = \sum_{m=1}^M (SP_m^A - SP_m^B) = 0$$

Die erste Form der Positionsverschiebung ist die der physischen Karosserie, zwischen der Start- und Endsequenz eines Gewerks. Für die Ermittlung der Positionsverschiebung $[PC]$ einer Karosserie wird für jede Karosserie $[b]$ aus der Gruppe von $[M]$ Karosserien die Differenz der Sequenzpositionen $[SP]$ der realisierten Start-Sequenz des Karosseriebaus $[ABS = ActualBodyStart]$ und der realisierten Ende-Sequenz des Karosseriebaus $[ABE = ActualBodyEnd]$ ermittelt: $[PC_b = SP_b^{ABE} - SP_b^{ABS}]$.

Auch im Verhältnis der Auftragssequenzen gibt es Positionsverschiebungen, die im Modell berücksichtigt werden $[PPC = PlannedPositionChange]$. Wenn beispielsweise eine bestimmte Karosserievariante eine systematisch längere Durchlaufzeit im Karosseriebau hat, dann ist es im Sinne einer akkuraten Planung möglich, die Karosserien dieser Karosserievarianten relativ zu der Position in der Montage-Start-Sequenz früher in die Karosseriebau zu starten. Diese Positionsverschiebungen zwischen den geplanten Auftragssequenzen wirken wie ein positiver oder negativer Vorlauf auf die Positionsverschiebung, die die Karosserie im Karosseriebau erfährt. Für die Ermittlung wird für jeden Auftrag $[a]$ aus der Gruppe von $[M]$ Aufträgen die Differenz der Sequenzpositionen $[SP]$ der geplanten Start-Sequenz des Karosseriebaus $[PBS = PlannedBodyStart]$ und der geplanten Start-Sequenz der Montage $[PAS = PlannedAssemblyStart]$ ermittelt: $[PPC_a = SP_a^{PBS} - SP_a^{PAS}]$. Da die Auftragsnummer zur Vereinfachung gleich dem Reihenfolgeindex definiert wurde, gilt: $[SP_a^{PAS} = a]$.

Zuletzt soll bezüglich der Positionsverschiebungen berücksichtigt werden, dass eine geplante Startsequenz unter Umständen nicht vollständig umgesetzt werden kann:

¹¹⁷Vgl. Inman (2003), S.856ff.

[$SPC = StartPositionChange$]. Bezogen auf den Start in den Karosseriebau können Gründe hierfür beispielsweise Anlagenstörungen oder Lieferengpässe bestimmter Teile sein. Wird eine Karosserie mit einer höheren Sequenzposition in den Karosseriebau gestartet, als geplant, dann werden andere Karosserien früher in den Karosseriebau gestartet. Für die Ermittlung wird für jeden Auftrag $[a]$ aus der Gruppe von $[M]$ Aufträgen die Differenz der Sequenzpositionen der tatsächlichen Rohbau-Start-Sequenz [$ABS = ActualBodyStart$] und der geplanten Rohbau-Start-Sequenz [$PBS = PlannedBodyStart$] ermittelt: [$SPC_a = SP_{b=a}^{ABS} - SP_a^{PBS}$].

Die gesamte Positionsverschiebung [$OPC = OverallPositionChange$], die ein bestimmter Auftrag bezogen auf die geplante Montage-Start-Position erfährt, ergibt sich dann aus der Summe der Positionsverschiebungen zwischen den Auftragssequenzen, der Positionsverschiebung bei Start in den Karosseriebau und der Positionsverschiebung der assoziierten Karosserie innerhalb des Karosseriebaus: [$OPC_a = SPC_a + PPC_a + PC_{b=a}$].

Es wird hier [$PC_{b=a}$] verwendet, was zum Ausdruck bringen soll, dass für die Ermittlung der gesamten Positionsverschiebung des Auftrags $[a]$ die Positionsverschiebung der assoziierten Karosserie herangezogen werden soll, also diejenige Karosserie, für die $[b = a]$ gilt. In einem Modell, in dem eine feste Zuordnung von Auftrag und Karosserie über den gesamten Produktionsprozess gilt, ist allein diese Positionsverschiebung maßgeblich für die Verfügbarkeit einer Karosserie. Eine weitere Festlegung ist, dass die geplante Ende-Reihenfolge des Karosseriebaus [$PBE = PlannedBodyEnd$] der geplanten Start-Reihenfolge der Montage entspricht, also [$SP_a^{PBE} = SP_a^{PAS}$]. Dies bildet den Fall ab, der im Allgemeinen gültig sein sollte, dass die ideale Ausgangssequenz des Karosseriebaus der geplanten Auftragssequenz der Montage entspricht. Sollte dies nicht der Fall sein, kann die [PBE] ohne weiteres in das Modell integriert werden, durch separate Berücksichtigung der [$PPC_a^{**} = SP_a^{PBE} - SP_a^{PAS}$] und Anpassung der [PPC] zu [$PPC_a^* = SP_a^{PBS} - SP_a^{PBE}$]. Die Zusammenfassung von [PPC^*] und [PPC^{**}] führt zurück auf [PPC]: [$PPC_a = SP_a^{PBS} - SP_a^{PBE} + SP_a^{PBE} - SP_a^{PAS}$]. Der Vergleich von [SP^{PBE}] und [SP^{ABE}] führt zu den [$EPC_a = EndPositionChange$]. Für diese gilt: [$EPC_a = SPC_a + PPC_a^* + PC_{b=a}$]. Die [OPC_a] unter Berücksichtigung von [PBE] wäre dann: [$OPC_a^* = SPC_a + PPC_a^* + PC_{b=a} + PPC_a^{**}$]. Im Folgenden wird aber weiter davon ausgegangen, dass [$SP_a^{PBE} = SP_a^{PAS}$] gilt, und damit [$PPC_a^{**} = 0$], [$PPC_a^* = PPC_a$] und [$OPC_a^* = OPC_a$].

Die Reihenfolge der Verfügbarkeitsprüfungen wird durch [$BCS = BodyCheckSequence$] repräsentiert. In der Folge der Ereignisse der Verfügbarkeitsprüfung gibt es im Gegensatz zu den anderen bis hier dargestellten Folgen keine eindeutige Zuordnung von Objekt und Position: für einen Auftrag kann die Verfügbarkeit an verschiedenen Positionen geprüft werden, und an einer Position kann die Verfügbarkeit für verschiedene Aufträge geprüft werden. Die Prüfungen, die für einen bestimmten Auftrag durchgeführt werden, unterscheiden sich aber qualitativ: es gibt eine erste, initiale Prüfung an einer Position, an der für den Auftrag zum ersten Mal mit dem Vorhaben geprüft wird, diesen in Abhängigkeit des Prüfungsergebnisses in die Montage zu senden. Diese initiale Position wird für den Auftrag $[a]$ mit der Variable [$SP_a^{BCS,I}$] beschrieben. Durch die Referenzierung auf die initiale Prüfung ist eine eindeutige Beziehung zwischen Auftrag und (einer) Position hergestellt. In der Gegenrichtung, zwischen Position und Auftrag, gibt

es diese Eindeutigkeit weiterhin nicht. Es lässt sich aber eine eindeutige Reihenfolge herstellen, bei der allerdings nicht jede Position besetzt ist: geht man davon aus, dass an einer Position die Aufträge strikt in der Reihenfolge nach aufsteigender Reihenfolgenummer gemäß der geplanten Start-Reihenfolge der Montage geprüft werden, dann ergibt sich eine eindeutige Reihenfolge. Positionen, an denen ein Auftrag gesendet wird, für den bereits eine Prüfung stattgefunden hat, sind nicht unbedingt mit einem Auftrag besetzt, der initial geprüft wurde. Allgemein wird die Position der Reihenfolgeprüfung mit $[SP^{BCS}]$ benannt. Die Position, zu der dem Auftrag $[a]$ eine Karosserie zugeordnet wird, heißt $[SP_a^{BCS,X}]$.

Der tatsächliche Start in die Montage wird in der Sequenz $[AAS = ActualAssemblyStart]$ dargestellt. Auf diesen wirken im realen Produktionssystem zahlreiche weitere Faktoren ein, wie das System der Teileverfügbarkeit und einzuhaltende Montagerestriktionen. In diesem Modell wird der tatsächliche Start in die Montage ausschließlich von der Karosserieverfügbarkeit determiniert. Am Punkt Montage-Start findet im Modus der Variantenproduktion im Allgemeinen eine Zuordnung von Auftrag und Karosserie $[a \neq b]$ statt. Deshalb muss es eine Start-Sequenz der Aufträge $[AAS^a]$ und eine Start-Sequenz der Karosserien $[AAS^b]$ geben. Die Zuordnung von Auftrag $[a]$ und Karosserie $[b]$ in der $[AAS]$ kann man darstellen durch $[SP_{a,b}^{AAS}]$. Im Falle der Erweiterung des Grundmodells auf komplexere Fabrikstrukturen mit mehreren Tauschpunkten kann damit auch der Sachverhalt modelliert werden, dass an jedem Tauschpunkt eine Neuordnung von Auftrag und Karosserie stattfindet. Hier gibt es dann eine $[ABS^a]$ und $[ABS^b]$ in Verbindung mit $[SP_{a,b}^{ABS}]$. Außerdem werden die $[PC_{b=a}]$ zu $[PC_{a,b}]$. Für den Grenzfall, in dem es nur einen Tauschpunkt gibt, gilt für die Sequenz $[ABS]$, dass Auftragsnummer und Karosserienummer gleich sind ($[a = b]$) und deshalb ist eine Darstellung als $[ABS^a]$ und $[ABS^b]$ in Verbindung mit $[SP_{a,b}^{ABS}]$ nicht notwendig.

Sortierkapazität

Der physische Bestand an Karosserien im Karosseriesortierer ist im Allgemeinen dynamisch. In der zeitlichen Betrachtung verändert sich der Bestand immer in dem Zeitpunkt, in dem eine Karosserie den Bestand verlässt oder hinzukommt. In der Dimension der Positionen wird der zeitliche Bezug durch den Positionsbezug ersetzt, so dass der physische Bestand im Karosseriesortierer $[SC_P^{SP}]$ zu bestimmten Reihenfolgepositionen relevant ist. Die Reihenfolge der positionsbezogenen Sortierkapazitäten wird mit $[SCS = SortingCapacitySequence]$ bezeichnet.

Virtueller Puffer

Zusätzlich zu dem physischen Bestand wird ein virtuellen Puffer $[SC_{vir}]$ berücksichtigt. Die Werte des virtuelle Puffers können größer, kleiner oder gleich Null sein: $[SC_{vir} \lesseqgtr 0]$. Er dient dazu, den Vorgriff in der geplanten Montagereihenfolge darzustellen. Der Vorgriff ist die Differenz in Positionen, die zwischen dem geplanten Start in die Montage $[SP^{PAS}]$ und der Verfügbarkeitsprüfung $[SP^{BCS}]$ liegen: $[SC_{vir,a}^{SP^{BCS}} = SP_a^{BCS} - SP_a^{PAS}]$. Wurde beispielsweise ein vorangegangener Auftrag wegen nicht verfügbarer Karosserie zurückgestellt, dann erhöht sich der Betrag des virtuellen Puffers um eins. Der effektive Bestand im Karosseriesortierer ergibt sich dann als die Summe aus physischem Bestand und virtuellem Puffer: $[SC_{eff,a}^{SP^{BCS}} = SC_P^{SP^{BCS}} + SC_{vir,a}^{SP^{BCS}}]$.

Der virtuelle Puffer wird erst relevant, wenn die Verfügbarkeitsprüfung erfolgt.¹¹⁸

Distanzen

Da bei variabler Zuordnung von Auftrag und Karosserie nach dem Ende des Karosseriebaus im Karosseriesortierer eine Neuordnung von Aufträgen und passenden Karosserien durchgeführt werden kann, ist es relevant, wie weit gleiche Karosserievarianten in der Auftragssequenz voneinander entfernt liegen. Intuitiv sind Tauschvorgänge zwischen Aufträgen mit gleicher Karosserievariante $[v]$ umso wahrscheinlicher, je näher die Aufträge in der geplanten Auftragssequenz beieinander liegen. Die Distanz von Aufträgen in einer Sequenz, gemessen in Positionen, ist grundsätzlich abhängig davon, zwischen welchen Aufträgen die Distanz bestimmt wird. In einer beliebigen Reihenfolge ergibt sich die Distanz zweier Aufträge einfach aus der Differenz der entsprechenden Reihenfolgennummern. Es sei $[M_v]$ die Anzahl in den $[M]$ Aufträgen, die die gleiche Karosserievariante $[v]$ benötigen. Die Aufträge seien die $[a_v^w]$ und deren Sequenzposition in der eingeplanten Auftragssequenz die $[SP_{a_v^w}^{PAS}]$, wobei $[w]$ ein Reihenfolgeindex der Aufträge mit Karosserievariante $[v]$ ist. Es sei $[r, q \in \{1, 2, \dots, M\}]$, dann kann man die Distanz zwischen zwei Aufträgen der Karosserievariante $[v]$ in der geplanten Montagesequenz ausdrücken mit $[D_{v,r,q}^{PAS} = SP_{a_r^q}^{PAS} - SP_{a_v^q}^{PAS}]$.

Eine weitere Möglichkeit die Distanz zu bestimmen ist, aus der Menge der $[M]$ Aufträge einen Fokusauftrag $[a = F]$ auszuwählen, der gleichsam als Referenzauftrag dient. Es werden dann die Distanzen bezogen auf diesen Referenzauftrag berechnet zu den entsprechenden Vorgängern in der Sequenz (mit niedrigerer Reihenfolgennummer) oder Nachfolgern (mit höherer Reihenfolgennummer). Das Maß für die Entfernung von Aufträgen mit gleicher Variante $[v]$ des fokussierten Auftrages $[a = F]$ mit der Sequenzposition $[SP_F^{PAS}]$ in der geplanten Montage-Start-Sequenz sei definiert als die Distanz $[D_{F,i,j}^{PAS}]$ mit dem i -ten Vorgänger $[p = predecessor]$ oder Nachfolger $[s = successor]$ mit $i \in \{\mathbb{N}\}$, welche durch $j \in \{p, s\}$ symbolisiert werden.

$$D_{F,i,j}^{PAS} = | SP_{i,j}^{PAS} - SP_F^{PAS} |.$$

Karosserieverfügbarkeit

Grundsätzlich ist eine Karosserie bei variabler Zuordnung von Auftrag und Karosserie verfügbar, wenn eine passende Karosserie zu der Reihenfolgeposition der Verfügbarkeitsprüfung im Bestand des Sortierers vorhanden ist, bei fester Zuordnung von Auftrag und Karosserie, wenn dies für die assoziierte Karosserie der Fall ist. In beiden Modi gilt, dass die Karosserie rechtzeitig im Karosseriesortierer eintreffen muss. Betrachtet man demnach ausschließlich den Bestand im Sortierer, dann lässt sich die Karosserieverfügbarkeit für einen Auftrag mit der Karosserievariante $[v]$ formal folgendermaßen beschreiben: $[B_v^{SP}]$ sei definiert als der Bestand an Karosserien der Variante $[v]$ an Position $[SP]$ im Karosseriesortierer. Ein Auftrag an dieser Position hat dann eine Karosserie verfügbar $[BAV_a = BodyAvailability]$, wenn $[B_v^{SP} \geq 1]$ gilt. Es kann also formuliert werden:

¹¹⁸In Abschnitt 4.1.7 wurde bereits von einem virtuellen Puffer gesprochen. Dieser ist im formalen Modell in den $[PPC]$ abgebildet.

$$BAV_{a_v}^{SP^{BCS,I}} = \begin{cases} 1 & \text{für } B_v^{SP^{BCS,I}} \geq 1 \\ 0 & \text{für } B_v^{SP^{BCS,I}} < 1 \end{cases}$$

Bei $[BAV_{a_v}^{SP^{BCS,I}} = 1]$ gilt $[SP_a^{BCS,X} = SP_a^{BCS,I}]$. Es wird bei dieser Darstellung davon ausgegangen, dass die Abstimmung, welche Aufträge Vorrang in der Sequenz haben, und welche nicht, zum Zeitpunkt der Prüfung schon erfolgt ist. Wenn also ein Bestand $[B_v^{SP} \geq 1]$ vorhanden ist, dann kann dieser für den Auftrag, der Gegenstand der Verfügbarkeitsprüfung ist, auch verwendet werden. Dies ist nicht unplausibel, denn wenn es einen Auftrag mit höherer Priorität gäbe, dann würde dieser sicherlich zuerst geprüft werden. Wenn für diesen Auftrag eine Variante im Karoseriesortierer vorhanden wäre, würde diese jenem Auftrag zugeordnet werden, der Bestand an Karosserien der entsprechenden Variante würde sinken. Außerdem gilt für jeden Auftrag, dass bei Verfügbarkeit einer Karosserie die tatsächliche Start-Position in der Montagesequenz gleich der Position in der Reihenfolge der Verfügbarkeitsprüfung $[SP^{BCS}]$ ist, es gilt dann $[SP_a^{AAS} = SP_a^{BCS,X}]$. Der prinzipielle Zusammenhang der Karosserieverfügbarkeitsprüfung wird nochmal in Abbildung 25 verdeutlicht: dargestellt ist eine Auftragssequenz, in der der Auftrag mit der Nummer [1] als einziger eine abweichende Karosserievariante benötigt. An der Position [1] der Verfügbarkeitsprüfungen wurde die Karosserieverfügbarkeit für Auftrag [1] geprüft. Weil eine passende Karosserie nicht verfügbar war, musste der Auftrag zurückgestellt werden und es wurde die Verfügbarkeit einer passenden Karosserie an der Position [1] für Auftrag [2] geprüft. Für diesen stellt diese Maßnahme einen Vorgriff dar, der virtuelle Puffer beträgt $[-1]$. Auftrag [2] wird mit Karosserie [2] in die Montage gesendet. An der nächsten Position der Verfügbarkeitsprüfung wird Auftrag [1] erneut geprüft, die Sortierkapazität beträgt an dieser Position noch [2], es sind die Karosserien [3] und [1] im Sortierbestand enthalten. In der tatsächlichen Montagereihenfolge haben Auftrag [1] und Auftrag [2] die Positionen getauscht gegenüber der ursprünglichen Planreihenfolge.

Positionen		8	7	6	5	4	3	2	1
Realisierte Start-Reihenfolge Montage	Auftrag	8	7	6	5	4	3	1	2
	Karosserie	8	7	6	5	4	3	1	2
Geplante Start-Reihenfolge Montage	Auftrag	8	7	6	5	4	3	2	1
Reihenfolge der Verfügbarkeitsprüfungen	Auftrag	8	7	6	5	4	3	1	2;1
Realisierte Reihenfolge Ende-Karosseriebau	Karosserie	8	7	6	5	4	1	2	3
Bestand im Karoseriesortierer	Karosserien	2	2	2	2	2	2	2	2

	Karosserievariante A
	Karosserievariante B

Abbildung 25: Darstellung der Karosserieverfügbarkeit in der Dimension der Positionen

In der Beschreibung zu Abbildung 25 wurde bereits angedeutet, wie es zu dem Bestand $[B_v^{SP}]$ der Variante $[v = v^*]$ kommt. Dies wird im Folgenden ausformuliert:

In Abschnitt 4.1.6 wurde gezeigt, wie der Füllstand im Sortierer durch die zeitliche Folge von Eingangs- und Ausgangsereignissen determiniert wird. Um einen variantenspezifischen Füllstand an jeder Position der Sequenz der Karosserieverfügbarkeitsprüfung $[SP^{BCS}]$ zu ermitteln, können die variantenspezifischen Eintritts- und Austrittsereignisse verwendet werden. Für die Eintrittsereignisse wird die Sequenz des Ausgangs des Karosseriebaus $[ABE]$ herangezogen, für die Austrittsereignisse die tatsächliche Startsequenz der Montage $[AAS]$. Hierfür werden binäre Hilfsvariablen $[y_v^{SP}]$, $[u_v^{SP}]$ formuliert, die an der Position $[SP]$ den Wert $[1]$ annehmen, wenn sich an der Sequenzposition $[SP^{ABE}]$, beziehungsweise an der Position $[SP^{AAS}]$ eine Karosserie der Variante $[v = v^*]$ befindet:

$$y_{v^*}^{SP} = \begin{cases} 1 & \text{für } v_b^{SP^{ABE}} = v^* \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$u_{v^*}^{SP} = \begin{cases} 1 & \text{für } v_b^{SP^{AAS}} = v^* \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Wenn definiert ist, an welcher Stelle eine Karosserie der Variante $[v = v^*]$ in den Bestand des Karosseriesortierers eintritt und austritt, dann können die Eintritts- und Austrittsereignisse kumuliert werden. Fraglich ist weiterhin, welche Karosserien zum Zeitpunkt der Verfügbarkeitsprüfung schon Eintritts- bzw. Austrittsereignisse hatten? In Hinblick auf die Eintrittsereignisse sind alle diejenigen Positionen (und die zugeordneten Karosserien) zu berücksichtigen, die kleiner oder gleich der Position der Verfügbarkeitsprüfung $[SP_{a_{v^*}}^{BCS}]$ sind. Ferner bildet der Inhalt des Karosseriesortierers den Produktionsvorlauf des Karosseriebaus gegenüber der Montage ab, es sind also zusätzlich $[SC_P^{SP}]$ Positionen der Eingangssequenz $[ABE]$ zu berücksichtigen. Im Allgemeinen sind also die folgenden Positionen zu berücksichtigen: $[SP^{ABE} \in \{1, \dots, SP^{BCS} + SC_P^{SP} - 1\}]$.¹¹⁹ Die Austrittsereignisse sind bis zu einer Position vor der Position der Verfügbarkeitsprüfung zu berücksichtigen, also $[SP^{AAS} \in \{1, \dots, SP^{BCS} - 1\}]$. Es wird hierbei unterstellt, dass die Auslagerung einer Karosserie immer am Ende der Prüfung erfolgt, weshalb für die Prüfung die Austrittsereignisse bis zu der vorherigen Position heranzuziehen sind. Die Gesamtzahl der Karosserien der Variante $[v^*]$ an der Position $[SP^{BCS}]$ ergibt sich demnach aus der Gleichung:

$$B_{v^*}^{SP^{BCS}} = \sum_{i=1}^{SP^{BCS} + SC_P^{SP^{BCS}} - 1} y_{v^*}^i - \sum_{j=1}^{SP^{BCS} - 1} u_{v^*}^j$$

Für diese Form der modellhaften Darstellung ist eine große Zahl von Hilfsvariablen einzusetzen. Mit Hilfe weniger Vereinfachungen lässt sich das Modell ohne Hilfsvariablen darstellen: Annahme ist, dass das Vorrangprinzip für Aufträge mit der niedrigeren Reihenfolgennummer strikt eingehalten wird: Bezogen auf einen bestimmten Auftrag $[a = F]$ mit der Karosserievariante $[v]$ an der Reihenfolgeposition der Verfügbarkeitssequenz $[SP^{BCS}]$ setzt sich der Bestand

¹¹⁹Der Term $[-1]$ wird eingefügt, weil bei einer Verfügbarkeitsprüfung an Position $[SP]$ die Karosserie von $[SP^{ABE}]$ eingelagert wird und sich damit maximal $[SC_P^{SP} - 1]$ weitere Karosserien im Sortierer befinden.

$[B_v^{SPBCS}]$ zusammen aus der assoziierten Karosserie, den Karosserien der $[S]$ Nachfolgaufträge und abzüglich des Bedarfs der $[P]$ Vorgängeraufträge, also:¹²⁰

$$B_{v^*}^{SPBCS} = B_F^{SPBCS} + \sum_{i=1}^S B_{is}^{SPBCS} + \sum_{i=1}^P B_{ip}^{SPBCS}$$

Hierbei bilden die assoziierte Karosserie und die Nachfolgekarnosserien das mögliche Karosserieangebot, die Vorgängeraufträge und der betrachtete Fokusauftrag den Karosseriebedarf. Die assoziierte Karosserie des betrachteten Auftrags $[a]$ ist im Sortierbestand eines Auftrags enthalten, wenn gilt:

$$B_F^{SPBCS} = \begin{cases} 1 \text{ für} & OPC_F \leq SC_{eff,F}^{SPBCS} - 1 \\ 0 \text{ für} & OPC_F > SC_{eff,F}^{SPBCS} - 1 \end{cases}$$

Die Karosserie des i 'ten Nachfolgers ist vorhanden, wenn gilt:

$$B_{is}^{SPBCS} = \begin{cases} 1 \text{ für} & OPC_{is} \leq SC_{eff,F}^{SPBCS} - 1 - D_{F,i,s}^{PAS} \\ 0 \text{ für} & OPC_{is} > SC_{eff,F}^{SPBCS} - 1 - D_{F,i,s}^{PAS} \end{cases}$$

Die gesamte Positionsverschiebung $[OPC]$ des Fokusauftrags oder der Nachfolgaufträge muss kleiner als der effektive Bestand im Karosseriesortierer an der Position der Verfügbarkeitsprüfung sein, damit eine Karosserie im Karosseriesortierer zur Verfügung steht.

Der Karosseriebedarf eines Vorgängerauftrags besteht genau dann, wenn zum Zeitpunkt der Verfügbarkeitsprüfung die assoziierten Karosserien von Vorgängeraufträgen noch nicht im Karosseriesortierer angekommen sind. Formal hat der i 'te Vorgänger einen offenen Bedarf, wenn gilt:

$$B_{ip}^{SPBCS} = \begin{cases} -1 \text{ für} & OPC_{ip} > SC_{eff,F}^{SPBCS} - 1 + D_{F,i,p}^{PAS} \\ 0 \text{ für} & OPC_{ip} \leq SC_{eff,F}^{SPBCS} - 1 + D_{F,i,p}^{PAS} \end{cases}$$

Vorgängeraufträge können einen offenen Bedarf aufweisen, wenn deren assoziierte Karosserien noch nicht im Karosseriesortierer eingetroffen sind, wenn die Verfügbarkeitsprüfung für den Fokusauftrag erfolgt. Wenn beispielsweise fünf Vorgängeraufträge für die Betrachtung relevant sind, und der fünfte Vorgänger einen offenen Bedarf hat, die anderen vier aber nicht, so wird aufgrund der Vorrangregel ein Tauschprozess einsetzen, an dessen Ende derjenige Auftrag mit der geringsten Vorrangpriorität keine Karosserie haben wird und für den Fokusauftrag als offener Bedarf zu werten ist. Demnach ist die Höhe des Bedarfs abhängig von der Anzahl der

¹²⁰Siehe hierzu auch Kapitel 6.1.2.

Vorgänger, die o.g. Kriterium erfüllen. Welche Aufträge der Vorgänger diesen Bedarf aufweisen, spielt für den Fokusauftrag keine Rolle, weil er jedem Vorgänger gegenüber nachrangig bedient wird. Vorgänger, deren Distanz so groß ist, dass die assoziierten Karosserien dieser Vorgänger nicht außerhalb des Toleranzbereichs des Fokusauftrags eintreffen können, entfalten in der Verfügbarkeitsbetrachtung des Fokusauftrags keine Wirkung mehr. Denn deren Karosserien treffen immer so ein, dass sie den Bedarf des Fokusauftrags oder eines anderen Vorgängers befriedigen. Abbildung 26 stellt das Prinzip beispielhaft dar: Die Abbildung zeigt die realisierte und die geplante Montagesequenz, die Sequenz der Verfügbarkeitsprüfung und die Sequenz des Karosseriebau-Endes. Der Bestand im Karosseriesortierer ist durchgängig [2], es gibt zwei Karosserievarianten: grau und farblos. Karosserie [1] trifft so spät im Karosseriesortierer ein (an Position [7]), dass diese für Auftrag [1] nicht verfügbar sein kann. Gleichzeitig trifft keine Karosserie gleicher Variante rechtzeitig im Karosseriesortierer ein, um ein Karosserieangebot zu erzeugen. Für Auftrag [1] ist damit eine Karosserie an der Position der Verfügbarkeitsprüfung nicht verfügbar. Aus Perspektive des Auftrags [5] kommt die assoziierte Karosserie pünktlich, allerdings hat Auftrag [1] einen offenen Bedarf. Somit kann also Auftrag [1] mit Karosserie [5] (an Position [4]) gesendet werden. Auftrag [5] wiederum fehlt die Karosserie bei Abfrage der Verfügbarkeit an Position [5], er muss zurückgestellt werden und kann erst mit Karosserie [1] (an Position [6]) gesendet werden. Für Auftrag [8] gibt es weder einen offenen Bedarf eines Vorgängers, noch eine verfügbare Karosserie eines Nachfolgers, aber die assoziierte Karosserie ist pünktlich, somit kann dieser an der Position der Prüfung der Verfügbarkeit in die Montage gesendet werden. Es ergibt sich also, dass für zwei Aufträge eine Karosserie nicht verfügbar ist.

Positionen		8	7	6	5	4	3	2	1
Realisierte Start-Reihenfolge Montage	Auftrag	8	7	5	6	1	4	3	2
	Karosserie	8	6	1	4	5	7	2	3
Geplante Start-Reihenfolge Montage	Auftrag	8	7	6	5	4	3	2	1
Reihenfolge der Verfügbarkeitsprüfungen	Auftrag	8	7	5	6;5	1	4;1	3;1	2;1
Realisierte Reihenfolge Ende-Karosseriebau	Karosserie	8	1	6	5	4	7	2	3
Bestand im Karosseriesortierer	Karosserien	2	2	2	2	2	2	2	2

	Karosserievariante A
	Karosserievariante B

Abbildung 26: Ermittlung der Karosserieverfügbarkeit mit Hilfe der OPC

Wenn bekannt ist, an welcher Reihenfolgeposition die Verfügbarkeit geprüft wird, kann auf die oben dargestellte Weise die Karosserieverfügbarkeit berechnet werden. Gerade diese Information ergibt sich bezogen auf einen Auftrag aus den Verfügbarkeitsergebnissen aller Vorgängeraufträge: der virtuelle Puffer bildet den Vorgriff der Verfügbarkeitsprüfung gegenüber der ursprünglich geplanten Montagereihenfolge ab: $[SP^{BCS} = SP^{PAS} + SC_{vir}]$. Die Höhe des virtuellen Puffers ergibt sich aus den gleichzeitig zurückgestellten Montageaufträgen, also den Aufträgen, für die bis zu der Position der betrachteten Verfügbarkeitsprüfung keine Karosserie verfügbar war. In

Modellen der Ablaufsimulation kann die positionsbezogene Höhe des virtuellen Puffer algorithmisch ermittelt werden, so wie dies in dem Modell des Abschnitts 4.3 geschieht und in Kapitel 6 dargestellt wird.

Zusammenfassung

Im Wirkmodell wurden die zwei direkten Einflußgrößen, das Verhältnis von Durchlaufzeit und Vorlaufzeit sowie die Variantenstruktur in der eingeplanten Montagesequenz, und die indirekte Einflußgröße, der Bestand der Karosserien im Karosseriesortierer, genannt. Im formalen Modell wurden Variablen für diese Sachverhalte definiert:

- $[SC_P]$ für den Bestand an Karosserien im Karosseriesortierer
- $[OPC]$ und $[SC_{vir}]$ für das Verhältnis von Durchlaufzeit und Vorlaufzeit, wobei sich die Summe $[OPC]$ aus den verschiedenen Komponenten zusammensetzt, die zu Positionsverschiebungen führen
- $[v^{SP^{PAS}}]$ für die Karosserievariante an einer bestimmten Position in der geplanten Montagesequenz, die Variantenstruktur ergibt sich aus der Folge $[v^{SP^1}, \dots, v^{SP^M}]$
- $[D_{F,i,j}^{PAS}]$ als abgeleitetes Maß für die Variantenstruktur in der eingeplanten Montagesequenz.

Die im Wirkmodell beschriebenen Formen der Autokorrelation finden sich hier ebenso wieder: die allgemeine Autokorrelation als Reduktion der Vorlaufzeit, enthalten in $[SC_{vir}]$, die variantenspezifische Autokorrelation in der Variable $[B_{ip}]$, welche den Bedarf des i -ten Vorgängers zeigt.

Datenmodell

Das in diesem Abschnitt beschriebene formale Modell wird in folgenden Kapiteln mit empirischen Daten gefüllt, beispielsweise 4.3 und 5. Diese Datenreihen sind aus statistischer Perspektive als Zeitreihen zu interpretieren. Für eine formale Definition von Zeitreihen sind zunächst die Begriffe der Zufallsvariable und des stochastischen Prozesses zu definieren. Eine Zufallsvariable $[Y]$ ist eine Variable, deren Werte das Ergebnis eines Zufallsvorgangs sind. Die Zahl $[y]$, die die Zufallsvariable nach der Durchführung des Zufallsvorgangs annimmt, heißt die Realisierung von $[Y]$.¹²¹ Nach Schlittgen ist ein stochastischer Prozess $\{Y_t\}$ eine mit $[t \in \mathbb{N}, \mathbb{N}_0 \text{ oder } \mathbb{Z}]$ indexierte Folge von Zufallsvariablen $[Y_t]$; $[t]$ beschreibt hier die Zeit. Eine Zeitreihe ist darauf aufbauend eine Folge $[y_1, \dots, y_N]$ von Realisationen der Zufallsvariablen eines Ausschnitts von $\{Y_t\}$.¹²² In dieser Arbeit wird die Folge nicht mit einem Zeitindex $[t]$ versehen, sondern mit einem Positionsindex $[SP]$, bezogen auf bestimmte Reihenfolgen im Modell. Zeitreihen können grundsätzlich isoliert betrachtet werden, als univariate stochastische Prozesse, oder im Zusammenhang miteinander, als multivariate stochastische Prozesse.¹²³

¹²¹Vgl. Fahrmeier et.al. (2003), S.224.

¹²²Vgl. Schlittgen (2012), S.4.

¹²³Siehe zur Definition multivariater stochastischer Prozesse beispielsweise Neusser (2006), S.155.

Phänomene der strukturellen Dynamik und der Dynamik in der Prozessstruktur wurden in Abschnitt 4.1 betrachtet. Außerdem wurde dort beschrieben, dass Prozessergebnisse voneinander abhängig sein können, beispielsweise die Durchlaufzeit einer Karosserie im Karosseriebau von der Karosserievariante. Wenn eines oder mehrere der genannten Phänomene in der Struktur der wahren Prozesse, beziehungsweise des wahren Systems, vorliegen, dann kann sich dies auch in der Struktur des Datenmodells, beziehungsweise der Datenreihen, zeigen. Aus der Perspektive der Zeitreihen heißt dies nichts anderes, als das die Daten, also die Realisierungen der zugrunde liegenden stochastischen Prozesse, zeitlich stochastisch nicht unabhängig sind.¹²⁴

In dieser Arbeit werden die Strukturen und Strukturänderungen, die auf die Datenreihen wirken, unterteilt mit den abstrakten Begriffen der

- Längsstruktur
- Querstruktur.

Längsstruktur umfasst dabei originär die Prozessstruktur und deren Änderungen, die den zeitlichen Verlauf der Daten eines Prozesses betreffen. Die Querstruktur bezeichnet Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Prozessen. Gemeinsam betrachtet kann durch den Zusammenhang zwischen den Prozessen, der Querstruktur, die Längsstruktur eines Prozesses die Längsstruktur eines anderen Prozesses verändern, oder unter Umständen erst induzieren. Der Fall der Abhängigkeit beziehungsweise Korrelation der Datenreihen ist demnach dem Bereich der Querstruktur zuzuordnen, der Fall der strukturellen Dynamik der Längsstruktur und der der Dynamik in der Prozessstruktur ebenfalls der Längsstruktur.

Beispiele für Phänomene der Längsstruktur sind der schwankende Bestand im Karosseriesortierer, der durch unterschiedliche Schichtmodelle zwischen Karosseriebau und Montage entstehen kann oder die zeitliche Verteilung der Karosserievarianten bei saisonaler Nachfrage, wie beispielsweise Cabriovarianten. Ein Beispiel für die Querstruktur wäre der Zusammenhang zwischen der Durchlaufzeit durch den Karosseriebau und der Karosserievariante. Die zeitliche Verteilung der Karosserievarianten würde, wenn ein Zusammenhang zwischen den Karosserievarianten und den Durchlaufzeiten bestünde, in der zeitlichen Folge der Durchlaufzeiten möglicherweise auch eine zeitliche Struktur induzieren.

Neben den genannten Beispielen können verschiedene Aspekte im konkreten Planungsfall in der beschriebenen Form Einfluss auf die Datenreihen nehmen. Da es das Ziel dieser Arbeit ist, ein auf viele Anwendungsfälle übertragbares Modell zu erzeugen, wurden diese abstrakten Begriffe eingeführt, um die möglichen Effekte konkreter Einflüsse auf die stochastischen Prozessergebnisse zu verallgemeinern. Prinzipiell kann bei jeder Einflußgröße hinterfragt werden, ob diese eine Längsstruktur aufweist, und/oder in Querstruktur mit einer anderen Einflußgröße verbunden ist.

4.3 Trace Driven Simulation zur Validierung des Wirkmodells

Das in Abschnitt 4.1 beschriebene und in Abschnitt 4.2 formalisierte Wirkmodell ist bis zu dieser Stelle eine Hypothese über das Wirksystems. Diese Hypothese ist durch die systematische

¹²⁴Vgl. zur stochastischen Unabhängigkeit beispielsweise Fahrmeir et.al. (2007), S.206ff.

Analyse des realen Prozesses, sowie Vergleich mit und Anlehnung an den Stand der Wissenschaft aus Sicht des Autors plausibel, die Untersuchung der Validität steht allerdings noch aus und soll im Folgenden durchgeführt werden. Dies dient einerseits dazu, die entsprechende Forschungslücke zu verkleinern, andererseits um den darauf aufbauenden Aussagen über die Eigenschaften des Wirksystems in Bezug auf die robuste Planung ein höheres theoretisches und praktisches Gewicht zu verleihen.

Ein wichtiger Aspekt zu Möglichkeiten und Zielen der Validierung wird von Rabe, Spiekermann und Wenzel eingebracht, nämlich die Unmöglichkeit, die vollständige Korrektheit eines Modells formal nachzuweisen. Es ist deshalb subjektiv zu entscheiden, mit welchen Techniken die Validierung durchgeführt wird. Die Autoren formulieren deshalb als Ziel der Validierung, nicht den formalen Nachweis der Gültigkeit, sondern die Bestätigung der Glaubwürdigkeit des Modells.¹²⁵

Unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen wird die Validität mit dem Ziel der Glaubwürdigkeit des Wirkmodells mit dem Verfahren der „Trace Driven“ Simulation untersucht. Ein „Trace Driven“ Simulationslauf zeichnet sich dadurch aus, dass nicht nur ausschließlich empirische Eingangsdaten verwendet, sondern diese auch in der empirischen Reihenfolge eingesetzt werden. Dieser Ansatz dient vor allem dazu, die Erklärungsmacht der ausgewählten Wirkstruktur, also die Wirkgrößen und deren Wirkzusammenhang, zu prüfen. Wenn die gemäß obiger Analyse des Wirkmodells identifizierten Parameter nicht ausreichen sollten, das System der Karosserieverfügbarkeit zu erklären, dann sollte dies im Ergebnis der „Trace Driven-Simulation“ sichtbar sein. Da durch die Verwendung der empirischen Eingangsdaten in empirischer Reihenfolge die Korrelation zwischen den empirischen Ergebnissen und den simulierten Ergebnissen der Karosserieverfügbarkeit sehr hoch ist, sollte die Abweichung der simulierten von den empirischen Ergebnissen entsprechend gering sein, wenn die Validität der Wirkstruktur des Modells groß ist.

Folgende Überlegung zeigt den statistischen Zusammenhang, der zu dieser Varianzreduktion zwischen den empirischen und den simulierten Ergebnissen führt. Es seien $[Y_i^E]$ die empirischen Karosserieverfügbarkeitsergebnisse, $[Y_i^S]$ die simulierten. Betrachtet man die Abweichung der Ergebnisse, also $[Y_i^E - Y_i^S]$, dann ergibt sich die Varianz der Differenz dieser beiden Zufallsvariablen zu $[Var(Y_i^E - Y_i^S) = Var(Y_i^E) + Var(Y_i^S) - 2Cov(Y_i^E, Y_i^S)]$. Sind die Ergebnisdaten korreliert, dann gilt: $[Cov(Y_i^E, Y_i^S) > 0]$. Deshalb sollte die Varianz bei korrelierten Ergebnissen geringer sein, als bei unkorrelierten.¹²⁶

Um Simulationsmodelle mittels „Trace Driven“ Simulation zu validieren, schlägt Kleijnen zwei unterschiedliche Methoden vor, die in diesem Kontext interessant sind:¹²⁷

1. Untersuchung der graphischen Verläufe der Ergebnisse
2. Statistische Methoden.

Es wird im Folgenden zunächst das konkrete Konzept der „Trace Driven“ Simulation erläutert und der graphische Vergleich des realen und des simulierten Systems durchgeführt. Danach

¹²⁵Vgl. Rabe, Spiekermann, Wenzel (2008), S.2.

¹²⁶Vgl. Law (2015), S.271ff.

¹²⁷Vgl. Kleijnen (1995), S.152ff.

werden statistische Methoden zur Validierung angewendet.

„Trace Driven“ Simulationsstudie

Für die Simulationsstudie wurden Daten aus einer realen Automobilproduktion erfasst. Im Erfassungszeitraum wurden $[M = 79.922]$ Aufträge $[a]$ mit deren assoziierten Karosserien $[b]$, mit $[a, b \in \{1, \dots, M\}]$ produziert. Der Verlauf der Sortierkapazität wurde über die Ein- und Austrittsereignisse mit zugehörigen Terminen nachvollzogen. Die stochastischen Prozesse des Ein- und Austritts können mit einer binären Zufallsvariable dargestellt werden, die bei einem Zeitindex den Wert $[1]$ annimmt, sofern ein solches Ereignis eingetreten ist, sonst aber den Wert $[0]$ hat. $[E_t^E]$ repräsentiert die Eintrittsereignisse, $[E_t^A]$ die Austrittsereignisse. Es wird angenommen, dass alle Ereignisse mit einem Zeitindex $[t \in \{0, \dots, T\}]$ versehen werden. Diese Ereignisse sind mit den assoziierten Karosserien verbunden. Unter Berücksichtigung einer Einschwingphase, deren Ende mit dem Zeitindex $[t_0]$ bezeichnet wird, und einer Ausschwingphase, deren Beginn mit $[T_0 < T]$ gekennzeichnet ist, ergibt sich der Füllstand des Karosseriesortierers zu jedem Zeitpunkt $[k]$ mit $[t_0 < k < T_0]$ nach folgender Berechnungsformel:
$$\left[SC_k = \sum_{t=t_0+1}^k E_t^E - \sum_{t=t_0+1}^k E_t^A \right].$$

Für alle Aufträge wurden die geplanten Montagetermine, die geplanten Termine für den Start des Karosseriebaus, die Termine des tatsächlichen Starts des Karosseriebaus und die Termine des Endes des Karosseriebaus ermittelt, wobei die letzten beiden Termine an der assoziierten Karosserie gemessen wurden. Die geplanten Montagetermine entsprechen dem letzten Planungsstand, bevor ein Auftrag in die Montage gesendet werden sollte. Auf Basis dieser Termine lassen sich die Sequenzen $[PAS]$, $[PBS]$, $[ABS]$, und $[ABE]$ und die zugehörigen Positionen der Aufträge und deren assoziierten Karosserien ermitteln: $[SP_a^{PAS}]$, $[SP_a^{PBS}]$, $[SP_{b=a}^{ABS}]$ und $[SP_{b=a}^{ABE}]$. Aus diesen Positionen werden die Positionsverschiebungen $[PPC_a]$, $[SPC_a]$ und $[PC_{a=b}]$ berechnet.¹²⁸

Um die Sequenz $[SCS]$ zu erzeugen, wurden aus den $[SC_t]$ mittlere Füllstände $[\overline{SC}_h]$ je Stunde aus den empirischen Füllständen ermittelt und den Positionen $[SP^{SCS}]$ über die entsprechenden geplanten Montagetermine der Aufträge $[a]$ der $[PAS]$ zugeordnet.¹²⁹

Es sei hier erwähnt, dass in dieser Simulationsstudie die Systeme, die über den Prozess der Auftragsrückstellung auf die Karosserieverfügbarkeit wirken, nicht modelliert wurden und dementsprechend die Effekte, die daraus auf die Karosserieverfügbarkeit entstehen, nicht berücksichtigt werden. Eine Zurückstellung führt zu einer Vergrößerung des Vorgriffs und damit zu einer tendenziell niedrigeren Karosserieverfügbarkeit. Ob der Verlust an Validität beziehungsweise Erklärungsmacht relevant ist, wird im Folgenden mit betrachtet.

Bewertung der Ergebnisse

Gemäß der Formel

¹²⁸ Auch hier gilt: $[PBE = PAS]$.

¹²⁹ Der Zeitstempel der $[SC_t]$ ist vom Format $[YYYY : MM : DD : hh : mm : ss]$, der der $[\overline{SC}_h]$ vom Format $[YYYY : MM : DD : hh]$, der der $[a]$ ist vom Format $[YYYY : MM : DD : hh : mm : ss]$.

$$BAV_{a_v}^{SP^{BCS,I}} = \begin{cases} 1 & \text{für } B_v^{SP^{BCS,I}} \geq 1 \\ 0 & \text{für } B_v^{SP^{BCS,I}} < 1 \end{cases}$$

und mit Anwendung des in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Schemas kann nun für jeden Auftrag ermittelt werden, ob eine Karosserie verfügbar ist, oder nicht. Es soll noch erwähnt sein, dass die Vorrangregel in der Simulation so gestaltet wurde, dass immer dem Auftrag mit der niedrigeren Reihenfolgennummer eine Karosserie zugeordnet wird; entsprechend der im zugrunde liegenden realen System angewendeten Steuerungsregel. Somit wirken für den Fokusauftrag $[a_F]$ die offenen Bedarfe der Vorgängeraufträge $[\sum_{i=1}^P B_{ip}]$ tatsächlich mindernd auf das Karosserieangebot.

Als Indikator für die Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit wird die über den Positionsindex der Aufträge $[a = SP_a^{PAS}]$ kumulierte Anzahl der Aufträge verwendet, die keine Karosserie verfügbar hatten. Für jede Position $[m \in \{1, \dots, M\}]$ ergibt sich die kumulierte Anzahl der nicht verfügbaren Karosserien zu: $[NVK_m = \sum_{a=1}^m NVK_a]$. Hierbei ist $[NVK_a]$ definiert als $[NVK_a = 1 - BAV_a^{SP^{BCS,I}}]$.¹³⁰

Der Blick auf die quantitativen Ergebnisse zeigt beim Vergleich der $[NVK_M]$ der beiden Kurven, $[NVK_M^{TD} = 1.808]$ und $[NVK_M^{Emp} = 1.859]$, dass die Differenz zum Ende der Simulation genau [51] Karosserien beträgt, dies stellt eine Abweichung von [2,7%] bezogen auf den empirischen Wert dar. Abbildung 27 zeigt auf den ersten Blick, dass der Verlauf der Ergebnisse

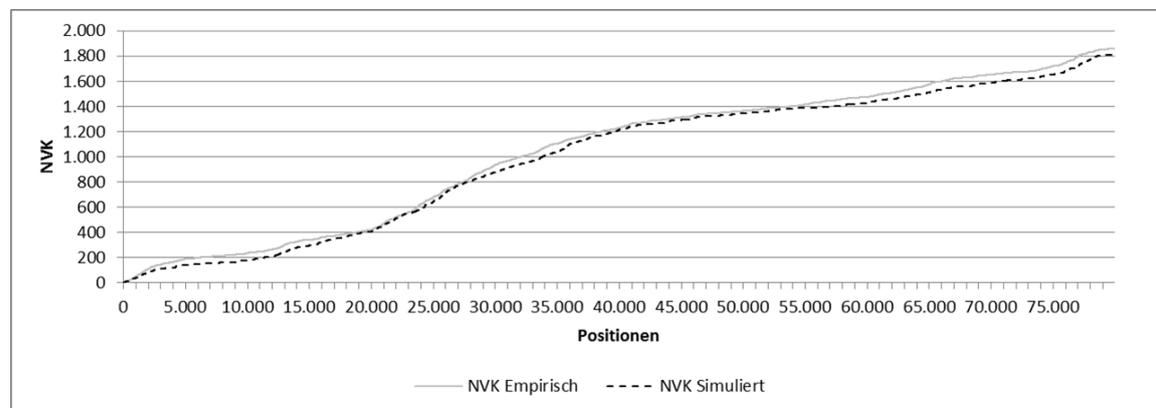


Abbildung 27: Vergleich der NVK der empirischen und der „Trace Driven“ Ergebnisse

der „Trace Driven“ Simulation dem Verlauf der empirischen Ergebnisse sehr ähnlich ist, das heißt die Kurvensteigung, die in den empirischen Ergebnissen nicht konstant ist, wird gut nachvollzogen, wenngleich es Abschnittsweise einen (variierenden) Niveauunterschied gibt. Diese Niveauunterschiede sind ein Indiz dafür, dass bestimmte Effekte im simulierten System positionsbeziehungsweise zeitverzögert auftreten.

Die sich verändernde Steigung der Kurve der empirischen Ergebnisse ist auffällig: diese zeigt, dass es eine empirische Koinzidenz von Einflüssen gibt, die dazu führt, dass in bestimmten Phasen mehr, in anderen weniger Karosserien nicht verfügbar sind. Aus Sicht des Autors lässt der grafische Vergleich der Kurven darauf schließen, dass die Hypothese über das Wirksystem

¹³⁰Mit $[NVK]$ wird in dieser Arbeit auch allgemein die nicht verfügbare Karosserie abgekürzt.

eine hohe Erklärungskraft besitzt und für diesen Fall und aus der dargestellten Perspektive eine vorläufige Bestätigung findet.

Wie eingangs erwähnt, weist das Modell gegenüber dem empirischen System einen systematischen Fehler auf: Auftragsrückstellungen aus anderen Gründen als dem Fehlen einer passenden Karosserie werden nicht berücksichtigt. Fraglich ist, ob dieser systematische Fehler signifikant ist für die Modellvalidität.

Qualitativ wirkt der Effekt in Richtung einer höheren Anzahl nicht verfügbarer Karosserien, denn in der empirischen Situation hat der Effekt der allgemeinen Autokorrelation in Verbindung mit einer erhöhten (exogenen) Anzahl nicht verfügbarer Karosserien c.p. die Wirkung, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Auftragsrückstellung aufgrund fehlender Karosserien steigt. Wäre dieser Effekt im Modell der Trace Driven Simulation integriert, würde die Zahl der $[NVK_M^{TD}]$ steigen, es würde also entweder die Differenz zwischen $[NVK_M^{TD}]$ und $[NVK_M^{Emp}]$ kleiner werden, oder es würde sich das Vorzeichen der Differenz ändern. Es gibt verschiedene Wege, um die quantitative Stärke des Effekts einzuschätzen. Ein möglicher ist, die exogenen Rückstellungen in das Modell der Trace Driven Simulation als Zufallsereignisse zu integrieren. Ein weiterer ist, abzuschätzen, ob diese nicht berücksichtigten Fälle relevant sein werden. Der zweite Weg wird im Rahmen dieser Arbeit verfolgt.

In Abschnitt 5.4 wird gezeigt, dass sich der gesamte Effekt der Autokorrelation bei variierender Kapazität im Karosseriesortierer im Modus der Variantenproduktion sichtbar auswirkt. Im dort verwendeten Modell wird aber auch deutlich, dass bei einer Kapazität im Karosseriesortierer von $[SC_P^* = 450]$, die dem Mittelwert der empirischen Werte $[\overline{SC_P} = 454]$ entspricht, der gesamte Effekt der Autokorrelation sehr gering ist. Dieser liegt im Mittel bei [20] nicht verfügbaren Karosserien über alle Aufträge. Allerdings ist das Gesamtniveau der nicht verfügbaren Karosserien in diesem Modell $[s]$ deutlich geringer als in den empirischen Daten, es liegt bei $[NVK_M^s = 1.125]$ im Vergleich zu [2.130] empirischen Auftragsrückstellungen. In der realen Fabrik lag der Anteil der Aufträge, die als Rückstellgrund die Karosserieverfügbarkeit aufweisen, bei etwa [87%], die Rückstellungen aus anderen Gründen liegen demnach bei [13%], das ergibt bezogen auf die $[NVK_M^{Emp}]$ etwa [15%] zusätzliche Rückstellungen. Im Rahmen des oben genannten Modells des Abschnitts 5.4 ist ein Effekt von [15%] zusätzlichen Rückstellungen auf die absolute Höhe der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien sicher vernachlässigbar, wenn der Gesamteffekt der allgemeinen Autokorrelation lediglich bei [20] Karosserien liegt.

Natürlich sind die Erkenntnisse aus diesem Modell auf die empirischen Ergebnisse nicht ohne Weiteres übertragbar, sie helfen aber, die Relevanz des Effekts einzuschätzen. Zunächst einmal liegt es auf der Hand, dass der Effekt der allgemeinen Autokorrelation c.p. umso größer ist, je größer die Anzahl der nicht verfügbaren Karosserien im Szenario ist. Wenn man zeigen kann, dass der Effekt in einem Modell nicht relevant ist, welches eine deutlich höhere Anzahl nicht verfügbarer Karosserien erzeugt, als in den empirischen Ergebnissen, dann ist es plausibel, dass dieser spezielle Effekt für das Modell der Trace Driven Simulation ebenfalls gering ist. In den empirischen Daten liegt in ca. [99%] der Positionen eine Kapazität im Karosseriesortierer von $[SC_P \geq 300]$ vor. Um ein gegenüber der empirischen Situation deutlich sensitiveres Modell auszuwählen, wird aus Abschnitt 5.4 ein Szenario gewählt, bei dem die mittlere Sortierkapazität

bei $[SC_P^* = \overline{SC}_P = 300]$ liegt. Die Kapazität im Karosseriesortierer im Modell ist also dauerhaft geringer und größtenteils deutlich geringer als die Kapazität im empirischen System, in welchem der Mittelwert $[\overline{SC}_P = 454]$ beträgt. Die Stärke des Effekts der gesamten allgemeinen Autokorrelation liegt in diesem Modell bei etwa [100] Karosserien, auf einem Gesamtniveau der nicht verfügbaren Karosserien von etwa [2.500]. In der Trace Driven Simulation sollte der Effekt schwächer sein: Beispielsweise läge in einem Modell $[t]$, welches eine etwas geringere Anzahl nicht verfügbarer Karosserien erzeugt ($[NVK_M^t = 1.897]$ bei $[SC_P^* = 350]$) der Effekt bei [60] Karosserien. Man kann also davon ausgehen, dass der gesamte Effekt der Autokorrelation zwischen [60] und [100] Karosserien liegt. Wenn man berücksichtigt, dass im realen System bei deutlich geringerer Gesamtanzahl der Auftragsrückstellungen, i.e. [2.130], beziehungsweise [1.859] wegen fehlender Karosserie, nur etwa [12,7%] der empirischen Rückstellungen fehlen, dann kann man schließen, dass der Effekt der Auftragsrückstellungen aus anderen Gründen als der Karosserieverfügbarkeit im Modell der Trace Driven Simulation sehr gering und in diesem Kontext vernachlässigbar ist.

Eine in Bezug auf die Untersuchung der Validität weiterführende Frage ist, wie sich die absolute Abweichung der $[NVK_M]$ über die gesamte Zeitreihe im Mittel auswirkt. Um der Antwort nachzugehen wird zunächst zusätzlich zu der gesamten Anzahl nicht verfügbarer Karosserien $[NVK_M]$ ein weiterer Kennwert formuliert: teilt man den gesamten Auftragsstrom in $[N = \frac{M}{z}]$ gleiche Abschnitte, wobei $[z]$ der Anzahl der Aufträge in jedem Abschnitt entspricht, so bilden die Abschnitte die Basis für unterschiedliche Beobachtungen. $[z]$ kann dann im Anwendungsfall beispielsweise der Anzahl von Aufträgen gleich einer Tagesproduktion entsprechen. Durch die Aufteilung in Abschnitte können Beobachtungen, nicht unbedingt unabhängig und identisch verteilt, in einer durch $[z]$ festgelegten Anzahl erzeugt werden. Für diese Beobachtungen kann dann der Erwartungswert in Form einer Punktschätzung bestimmt werden. Nach Neusser ist das arithmetische Mittel ein erwartungstreu und konsistenter Schätzer des Erwartungswerts eines stationären stochastischen Prozesses.¹³¹ Stationarität vorausgesetzt, ist $[\bar{Y}^z = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y_n]$ ein Schätzer für die mittlere Anzahl der nicht verfügbaren Karosserien je Abschnitt bei einer Abschnittsgröße von $[z]$. Da die Stationarität eine notwendige Bedingung für Konsistenz und Erwartungstreue des Schätzer ist, sollte jene statistisch getestet werden. Hierfür stehen statistische Testverfahren zur Verfügung, beispielsweise die Tests auf Vorliegen einer Einheitswurzel, wie der (Augmented-) Dickey-Fuller-Test oder der Phillip-Perron-Test, beziehungsweise auf Stationarität, wie der KPSS-Test.¹³²

Im Unterschied beispielsweise zu makroökonomischen Zeitreihen sind die Wirkzusammenhänge im System der Karosserieverfügbarkeit direkt und gut beobachtbar, nicht nur die Ergebnisse der Prozesse. Deshalb sind Veränderungen im Wirksystem, beispielsweise die temporäre und erhebliche Verringerung der Sortierkapazität, den Experten im Allgemeinen bekannt und müssen nicht aus den Daten heraus identifiziert werden. Klar ist, dass bei der Schätzung statistischer Parameter, wie beispielsweise einer mittleren Anzahl nicht verfügbarer Karosserien, ein repräsentativer Zeitraum zu wählen ist, in dem das Wirksystem hinreichend stabil ist. Diese Stabilität im Wirksystem findet dann auch Ausdruck in der Stabilität der Ergebnisse und damit in der Eigenschaft

¹³¹Vgl. Neusser (2006), S.45ff. und Vgl. zum Konzept der Stationarität auch Abschnitt 6.2.4.

¹³²Vgl. Neusser (2006), S.111ff.

der Stationarität der Ergebniszeitreihe der $[NVK]$, beziehungsweise der $[\overline{Y^z}]$. Im Kontext der Zeitreihenanalyse sind substantielle Instabilitäten im Wirkmechanismus beispielsweise

- ein Trend oder
- ein Strukturbruch.

Ein Strukturbruch sei hier verstanden als ein Ereignis, welches in dem durch die untersuchten Daten abgedeckten Zeitraum auftritt und langfristig Einfluss auf die Ergebnisse nimmt. Man kann dann im Sprachgebrauch dieser Arbeit von Dynamik in der Struktur des Prozesses sprechen. Davon abzugrenzen ist ein sogenannter „Schock“, der im Falle eines stationären Prozesses nicht dazu führt, dass der stochastische Prozess langfristig seine statistische Charakteristik ändert. Ein Strukturbruch würde auf eine andere Art von Modellen leiten, in denen solche Ereignisse berücksichtigt werden können.¹³³ Um einen solchen Strukturbruch festzustellen, können einerseits die Prozessdaten betrachtet werden, andererseits können Informationen aus der tatsächliche Produktion herangezogen werden, ob solche Ereignisse aufgetreten sind, oder nicht. In dem in dieser Arbeit betrachteten Produktionssystem sind solche Ereignisse nach Kenntnis des Autors nicht aufgetreten. Abbildung 28 zeigt die empirische Anzahl nicht verfügbarer Karosserien als $[\overline{Y^z}]$ bei einer Abschnittsgröße von $[z = 1000]$. Der Kurvenverlauf zeigt, dass die Daten nicht auf eine dauerhafte Niveaushiftung schließen lassen.

Die Regressionsgleichungen, die in den beiden in dieser Arbeit angewendeten Testverfahren zum Einsatz kommen, weisen eine deterministische und eine stochastische Komponente auf. Neusser empfiehlt, zur Spezifikation der deterministischen Komponente die Daten zunächst gegen die Zeit zu plotten, um festzustellen, ob eine Art kontinuierliches Wachstum in den Daten vorliegt.¹³⁴ Die Plots der empirischen und der simulierten $[NVK]$ sind in den Abbildungen 28 und 29 dargestellt. Ein solches Wachstum ist in diesen Daten nicht erkennbar. Es kann also festgehalten werden, dass es ex ante keine Hinweise auf Vorliegen von Phänomenen der Instabilität des Wirkmechanismus im genannten Sinne gibt.

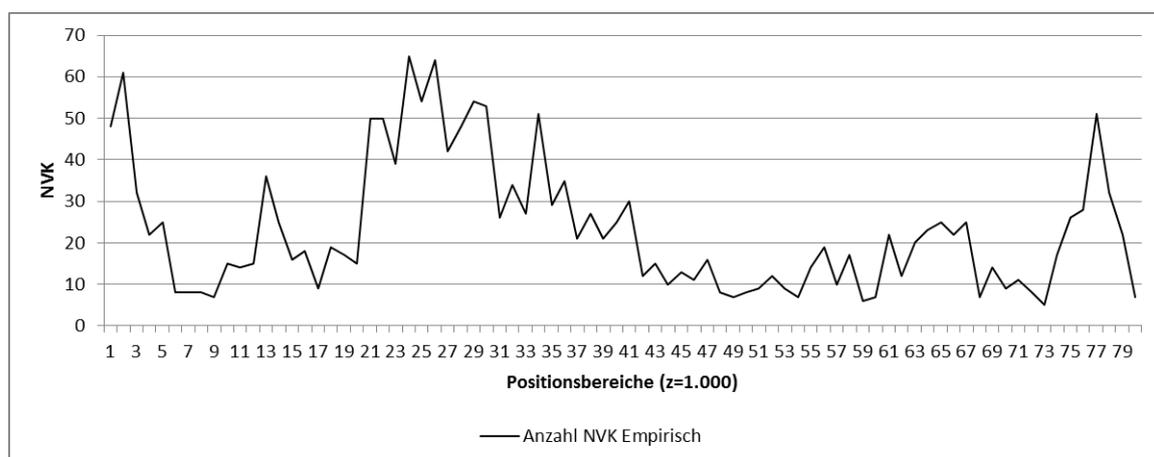


Abbildung 28: Zeitreihe der empirischen NVK in 1000er Abschnitten

¹³³Vgl. hierzu beispielsweise Interventionsmodelle bei Schlittgen (2012), S.168ff.

¹³⁴Vgl. Neusser (2011), S.124.

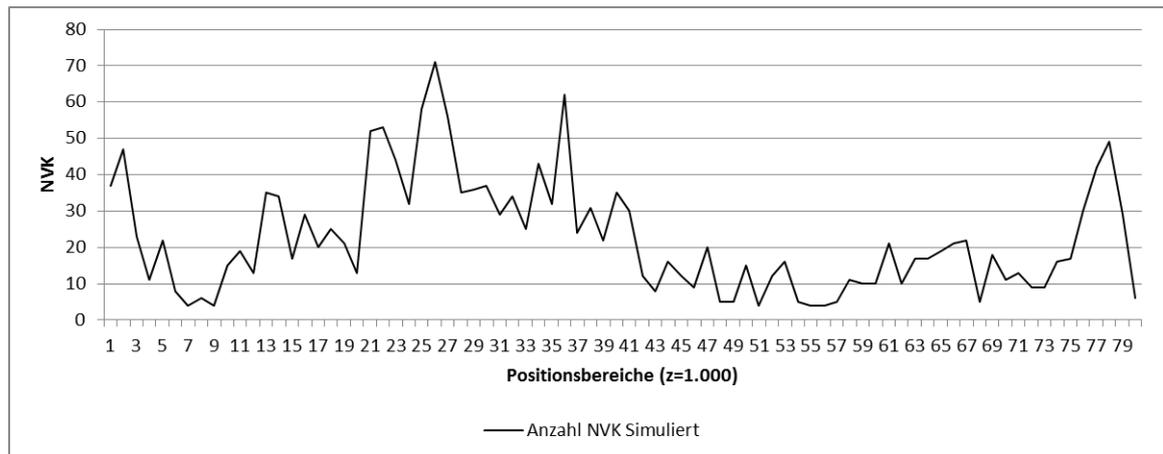


Abbildung 29: Zeitreihe der simulierten NVK in 1000er Abschnitten

Um die empirische und die simulierte Zeitreihe weiterführend auf Stationarität zu untersuchen, wurden zwei Testverfahren angewendet: Zum einen der Dickey-Fuller-Test unter der Nullhypothese, dass eine Einheitswurzel vorliegt, der Prozess also nicht stationär ist. Zum anderen wurde der KPSS-Test durchgeführt, mit der Nullhypothese, dass der stochastische Prozess stationär ist. Die jeweilige Vorgehensweise und die Testergebnisse werden im Anhang erläutert. Für die weitere Vorgehensweise zur Untersuchung der Mittelwerte wird mit den Datenreihe der Abschnittsgröße $[z = 1000]$ gearbeitet, unter der durch die Prüfung nicht widerlegten Annahme, dass diese aus statistischer Perspektive stationär ist. Es ergibt sich für die simulierten Ergebnisse $[\bar{Y}_S^z = 22,6]$ und für die empirischen Ergebnisse $[\bar{Y}_E^z = 23,24]$, so dass die Abweichung $[\Delta \bar{Y}_{E,S}^z = \bar{Y}_E^z - \bar{Y}_S^z = 0,64]$ ist. Je $[1000]$ Aufträge beträgt die Abweichung bei der mittleren Anzahl nicht verfügbarer Karosserien also $[0,64]$ Karosserien, einem Anteil von weniger als $[3\%]$. Da diese mittlere Abweichung nicht einmal einer Karosserie entspricht, zeigt aus Sicht des Autors auch diese Gegenüberstellung, dass man von einer hohen Validität des Wirkmodells ausgehen kann.

Da Punktschätzer für den Erwartungswert ebenfalls einer stochastischen Verteilung unterliegen, könnte es natürlich sein, dass die beiden Mittelwerte, mit einer Varianz $[Var(\bar{Y}^z)]$, zufällig nahe bei einander liegen. Um die Güte der Punktschätzung quantitativ bewerten zu können, ist ein übliches Vorgehen, aus einer repräsentativen Stichprobe Konfidenzintervalle für den geschätzten Parameter zu erzeugen, die den wahren Wert mit einer definierten Wahrscheinlichkeit überdecken. Dies ist aus zweierlei Gründen im Falle stochastischer Prozesse nicht immer unbedingt möglich, denn zum Einen sind die Prozessergebnisse häufig autokorreliert, also nicht stochastisch unabhängig, zum anderen sind die stochastischen Verteilungen der Prozessergebnisse, zumindest von realen Systemen, nicht vollständig identisch. Ein Ansatz ist, durch die Unabhängigkeit der Beobachtungen über unterschiedliche Experimente und zugehörige „Trace Driven“ Simulationsläufe, unabhängig und identisch verteilte Zufallsvariablen zu erzeugen. Law schlägt beispielsweise den „Correlated Inspection Approach“ vor, bei dem eine Vielzahl von Experimenten im realen System durchgeführt werden, die dann später als „Trace Driven“ Experimente simulativ nachgeahmt werden. Die Beobachtungen der Experimente des realen Systems und des

simulierten Systems können dann verglichen und statistisch ausgewertet werden. Ein weiterer Vorschlag ist die Schätzung eines Konfidenzintervalls für die Abweichung der Erwartungswerte des realen und des simulierten Systems. Voraussetzung ist auch hier, dass zahlreiche unabhängig und identisch verteilte Beobachtungen von beiden Systemen gesammelt werden können.¹³⁵ Im hier betrachteten Anwendungsfall des Systems der Karosserieverfügbarkeit, für den Vergleich der „Trace Driven“ Simulation und des realen Prozesses, gibt es jeweils nur einen Ergebnisstrom, also prinzipiell nur eine Beobachtung der entsprechenden Systeme. Beide genannten Verfahren, die auf Experimenten mit unabhängigen und identisch verteilten Beobachtungen beruhen, sind also nicht anwendbar.¹³⁶ In der Literatur finden sich zahlreiche weitere Verfahren, die auf unabhängigen und (approximativ) identisch verteilten Beobachtungen beruhen, wie beispielsweise regressionsbasierte Verfahren.¹³⁷

Da die statistische Validierung des Wirksystems nur ein Verfahren neben der grafischen Validierung ist, und beide Ansätze aus Sicht des Autors zeigen, dass Validität im Sinne des oben angeführten Kriteriums der „Glaubwürdigkeit“ vorliegt, werden weitergehende Verfahren hier nicht mehr angewendet.

¹³⁵Vgl. Law (2015), S.271ff.

¹³⁶Vgl. Sauerbier (1999), S.114.

¹³⁷Vgl. Kleijnen (1998).

5 Analyse des Wirksystems

In Kapitel 2 wurde dargestellt, dass ein valides Wirkmodell notwendige Voraussetzung für die robuste taktische Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit ist. In Kapitel 4 wurde ein generisches Wirkmodell aufgebaut und es wurde vorläufig bestätigt, dass der in diesem Wirkmodell dargestellte Wirkmechanismus ein hohes Maß an Erklärungsmacht für das konkret untersuchte reale System besitzt.

Dieses Kapitel dient dazu, das Wirkmodell in einigen Details zu konkretisieren und Schlüsse für die Praxis der taktischen Produktionsplanung zu ziehen. Wenn, wie in der Validierungsstudie geschehen, alle Effekte gleichzeitig zur Geltung kommen, überlagern sich die Wirkungen und es ist schwierig, die Relevanz einzelner, bestimmter Effekte festzustellen. Es ist deshalb das Ziel dieses Kapitels, Effekte der Quer- und Längsstruktur, der Koinzidenz und der Autokorrelation zu isolieren. Dies kann nur in einer Art Laborumgebung geschehen, da in einer realen Produktionsumgebung immer zahlreiche Effekte gleichzeitig wirken, wie in der Trace Driven Simulation. Als eine solche Laborumgebung dienen in dieser Arbeit Modelle der Ablaufsimulation, die auf dem validierten Wirkmodell basieren und für die die empirischen Daten der Trace Driven Simulation als Basis für die Eingangsdaten verwendet werden.

Die Wirkung bestimmter, isolierter Effekte im System der Karosserieverfügbarkeit hängt aufgrund der Systemeigenschaften immer vom konkreten Zustand des Systems ab, also von der Systemstruktur, und den vergangenen Systemergebnissen. Es ist deshalb nicht möglich, allgemeingültige Aussagen über die konkrete Wirkung bestimmter Effekte zu treffen, ohne die Historie des Systems und die übrigen Wirkgrößen mit zu berücksichtigen. Ein Beispiel aus dem Bereich des Zusammenwirkens der Effekte soll dies verdeutlichen: weist ein Produktionszeitraum besonders viele seltene Karosserievarianten auf, heißt dies nicht, dass die Karosserieverfügbarkeit per se niedrig sein muss. Es könnte beispielsweise gerade in diesem Zeitraum die Termintreue der Karosserien besonders hoch sein, oder der Füllstand im Karosseriesortierer ist besonders hoch, so dass Tausch- und Wartefunktion besonders stark wirken. Es kann deshalb nicht das Ziel dieses Abschnitts sein, allgemeingültige Aussagen über die absolute Höhe bestimmter Effekte zu tätigen. Es ist das Ziel, zu untersuchen, ob bestimmte Effekte signifikante Wirkung auf die Anzahl der Risikokarosserien und damit auf die Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit in einer Laborumgebung haben können und deshalb bei der taktischen Produktionsplanung berücksichtigt werden sollten. In einem konkreten Planungsfall wäre dann zu entscheiden ob die vorgestellten Effekte endogen oder exogen berücksichtigt werden und auf welche Art dies geschehen soll, das heißt, wie die konkrete Modellierung erfolgen soll.

Es ist nicht Ziel dieser Arbeit, alle möglichen Einflüsse, die zu Quer- und Längsstruktur führen können, zu zeigen, sondern beispielhaft darzustellen, welche konkreten Sachverhalte sich hinter den abstrakten Begriffen „Quer- und Längsstruktur“ verbergen können.

5.1 Untersuchung der Variantenstruktur

Die geplante Montagesequenz ist im Wirksystem der Karosserieverfügbarkeit von besonderer Relevanz, weil sie zum einen mit definierter Qualität umgesetzt werden soll, zum anderen auch

selbst wesentlich den Tauschprozess beeinflusst: sie nimmt eine doppelte Rolle ein, Ursache und Zielgröße. Denn in der Auftragsreihenfolge ist die Variantenstruktur festgelegt, insbesondere, in welcher Distanz Aufträge, die die gleiche Karosserievariante benötigen, zueinander stehen. Die Folge von Aufträgen mit den zugehörigen Karosserievarianten und die daraus resultierende Distanz gleicher Karosserievarianten ist eine Form der Längsstruktur der Auftragsreihenfolge. Diese Längsstruktur, verhindert, ermöglicht, erleichtert oder erschwert den Tauschprozesse im System der Karosserieverfügbarkeit. Dies ist eine Erklärung für das Phänomen, das unterschiedliche Reihenfolgen (oder Längsstrukturen) unter sonst gleichen Bedingungen zu unterschiedlichen Ergebnissen der Karosserieverfügbarkeit führen können. Bevor dies im Rahmen einer Simulationsstudie verdeutlicht und nachgewiesen wird, soll zunächst die Behandlung der Wirkgröße „Auftragsreihenfolge“ in der Literatur dargestellt werden. Danach wird kurz der Kontext betrachtet, aus dem Längsstruktur in der Auftragsreihenfolge entsteht.

Stand der Wissenschaft zur Einflußgröße „Variantenstruktur“

Bei Inman wird die geplante Montagesequenz lediglich als Zielgröße genannt, im Sinne einer Soll-Reihenfolge, nicht aber die Variantenstruktur als Ursache mit eigenem Effekt auf die Karosserieverfügbarkeit. Sein Modell zielt darauf ab, den Servicegrad bei gegebener ASRS-Kapazität, beziehungsweise die ASRS-Kapazität bei gegebenem Servicegrad zu bestimmen. Er nennt als die „primary drivers“ der ASRS-Kapazität

- die Positionsverschiebungen im Karosseriebau
- die Anzahl der Karosserievarianten und
- den Anteil der Karosserievarianten.¹³⁸

Explizit berücksichtigt Inman in seiner Methode zur Berechnung der „Upper Bound“ des Servicegrads des ASRS, dass es Aufträge in der Sollreihenfolge geben kann, die die gleiche Karosserievariante benötigen. Er nimmt an, dass Nachfolgaufträge ihre Karosserien als Tauschkarosserien zur Verfügung stellen, in dem er die Wahrscheinlichkeit des Gegenereignisses berechnet, dass innerhalb eines bestimmten Bereichs der Sollreihenfolge, der durch die Anzahl der Plätze im Karosseriesortierer bestimmt wird, kein Tauschpartner zur Verfügung steht. Ferner nimmt er Tauschvorgänge als stochastisch unabhängig an und betrachtet die Wirkung von Vorgängeraufträgen nicht.¹³⁹ Zusammengefasst sei Inmans Berücksichtigung des Aspekts der Sollreihenfolge wie folgt beschrieben: er zieht die Möglichkeit des Vorhandenseins eines Tauschpartners grundsätzlich in Betracht, soweit es einen durch die Sortierkapazität bestimmten Bereich der Sollsequenz betrifft. Distanzaspekte berücksichtigt er nicht, auch nicht die Möglichkeit, dass Aufträge die Vorgänger sind oder eine größere Distanz als die Sortierkapazität aufweisen, auf die Karosserieverfügbarkeit wirken können.

Bei Gushikin et.al. spielt der Reihenfolgeaspekt explizit eine wichtige Rolle; allerdings nicht als Aspekt der geplanten Montagesequenz in seiner Wirkung auf die Tauschbarkeit der Karosserien, sondern zur Erzeugung eines virtuellen Puffers, um planerisch regelmäßige beziehungsweise

¹³⁸Vgl. Inman (2003), S.849.

¹³⁹Vgl. Inman (2003), S.861 und für weitere Ausführungen Abschnitt 6.1.1 dieser Arbeit.

systematische Unterschiede in der Durchlaufzeit der Karosserien auszugleichen. Die Autoren zielen auf die geplante Eingangssequenz des Karosseriebaus. Es werden bestimmte Karosserievarianten gegenüber ihrer Reihenfolgeposition in der geplanten Montagesequenz vorgezogen, um Verspätungen im Karosseriebau vorwegzunehmen und präventiv auszugleichen. Im Rahmen des in dieser Arbeit vorgestellten Erklärungs- und formalen Modells wurde dieser Aspekt mit [PPC] als „geplante Positionsverschiebung“ bezeichnet.¹⁴⁰

Entstehung eines Kundenauftrags im Kundenauftragsprozess und Produktentstehungsprozess

Es wird im Folgenden kurz darauf eingegangen, wie es (modellhaft) zur Festlegung der benötigten Karosserievariante in einem Kundenauftrag kommt und welche wesentlichen Effekte hier wirken. Bei Herold findet sich eine Darstellung der Geschäftsprozesse der Volkswagen AG: Hier wird unter anderem das Zusammenwirken der „Kernprozesse“ der Produktentstehung, der Produktherstellung und des Produktverkaufs schematisch dargestellt.¹⁴¹ Die Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit werden maßgeblich durch die Ergebnisse in diesen drei Kernprozessen beeinflusst: die Anzahl der möglichen Karosserievarianten wird im Produktentstehungsprozess festgelegt. Im Prozess des Produktverkaufs werden Fahrzeuge mit einer bestimmten Verteilung der Konfiguration vertrieben, diese Fahrzeugkonfiguration enthält immer eine bestimmte Ausprägung der Karosserievariante in Form und Farbe, so dass sich hier die Verteilung der Karosserievarianten ergibt. Ferner treffen hier Angebot und Nachfrage zusammen, es wirken also sowohl Abhängigkeiten zu bestimmten Karosserievarianten auf der Angebotsseite, wie beispielsweise Herstellkosten, die die Preise beeinflussen, als auch auf die Effekte der Nachfrageseite, wie Mode, Trend, Saisonalität und vieles mehr. Bezogen auf diese beiden Kernprozesse lässt sich zusammenfassen, dass der Produktentstehungsprozess die möglichen Karosserievarianten determiniert, der Verkaufsprozess die in einem bestimmten Zeitraum zu produzierenden. Im Prozess der Produktherstellung werden die zu produzierenden Karosserien im Rahmen der PPS-Aufgabe der Reihenfolgebildung in eine Sollreihenfolge gebracht. Diese Sollreihenfolge ist schließlich maßgeblich für die Längsstruktureffekte auf die Tauschbarkeit der Karosserievarianten. Abbildung 30 zeigt die Zusammenhänge schematisch.

Vereinfacht man den Prozess der Auftragseinplanung dahingehend, dass man annimmt, dass die Anzahl der einplanbaren Aufträge gleich der Anzahl der einzuplanenden Aufträge ist, dann kann man die Anzahl der Permutationen der Auftragsreihenfolge mit Hilfe eines einfachen Urnenmodells berechnen. Abbildung 30 folgt bereits diesem Modell: Es wird angenommen, dass eine Folge von genau $[M]$ Aufträgen einzuplanen ist. Die im Produktentstehungsprozess festgelegten Karosserievarianten dieser Aufträge werden analog zu dem formalen Modell der Karosserieverfügbarkeit als $[v \in \{1, \dots, V\}]$ dargestellt. Die insgesamt $[V]$ Varianten bilden $[V]$ Urnen. Von jeder Variante $[V]$ gibt es eine Anzahl Vertreter $[m_v]$, die der Anzahl der Kugeln des Urnenmodells entspricht, wobei die Summe über alle Varianten $[M]$ ergibt, also $[M = \sum_{v=1}^V m_v]$ gilt. Die Besetzung der Urnen ergibt sich aus dem Vertriebsprozess und entsteht, wie oben beschrieben,

¹⁴⁰ vgl. Abschnitte 4.1 und 4.2.

¹⁴¹ Vgl. Herold (2005), S.21.

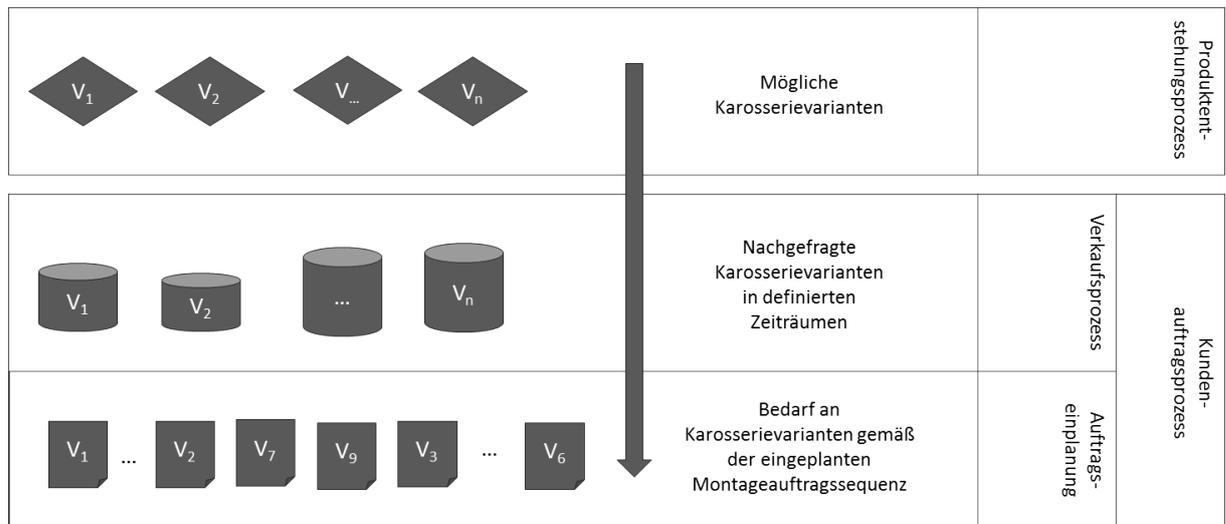


Abbildung 30: Die Variantenstruktur der Auftragsreihenfolge als Ergebnis aus Produktentstehungs- und Kundenauftragsprozess

aus dem Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage. Die Anzahl der möglichen Permutationen sei mit $[W]$ bezeichnet und ergibt sich dann einfach aus dem Urnenmodell unter der Annahme, dass die Kugeln nicht zurückgelegt werden: $\left[W = \frac{M!}{\prod_{v=1}^V m_v!} \right]$. Gibt es nur eine Karosserievariante $[V = 1]$ dann ist $[W = 1]$; gibt es $[M]$ Karosserievarianten $[V = M]$, dann ist $[W = M!]$. Der Karosseriesortierer führt dazu, dass unterschiedliche Reihenfolgen, trotz unterschiedlicher Distanzprofile, zu ähnlichen oder gar gleichen Ergebnissen der Karosserieverfügbarkeit führen. Dies liegt darin begründet, dass über Verfügbarkeit oder Nicht-Verfügbarkeit einer Karosserie im Sortierer $\left[\geq \right]$ Relationen zwischen Vorlauf- und Durchlaufzeit entscheiden.

Simulationsstudie zum Nachweis der Relevanz der Variantenstruktur für die Karosserieverfügbarkeit

Der Nachweis dafür, dass die Reihenfolge der Aufträge beziehungsweise die Längsstruktur für die Ergebnisse im System der Karosserieverfügbarkeit relevant sein kann, wird mit Hilfe einer Simulationsstudie erbracht. Ziel ist es, in den Experimenten den Effekt der Reihenfolge zu isolieren. Als Kennwert einer speziellen Reihenfolge wird die Variable $\left[\overline{NVK}_M^{RF} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} NVK_M^{RF,i} \right]$ definiert (siehe dazu Abschnitt 6.2.4). Zur Isolation des Effekts der Reihenfolge ist es notwendig, den Füllstand im Sortierer konstant zu halten. Deshalb wird dieser für jeden Lauf eines Experiments stabil gehalten auf $[SC = SC^*]$ und nur über die Experimente variiert.

In den Experimenten werden zwei bestimmte und $[30]$ zufällige Reihenfolgen untersucht. Die erste Reihenfolge ist eine äquidistante Reihenfolge der Karosserievarianten, das heißt, die Aufträge, die die gleiche Karosserievariante verwenden, werden gezielt so über die Auftragsreihenfolge verteilt, dass die Distanz zwischen ihnen annähernd gleich bleibt. Die Distanz zwischen Aufträgen mit gleicher Karosserievariante ist also annähernd konstant und wird mit $\left[\overline{D}_v \right]$ bezeichnet. Die variantenspezifische Distanz $\left[\overline{D}_v \right]$ ist determiniert durch den Anteil der Aufträge, welche die Karosserievariante $[v]$ benötigen, an der gesamten Anzahl der Aufträge, i.e. $[p_v]$. Es gilt

$\left[\overline{D}_v \approx \frac{1}{p_v}\right]$ und $\left[\overline{D}_v^i \approx i\overline{D}_v\right]$ gemäß der Notation im formalen Modell der Karosserieverfügbarkeit, das heißt der i 'te Vorgänger oder Nachfolger ist ungefähr i -mal den variantenspezifischen Abstand $\left[\overline{D}_v\right]$, gemessen in Positionen, entfernt. Für die zweite Reihenfolge werden alle Aufträge gemäß ihrer benötigten Karosserievariante zu Blöcken zusammengefasst, das heißt, es findet eine Art Losfertigung statt. Aufträge mit gleicher Karosserievariante haben hier immer eine Distanz zum nächsten Vorgänger und Nachfolger von eins (mit Ausnahme des ersten und letzten Auftrags eines variantenspezifischen Blocks, welche keinen Vorgänger, beziehungsweise Nachfolger, mehr haben). Die äquidistante Reihenfolge und die Blockreihenfolge wurden weniger wegen ihrer praktischen Relevanz, als wegen ihrer theoretischen Handhabbarkeit für die Untersuchung herangezogen. Die Muster oder Profile variantenspezifischer Distanzen folgen einfachen Prinzipien, die zwar in ihrer Reinform als einzige Konstruktionsregel einer Auftragsreihenfolge unüblich sein mögen, aber in kurzen Abschnitten der Auftragsreihenfolge zufällig oder gezielt auftauchen können. Können beispielsweise bestimmte Karosserievarianten nicht restriktionsfrei für die Montage eingeplant werden, dann werden diese üblicherweise in bestimmten Distanzen über die Auftragsreihenfolge verteilt. Andere wiederum könnten bevorzugt direkt hintereinander eingesteuert werden, weswegen definierte Blöcke von Varianten nicht unüblich sind. Im ersten Schritt wird das arithmetische Mittel $\left[\overline{NVK}_M^{ZRF} = \frac{1}{30} \sum_{j=1}^{30} \overline{NVK}_M^{RFj}\right]$ über alle zufälligen Reihenfolgen $[j \in \{1, \dots, 30\}]$ als Kennwert verwendet, über alle Sortierkapazitäten gebildet, und mit der Äquidistanten Reihenfolge $\left[\overline{NVK}_M^{Aequi}\right]$ verglichen. Abbildung 31 zeigt,

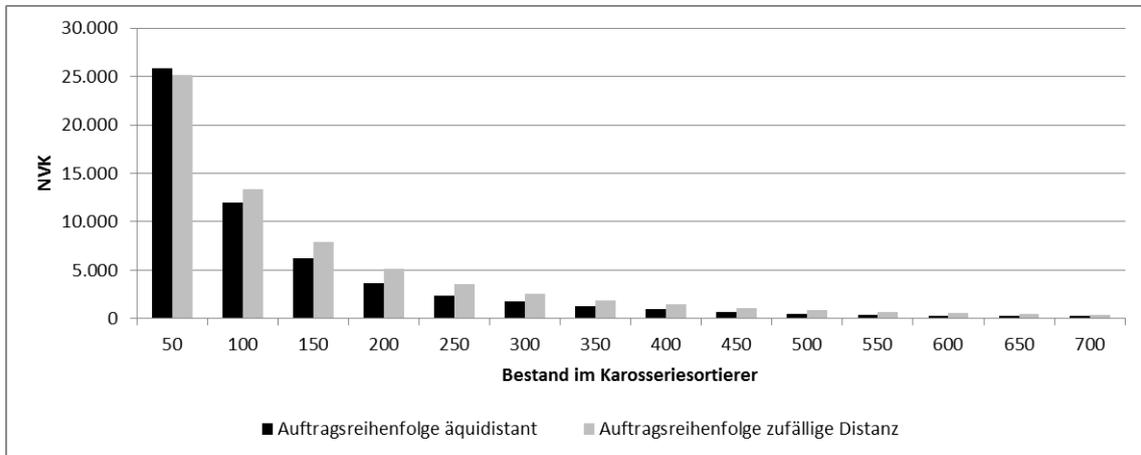


Abbildung 31: Vergleich der zufälligen und der äquidistanten Reihenfolge

dass die äquidistante Reihenfolge statistisch ab einer Sortierkapazität von $[SC^* = 100]$ weniger nicht verfügbare Karosserien verursacht als die zufälligen Reihenfolgen im Mittel. Die zufälligen Reihenfolgen weisen also im genannten Bereich der Sortierkapazität einen höheren Anspannungsgrad bezüglich der Karosserieverfügbarkeit auf. Bei niedrigen Sortierkapazitäten sind die Verhältnisse umgekehrt, hier $[SC^* = 50]$. Hier verursacht die äquidistante Reihenfolge eine höhere Anzahl nicht verfügbarer Karosserien. Dieses Phänomen lässt sich anschaulich an der Variantenstruktur der unterschiedlichen Reihenfolgen erklären.

Bei einer äquidistanten Reihenfolge liegen Distanzschwerpunkte um die Punkte $\left[\frac{1}{p_v}\right]$. Ist die Sortierkapazität deutlich kleiner als ein Distanzschwerpunkt, dann sind die Karosserievarianten

schwer oder unter Umständen gar nicht mehr tauschbar. Schwer tauschbar heißt, die Karosserievarianten können noch dann getauscht werden, wenn die Karosserien der nachfolgenden Aufträge zu früh im Karosseriesortierer eintreffen. Gar nicht mehr tauschbar sind diese Varianten, deren Distanz zwischen $\left[\frac{1}{p_v}\right]$ und $[SC^*]$ gemessen in Positionen so groß ist, dass diese auch nicht durch ein zu früh kommen der Karosserien überwunden werden kann. Bei einer zufälligen Reihenfolge sind auch die Distanzen zufällig verteilt, es gibt dann Aufträge mit gleicher Karosserievariante, deren Karosserien tauschbar sind, auch bei sehr kleiner Sortierkapazität $[SC^*]$, und solche, deren Karosserien nicht tauschbar sind.

Noch schwerwiegender werden die Unterschiede, wenn die zufälligen Reihenfolgen mit der Blockreihenfolge verglichen werden. Auch für diesen Vergleich wird für die Darstellung der Charakteristik der zufälligen Reihenfolgen der Mittelwert $\left[\overline{NVK}_M^{ZRF}\right]$ verwendet. Abbildung 32 zeigt

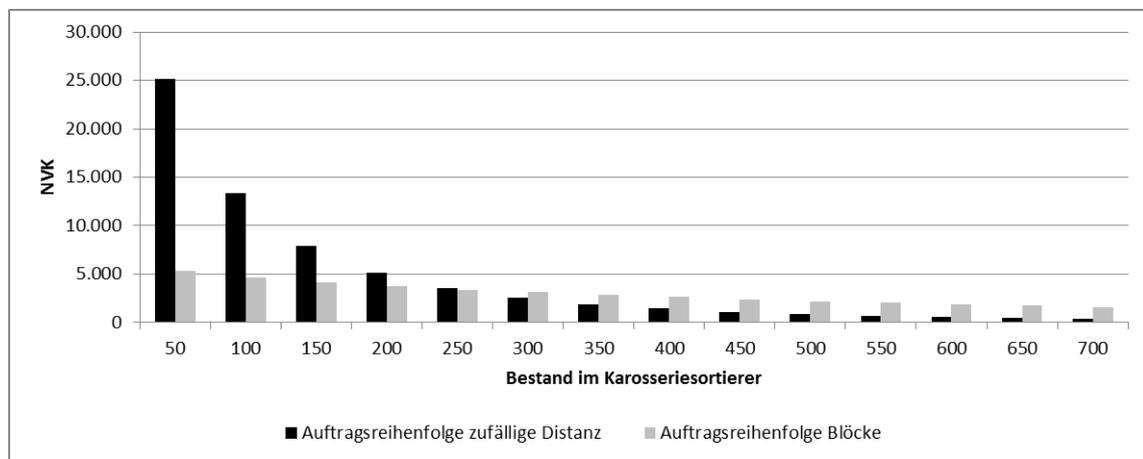


Abbildung 32: Vergleich der zufälligen Reihenfolge und der Blockreihenfolge

die Ergebnisse der Simulation. Besonders auffällig ist, dass die Sensitivität der Blockreihenfolge gegenüber einer Variation der Sortierkapazität deutlich geringer ist, als die der zufälligen Reihenfolge. Dies erkennt man daran, dass die Kurve der Blockreihenfolge ein vergleichsweise schwaches Gefälle bei zunehmender Sortierkapazität aufweist, derart schwach, dass sich die Kurven schon bei einer Sortierkapazität zwischen $[SC^* = 250]$ und $[SC^* = 300]$ schneiden. Und das, obwohl die Blockreihenfolge für niedrige Sortierkapazitäten deutlich weniger Nichtverfügbarkeiten als die zufällige Reihenfolge erzeugt.

Warum die Blockreihenfolge eine solch geringe Sensitivität gegenüber der Sortierkapazität aufweist, zeigt eine kurze Analyse. Aufträge, die die gleiche Karosserievariante benötigen, folgen in der Blockreihenfolge direkt aufeinander. Die Tauschbarkeit ist für die ersten Aufträge der betrachteten Variante sehr günstig und nimmt in Richtung der letzten Aufträge ab. Spätestens der letzte Auftrag des Blocks hat keinen Nachfolger mit gleicher Variante, dessen Karosserie er verwenden könnte. Hinzu kommt, dass die Wirkung einer stark verzögerten Karosserie eines Auftrags des Blocks in der Reihenfolge der Aufträge des Blocks nach hinten verschoben wird. Dies führt dazu, dass diejenigen Aufträge eines Blocks, die keine Karosserie verfügbar haben, am Ende des Blocks stehen. Die Kapazität des Karosseriesortierers spielt hierbei nur eine geringere Rolle, da die großen Positionsverschiebungen im Allgemeinen durch den Sortierer ohnehin nicht

kompensiert werden könnten. Abbildung 33 zeigt diesen Effekt am Beispiel eines Blocks. Auf der

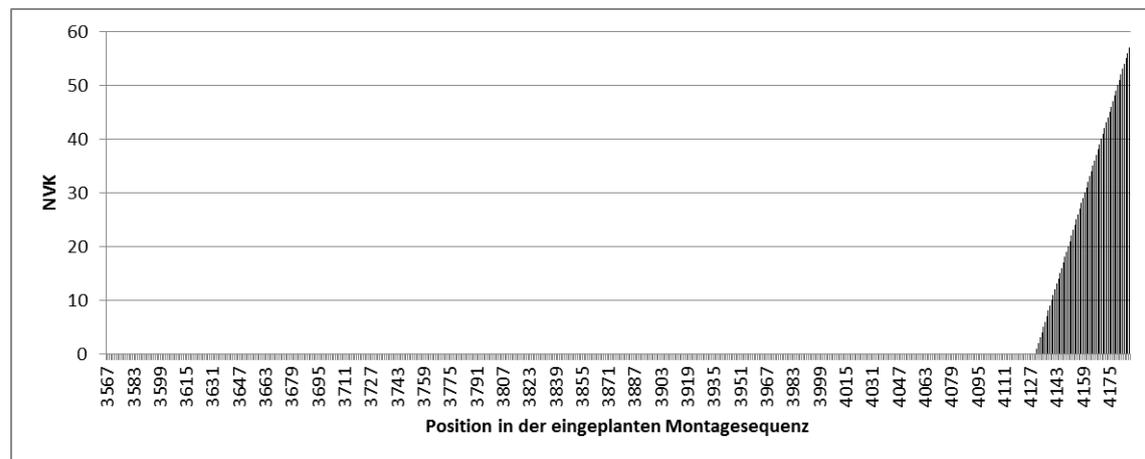


Abbildung 33: Kumulierte Anzahl nicht verfügbarer Karosserien eines Blocks; Aufträge in der eingeplanten Reihenfolge geordnet

horizontalen Achse sind die ursprünglichen Positionen in der geplanten Montagesequenz abgetragen, auf der vertikalen die kumulierte Anzahl nicht verfügbarer Karosserien. Es wird deutlich, dass bis zum Ende alle Aufträge Karosserien verfügbar haben, nur die letzten Aufträge tragen die Wirkung starker Verzögerung der Karosserien.

Zusammenfassung und Implikationen für die taktische Produktionsplanung

Für das Wirkmodell lässt sich aus dem Vergleich der zufälligen Reihenfolgen, der äquidistanten Reihenfolge und der Blockreihenfolge schließen, dass die geplante Auftragsreihenfolge und die daraus resultierende Längsstruktur für die Ergebnisse im System der Karosserieverfügbarkeit eine relevante Wirkgröße sein kann. Die Variation der Simulationsergebnisse über den Füllstand im Karosseriesortierer zeigt, dass die Kapazität des Karosseriesortierers als indirekte Einflußgröße maßgeblich für Richtung und Stärke der Effekte ist. Es wurde gezeigt, dass Auftragsreihenfolgen so konstruiert werden können, dass diese zu signifikanten Abweichungen in den Ergebnissen des Systems der Karosserieverfügbarkeit führen. Als Ergänzung zum Stand der Literatur kann festgehalten werden, dass die geplante Montagereihenfolge nicht nur die Soll-Daten für die Karosserieverfügbarkeit liefert, und damit Zielgröße ist, sondern durch die Variantenstruktur gleichzeitig zur Wirkgröße wird.

Wenn also im Wirkmodell die geplante Montagesequenz signifikant auf die Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit wirken kann, und Richtung und Stärke vom Füllstand im Karosseriesortierer abhängig sind, dann ist dieser Sachverhalt im Planungsmodell der taktischen Produktionsplanung und mit dem Ziel der robusten Planung zu berücksichtigen:

- Die zukünftige Längsstruktur der geplanten Montagesequenz sollte explizit beziehungsweise bewusst antizipiert werden, entweder modellendogen durch Abbildung der für die Bildung der geplanten Montagesequenz relevanten Mechanismen oder modellexogen durch Verwendung strukturierter Eingangsdaten, oder teilweise endogen und exogen.

- Die Ergebnisse der Planungsmodelle sollten auf die Sensitivität gegenüber der Variation der geplanten Montagesequenz untersucht werden, um die Bedeutung dieses Effekts abzuschätzen (i.e. die Darstellung der Ergebnisbandbreite). Grenzbetrachtungen, wie hier geschehen mit der konstruierten äquidistanten Reihenfolge und der Blockreihenfolge können dafür hilfreich sein, genauso wie die Verwendung zahlreicher zufälliger Reihenfolgen.

5.2 Untersuchung der Positionsverschiebungen

Positionsverschiebungen sind Ausdruck für die Durchlaufzeitschwankung der Karosserien in der Produktion. Wäre die Durchlaufzeit in der Produktion für alle Karosserien vollkommen stabil, würde kein Karosseriesortierer und kein Prozess des Karosserietauschs benötigt werden und die Auftragsreihenfolge spielte keinerlei Rolle. Da aber Positionsverschiebungen letztlich in der hier betrachteten Form eines Produktionssystems unvermeidbar sind, sind diese in der Planung sachgerecht zu handhaben.

Stand der Wissenschaft

Bei Inman werden zur Modellierung der Reihenfolgeveränderungen der Karosserien im Karosseriebau ebenfalls Positionsverschiebungen verwendet. Er beschränkt sich rein auf die physischen Positionsverschiebungen im Karosseriebau, die in dieser Arbeit mit $[PC]$ bezeichnet werden. Die formale Definition der Positionsverschiebungen, als Differenz der an einem Objekt gemessenen Reihenfolgeposition in der Ein- und Ausgangssequenz des Karosseriebaus ist weitgehend identisch. Er definiert: $\text{Sequence Displacement} = \text{Body Sequence Position} - \text{Post Paint Sequence Position}$.¹⁴² Hierbei entspricht die „Body Sequence Position“ der Reihenfolgeposition der Start-Reihenfolge des Karosseriebaus $[ABS]$, die „Post Paint Sequence Position“ der Reihenfolgeposition in der Ende-Reihenfolge des Karosseriebaus $[ABE]$. Durch diese Form der Variablenstellung in der Gleichung werden, im Gegensatz zur Notation dieser Arbeit, beschleunigte Karosserien mit einem positiven, verzögerte Karosserien mit einem negativen Vorzeichen belegt. Inman verwendet eine Verteilung der Positionsverschiebung, gebildet aus allen im Planungsmodell berücksichtigten Karosserien, beziehungsweise deren korrespondierenden Produktionsdaten. Einen etwaigen Zusammenhang zwischen der Verteilung der Positionsverschiebungen und der Karosserievariante berücksichtigt er nicht (keine Querstruktur). Ebenso wenig berücksichtigt er eine Längsstruktur in den Positionsverschiebungen, das heißt aufeinanderfolgende Positionsverschiebungen sind vollkommen stochastisch unabhängig.

Gushikin et.al. verwenden eine abgewandelte Form der Positionsverschiebungen, die „Number of positions out of sequence $[NPOS]$ “.¹⁴³

Struktur in den Positionsverschiebungen

Empirische Positionsverschiebungen können zeitlich strukturiert sein und im Zusammenhang stehen mit anderen Einflussfaktoren im System der Karosserieverfügbarkeit, also eine Längs-

¹⁴²Inman (2003), S.849.

¹⁴³Gushikin et.al.(2008), S.53.

und eine Querstruktur aufweisen. Es werden im Folgenden zwei mögliche Formen der Längsstruktur untersucht: Dynamik in der Verteilung der Positionsverschiebungen und das Auftreten der Positionsverschiebungen in Blöcken. Bezüglich der Querstruktur wird eine mögliche Abhängigkeit der Positionsverschiebungen von den produzierten Karosserievarianten gezeigt und der Effekt für die Ergebnisse im System der Karosserieverfügbarkeit untersucht.

Dynamik in den Verteilungen der Positionsverschiebungen

In dem Maße, in dem die Produktion und ihre Ergebnisse dynamisch sind, in dem Maße werden die Positionsverschiebungsergebnisse von dieser Dynamik betroffen sein. Die Positionsverschiebungen sind ein Resultat der Produktionsprozesse und der Produktionsstruktur, in der diese ablaufen. Prozesse und Struktur können sich einer grundsätzlichen Differenzierung folgend geplant und ungeplant verändern. Die Veränderungen können von längerer oder kürzerer Dauer sein. Ein Beispiel für eine dauerhafte und geplante Veränderung im Produktionsprozess ist die Integration einer neuen Fahrzeugvariante. Eine ungeplante Veränderung kann beispielsweise auf Grund einer Störung in einer Produktionsanlage entstehen, oder aus einem Versorgungsengpass bei einem Zulieferteil resultieren. In einer komplexen und weit vernetzten Produktionswelt sind Veränderungen eher die Regel, als die Ausnahme. Das es Veränderungen gibt, zeigt sich auch in den Produktionsdaten des in dieser Arbeit verwendeten Praxisbeispiels. Abbildung 34 zeigt

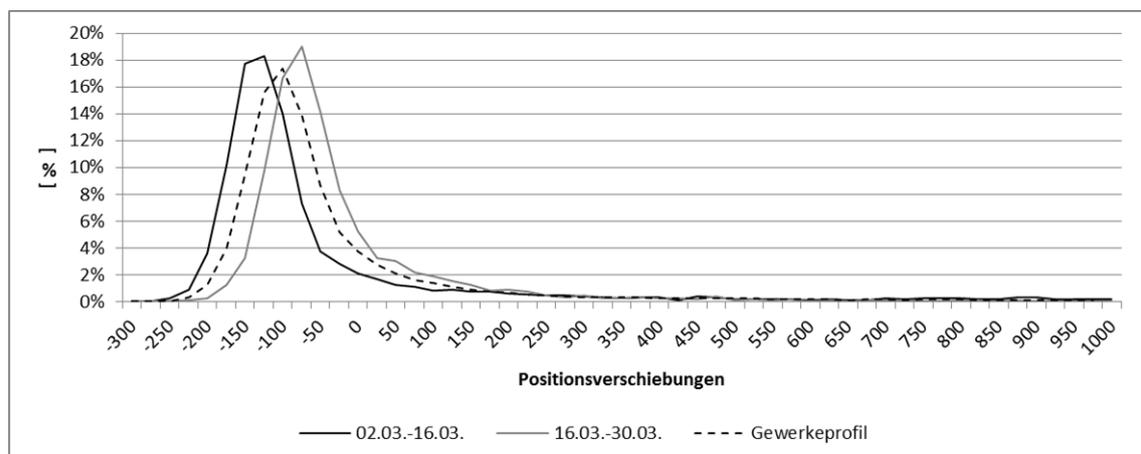


Abbildung 34: Dynamik in den Positionsverschiebungen - Änderungen in der Wochenstruktur

Häufigkeitsverteilungen jeweils einer Produktionswoche aller produzierten Karosserien. Ferner zeigt die Abbildung die Häufigkeitsverteilung über den gesamten Erfassungszeitraum (Gewerkeprofil), also das mittlere Profil. Die Verläufe haben eine signifikant unterschiedliche Lage im Positionsverschiebungsintervall $[-275; 250]$, was deutlich macht, dass in diesen Wochen und im Verhältnis zum Gesamtmittel die Positionsverschiebungen eine andere Qualität haben. Wenn sich die Häufigkeitsverteilungen von Zeitraum zu Zeitraum unterscheiden, spricht viel dafür, dass auch die Ergebnisse im System der Karosserieverfügbarkeit von Zeitraum zu Zeitraum unterschiedlich sind. Abbildung 35 zeigt noch einmal, in welcher Form die Dynamik in den Positionsverschiebungen in den Ergebnissen des Systems der Karosserieverfügbarkeit sichtbar werden kann. Für dieses Experiment wurde die gleiche zufällige Auftragssequenz verwendet, der

Bestand im Karoseriesortierer beträgt [$SC^* = 350$]. Die beiden durchgeführten Experimente unterscheiden sich lediglich im Strom der Positionsverschiebungen, der in einem Experiment dem empirischen entspricht, in dem anderen zufällig generiert wurde, aus den gleichen empirischen Werten, für die lediglich die Reihenfolge geändert wurde (es werden also die gleichen Positionsverschiebungen verwendet, einmal in empirischer Reihenfolge, einmal in zufälliger). Es wurde oben bereits gezeigt, dass es im empirischen Strom Phänomene dynamischer Verteilungen der Positionsverschiebungen gibt. Ob diese in den Ergebnissen sichtbar werden, ist hingegen wieder eine andere Frage. Theoretisch ist es klar, dass dies der Fall sein kann. Das Simulationsexperiment zeigt, dass dies für diesen konkreten empirischen Strom der Positionsverschiebungen in geringem Maße der Fall ist. Denn die Kurve der kumulierten $[NVK]$ auf Basis des empirischen Stroms der Positionsverschiebungen schneidet die Kurve auf Basis des zufälligen Stroms der Positionsverschiebungen mehrfach, resultierend aus einer sich ändernden Steigung jener Kurve, und nicht dieser. Die Dynamik in den Positionsverschiebungen führt also auch zu einer Dynamik in den Ergebnissen, in diesem Fall zu einer geringen.

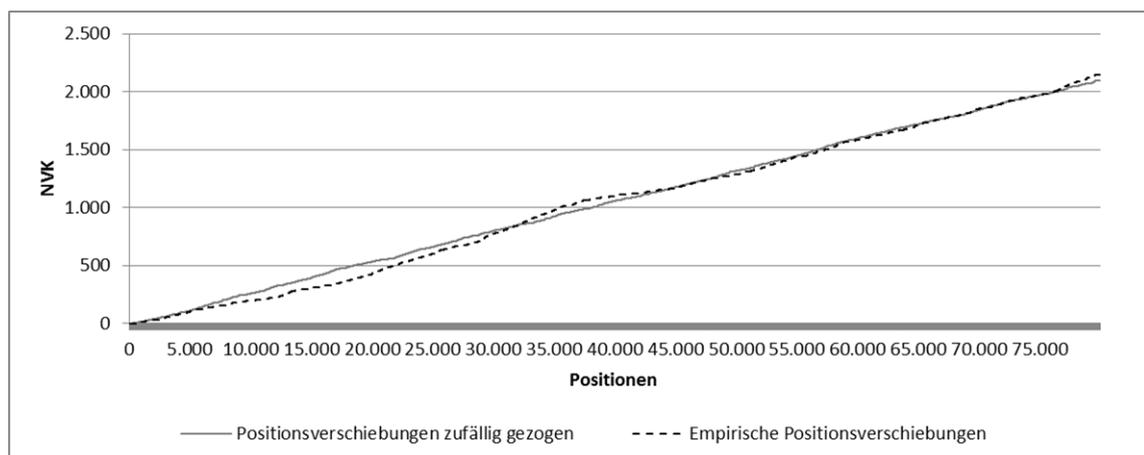


Abbildung 35: Ergebniswirksamkeit des empirischen und des zufälligen Stroms der Positionsverschiebungen im Vergleich

Blöcke in den Positionsverschiebungen

Blöcke in den Positionsverschiebungen entstehen immer dann, wenn mehrere Karosserien in direkter Folge von bestimmten Ereignissen betroffen sind. Beispielsweise würde eine Störung einer Anlage, in deren Umlaufbestand mehrere Karosserien enthalten sind, alle Karosserien des Umlaufbestands gleichermaßen betreffen. Gibt es zu dieser Anlage eine parallele Anlage, die weiter produziert, dann werden alle Karosserien der gestörten Anlage relativ zu denen der ungestörten in ihren Reihenfolgepositionen verschoben. Ein weiteres Beispiel ist, wenn bestimmte Karosserien über einen Bypass-Prozess andere überholen, dann werden alle überholten Karosserien gleichermaßen relativ zu den überholenden Karosserien verzögert. Man kann die Blöcke unterscheiden nach der Anzahl der verzögerten Karosserien im Block und nach der Höhe der Positionsverschiebung, die jede Karosserie im Block erfährt - diese kann gleich oder unterschiedlich sein. Es liegt in der Struktur des Produktionssystems begründet, ob, in welchem Maß und auf

welche Art geblockte Positionsverschiebungen auftreten. Ob Blöcke in den Positionsverschiebungen in den empirischen Daten auftreten, wird am Beispiel der Größe und Anzahl der Blöcke untersucht.

Als Indikator für die Blöcke in den Positionsverschiebungen wird die Blockverteilung $[h(l)]$ ver-

Blocklänge	Zufällige Positionsverschiebungen	Empirische Positionsverschiebungen
1	10242	10169
2	2173	2061
3	452	453
4	96	104
5	18	31
6	0	10
7	0	7
8	0	2
9	0	1
10	0	2
11	0	0
12	0	1
13	0	0
14	0	0
15	0	1
16	0	1

Tabelle 2: Vergleich der Verteilungen der Blocklängen zwischen der empirischen Reihenfolge der PosV und einer zufällig erzeugten Reihenfolge

wendet, die sich aus Blocklänge $[l]$ und der absoluten Blockanzahl $[H]$ ermitteln lässt. $[l]$ gibt an, wie viele Positionsverzögerungen zeitlich in direkter Folge stehen. Beispielsweise heißt $[l = 1]$, das nach einer verzögerten Karosserie direkt eine nicht verzögerte folgt. Blocklänge $[2]$ bedeutet dementsprechend, dass nach zwei direkt aufeinanderfolgenden und verzögerten Karosserien eine nicht verzögerte folgt, etc. $[H]$ gibt an, wie oft eine bestimmte Blocklänge $[l = l^*]$ in der Datenreihe vorkommt. Tabelle 2 zeigt einen Vergleich von $[l]$ und $[H]$ in den empirischen Prozessergebnissen und den Ergebnissen einer Ablaufsimulation, in der die Positionsverschiebungen zufällig gezogen werden. Die Verteilung von Größe und Anzahl der Positionsverschiebungen in den beiden Datenreihen ist identisch, nur die zeitliche Verteilung der Positionsverschiebungen ist modellspezifisch; es ergeben sich demnach unterschiedliche Blockverteilungen. Wenn $[E]$ für die empirischen Werte und $[R]$ für die zufälligen Werte steht, dann gilt $\left[\sum_{l=1}^{16} H^R(l) l = \sum_{l=1}^{16} H^E(l) l \right]$. Tabelle 2 zeigt, dass sich die Häufigkeitsverteilungen ab Blocklänge $[5]$ signifikant unterscheiden: bei $[l = 5]$ ist $[H^E]$ etwa $[72\%]$ größer als $[H^R]$. Die größeren Blocklängen mit $[l > 5]$ werden in der Simulation überhaupt nicht erreicht. Da die Blockanzahl $\left[\sum_{l=6}^{16} H^E = 25 \right]$ mit Blocklänge $[l \geq 5]$ klein ist, kann man davon ausgehen, dass dieses Phänomen keinen größeren Einfluss auf die Ergebnisse hat, was sich in einer Simulationsstudie auch bestätigt. Auch diese Simulationsstudie folgt dem in Abschnitt 6.2 beschriebenen Prinzip, allerdings wurde die Modellierung der Zuordnung der Positionsverschiebungen angepasst: für die Höhe der Positionsverschiebungen wird die diskrete empirische Wahrscheinlichkeitsfunktion $[h^{Emp}(PC)]$ verwendet. Für die Bildung von Blöcken wird zusätzlich die Verteilung der Blöcke $[h(l)]$ berücksichtigt. In dieser

Verteilung werden die Fälle unterschieden, in denen eine Karosserie nicht verzögert oder sogar beschleunigt wird (i.e. $[l = 0]$), dass eine einzelne Karosserie verzögert wird, $[l = 1]$, oder dass ein Block von Karosserien mit $[l \in \{2, \dots, 16\}]$ verzögert wird. Es wird in einem Modell die empirische Blockverteilung $[h^E(l)]$ herangezogen, in dem anderen Modell die zufällige Blockverteilung $[h^R(l)]$. Für alle Karosserien, für die eine Verzögerung ermittelt wurde, wird dann ein konkreter Wert aus $[h^{Emp}(PC)]$ gezogen. Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse. Die verwendeten Simulationsmodelle sind bis auf die Blockverteilung identisch; offensichtlich führen diese nicht zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen.

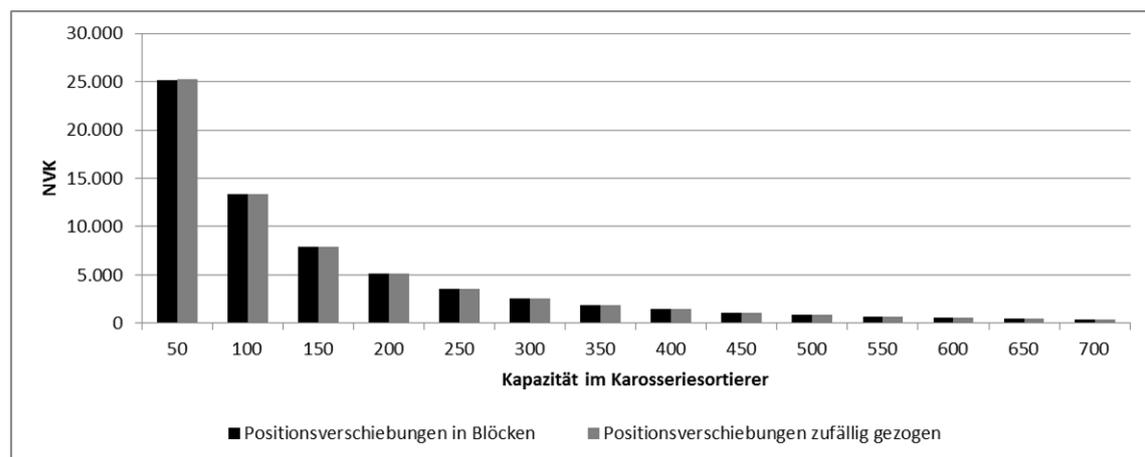


Abbildung 36: Vergleich der Anzahl der NVK aus unterschiedlichen Blockverteilungen

Querstruktur

Die stochastische Abhängigkeit der Positionsverschiebungen von den Karosserievarianten wurde von Gushikin bereits erwähnt und in einer Heuristik zur Umplanung der Lackierungsreihenfolge berücksichtigt. Zunächst soll die Ursache für Korrelationen diskutiert werden. Im Rahmen der Variantenfließfertigung ist es üblich, wie bereits beschrieben, dass zahlreiche Varianten produziert werden können. Nicht alle Varianten haben aber die gleiche Auftretenshäufigkeit, so dass bestimmte variantenspezifische Prozesse häufiger, andere seltener ablaufen. Lernkurveneffekte können also variantenabhängig sein, so dass das Nacharbeitsaufkommen für seltene Varianten höher sein könnte. Unter Umständen gibt es für sehr seltene Varianten Sonderprozesse, die ein anderes Störverhalten aufweisen, als die Regelprozesse. Werden für unterschiedliche Varianten unterschiedliche Anlagen oder Werkzeuge verwendet, können auch an dieser Stelle Unterschiede in der Prozessqualität begründet sein, die beispielsweise zu einem erhöhten Nacharbeitsaufkommen führen können. Ferner kann es sein, dass unterschiedliche Materialien für unterschiedliche Varianten verwendet werden, die die Prozessqualität beeinflussen. Zusammenfassend ist ein variantenspezifisches Positionsverschiebungsverhalten einer Produktion nicht unplausibel.¹⁴⁴ Betrachtet man die Positionsverschiebungen aus den verwendeten empirischen Daten, wird schnell deutlich, dass es solche variantenabhängigen Effekte in diesem speziellen Produktionssystem offensichtlich gibt. Abbildung 37 zeigt für alle Rohbauvarianten der Karosserien den Anteil der

¹⁴⁴Vgl. hierzu auch Abschnitt 4.1.2.

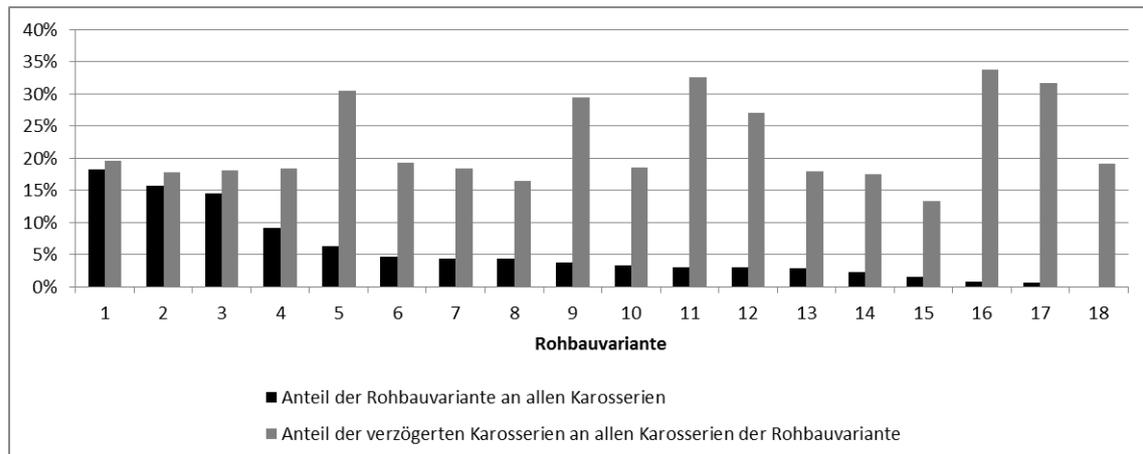


Abbildung 37: Zusammenhang der Positionsverschiebung mit der Rohbauvariante

Rohbauvariante $[p_v]$ und den Anteil der Karosserien mit verzögernder Positionsverschiebung an der jeweiligen Variante $[v]$. Die Rohbauvarianten sind dem Anteil $[p_v]$ nach absteigend von links nach rechts sortiert, so dass die erste Variante von links mit der Nummer [1] die häufigste ist. Es wird direkt deutlich, dass die Anteile der verzögerten Karosserien deutlich unterschiedlich sind, vor allem im mittleren und rechten Bereich, also bei den geringeren absoluten Häufigkeiten der Karosserievarianten.

Abbildung 38 zeigt, dass auch bei den Lackvarianten erheblich Unterschiede bestehen können,

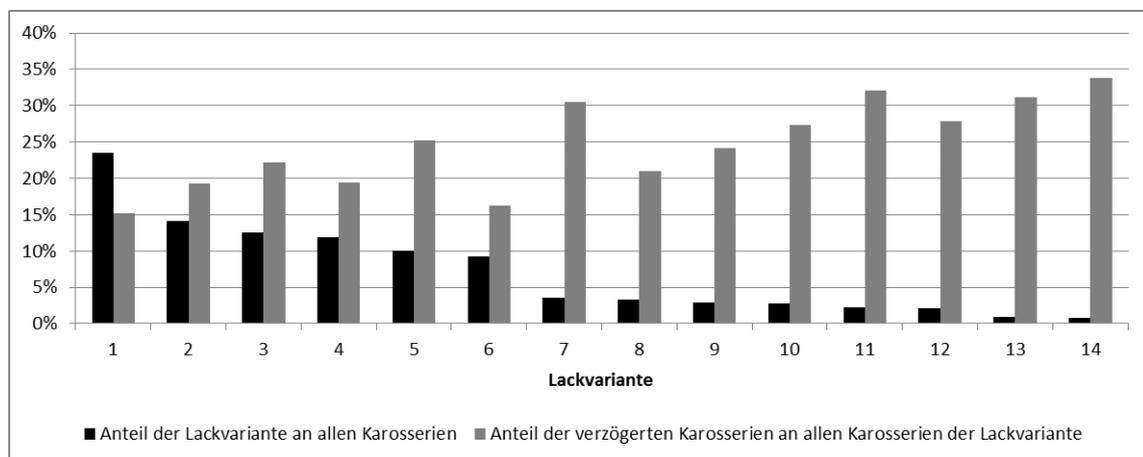


Abbildung 38: Zusammenhang der Positionsverschiebung mit der Lackvariante

hier auch schon innerhalb der Gruppe der drei häufigsten Lacke.

Wenn es also Korrelationen zwischen Verzögerungen und den Karosserievarianten gibt, ist zu klären, ob und wie diese auf die Ergebnisse im System der Karosserieverfügbarkeit wirken. Um die Effekte analysieren zu können, wurde eine Simulationsstudie durchgeführt. Es wurden zwei Modelle simuliert, die bis auf die Gestaltung der Positionsverschiebungen identisch sind. Für beide Modelle wurde die gleiche Vorgehensweise, wie im Abschnitt 6.2 beschrieben, angewendet. Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse beider Modelle in einer Gegenüberstellung. Es werden wieder jeweils die Mittelwerte der $[\overline{NVK}_M]$ für die korrelierten und unkorrelierten Positions-

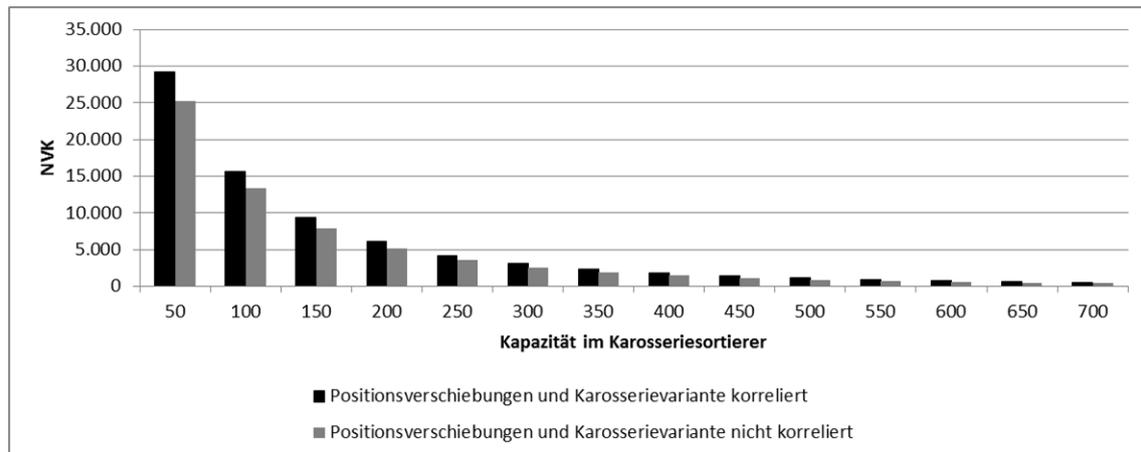


Abbildung 39: Vergleich von mit der Karosserievariante abhängigen und unabhängigen Positionsverschiebungen

verschiebungen ermittelt.¹⁴⁵ Die Kurve „Positionsverschiebungen und Karosserievariante nicht korreliert“ zeigt die Ergebnisse des Modells ohne variantenabhängige Positionsverschiebungen, die Kurve „Positionsverschiebungen und Karosserievariante korreliert“ zeigt die Ergebnisse des Modells mit variantenabhängigen Positionsverschiebungen. Der Kurvenvergleich zeigt deutlich, dass die Unterschiede sichtbar sind. Dieses Ergebnis überrascht nicht, da gerade die Karosserievarianten, die seltener vorkommen einen höheren Anteil an verzögerten Karosserien aufweisen. Je seltener eine Karosserievariante aber vorkommt, desto schlechter kann diese getauscht werden und desto sensibler reagiert die Variante auf verlängerte Durchlaufzeiten (*ceteris paribus*). Die Konzentration von verzögernden Positionsverschiebung bei seltenen Varianten führt zu einer höheren Anzahl von Risikokarosserien und deshalb zu schlechteren Ergebnissen der Karosserieverfügbarkeit.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass Phänomene der Quer- und Längsstruktur in realen Produktionssystemen auftreten. Es wurde in Simulationsstudien gezeigt, dass diese Phänomene sichtbare Effekte auf die Ergebnisse im System der Karosserieverfügbarkeit haben können. Es kann deshalb für die taktische Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit geschlossen werden, dass diese Effekte im Rahmen der Modellierung berücksichtigt werden sollten. Es müssen diese nicht unbedingt modelliert werden, aber es sollte untersucht werden, ob diese Effekte im geplanten System auftreten können, beziehungsweise welche Effekte auftreten können, und ob diese Effekte die Systemergebnisse signifikant beeinflussen. Analog zu den Effekten im Zusammenhang mit der geplanten Auftragsreihenfolge wäre also die Identifikation solcher Zusammenhänge und die Ermittlung der Sensitivität gegenüber diesen Zusammenhängen zu empfehlen.

¹⁴⁵Siehe Abschnitt 6.2.4.

5.3 Untersuchung der Sortierkapazität

Die Kapazität des Sortierers wurde als indirekte Einflußgröße auf die Karosserieverfügbarkeit beschrieben. Die beiden direkten Einflußgrößen sind die Positionsverschiebungen und die Variantenstruktur in der Auftragssequenz. Es ist intuitiv klar, dass die Anzahl der nicht verfügbaren Karosserien sinkt, wenn c.p. die Kapazität im Karosseriesortierer steigt. Dieser Sachverhalt zeigt sich auch in den Ergebnissen der bisher durchgeführten Simulationsstudien. Die Vergrößerung der Kapazität des Karosseriesortierers wirkt über die bereits genannten Funktionen „Wartefunktion“ und „Tauschfunktion“. Wenn die Kapazität des Karosseriesortierers steigt, dann verringert sich c.p. die Wahrscheinlichkeit, dass die assoziierte Karosserie zu spät kommt (i.e. die Wartefunktion). Außerdem erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass eine Nachfolge- oder Vorgängerkarosserie rechtzeitig im Karosseriesortierer verfügbar ist und das Tauschrisiko sinkt (i.e. die Tauschfunktion). Beide Effekte wirken stets gleichzeitig.¹⁴⁶ Außerdem beeinflusst die Kapazität des Karosseriesortierers die Sensitivität der Karosserieverfügbarkeit gegenüber den beiden direkten Einflußgrößen.

Das zwischen der Karosserieverfügbarkeit und der Kapazität des Karosseriesortierers kein linearer Zusammenhang besteht, wurde in den bis hier durchgeführten Experimenten schon sichtbar: auf niedrigem Kapazitätsniveau führt die Erhöhung der Sortierkapazität zu einer stärkeren Reduktion der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien als auf einem hohen Niveau der Kapazität.¹⁴⁷ Abbildung 40 zeigt ergänzend, dass bei steigender Karosserieverfügbarkeit das System weniger sensitiv wird, für den Modus der Auftragsproduktion und den der Variantenproduktion. Die Kurven zeigen die Stichproben-Standardabweichung der $[NVK_M^i]$ bei Zunahme der Sortierkapazität. Es wird deutlich, dass mit steigender Kapazität des Karosseriesortierers die Standardabweichung immer geringer wird, die Ergebnisse bei unterschiedlichen zufällig erzeugten Plan-Reihenfolgen der Montage mit steigender Sortierkapazität also immer enger um den Mittelwert bei einer bestimmten Sortierkapazität streuen.

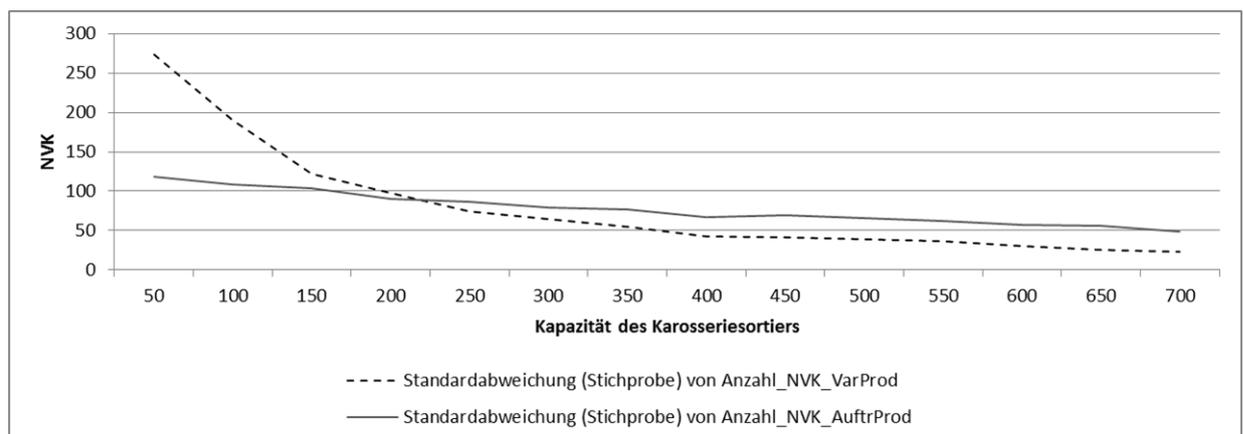


Abbildung 40: Standardabweichung der NVK bei steigender Sortierkapazität, im Modus der Auftrags- und der Variantenproduktion

¹⁴⁶Siehe hierzu die Ausführungen in den Abschnitten 4.1.6 und 6.1.2.

¹⁴⁷Siehe hierzu beispielsweise Abbildung 39.

5.4 Untersuchung der Autokorrelation

In Abschnitt 4 wurden zwei Formen der Autokorrelation beschrieben, nämlich die

- allgemeine Autokorrelation, die auf dem Vorgriff in der geplanten Montagereihenfolge basiert und die
- variantenspezifische Autokorrelation, die aufgrund nicht erfüllter Karosseriebedarfe von Vorgängeraufträgen wirkt.

Um zu zeigen, dass die Autokorrelation ein relevanter Wirkmechanismus sein kann, werden im Folgenden die Ergebnisse einer Simulationsstudie vorgestellt. Für diese Simulationsstudie werden die gleichen Produktionsaufträge wie in den Abschnitten 5.1 und 5.2 verwendet. Es wird eine zufällig bestimmte Auftragsreihenfolge verwendet. Die Positionsverschiebungen werden, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, in jedem Experiment zufällig und in Blöcken gezogen. Die Menge der Positionsverschiebungen bleibt von Experiment zu Experiment unverändert, durch die zufällige Ziehung je Experiment werden allerdings die Zeitreihen der Positionsverschiebungen verschieden sein, und damit wird auch die Zuordnung „Auftrag zu Positionsverschiebung“ variieren. Während die Auftragsreihenfolge über alle Experimente die gleiche ist, wird die Sortierkapazität variiert, in fünfziger Schritten, von $[SC^* = 50]$ bis $[SC^* = 700]$. Durch die Berücksichtigung einer sich verändernden Sortierkapazität kann untersucht werden, ob der Effekt der Autokorrelation in unterschiedlichen Systemzuständen in unterschiedlicher Stärke auftritt, oder nicht. Für jeden Wert der Sortierkapazität werden 30 Experimente durchgeführt, jeweils im Modus der Auftrags- und der Variantenproduktion.

Für die Untersuchung der allgemeinen Autokorrelation, muss die Autokorrelation gleichsam ein- und ausgeschaltet werden können. Für die Berücksichtigung der Autokorrelation muss am bisher verwendeten Erklärungsmodell und formalen Modell keine Veränderung vorgenommen werden: die Rückstellung eines Auftrags in der geplanten Auftragssequenz der Montage führt zum Vorgriff in der Auftragssequenz, der die Verspätungstoleranz der nachfolgenden Aufträge gegenüber ihren assoziierten Karosserien solange reduziert, bis der zurückgestellte Auftrag wieder eingesteuert wurde. Die Größe des virtuellen Puffers wird bestimmt durch die Anzahl der zu einem bestimmten Zeitpunkt zurückgestellten Aufträge; bei einer Größe von Null werden nachfolgende Aufträge nicht negativ beeinflusst. Je größer der negative virtuelle Puffer ist, desto stärker wird die Verspätungstoleranz der assoziierten Karosserien reduziert und desto stärker ist der potentielle Effekt der Autokorrelation. Es gilt: $[SC_P^{SPBCS,I} - AGZA^{SPBCS,I} = SC_{eff}^{SPBCS,I}]$.¹⁴⁸ Um einen rückstellungsfreien Zustand für alle Aufträge zu erzeugen, wird im Simulationsmodell die Anzahl der gleichzeitig zurückgestellten Aufträge zum physischen Puffer addiert, so dass der physische Puffer exakt mit der Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge um den voreingestellten Wert (*i.e.* 50, 100, ..., 700) schwankt: $[SC_{P^*}^{SPBCS,I} = SC_P^{SPBCS,I} + AGZA^{SPBCS,I}]$. Damit ist $[SC_{eff}^{SPBCS,I} = SC_{P^*}^{SPBCS,I} - AGZA^{SPBCS,I} = SC_P^{SPBCS,I} = SC^*]$. Die Reduktion der Vorlauf-

¹⁴⁸ $[SC_{vir,F}^{SPBCS}]$ kann auch größer Null sein, wenn gilt: $[SP_F^{BCS} > SP_F^{BCS,I}]$. An der Position $[SP^{BCS,I}]$ gilt $[-AGZA^{SPBCS,I} = SC_{vir,F}^{SPBCS,I} \leq 0]$.

zeit und damit die Autokorrelation wird auf diesem Weg ausgeglichen. Die Ergebnisse der Studie bei Auftragsproduktion werden im Folgenden vorgestellt.

Auftragsproduktion mit und ohne Autokorrelation der Ergebnisse

Abbildung 41 zeigt die sich aus den 30 Experimenten ergebende mittlere Anzahl nicht verfügbarer Karosserien, unter Berücksichtigung der Autokorrelation und ohne Berücksichtigung der Autokorrelation. Die Distanz der dargestellten Säulenhöhe ist ein Indikator für die Stärke des Effekts der Autokorrelation. Es lässt sich auf den ersten Blick schließen, dass der Effekt der Autokorrelation mit zunehmender Sortierkapazität abnimmt, da sich die Säulenhöhen zunehmend angleichen. Dies liegt darin begründet, dass mit zunehmender Kapazität des Karosseriepuffers (physischer Puffer) die Karosserieverfügbarkeit steigt, und dadurch der virtuelle negative Puffer kleiner wird, die effektive Sortierkapazität also überproportional zunimmt. Diesen Zusammenhang kann man auch formal zeigen, wenn man die Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge als abhängige Variable der Sortierkapazität auffasst:

$$\left[SC_P^{SPBCS,I} - AGZA^{SPBCS,I} \left(SC_P^{SPBCS,I} \right) = SC_{eff}^{SPBCS,I} \right].$$

Die Ableitung nach der Sortierkapazität bringt dann:

$$\left[\frac{dSC_{eff}^{SPBCS,I}}{dSC_P^{SPBCS,I}} = 1 - \frac{dAGZA^{SPBCS,I}}{dSC_P^{SPBCS,I}} \right] \text{ mit } \left[\frac{dAGZA^{SPBCS,I}}{dSC_P^{SPBCS,I}} < 0 \right].$$

Dieser positive Rückkopplungseffekt, ausgedrückt durch den Term $\left[\frac{dAGZA^{SPBCS,I}}{dSC_P^{SPBCS,I}} \right]$ zeigt sich auch darin, dass die Abnahme der mittleren Anzahl nicht verfügbarer Karosserien bei Zunahme der Sortierkapazität im Bereich geringer Sortierkapazität in der Simulation unter Berücksichtigung der Autokorrelation deutlich stärker ist, als ohne Berücksichtigung der Autokorrelation. Dies wird bei Betrachtung von Abbildung 42 noch deutlicher. Diese zeigt die Reihe der Dif-

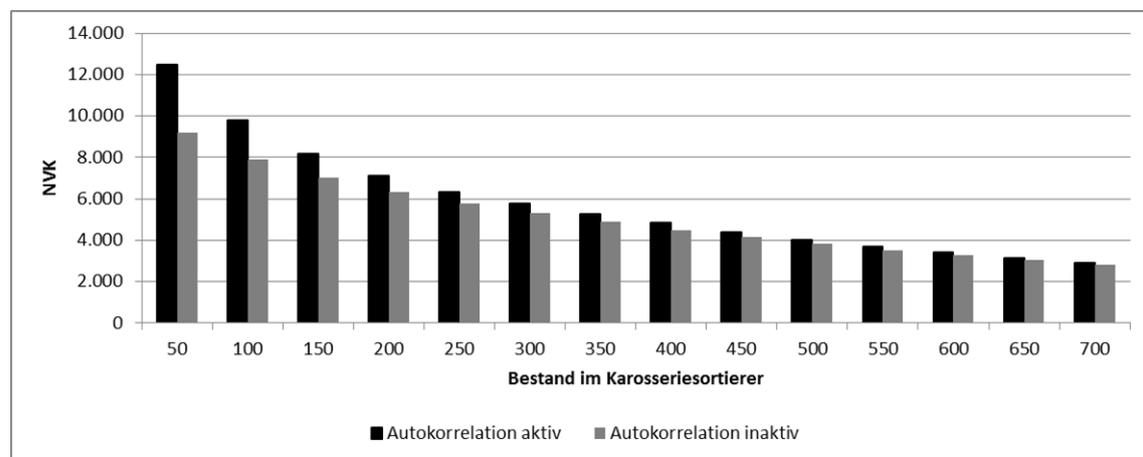


Abbildung 41: Gegenüberstellung der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien mit und ohne Autokorrelation der Ergebnisse bei Auftragsproduktion

ferenzen der mittleren Anzahl nicht verfügbarer Karosserien der beiden Simulationsmodi bei

Variation der Sortierkapazität. Es wird deutlich, dass die Differenzen bei zunehmender physischer Sortierkapazität schrumpfen.

Die Bedeutung dieser absoluten Abweichung für die Produktionsplanung zeigt Abbildung 43.

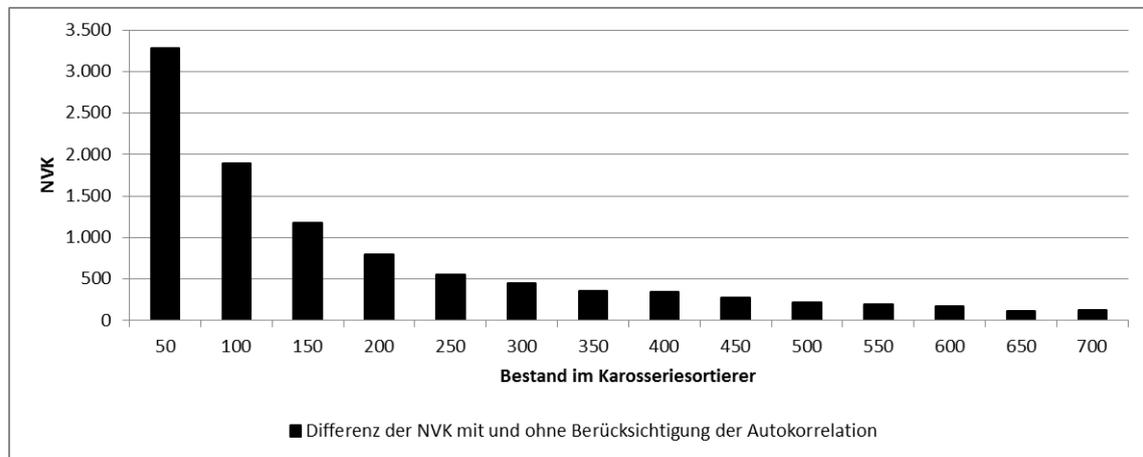


Abbildung 42: Differenzenreihe der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien mit und ohne Autokorrelation bei Auftragsproduktion

Dargestellt ist der Anteil der Differenz der beiden Reihen am Wert der Reihe, bei der die Autokorrelation berücksichtigt wurde. Bei einer Sortierkapazität von $[SC^* = 50]$ liegt die mittlere Anzahl nicht verfügbarer Karosserien ohne Berücksichtigung der Autokorrelation ca. [25%] unter dem Wert, der sich mit Berücksichtigung der Autokorrelation ergibt. Erst ab einer Sortierkapazität von [600] Plätzen fällt der Anteil der Differenz unter die [5%] Linie. Zusammenfassend lässt

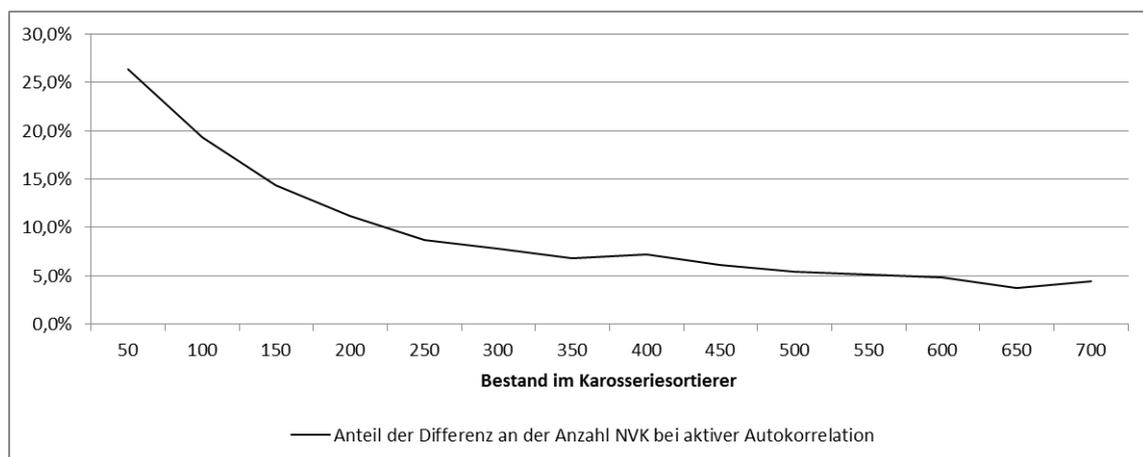


Abbildung 43: Anteil der Differenzen an der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien unter Berücksichtigung der Autokorrelation bei Auftragsproduktion

sich schließen, dass im Falle einer Produktion im Modus der Auftragsproduktion das Ignorieren der Autokorrelation zu erheblichen Planungsfehlern führen kann, umso stärker, je niedriger die Karosserieverfügbarkeit ohne Berücksichtigung der Autokorrelation ausgelegt wird.

Variantenproduktion mit und ohne Autokorrelation der Ergebnisse

Wird die Simulationsstudie im Modus der Variantenproduktion durchgeführt, ergeben sich ähnliche Schlussfolgerungen, wenngleich die Ergebnisse bei Variantenproduktion ein anderes Verhalten gegenüber der Erhöhung der Sortierkapazität aufweisen, wie nun gezeigt wird: Abbildung 44 zeigt die mittleren kumulierten Werte der nicht verfügbaren Karosserien bei variierender Sortierkapazität. Auch hier zeigt sich, wie im Fall der Auftragsproduktion, bei geringeren Sortierkapazitäten eine signifikant niedrigere mittlere Anzahl nicht verfügbarer Karosserien in dem Fall, in dem die Autokorrelation nicht berücksichtigt wird.

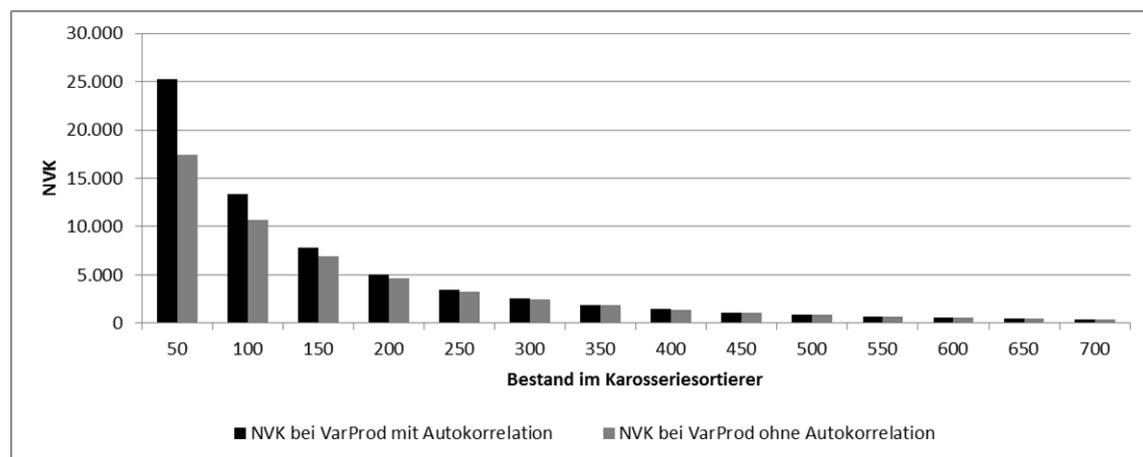


Abbildung 44: Gegenüberstellung der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien mit und ohne Autokorrelation der Ergebnisse bei Variantenproduktion

Die Abbildungen 45 und 46 zeigen die absoluten Differenzen und die Differenzen als Anteil der mittleren Anzahl nicht verfügbarer Karosserien bei Berücksichtigung der Autokorrelation. Es wird deutlich, dass die Differenzen bei zunehmender Sortierkapazität schnell kleiner werden, die Anteilsreihe fällt bereits ab einer Sortierkapazität [$SC^* = 300$] unter die [5%] Marke. Das die Unterschreitung dieses Werts im Modus der Variantenproduktion schneller erfolgt, als im Modus der Auftragsproduktion, überrascht nicht, da in jenem Modus die Karosserieverfügbarkeit bei zunehmender Sortierkapazität schneller steigt. Dies wird deutlich am Verlauf der beiden Wertereihen der absoluten Differenzen: obwohl die Differenzenreihe im Modus der Variantenproduktion bei einer Sortierkapazität von [$SC^* = 50$] bei einem deutlich höheren Wert startet, fällt die Differenzenreihe in diesem Modus bereits bei einer Sortierkapazität von [$SC^* = 150$] unter die absoluten Werte der Differenzenreihe im Modus der Auftragsproduktion.

Zusammenfassend lässt sich für den Modus der Variantenproduktion schließen, dass der Planungsfehler durch fehlende Berücksichtigung der Autokorrelation der Ergebnisse für kleine Sortierkapazitäten auch erheblich sein kann, für größere Sortierkapazitäten aber klein werden kann, weil durch den Modus der Variantenproduktion die Karosserieverfügbarkeit schnell steigt.

Variantenspezifische Autokorrelation und Auswertung mit Prioritätenregel

Um zu zeigen, dass die variantenspezifische Autokorrelation signifikant wirken kann, wird folgendes Experiment konstruiert: Die variantenspezifische Autokorrelation führt zu dem Phänomen,

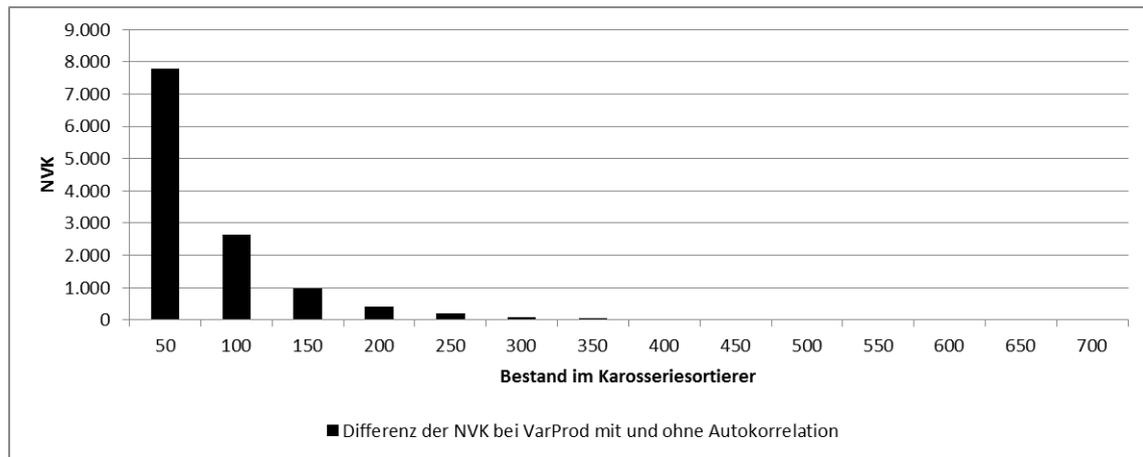


Abbildung 45: Differenzenreihe der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien mit und ohne Autokorrelation bei Variantenproduktion

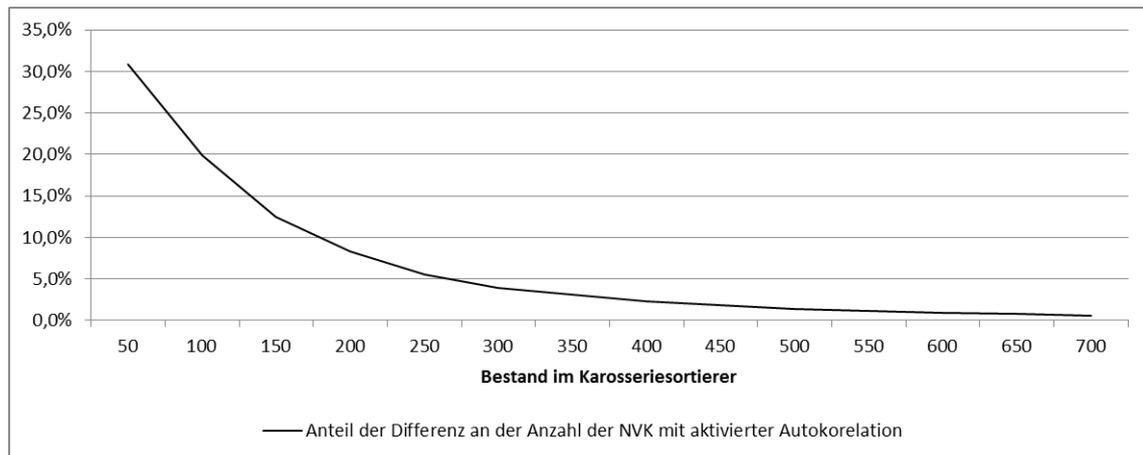


Abbildung 46: Anteil der Differenzen der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien unter Berücksichtigung der Autokorrelation bei Variantenproduktion

dass ein Auftrag, der pünktlich in die Montage gesendet werden könnte, weil eine passende Karosserievariante im Sortierer eintrifft, nicht gesendet werden kann, weil diese zuvor einem anderen Auftrag zugeordnet wurde, der eine niedrigere Reihenfolgennummer aufweist. Dieser andere Auftrag wurde allerdings zuvor schon zurückgestellt, er kann also nicht mehr pünktlich in die Montage gesendet werden. Würde man diesem anderen Auftrag nun die Karosserie nicht zuordnen und diesen einfach etwas länger, vielleicht auf die nächste oder übernächste, Karosserie warten lassen, könnte die Karosserieverfügbarkeit erhöht werden; es würde die variantenspezifische Autokorrelation ganz oder teilweise aufgehoben, in Abhängigkeit davon, wie lange man den Auftrag mit niedrigerer Reihenfolgennummer warten lässt. Dieser Effekt müsste sich dann in den Ergebnissen der [NVK] niederschlagen.

Es wird die folgende Prioritätenregel in das Simulationsmodell implementiert: wenn eine passende Karosserie für einen zurückgestellten Auftrag im Sortierer eintrifft, wird diese dem zurückgestellten Auftrag nur zugeordnet, wenn sich innerhalb eines bestimmten Auftragsbereichs kein weiterer Auftrag befindet, der diese Karosserievariante benötigen wird und wenn die Rückstell-

dauer des zurückgestellten Auftrags durch Verlagerung der Priorität nicht zu stark ansteigt.¹⁴⁹ Dadurch wird die Wiedereinsteuerung des zurückgestellten Auftrags zu Gunsten der Karosserieverfügbarkeit der nächsten Aufträge verzögert. Zusammengefasst heißt das, dass diese Methode die Karosserieverfügbarkeit bei noch nicht zurückgestellten Aufträgen erhöht, gleichzeitig aber auch die Rückstelldauer bei bereits zurückgestellten Aufträgen. Auf die Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge hat diese Methode mittelfristig keine Auswirkung, weil es hierfür nicht relevant ist, welcher Auftrag zurückgestellt wurde, kurzfristig allerdings schon: wird ein zurückgestellter Auftrag nicht unmittelbar mit einer zur Verfügung stehenden Karosserie bedient, bleibt dieser zurückgestellt, bis die nächste passende Karosserievariante in den Sortierer eingelagert wird. Würde dieser Auftrag direkt bedient werden, zu Lasten eines folgenden Auftrags, würde die Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge zunächst sinken, bis der nachfolgende Auftrag eintrifft, der mangels Karosserie zurückgestellt werden muss. Für diese Überlegung wurde davon ausgegangen, dass für den nachfolgenden Auftrag im Rahmen der Vorlaufzeit keine weitere passende Karosserie eintrifft, der zurückgestellte Auftrag und der nachfolgende Auftrag also tatsächlich um eine Karosserie konkurrieren.

Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse der Simulationsstudie. Die Kurve „NVK bei VarProd mit

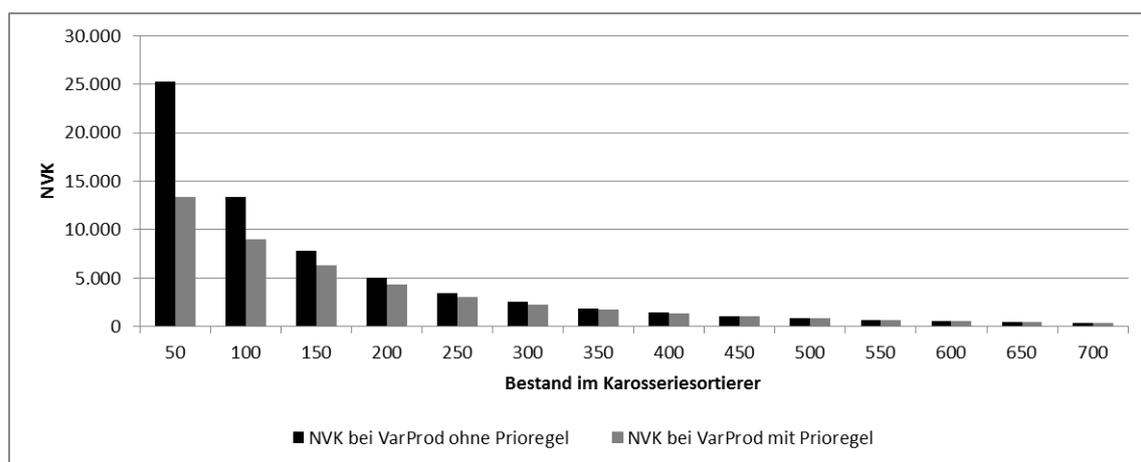


Abbildung 47: Anzahl nicht verfügbarer Karosserien im Modus der Variantenproduktion bei veränderter Prioritätenregel

Prioregel“ stellt die Ergebnisse unter Einsatz der veränderten Prioritätenregel dar, bei der die variantenspezifische Autokorrelation teilweise aufgehoben wurde. Es wird deutlich, dass die mittlere Anzahl nicht verfügbarer Karosserien bei veränderter Prioregel deutlich geringer ist, vor allem für kleine Sortierkapazitäten, ein Anzeichen dafür, dass die variantenspezifische Autokorrelation eine signifikante Wirkung entfaltet. Für größere Kapazitäten im Karosseriesortierer wird der Effekt gering, beziehungsweise er verschwindet. Dies geschieht erwartungsgemäß, weil die Karosserieverfügbarkeit im Modus der Variantenproduktion bei Zunahme der Sortierkapazität schnell steigt und sehr hoch wird.

¹⁴⁹Der Grundgedanke der Veränderung der Priorisierung findet sich auch bei Meißner (2009), S.163ff., allerdings im Kontext der Auftragsproduktion.

5.5 Untersuchung der gemeinsamen Wirkung von Quer- und Längsstruktur

Bis hier wurden für die Eingangsgrößen die Aspekte der Quer- und Längsstruktur isoliert untersucht. In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass das Zusammenspiel dieser Aspekte ebenso betrachten- wie beachtenswert ist, weil erst im Zusammenspiel dieser Aspekte die Anzahl und die zeitliche Verteilung von Risikokarosserien festgelegt werden.

In Kapitel 4 wurde bereits beschrieben, dass die Verfügbarkeit einer Karosserie auf verschiedene Arten sichergestellt werden kann, beispielsweise:

- durch Pünktlichkeit der assoziierten Karosserie
- durch eine geringe Anzahl von Karosserievarianten, welche die Tauschbarkeit der Karosserie begünstigt
- durch eine hinreichende Kapazität im Sortierer als Wartefunktion und Tauschfunktion.

Hierbei hängt die jeweilige Wirkmächtigkeit der aufgezählten Hebel wechselseitig voneinander ab. Ist der Karosserietausch möglich und gibt es nur eine einzige Karosserievariante im System, so liegt die Verfügbarkeit zwangsläufig bei [100%], unabhängig davon, welche Kapazität der Karosseriesortierer aufweist oder wie pünktlich die einzelne Karosserie ist. Dies gilt, sofern die Versorgung mit Karosserien aus der Produktion der Vorprozesse nicht ausbleibt (durch Störungen oder ähnliches). Werden alle Karosserien hingegen pünktlich abgeliefert, so spielt die Anzahl der Varianten keine Rolle und auch die Kapazität des Sortierers nicht, kurzum: bei vollkommener Pünktlichkeit oder vollkommener Tauschbarkeit spielt die Kapazität des Sortierers keine Rolle und die Karosserieverfügbarkeit liegt bei [100%].

Mildert man diese beiden geschilderten extremen Zustände des Systems ab und geht von unvollkommener Tauschbarkeit und Pünktlichkeit aus, so kann man schließen, dass eine Karosserie genau dann nicht verfügbar ist, wenn Unpünktlichkeit und Nicht-Tauschbarkeit gleichzeitig auftreten, das eine oder das andere ist nicht hinreichend. Nicht Tauschbarkeit wird durch größere Distanzen in der Auftragsreihenfolge begünstigt. Dass die Längsstruktur der Reihenfolge einen Effekt auf die Tauschbarkeit der Karosserien hat, wurde in Abschnitt 5.1 gezeigt. Für die Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit ist es ferner von Relevanz, welche Karosserie(-variante) pünktlich ist, und welche nicht. Wenn seltene Karosserievarianten zur Unpünktlichkeit neigen, wirkt dies stärker, als wenn dies bei Karosserievarianten mit hoher Auftretenshäufigkeit der Fall ist. Diese Form der Querstruktur und deren Wirkung wurde in Abschnitt 5.2 diskutiert.

Ebenso wurde bereits gezeigt, dass in Abhängigkeit von der Kapazität des Sortierers bestimmte Größen von Positionsverschiebungen oder Distanzen in der Auftragsreihenfolge keine Auswirkung auf die Karosserieverfügbarkeit haben können. Es gilt: Je größer c.p. der Füllstand im Karosseriesortierer, also je größer die Vorproduktion, desto größere Positionsverschiebungen von Karosserien können kompensiert werden und desto eher sind Karosserievarianten mit hoher Distanz tauschbar (siehe hierzu Abschnitt 5.3).

Zusammenfassend kann man sagen, dass für einen Auftrag die Wahrscheinlichkeit der Verfügbarkeit einer Karosserie umso geringer ist, je seltener die benötigte Karosserievariante in einem

relevanten Zeitraum auftritt, je größer die Wahrscheinlichkeit von hohen Positionsverschiebungen ist, und je kleiner der Füllstand im Karosseriesortierer zum Zeitpunkt der Prüfung auf Karosserieverfügbarkeit ist. Wenn ungünstige Umstände erwartungsgemäß an einer Karosserie zusammentreffen, wird hier von einer „Risikokarosserie“ gesprochen. Der Begriff bezieht sich auf die ex ante Wahrscheinlichkeit der Nicht-Verfügbarkeit.

Ein weiterer Aspekt ist die Autokorrelation der Ergebnisse. Die Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge reduziert die Vorlaufzeit eines Auftrags und damit den effektiven Karosseriebestand im Sortierer. Treffen in einem Zeitraum verstärkt seltene Karosserievarianten, hohe Positionsverschiebungen und niedrige Füllstände des Karosseriesortierers aufeinander (zeitliche Häufung), verstärkt sich der Effekt noch durch die Autokorrelation der Ergebnisse, das heißt die Anzahl der Risikokarosserien steigt, weil der effektive Karosseriebestand sinkt. Der Schluss aus dieser Argumentation ist, dass das System der Karosserieverfügbarkeit durch die Autokorrelation der Ergebnisse überproportional auf die zeitliche Häufung von Risikokarosserien reagiert. Die zeitliche Häufung von Risikokarosserien resultiert ebenso wie die Anzahl der Risikokarosserien aus einem Zusammenwirken von Längs- und Querstruktur, sie erhöht die Anzahl der Risikokarosserien zusätzlich. Inhaltlich könnte dies beispielsweise begründet sein durch:

- Häufung von Karosserievarianten, die mit hohen Positionsverschiebungen korrelieren durch Saisonalitätseffekte in der Auftragsreihenfolge
- Höhere Positionsverschiebungen durch schlechteren Allgemeinzustand der Produktion (beispielsweise Anlaufphase o.ä.), der durch eine Zunahme der Störungen auch die Vorproduktion und damit den Karosseriebestand reduziert.

Es soll im Folgenden in einer Simulationsstudie nachgewiesen werden, dass durch das Zusammenspiel von Quer- und Längsstruktur die Anzahl und die zeitliche Häufung von Risikokarosserien festgelegt werden und dies einen relevanten Effekt auf die Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit hat. Ausgangspunkt für die Studie ist die „Trace Driven Simulation“. Hier wurden sowohl die gemessene empirische Quer- als auch die Längsstruktur vollständig berücksichtigt, so dass man von einer empirischen Anzahl und Häufung von Risikokarosserien sprechen kann. Für die Simulationsstudie wird erneut $[NVK_M]$ als Indikator für die Ergebnisse des Modellsystems verwendet (siehe zur Methodik Abschnitt 6.2.4). Als Referenz dient, wie beschrieben, die simulierte Anzahl nicht verfügbarer Karosserien der „Trace Driven Simulation“: $[NVK_M^{TD} = 1.808]$. Wenn man die Frage beantworten möchte, ob die gemeinsame Berücksichtigung von Quer- und Längsstruktur für die Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit relevant ist, dann kann man die Systemergebnisse unter vollständiger Berücksichtigung der empirischen Struktur (quer und längs) vergleichen mit den Ergebnissen, die sich bei unvollständiger Berücksichtigung ergeben. Es ist nicht möglich, jeden Effekt isoliert zu untersuchen, beispielsweise kann man die Querstruktur einer oder mehrerer Eingangsgrößen nicht auflösen, ohne dass gleichzeitig auch ein Teil der Längsstruktur aufgelöst wird. Versuchte man beispielsweise den Aufträgen andere Bestände des Karosseriesortierers zuzuordnen, so müsste man unter Beibehaltung der empirischen Auftragsreihenfolge die Folge der Sortierbestände ändern und würde damit auch die Längsstruktur des Sortierbestands manipulieren. Hingegen ist es möglich, Längs- und Querstruktur

vollständig zu trennen indem man die Zuordnung der Daten aus Reihenfolge, Karosseriebestand und Positionsverschiebungen in den Datensätzen beibehält, also die Querstruktur, aber die Reihenfolge der Datensätze ändert, also die Längsstruktur. Durch die zufällige Reihenfolgebildung in den individuellen Läufen mit individuellen Zufallszahlenströmen können Anzahl und zeitliche Häufung von Risikokarosserien ebenso nur zufällig entstehen. Somit kann man die empirische Struktur (quer und längs) der empirischen Querstruktur in Verbindung mit zufälligen Längsstrukturen gegenüberstellen und untersuchen, ob sich die Ergebnisse der Simulationsmodelle signifikant unterscheiden. Mögliche Ergebnisse sind:

- die empirische Längsstruktur führt zu einer geringeren Anzahl und/oder günstigeren zeitlichen Verteilung der Risikokarosserien, was sich durch einen niedrigeren Wert der $[NVK]$ ausdrückt
- die empirische Längsstruktur führt zu einer höheren Anzahl und/oder ungünstigeren zeitlichen Verteilung der Risikokarosserien, was sich durch einen höheren Wert der $[NVK]$ ausdrückt
- die empirische und die zufällige Längsstruktur unterscheiden sich nicht signifikant.

Es soll in diesem Untersuchungszusammenhang noch eine Frage aufgeworfen werden: können die Effekte der Anzahl der Risikokarosserien und der zeitlichen Verteilung der Risikokarosserien isoliert werden? Es wurde oben erwähnt, dass durch die Autokorrelation der Ergebnisse die zeitliche Häufung der Risikokarosserien zu einer Erhöhung der Anzahl der Risikokarosserien führt. Ziel ist, eine Art „a priori“ Anzahl von Risikokarosserien abschätzen zu können, also eine Anzahl, bevor der Effekt der zeitlichen Häufung wirkt. Folgende Überlegung soll zu diesem Ziel führen: Sollte eine zeitliche Häufung vorliegen, so sollte die Dichte der Risikokarosserien in bestimmten Abschnitten gegenüber anderen erhöht sein. Eine erhöhte Dichte der Risikokarosserien sollte sich wiederum in einer Erhöhung der $[NVK]$ niederschlagen. Diese Erhöhung sollte im Verlauf der kumulierten $[NVK]$ sichtbar sein, weil sich die Kurvensteigung ändern müsste. Es wird deshalb neben den Ergebnissen der Simulationsläufe auch der Verlauf der Kurve der kumulierten $[NVK]$ betrachtet.

Eine Aussage, die in jedem Fall getätigt werden kann, ist die über die zeitliche Verteilung der Risikokarosserien:

- verläuft die Kurve linear, sind die Risikokarosserien zeitlich gleichmäßig verteilt
- verläuft die Kurve nicht linear, sind die Risikokarosserien zeitlich ungleichmäßig verteilt.

Eine Aussage über die a priori Anzahl der Risikokarosserien kann unter Umständen getätigt werden:

- ist die resultierende Anzahl der $[NVK]$ in einem Modell höher und der Verlauf der Kurve der kumulierten $[NVK]$ in diesem Modell ist linear, dann kann man von einer höheren a priori Anzahl von Risikokarosserien ausgehen

- ist die resultierende Anzahl der $[NVK]$ in einem Modell höher und der Verlauf der Kurve der kumulierten $[NVK]$ in diesem Modell ist nicht linear, dann ist keine Aussage über das Verhältnis der a priori Risikokarrieren möglich, weil beide Effekte wirksam sein könnten.

Tabelle 3 zeigt eine Gegenüberstellung statistischer Kennwerte der Ergebnisverteilung des Modells unter Auflösung der Längsstruktur in den Eingangsdaten und als Referenz die kumulierte Anzahl der NVK der Trace Driven Simulation. Es wird davon ausgegangen, dass durch die 30

Min NVK	Max NVK	Mittelwert NVK	Standardabweichung	Trace Driven
1.551	1.689	1.630	32,1	1.808

Tabelle 3: Statistik des Modells unter Auflösung der Längsstruktur

Simulationsläufe eine repräsentative Stichprobe des Ergebnisraums gezogen wurde (Vgl. Abschnitt 6.2.4). Die Differenz zwischen $[NVK_M^{TD}]$ der „Trace Driven Simulation“ und dem maximalen Wert der $[NVK_M^i]$ unter Auflösung der Längsstruktur ist so hoch, i.e. (119), dass man davon ausgehen kann, dass die beiden Modelle strukturell signifikant unterschiedlich sind: die These über den Effekt aus der Längsstruktur kann also für diesen Fall aufrecht erhalten werden. Die Abweichung des „Trace Driven Ergebnisses“ vom Mittelwert der Simulationsläufe unter Auflösung der Querstruktur beträgt ca. das $[5, 5]$ -fache der Standardabweichung der Ergebnisverteilung. Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse eines Simulationslaufs unter Beibehaltung der Querstruktur und Auflösung der Längsstruktur im Vergleich mit dem Ergebnis der Trace Driven Simulation.¹⁵⁰ Betrachtet man Abbildung 48, so wird deutlich, dass im Modell mit der

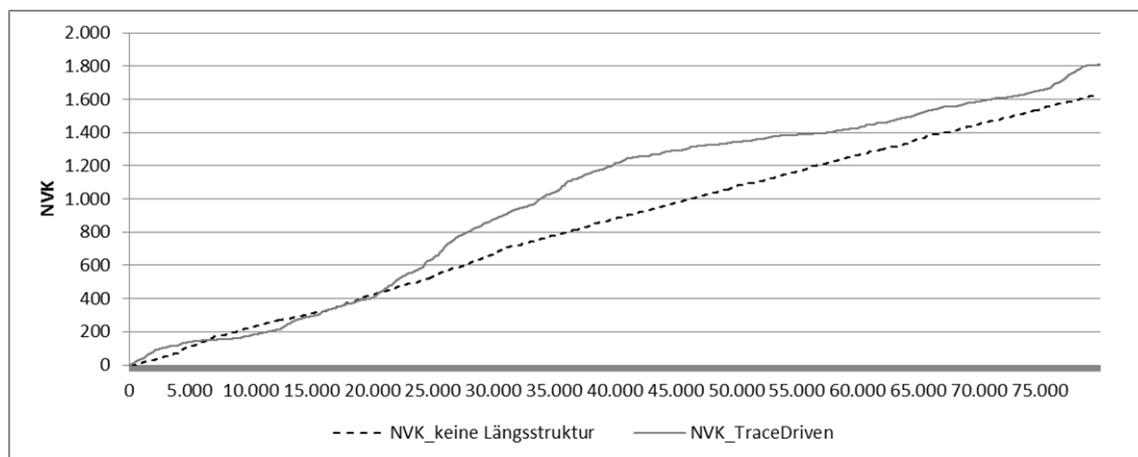


Abbildung 48: Anzahl der NVK unter Beibehaltung der Querstruktur und Auflösung der Längsstruktur im Vergleich mit den Trace Driven Ergebnissen

simulierten Längsstruktur die Anzahl der Risikokarrieren gleichmäßig verteilt sein muss, weil die kumulierte Anzahl der $[NVK]$ annähernd linear ansteigt. Diese Abbildung zeigt im Vergleich den Verlauf im Modell der „Trace Driven Simulation“, der erheblich von einem linearen Verlauf abweicht. Dies zeigt eindeutig, dass in diesem realitätsnahen Modell die Risikokarrieren zeitlich ungleichmäßig verteilt sind. Unklar ist, inwieweit die größere Anzahl der $[NVK]$ aus der

¹⁵⁰Es wurde der Lauf gewählt, der das Maximum $[NVK = 1.689]$ erzeugt hat.

zeitlich ungleichmäßigen Verteilung der Risikokarosserien resultiert (Effekt der Autokorrelation) und/oder a priori schon eine größere Anzahl von Risikokarosserien vorhanden ist.

Zusammenfassung und Implikationen für die robuste Planung der Karosserieverfügbarkeit

Bezogen auf das Wirkmodell ist festzustellen, dass die gemeinsame Wirkung von Quer- und Längsstruktur einen Effekt darstellt, der zu berücksichtigen ist. Intuitiv ist klar, dass in einem autokorrelierten System die zeitliche Anordnung innerhalb der verwendeten Datenreihen relevant sein muss, dass sich dies auch tatsächlich in den Systemergebnissen merklich niederschlägt, zeigt die Simulationsstudie.

Bezogen auf die taktische Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit sind zwei mögliche Effekte relevant: zum Einen könnte der Erwartungswert durch die gemeinsame Wirkung von Quer- und Längsstruktur abweichen, zum anderen könnte der Kurvenverlauf, also die Steigung bestimmter Kurvenabschnitte, abweichen.¹⁵¹ Selbst wenn der Erwartungswert der nicht verfügbaren Karosserien gleich sein sollte, können unter Berücksichtigung der Längsstruktur Phasen mit deutlich höheren und Phasen mit deutlich niedrigeren Verfügbarkeitswerten auftreten, so dass es letztendlich vom Zielsystem abhängt, ob und wenn ja, in welchem Maß der Effekt der gemeinsamen Wirkung von Quer- und Längsstruktur von Bedeutung ist. Wenn beispielsweise Tageswerte der Karosserieverfügbarkeit von Bedeutung wären und ein mittlerer Tageswert, gebildet aus Daten eines weiten Erfassungszeitraums nicht infrage käme, dann führte eine Nicht-Berücksichtigung dieses Effekts zu zeitweise deutlich abweichenden Werten. Anschaulich wird dies, wenn man unterstellt, das wahre System hätte den Ergebnisverlauf der Trace Driven Simulation und das Planungssystem den des Modells ohne Berücksichtigung der Längsstruktur.

Aus der Perspektive der Produktionsplanung stellt sich die Frage, ob solche zeitlichen Ballungen von Risiken für die zukünftige Struktur des Systems der Karosserieverfügbarkeit berücksichtigt werden sollten. Es konnte nachgewiesen werden, dass in der „Trace Driven Simulation“ eine Kombination aus Quer- und Längsstruktur zugrunde liegt, die offensichtlich zu einer höheren Anzahl nicht verfügbarer Karosserien führt, als wenn alleine die empirische Querstruktur berücksichtigt wird, und die empirische Längsstruktur aufgelöst wird, beziehungsweise in den Läufen eine zufällige Struktur generiert wird. Wenn es das Ziel der Planung ist, ein valides Planungsmodell aufzubauen, dann sollte man sich die Möglichkeit solcher Systemzustände, in denen ungünstige Konstellationen in den Eingangsgrößen gleichzeitig und über bestimmte Zeiträume hinweg stabil auftreten, zumindest bewusst machen, die Effekte abschätzen und entsprechend der Zielsituation für das System der Karosserieverfügbarkeit berücksichtigen.

¹⁵¹Wenn eine Erhöhung der $[AGZA]$ stärker auf die Karosserieverfügbarkeit wirkt als eine Senkung, dann sollte der Erwartungswert der $[NVK_M]$ steigen, wenn Quer- und Längsstruktur wie dargestellt gemeinsam wirken. Den Erkenntnissen aus dem Abschnitt 5.3 folgend, sollte dies so sein, denn bei zunehmender Sortierkapazität wird der Rückgang der $[NVK_M]$ kleiner (siehe beispielsweise Abbildung 39).

6 Planungsmodelle

Analytische Modelle und Simulationsmodelle zeigen kontextbezogene Vorteile und Nachteile, die, je nach Untersuchungsgegenstand, für den einen Ansatz oder den anderen oder eine Kombination beider Ansätze sprechen. Wie Kuhn und Wenzel schreiben, ist ein wesentlicher Vorteil von Simulationsmodellen, dass sich in diesen der Verlauf des Systemzustands herstellen lässt, auch bei komplexen Systemen, bei denen mathematisch-analytische Verfahren möglicherweise an ihre Grenzen stoßen. Die Autoren führen aber ebenso an, dass vor dem Einsatz simulativer Verfahren der Einsatz analytischer Verfahren zu prüfen sei.¹⁵² Da unterschiedlichste Fragestellungen und Zielsetzungen Untersuchungsgegenstand der taktischen Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit sein können, für die sich jeweils simulative oder analytische Ansätze besser eignen, wird in dieser Arbeit keine grundsätzliche Bewertung analytischer und simulativer Ansätze durchgeführt. Es werden aber Stärken und Schwächen bestehender Ansätze und der in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze untersucht - zur besseren Einschätzung der adäquaten Verfahrenswahl im praktischen Einsatz und als Ansatzpunkt für die wissenschaftliche Weiterentwicklung.

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, ist dem Stand der Wissenschaft entsprechend das einzige „echte“ analytische Modell zur taktischen Produktionsplanung dasjenige von Robert R. Inman, deshalb wird bei der Diskussion des aktuellen Stands der Wissenschaft dieses Modell untersucht. Ferner wird Inmans Modell und die Erkenntnisse aus dessen Analyse als Basis verwendet, um den Stand der Wissenschaft zu analytischen Modellen um die distanzbasierte Methode zu erweitern.

6.1 Analytische Modelle

6.1.1 Stand der Wissenschaft

Der wesentliche Beitrag zur Berechnung der Karosserieverfügbarkeit mit analytischen Modellen ist der von Robert R. Inman: „ASRS sizing for recreating automotive assembly sequences“. Bezogen auf das oben dargestellte Wirkmodell verwendet Inman auf der Karosserieebene das gleiche Fabrikmodell.¹⁵³ Er geht implizit davon aus, dass die Reihenfolge der Karosserien bei Rohbaustart auch die gewünschte Auftragsreihenfolge für Montage-Start ist und dass die geplante Rohbau-Start-Reihenfolge und die tatsächliche Rohbau-Start-Reihenfolge übereinstimmen, also formal $[SPC = PPC = 0]$ gilt. In seiner Methode berücksichtigt er $[M]$ Karosserien, für die er die Positionsverschiebungen mit Hilfe eines Vergleichs der Start und Ende Sequenz des Karosseriebaus ermittelt.¹⁵⁴ Aus dem Histogramm der Positionsverschiebungen kann man die diskrete Verteilungsfunktion der Positionsverschiebungen $[F(PC)]$ ermitteln, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Positionsverschiebung kleiner oder gleich $[PC]$ eintritt. Systematische Unterschiede im Durchlaufverhalten bestimmter Karosserievarianten werden nicht berücksichtigt, die Positionsverschiebungen korrelieren also nicht mit bestimmten Karosserievarianten. Ferner werden die Realisierungen der Positionsverschiebungen als stochastisch unabhängig angenommen, es liegt also keine Autokorrelation vor. Die Karosserieverfügbarkeit ergibt sich bei

¹⁵²Vgl. Handbuch der Logistik (2008) S.74.

¹⁵³Vgl. Inman (2003), S.848.

¹⁵⁴Zur konkreten Vorgehensweise vergleiche 4.1.

Inman mit fester Zuordnung von Auftrag und Karosserie entsprechend der Funktion:¹⁵⁵

$$BAV [\%] = F(SC) \times 100\%.^{156}$$

Die Karosserieverfügbarkeit entspricht also der Wahrscheinlichkeit, mit der eine Positionsverschiebung kleiner oder gleich der Anzahl der Plätze im Karosseriesortierer erreicht wird. Ist es das Ziel, den Karosseriesortierer auszulegen (unter Verwendung einer gegebenen Karosserieverfügbarkeit und gegebenen Positionsverschiebungen), dann schlägt Inman vor, die Menge der berücksichtigten Positionsverschiebungen anzupassen. Es wird die Karosserie mit der größten Positionsverschiebung eliminiert, für die restlichen werden die Positionsverschiebungen neu berechnet. Der Anteil der auf diese Weise eliminierten Karosserien entspricht dem Verlust an Karosserieverfügbarkeit, beispielsweise würden bei einer ursprünglichen Anzahl von Karosserien von 10.000 und einer gewünschten Karosserieverfügbarkeit von 90% die 1.000 Karosserien mit den jeweils größten Positionsverschiebungen sukzessive eliminiert, die verbleibende größte Positionsverschiebung entspricht dann der notwendigen Anzahl an Plätzen im Karosseriesortierer.¹⁵⁷

Meißner greift Inmans Methode ohne Berücksichtigung der Tauschmöglichkeit von Auftrag und Karosserie auf. Er stellt eine konservative Variante vor, bei dem der Karosseriesortierer etwas größer ausgelegt wird, der Freiraum zum Einsteuern der Aufträge dafür aber erweitert wird.¹⁵⁸ Der Autor weist daraufhin, dass das von ihm vorgestellte Verfahren zwar die Flexibilität in der Einsteuerung erhöht, gleichzeitig aber auch zu einer längeren Rückstelldauer der Aufträge und damit zu weiteren Nachteilen führen kann.¹⁵⁹

Um die Möglichkeit der Neuordnung von Auftrag und Karosserie bei Montage-Start zu berücksichtigen, stellt Inman die folgende Funktion als „Upper Bound“ der Karosserieverfügbarkeit vor:¹⁶⁰

$$BAV [\%] \leq F(SC) + (1 - F(SC)) \times \sum_{v=1}^V p_v \times \left(1 - (1 - p_v)^{SC}\right).$$

Man erkennt, dass Inman die Wartefunktion des Karosseriesortierers als Untergrenze der Karosserieverfügbarkeit gestaltet $[F(SC) + (1 - F(SC)) \times \dots]$. Er nimmt an, dass ein Auftrag nur dann einen Karosserietausch vollzieht, wenn die assoziierte Karosserie nicht rechtzeitig im Sortierer vorhanden ist [Warteeffekt greift nicht]. Von diesen Aufträgen, die von der Unpünktlichkeit der assoziierten Karosserien betroffen sind, finden diejenigen einen Tauschpartner, die mindestens einen Auftrag mit gleicher Karosserievariante, also mindestens einen Nachfolger, innerhalb eines bestimmten Bereichs haben [Tauscheffekt greift]. Aus ex ante Sicht wird dies ausgedrückt, durch die Gegenwahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb des Toleranzbereichs kein Nachfolger vorkommt $\left[1 - (1 - p_v)^{SC}\right]$. Der Toleranzbereich entspricht der Kapazität zur Resortierung im Karosseriesortierer, ausgedrückt in Positionen. Diese Annahme über den Tauscheffekt impliziert, dass die assoziierte Karosserie eines Nachfolgeauftrags, der eine Distanz zum Fokusauftrag kleiner oder gleich dem Toleranzbereich aufweist, als mindestens pünktlich angenommen wird. Außerdem wird damit festgelegt, dass die assoziierten

¹⁵⁵ Vgl. Inman (2003), S.857.

¹⁵⁶ Es wird hier vereinfacht notiert: $[SC = SC_P]$.

¹⁵⁷ Vgl. Inman (2003), S.855.

¹⁵⁸ Vgl. Meißner (2009), S.162ff.

¹⁵⁹ Vgl. Meißner (2009), S.163ff.

¹⁶⁰ Vgl. Inman (2003), S.861.

Karosserien von Nachfolgaufträgen, die eine Distanz aufweisen, die um mindestens eine Position größer ist, als der Toleranzbereich, zum Tausch nicht zur Verfügung stehen können (selbst wenn die Karosserien früher als geplant im Karosseriesortierer zur Verfügung stünden).

Wenn man diesen analytischen Ansatz vergleicht, mit dem Modell welches in Abschnitt 4.2 vorgestellt wurde, fällt auf, dass zwar die Pünktlichkeit der assoziierten Karosserie und die mögliche Verfügbarkeit von Nachfolgaufträgen berücksichtigt wird, der mögliche Bedarf von Vorgängeraufträgen aber nicht. Da dieser die Karosserieverfügbarkeit nur niedriger ausfallen lässt, ist dies für die intendierte Berechnung einer „Upper Bound“ zunächst mal nicht problematisch. Es bleibt aber die Frage offen, ob der Tauschvorgang zwischen dem fokussierten Auftrag, den Vorgängeraufträgen und den Nachfolgaufträgen in einem analytischen Modell zur Berechnung der Anzahl nicht verfügbarer Karosserien abgebildet werden kann. Ein Ansatz hierzu wird im Folgenden mit der distanzbasierten Methode vorgestellt.

6.1.2 Distanzbasierte Methode zur Ermittlung der Karosserieverfügbarkeit

Die distanzbasierte Methode ist ein erweiterter Ansatz zur Berechnung der Karosserieverfügbarkeit. Sie verwendet die Verteilungsfunktion der Positionsverschiebungen analog zur o.g. Methode nach Inman, stellt aber im Vergleich zur Methode der „Upper Bound“-Berechnung eine wesentliche Erweiterung dar, weil sie eine exakte Berechnung der Karosserieverfügbarkeit erlaubt bei Berücksichtigung des Tauschs von Auftrag und Karosserie. Die Idee bei dieser Methode ist, die Koinzidenz der Ereignisse zwischen den assoziierten Karosserien von Aufträgen, die die gleiche Karosserievariante benötigen, nachzubilden. Es wird berechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einer gegebenen Anzahl von Vorgängern und Nachfolgern mindestens eine Karosserie für einen bestimmten Auftrag verfügbar ist. Dieser bestimmte Auftrag kann im Fall einer äquidistanten Verteilung der Aufträge in der Auftragsreihenfolge repräsentativ für alle Aufträge stehen, die die gleiche Karosserievariante benötigen.

Ausgangspunkt ist das in Kapitel 4.2 dargestellte formale Modell des Systems der Karosserieverfügbarkeit. Im Unterschied zu der dort gezeigten Modellierung wird für den analytischen Ansatz der Bezug auf die Position in der Reihenfolge der Verfügbarkeitsprüfungen $[SP^{BCS}]$ aufgegeben, weil die Berechnung der tatsächlichen Position der Verfügbarkeitsprüfung abhängig ist von der Größe des virtuellen Puffers und die Ermittlung dessen statisch nicht möglich ist, sondern einen dynamischen Ansatz erfordert, wie ihn beispielsweise eine Ablaufsimulation bietet.

Zur statischen Berechnung der Karosserieverfügbarkeit mit der distanzbasierten Methode sind einige Annahmen zu treffen. Zentraler Bestandteil sind auch hier wieder die Summen der Positionsverschiebungen $[OPC_a]$, die im Abschnitt 4.1 definiert wurden. Es wird angenommen, dass die $[OPC_a]$ untereinander stochastisch unabhängig sind. Es seien $[M]$ Aufträge und $[M]$ Karosserien Gegenstand der Betrachtung. Es gäbe $[V]$ Karosserievarianten, die jeweils einen Anteil $[p_v]$ an den $[M]$ Aufträgen aufweisen. Es sei $[OPC_a]$ die Realisierung einer Zufallsvariable. $\{\widehat{OPC}\}$ sei die Menge aller auftragsbezogenen Summen der Positionsverschiebungen, $\{\widehat{OPC}_v\}$ die Menge der auftragsbezogenen Positionsverschiebungen der Variante $[v]$. Dann sei $[H(OPC)]$ die diskrete Funktion der absoluten Häufigkeiten der $[OPC]$, $[h(OPC)]$ die diskrete Wahrscheinlichkeitsfunktion. Durch aufsteigende Ordnung der $[OPC]$ und Kumulation der $[h(OPC)]$ kann

die diskrete Verteilungsfunktion $[F(OPC)]$ der $[OPC]$ erzeugt werden. Diese Funktion gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Auftrag in Verbindung mit der assoziierten Karosserie eine Positionsverschiebung kleiner oder gleich $[OPC]$ realisiert. Der Definitionsbereich von $[F(OPC)]$ wird begrenzt durch die Minimale und Maximale Positionsverschiebung in $\{\widehat{OPC}\}$. Dafür wird die Positionsbandbreite $[PBW]$ definiert als: $PBW = |\min\{\widehat{OPC}\}| + \max\{\widehat{OPC}\}$. Die variantenspezifischen Funktionen ergeben sich analog und werden jeweils mit dem Index $[v]$ markiert.

Wie im Kapitel 4.1 erläutert wurde, hängt der Tauschprozess ab von der Distanz von Aufträgen in der geplanten Montagesequenz, die die gleiche Karosserievariante benötigen. Für die weitere Vorgehensweise wird zunächst von einer äquidistanten Verteilung der Karosserievarianten in der geplanten Montagesequenz ausgegangen, das heißt, die Distanzen von Aufträgen mit gleicher Karosserievariante $[v]$ sind über die gesamte Auftragssequenz identisch und betragen $[\overline{D}_v = \frac{1}{p_v}]$.¹⁶¹ So hätten beispielsweise die Karosserien einer Variante $[v]$ mit einem Anteil von [10%] eine gleichmäßige Distanz von [10] Positionen in der geplanten Auftragssequenz. Fokussiert man einen bestimmten Auftrag mit Karosserievariante $[v]$, so hat dieser seinen i 'ten Vorgänger oder Nachfolger in einer Distanz von $[D_{v,i} = i \times \overline{D}_v]$.

Der Bestand im Karosseriesortierer wird zunächst als konstant und identisch für jeden Auftrag angenommen und durch $[SC^*]$ repräsentiert.

Die distanzbasierte Methode ist, wie die zuvor dargestellte Methode von Inman, ein statisches stochastisches Verfahren: statisch, weil die positive Rückkopplung der Karosserieverfügbarkeit nicht berücksichtigt wird (die allgemeine Autokorrelation wird nicht berücksichtigt, die variantenspezifische (Bedarf der Vorgängeraufträge) hingegen schon), stochastisch, weil die verwendeten Variablen als Zufallsvariablen aufzufassen sind. Die Karosserieverfügbarkeit eines Auftrags wird als Wahrscheinlichkeit $[P]$ ermittelt, nämlich $[P(BAV = 1)]$, also die Wahrscheinlichkeit, dass einem Auftrag mindestens eine Karosserie zur Verfügung steht. Um diese Wahrscheinlichkeit zu ermitteln, stehen, wie im formalen Modell der Karosserieverfügbarkeit dargestellt, Karosserieangebot und Karosserienachfrage im Mittelpunkt. Die Differenz von Karosserieangebot und Karosserienachfrage wird mit $[NBS = NetBodySupply]$ bezeichnet. Der Definitionsbereich der $[NBS]$ leitet sich ab aus der Positionsbandbreite der Positionsverschiebungen und der Position der Aufträge mit gleicher Karosserievariante in der geplanten Montagesequenz. Der maximale Karosseriebedarf an einer bestimmten Montageposition ist gleich der Anzahl der relevanten Vorgängeraufträge $[P^t]$ zuzüglich des Bedarfs des betrachteten Auftrags, also $[P^t + 1]$. Das maximale Angebot an Karosserien ist gleich der Anzahl der relevanten Nachfolgaufträge $[S^t]$ zuzüglich der Karosserie des betrachteten Auftrags, also $[S^t + 1]$. Der Definitionsbereich der $[NBS]$ erstreckt sich also über das folgende Intervall: $[-(P^t + 1); S^t + 1]$ mit $[NBS \in \mathbb{Z}]$. Da in dieser Basisvariante der Methode davon ausgegangen wird, dass die Aufträge mit gleicher Karosserievariante $[v]$ äquidistant über die geplante Montagesequenz verteilt sind, gilt für jeden Auftrag ein variantenspezifischer Definitionsbereich.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich für einen Auftrag mit der Karosserievariante $[v]$ ein bestimmter Wert $[NBS]$ ergibt, wird ausgedrückt mit der variantenspezifischen Wahrscheinlichkeitsfunktion

¹⁶¹Es wird im Folgenden $[D]=[D^{PAS}]$ verwendet.

$[SC^* - s\bar{D}_v]$ Positionen früher ankommt, als geplant.¹⁶³ Es soll dies am Beispiel erläutert werden. Es sei $[s = 2]$ der zweite Nachfolger mit $[\bar{D}_v = 100]$ einer mittleren Distanz von $[100]$ Positionen in der geplanten Montage-Start-Sequenz, also einer Gesamtdistanz von $[200]$ Positionen. Der Sortierbestand $[SC^*]$ sei $[100]$ Karosserien. Damit die assoziierte Karosserie des zweiten Nachfolgers im Sortierbestand verfügbar ist, muss diese mindestens $[100]$ Positionen früher eintreffen, als geplant. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ergibt sich aus der entsprechenden Verteilungsfunktion. Analog gilt für die Vorgänger, dass man die Wahrscheinlichkeit berechnen kann, dass ein Vorgänger eine Karosserie außerhalb der Vorproduktion des betrachteten Auftrags platziert: $P_v(x_p > SC^* + p\bar{D}_v) = 1 - F_v(SC^* + p\bar{D}_v) \cdot [1 - F_v(SC^* + p\bar{D}_v)]$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die assoziierte Karosserie des p 'ten Vorgängers mindestens $[SC^* + p\bar{D}_v]$ Positionen zu spät eintrifft. Es soll dies am gleichen Beispiel erläutert werden. Es sei $[p = 2]$ der zweite Vorgänger mit $[\bar{D}_v = 100]$ einer mittleren Distanz von $[100]$ Positionen in der geplanten Montage-Start-Sequenz, also einer Gesamtdistanz von $[200]$ Positionen. Der Sortierbestand $[SC^*]$ sei $[100]$ Karosserien. Damit die assoziierte Karosserie des zweiten Vorgängers nicht im Sortierbestand oder früher verfügbar ist, muss diese mindestens $[300]$ Positionen später eintreffen, als geplant.

Die Anzahl der tatsächlich verfügbaren Karosserien ergibt sich aus dem Zusammenspiel aller beteiligten Aufträge und Karosserien gleichzeitig, also Fokusauftrag, Vorgänger und Nachfolger. Die Anzahl der beteiligten Aufträge ist $[L = (P^t + S^t + 1)]$. Die Positionsverschiebung, die die assoziierten Karosserien erfahren, werden ausgedrückt durch die entsprechenden Realisationen der Zufallsvariablen $[OPC]$, die als stochastisch unabhängig angenommen werden. Die gleichzeitige Realisation aller $[L]$ Zufallsvariablen ist ein Elementarereignis in einem L -dimensionalen Raum $\subset [Z^L]$, welches durch eine L -dimensionale Zufallsvariable $[\widetilde{OPC}_v]$ mit $[r \in \{1, \dots, L\}]$ als $[\widetilde{OPC}_v = (OPC_v^1, \dots, OPC_v^r, \dots, OPC_v^L)]$ abgebildet wird. Jeder Realisation von $[\widetilde{OPC}_v]$ ist eine Eintrittswahrscheinlichkeit $[P(\widetilde{OPC}_v) = \prod P(OPC_v^r)]$ und eine bestimmte Anzahl tatsächlich verfügbarer Karosserien $f(\widetilde{OPC}_v) = NBS$ zugeordnet.¹⁶⁴ Die Zuordnung einer bestimmten Zahl $[NBS]$ zu einem L -Tupel geschieht über die Abbildungsvorschrift $[f]$, auf die später noch eingegangen wird. Die Realisationen von $[\widetilde{OPC}_v]$, die zur gleichen Anzahl $[NBS]$ führen, werden zu der Ereignisgruppe $[NBS_E]$ zusammengefasst. Die $[L]$ möglichen Werte der tatsächlichen Anzahl verfügbarer Karosserien $[NBS]$ bilden einen Ereignisraum. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Wert, also ein Ereignis, tatsächlich verfügbarer Karosserien $[NBS_E]$ eintritt, ist gleich der Summe der Wahrscheinlichkeiten der Elementarereignisse, die diesen Wert erzeugen: $[P(NBS_E) = \sum P(f_v(\widetilde{OPC}_v) = NBS_E)]$.

Die Abbildungsvorschrift $[f_v]$ ordnet jeder Permutation der L -Karosseriepositionen eine Zahl tatsächlich verfügbarer Karosserien zu. Dies wird kurz an einem einfachen Beispiel demonstriert: Es seien je ein Vorgänger und ein Nachfolger betrachtet. Der Sortierbestand betrage $[50]$ Karosserien. Die mittlere Distanz betrage $[100]$ Positionen. Die Realisation $[s, F, p] = [-30, 0, 90]$ bedeutet, dass die assoziierte Karosserie des Nachfolgers $[30]$ Positionen früher eintrifft, die des Fokusauftrags an der vorgesehenen Position und die des Vorgängers $[90]$ Positionen später; i.e.

¹⁶³Beziehungsweise bei $[SC^* - s\bar{D}_v > 0]$ weniger Positionen verzögert ankommt als $[SC^* - s\bar{D}_v]$.

¹⁶⁴Vgl. Wunsch (2006), S.36.

ein mögliches Ereignis von zahlreichen anderen. Daraus ergibt sich, dass die Karosserie des Nachfolgers nicht früh genug eintrifft, um ein Angebot zu erzeugen, die des Vorgängers nicht so spät ist, dass diese einen Bedarf erzeugt, und die des Fokusauftrags innerhalb des Sortierbestands vorhanden ist. Demnach ergäbe sich hier der Wert $[NBS = 1]$, eine Karosserie ist verfügbar. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für dieses Elementarereignis $[s, F, p] = [-30, 0, 90]$ kann mit Hilfe der Positionsverschiebungsprofile $[h_v(OPC_v)]$ ermittelt werden.

Um nicht die Eintrittswahrscheinlichkeiten aller Elementarereignisse einzeln aufsummieren zu müssen, bedient man sich der L-dimensionalen Verteilungsfunktion $[\tilde{F}_v(\widehat{OPC}_v)]$. Die Intervallgrenzen können jetzt so gewählt werden, das eine Teilmenge aller Elementarereignisse, für die sich $[NBS = 1]$ ergibt, erfasst wird:

- $\tilde{F}_v(\text{Max}\{\widehat{OPC}_v\}, 50, 150) - \tilde{F}_v(-50, 50, 150)$ die Nachfolgerkarosserie erzeugt kein Angebot, der Vorgänger keinen Bedarf und die Fokuskarosserie ist pünktlich.
- $\tilde{F}_v(-50, \text{Max}\{\widehat{OPC}_v\}, 150) - \tilde{F}_v(-50, 50, 150)$ die Nachfolgerkarosserie erzeugt ein Angebot, die Fokuskarosserie kommt zu spät und erzeugt kein Angebot und die Vorgängerkarosserie erzeugt keinen Bedarf.
- $\tilde{F}_v(-50, 50, \text{Max}\{\widehat{OPC}_v\}) - \tilde{F}_v(-50, 50, 150)$ Nachfolge- und Fokuskarosserie erzeugen ein Angebot, die Vorgängerkarosserie erzeugt einen Bedarf.

NBS	s	F	p
-1	$1 - F_v(SC^* - \bar{D}_v)$	$1 - F_v(SC^*)$	$1 - F_v(SC^* + \bar{D}_v)$
0	$1 - F_v(SC^* - \bar{D}_v)$	$1 - F_v(SC^*)$	$F_v(SC^* + \bar{D}_v)$
0	$1 - F_v(SC^* - \bar{D}_v)$	$F_v(SC^*)$	$1 - F_v(SC^* + \bar{D}_v)$
0	$F_v(SC^* - \bar{D}_v)$	$1 - F_v(SC^*)$	$1 - F_v(SC^* + \bar{D}_v)$
1	$F_v(SC^* - \bar{D}_v)$	$1 - F_v(SC^*)$	$F_v(SC^* + \bar{D}_v)$
1	$1 - F_v(SC^* - \bar{D}_v)$	$F_v(SC^*)$	$F_v(SC^* + \bar{D}_v)$
1	$F_v(SC^* - \bar{D}_v)$	$F_v(SC^*)$	$1 - F_v(SC^* + \bar{D}_v)$
2	$F_v(SC^* - \bar{D}_v)$	$F_v(SC^*)$	$F_v(SC^* + \bar{D}_v)$

Tabelle 4: NBS Konstellationen

Tabelle 4 zeigt die unterschiedlichen Konstellationen für je einen Vorgänger und Nachfolger.¹⁶⁵ Hierin werden die Komponenten von $[\widehat{OPC}_v]$ in separaten Spalten erfasst. Die Wahrscheinlichkeit für die Verfügbarkeit einer Karosserie für Aufträge der Variante $[v]$ ergibt sich dann nach oben genannter Formel für die Karosserieverfügbarkeit:

$$P(BAV = 1) = 1 - F_v(NBS = 0)$$

$$= 1 - [(1 - F_v(SC^* - \bar{D}_v)) \times (1 - F_v(SC^*)) \times F_v(SC^* + \bar{D}_v)]$$

¹⁶⁵ $F_v(\text{Max}\{\widehat{OPC}_v\} = 1)$.

$$\begin{aligned}
& - [F_v (SC^* - \bar{D}_v) \times (1 - F_v (SC^*)) \times (1 - F_v (SC^* + \bar{D}_v))] \\
& - [(1 - F_v (SC^* - \bar{D}_v)) \times F_v (SC^*) \times (1 - F_v (SC^* + \bar{D}_v))] \\
& - [(1 - F_v (SC^* - \bar{D}_v)) \times (1 - F_v (SC^*)) \times (1 - F_v (SC^* + \bar{D}_v))]
\end{aligned}$$

Fasst man das Eintreffen einer Karosserie in einem bestimmten Bereich, also die Angebots-erzeugung einer Nachfolgerkarosserie oder die Bedarfserzeugung einer Vorgängerkarosserie als Binäreignis auf, lässt sich einfach die Anzahl der möglichen Konstellationen bei $[L]$ untersuchten Aufträgen berechnen: bei $[L = (P^t + S^t + 1)]$ binären Variablen gibt es genau $[2^L]$ mögliche Kombinationen. Von dieser Anzahl ist nach obiger Vorgehensweise nur der Anteil relevant, der kein ausreichendes Netto-Karosserieangebot erzeugt.

Bei zunehmender Anzahl von beteiligten Aufträgen $[L]$ muss diese Methode zwangsläufig konvergieren: die Distanz eines zusätzlichen Auftrags zum Fokusauftrag ist immer größer als die Distanz der Aufträge, die bereits berücksichtigt wurden. Durch die Positionsverschiebungsprofile ist festgelegt, bis zu welcher Distanz Vorgänger und Nachfolger überhaupt auf den Fokusauftrag wirken, d.h. Vorgänger und Nachfolger, die eine bestimmte Distanz überschreiten, werden unwirksam, formal lässt sich dies so ausdrücken: die zusätzliche Berücksichtigung eines Vorgängers $[i]$ oder eines Nachfolgers $[j]$ bleibt ohne Auswirkung auf das Ergebnis, wenn für $[i]$ oder $[j]$ gilt:

$$\begin{aligned}
(SC^* + i\bar{D}_v) > \text{Max} \{ \widehat{OPC}_v \} &\rightarrow F_v (SC^* + i\bar{D}_v > \text{Max} \{ \widehat{OPC}_v \}) = 1 \\
(SC^* - j\bar{D}_v) < \text{Min} \{ \widehat{OPC}_v \} &\rightarrow F_v (SC^* - j\bar{D}_v < \text{Min} \{ \widehat{OPC}_v \}) = 0
\end{aligned}$$

Nimmt man an, es würde ein Wert $[i]$ gewählt, für den obige Bedingung gälte, dann wäre die Wahrscheinlichkeit, dass dieser i 'te Vorgänger einen Bedarf erzeugt gleich $[0]$. Auch ein Elementarereignis, welches diesen Vorgänger als Bedarfsträger berücksichtigt, hätte eine Eintrittswahrscheinlichkeit von $[0]$: $[P(\widehat{OPC}_v) = \prod P(OPC_v^x) = 0]$.

Gegenüberstellung der distanzbasierten Ergebnisse und der empirischen Ergebnisse

Fraglich ist, wie sich die Ergebnisse der distanzbasierten Methode gegenüber den empirischen Ergebnissen verhalten? Das Datenmodell für die distanzbasierte Methode wurde analog zur „Trace Driven“ Simulation mit möglichst großer Nähe zu den empirischen Daten gestaltet. Um die empirischen Muster in Quer- und Längsstruktur integrieren zu können (beispielsweise der schwankende Bestand im Karosseriesortierer), wurden auftragsindividuelle $[SP_F^{BCS}]$ verwendet, wobei $[SP_F^{BCS} = SP_F^{PAS}]$ gesetzt wurde. Dadurch wirkt die allgemeine Autokorrelation weiterhin nicht, wegen $[SC_{vir,F}^{SP^{BCS}} = SP_F^{BCS} - SP_F^{PAS} = 0]$ mit $[SP_F^{BCS} = SP_F^{PAS}]$. Die empirische eingeplante Auftragssequenz wurde vollständig übernommen, $[D_{F,i,j} = \bar{D}_v]$ gilt hier also nicht.¹⁶⁶ Ebenso wurden die empirischen Positionsverschiebungen verwendet, um $[h(PC)]$ zu ermitteln. Dafür wurden die Positionsverschiebungen von je zwei Kalenderwochen für Verteilungsfunktionen mit je zwei Kalenderwochen Gültigkeit verwendet. Als Zufallsvariable gilt weiterhin $[OPC_F = PPC_F + SPC_F + PC_F]$. Es wurde die Anzahl der berücksichtigten Vorgänger

¹⁶⁶siehe hierzu Abschnitt 4.2.

und Nachfolger mit jeweils sieben festgelegt, weil die Änderung der $[NVK_M]$ mit Einbezug des sechsten Vorgängers und Nachfolgers schon sehr gering war.

Abbildung 50 zeigt den Ergebnisvergleich: die kumulierte Anzahl der $[NVK]$ aller Aufträge ist sehr ähnlich, $[NVK_M^D = 1.797]$ und $[NVK_M^{Emp} = 1.859]$. Fraglich ist, ob sich die Abweichung in der absoluten Zahl der $[NVK]$ erklären lässt? Ein Aspekt ist sicherlich, dass aus Perspektive der Einflußgrößen die allgemeine Autokorrelation nicht berücksichtigt wird. Die Stärke des Effekts genau zu ermitteln ist nicht möglich, eine Schätzung kann aber mittels der in den Abschnitten 5.4 und 4.3 vorgenommenen Überlegungen erfolgen: dort wurde der Effekt etwa auf [60] bis [100] nicht verfügbare Karosserien geschätzt.¹⁶⁷ Dieser Effekt erklärt plausibel einen Teil der absoluten Abweichung. Im dynamischen Verlauf gibt es auch Unterschiede: die Veränderungen in der Kurvensteigungen treten positionsversetzt auf. Dies erklärt sich aus der weitgehenden Auflösung der Längsstruktur in den Positionsverschiebungen durch die zeitliche Zusammenfassung der Positionsverschiebungen zu Einheiten von zwei Wochen. Empirische Phasen großer Positionsverschiebungen werden innerhalb der Zwei-Wochen-Zeiträume tendenziell nivelliert: wäre beispielsweise in der ersten Woche die aufgetretenen Positionsverschiebungen eher niedrig, in der zweiten Woche eher hoch, dann würde die gemeinsame Verteilung eine mit mittlerer Größe der Positionsverschiebungen sein, wie diese sich aus der Zusammenfassung der beiden Verteilungen ergäbe.

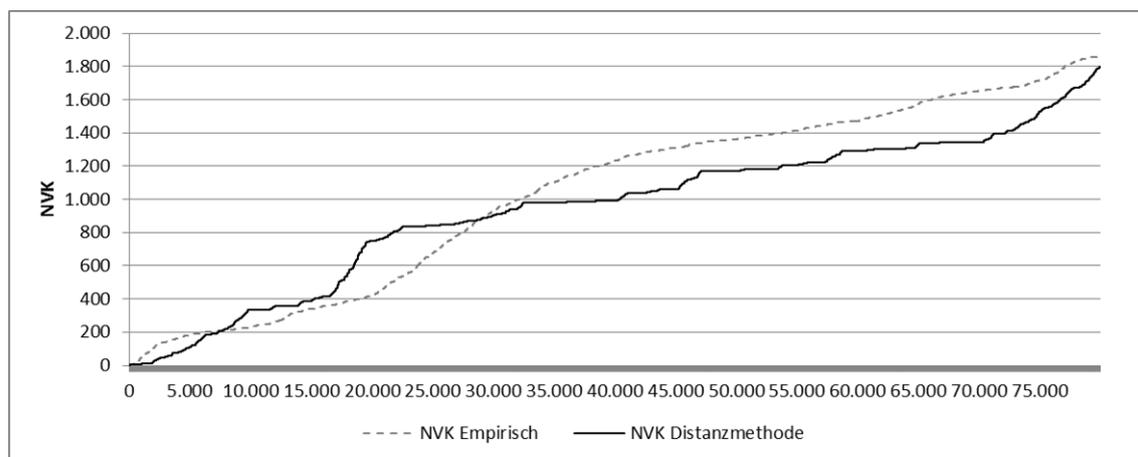


Abbildung 50: Gegenüberstellung der distanzbasierten NVK und der empirischen NVK

Reflektion der Upper Bound von Inman und Vergleich mit der Distanzbasierten Methode

Wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben, hat Inman ein Modell für die analytische Ermittlung einer Upper-Bound der Karosserieverfügbarkeit formuliert: $BAV [\%] \leq F(SC) + (1 - F(SC)) \times \sum_{v=1}^V p_v \times (1 - (1 - p_v)^{SC})$. Wenn es sich dabei tatsächlich um eine Obergrenze der Karosserieverfügbarkeit handelt, dann sollten sich für keine Kombination aus Sortierkapazität $[SC]$,

¹⁶⁷In den Experimenten, auf die hier Bezug genommen wurde, werden prinzipiell die gleichen Eingangsdaten verwendet, allerdings werden die Daten anders aggregiert und die empirische Quer- und Längsstruktur werden aufgelöst.

Varianteanteil $[p_v]$ und Verteilungsfunktion der Positionsverschiebungen $[F]$ eine höhere Karosserieverfügbarkeit ermitteln lassen, vorausgesetzt, dass das Vergleichsmodell hinsichtlich Validität adäquat ist. Es wird hier nun gezeigt, dass sich mit Hilfe der distanzbasierten Methode ein Fall konstruieren lässt, in dem die Karosserieverfügbarkeit bei gleichen Variablenwerten höher ist, als bei Inmans Upper-Bound.

Unterstellt wird eine Gleichverteilung der Karosserievarianten, das heißt, alle Karosserievarianten haben den gleichen Anteil von $[\bar{p}_v]$ an der Gesamtanzahl der Karosserien. Damit ergibt sich aus den analytischen Ansätzen, dass bei gleichen Eingangsdaten die Karosserieverfügbarkeit jeder Karosserievariante $[v]$ identisch ist, und damit lässt sich aus der Verfügbarkeit der Karosserien einer Karosserievariante auf die Verfügbarkeit aller Karosserien schließen. Es wird nun für den Methodenvergleich eine Reihe von Experimenten durchgeführt, bei denen $[\bar{p}_v]$ sukzessive erhöht wird: $[\bar{p}_v] \in \{0,001; 0,005; 0,01; 0,05\}$. Für jeden Wert von $[\bar{p}_v]$ wird die Sortierkapazität $[SC]$ sukzessive erhöht, die Verteilungsfunktion der Positionsverschiebungen ist für beide Modelle identisch und konstant. Es kann dann für unterschiedliche Werte der Sortierkapazität die Karosserieverfügbarkeit je Anteil der Karosserievariante verglichen werden, was in Form der Abbildungen 51 bis 54 erfolgt. Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse bei einem Anteil $[\bar{p}_v]$ von $[0,1\%]$. Man erkennt deutlich, dass für einen weiten Bereich der Sortierkapazität die Inman-Methode tatsächlich die höhere Karosserieverfügbarkeit ausgibt. Aber ab einer Sortierkapazität von $[930]$ schneidet die Ergebniskurve der distanzbasierten Methode die der Inman-Methode, die Karosserieverfügbarkeit ist also bei solch hohen Sortierkapazitäten höher. Die anderen Gra-

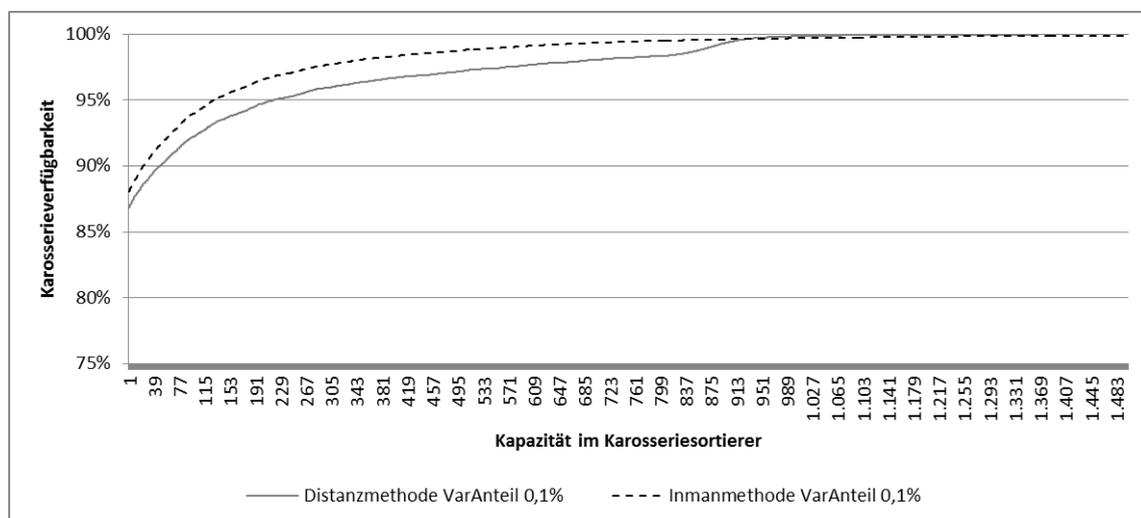


Abbildung 51: Upper-Bound der Karosserieverfügbarkeit - Methodenvergleich bei Variantenanteil 0,1%

fiken, die die Ergebnisse bei höheren Anteilen der Karosserievariante präsentieren, zeigen, wie sich der Schnittpunkt zu niedrigeren Kapazitäten im Karosseriesortierer verschiebt. Bei einem Variantenanteil von $[5\%]$ gibt es keinen Schnittpunkt mehr, hier liegt die Ergebniskurve der distanzbasierten Methode vollständig über der der Inman-Methode.

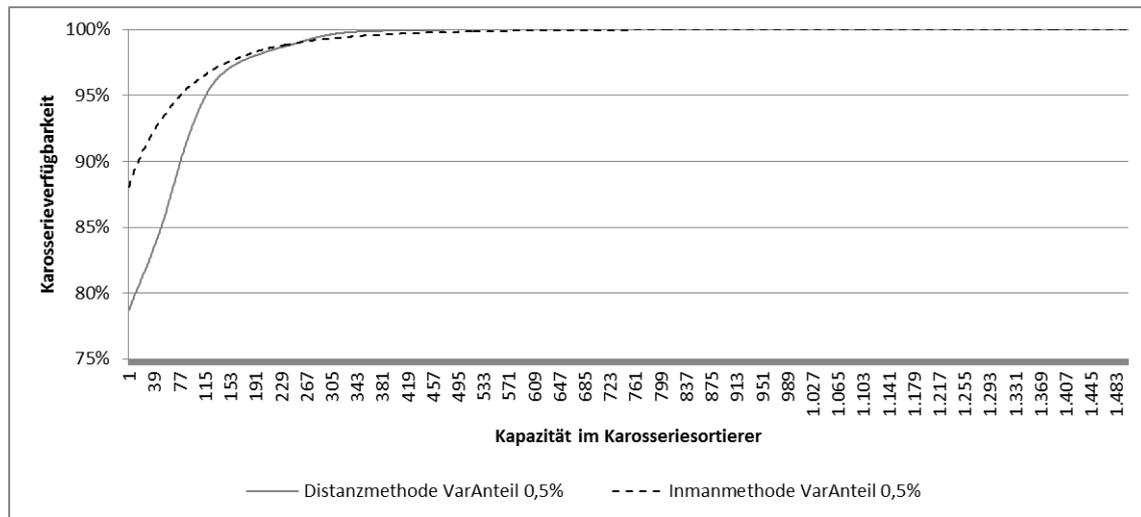


Abbildung 52: Upper-Bound der Karosserieverfügbarkeit - Methodenvergleich bei Variantenanteil 0,5%

6.1.3 Kritische Würdigung analytischer Modelle zur Planung der Karosserieverfügbarkeit

Fehlen der allgemeinen Autokorrelation

Sowohl Inman als auch Meissner führen die in Abschnitt 6.1.1 dargestellte Methode als Verfahren zur Auslegung eines Karosseriesortierers an, beziehungsweise als Verfahren, um bei gegebener Sortierkapazität den Servicegrad des Karosseriesortierers zu bestimmen. Auf Basis der Überlegungen in dieser Arbeit zu den grundlegenden Einflußgrößen und den Wirkmechanismen im System der Karosserieverfügbarkeit ist allerdings festzustellen, dass der Aspekt der Autokorrelation in diesem statischen Modell nicht berücksichtigt werden kann: die variantenspezifische Autokorrelation ist in diesem Fall nicht relevant, weil der Tausch von Auftrag und Karosserie ausgeschlossen ist, die allgemeine Autokorrelation ist dies hingegen schon. Es wurde bei der Darstellung des Wirkmodells im Rahmen dieser Arbeit vom Vorgriff in der geplanten Auftragssequenz der Montage gesprochen, der wie ein negativer virtueller Puffer wirkt und in der Größe gleich der Anzahl der zurückgestellten und noch nicht wiederingesteuerten Vorgängeraufträge ist. Sei es, dass ein Karosseriesortierer eine Größe von $[SC = 100]$ Plätzen aufweist, dann sollten alle Positionsverschiebungen, die kleiner oder gleich $[100]$ Positionen sind, durch diesen Sortierer kompensiert werden. Es sei nun ein Auftrag betrachtet, dessen Karosserie genau $[100]$ Positionen zu spät den Karosseriebau verlässt. Wenn der Vorgriff größer als Null ist, dann kann für diesen Auftrag die assoziierte Karosserie nicht verfügbar sein, weil der Auftrag mindestens einen Takt früher in die Montage geschickt werden soll, als ursprünglich geplant. Und wenn für manche Aufträge Karosserien nicht verfügbar sind, die eine Verspätung in Positionen gleich der Anzahl der Plätze im Karosseriesortierer erleiden, dann muss die Karosserieverfügbarkeit zwingend niedriger sein, als $[BAV [\%] = F(SC) \times 100\%]$. Die von den beiden Autoren vorgestellten Berechnungsmethoden können also nur bei einer Karosserieverfügbarkeit von $[100\%]$ korrekte Ergebnisse liefern. Zum Nachweis, dass der Effekt der allgemeinen Autokorrelation auch tatsäch-

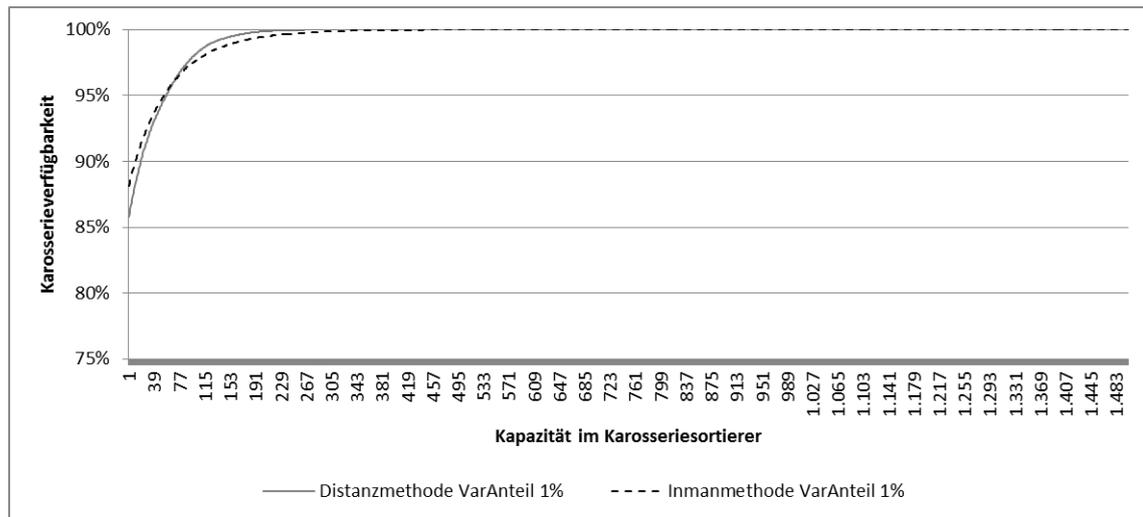


Abbildung 53: Upper-Bound der Karosserieverfügbarkeit - Methodenvergleich bei Variantenanteil 1%

lich wirksam sein kann, wird auf Abschnitt 5.4 verwiesen. Ergänzend zeigt Abbildung 55 die Ergebnisse der Inman-Methode, die erwartungsgemäß denen der Simulation ohne Berücksichtigung der Autokorrelation sehr ähneln, beziehungsweise fast identisch sind. Der Planungsfehler, der sich für ein System ergeben würde, in dem die Autokorrelation wirkt, ist dann der Anteil der nicht verfügbaren Karosserien, der nicht durch die Inman-Methode angezeigt wurde. Dieser wird erwartungsgemäß kleiner mit zunehmender Kapazität im Karosseriesortierer.

Der Effekt der allgemeinen Autokorrelation ist auch bei der distanzbasierten Methode nicht berücksichtigt, der der variantenbezogenen Autokorrelation hingegen schon. Denn es wird die Wahrscheinlichkeit berücksichtigt, dass die assoziierte Karosserie eines Vorgängerauftrags so spät im Karosseriesortierer ankommt, dass dieser Auftrag zum Ereignis der Verfügbarkeitsprüfung einen offenen Bedarf hat.¹⁶⁸

Ein weiterer Aspekt ist, dass sich aufgrund der fehlenden Ermittlung der [AGZA] nicht alle Kennzahlen ermitteln lassen, die aber für die Planung relevant sein können.¹⁶⁹

Berücksichtigung der Auftragsreihenfolge

In Abschnitt 5.1 wurde gezeigt, dass die konkrete Gestalt der Auftragsreihenfolge einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse im System der Karosserieverfügbarkeit haben kann, weil diese beispielsweise die Tauschbarkeit der Karosserievarianten beeinflusst. Inmans Methode sieht den Karosserietausch nicht vor, dementsprechend ist die fehlende Möglichkeit zur Berücksichtigung der konkreten Auftragsreihenfolge bezogen auf den Aspekt der Tauschbarkeit nicht relevant. In der distanzbasierten Methode kann eine konkrete Auftragsreihenfolge berücksichtigt werden (wie im Vergleich mit den empirischen Ergebnissen geschehen; vgl. hierzu Abschnitt 6.1.2).

¹⁶⁸Vgl. beispielsweise Abbildung 49 und Abschnitt 5.4.

¹⁶⁹Siehe zu den Kennzahlen Kapitel 7.

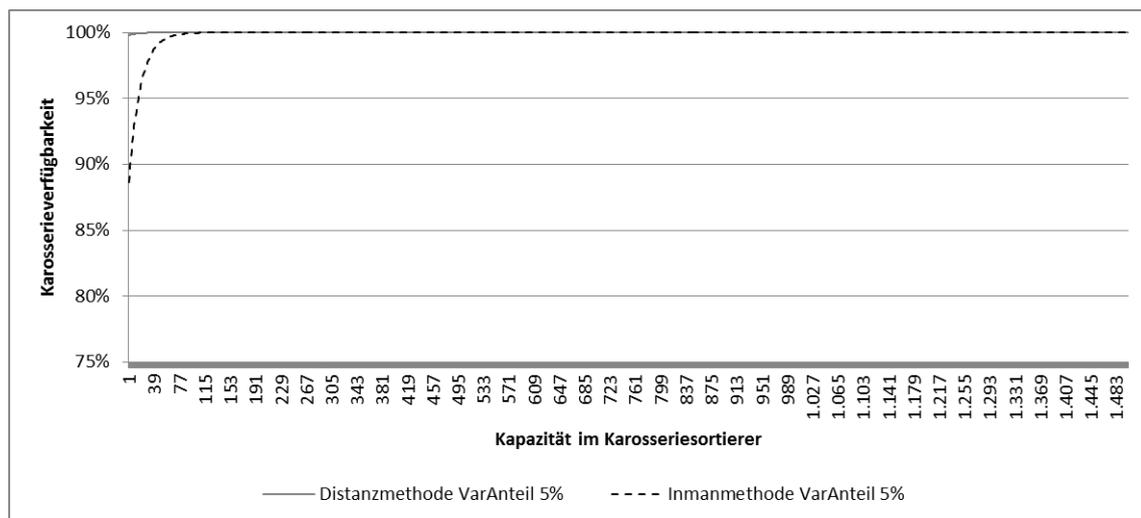


Abbildung 54: Upper-Bound der Karosserieverfügbarkeit - Methodenvergleich bei Variantenanteil 5%

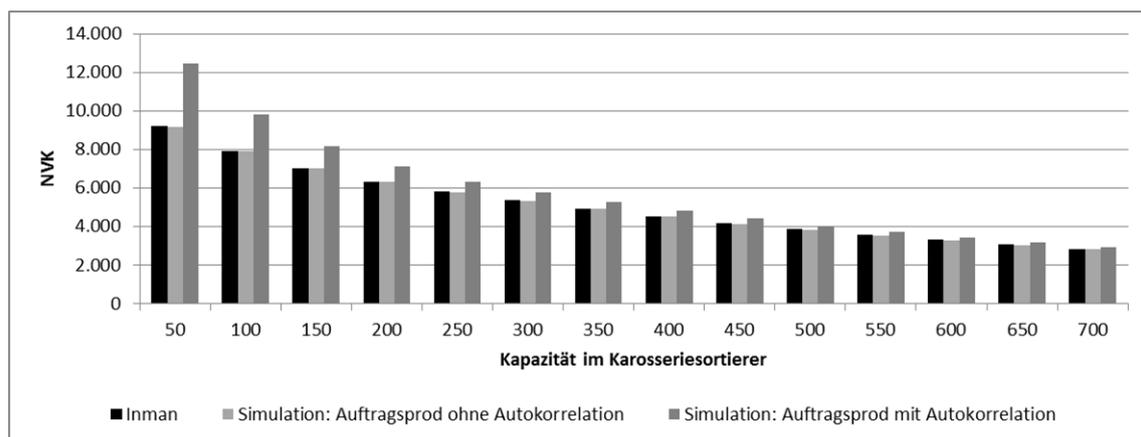


Abbildung 55: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Inman-Methode und der Simulationsergebnisse

Strukturelle Beschränktheit

In dieser Arbeit wurde ein generisches Wirkmodell aufgebaut, welches erlaubt, auch komplexere Fabrikstrukturen darzustellen. Die hier vorgestellten analytischen Verfahren, nach Inman und die distanzbasierte Methode, arbeiten mit dem Grundmodell, aus lediglich zwei Gewerken, dem Karosseriebau und der Montage. Fraglich ist, ob diese Verfahren prinzipiell auf eine differenziertere Fabrikstruktur übertragbar wären, also beispielsweise mit drei Gewerken Rohbau, Oberfläche und Montage, jeweils getrennt durch einen Karosseriesortierer und mit einem Tauschpunkt zwischen den Gewerken. Der Beantwortung dieser Frage wird im Folgenden nachgegangen:

Abbildung 56 zeigt ein Fabrikmodell mit zwei Tauschpunkten. Um die gesamte Positionsverschiebung [*OPC*], die einem Auftrag in den analytischen Modellen zugeordnet wird, ermitteln zu können, wird neben der Positionsverschiebung im Oberflächenprozess [*PC*] die tatsächliche Startreihenfolge in die Oberfläche [*ABS*] benötigt, um die Positionsverschiebungen [*SPC*] zu

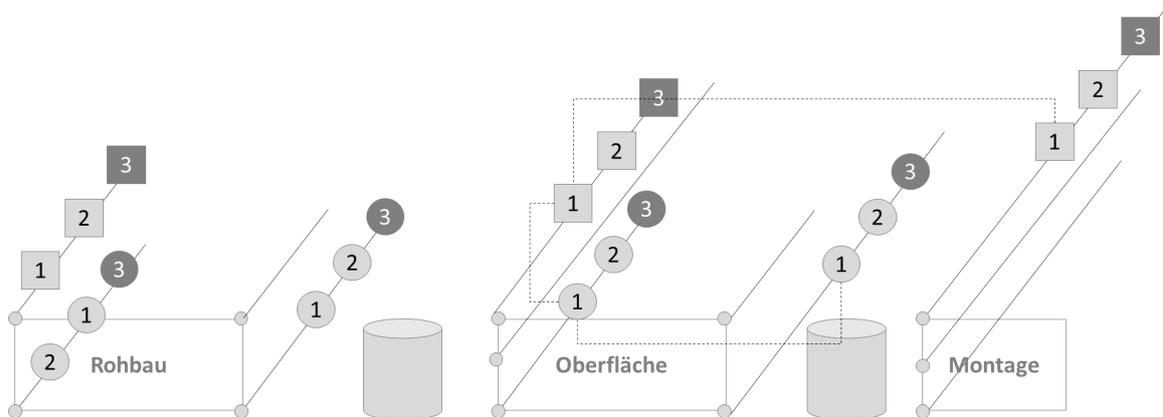


Abbildung 56: Fabrikmodell mit zwei Tauschpunkten

ermitteln. Diese müsste in einem Modell mit zwei Tauschpunkten endogen im Modell entwickelt werden, um den Einfluss des ersten Produktionsabschnitts (hier im Beispiel: der Rohbau) bis zum ersten Tauschpunkt, beziehungsweise Verfügbarkeitspunkt abzubilden. Denkbar wäre dann ein mehrschrittiger Ansatz, in dem zunächst die Karosserieverfügbarkeit für den Punkt Oberfläche-Start und die $[SPC]$ der Oberfläche berechnet werden, um danach die Karosserieverfügbarkeit für den Punkt Montage-Start zu ermitteln. Die Logik, die die erwähnten Modelle für den Punkt der Verfügbarkeitsprüfung vor Montage-Start vorsehen, kann zu diesem Zweck aber nicht ohne Weiteres auf den Punkt der Verfügbarkeitsprüfung bei Oberfläche-Start übertragen werden. Der Grund hierfür ist die Tatsache, dass in diesen Modellen die Realisierungswahrscheinlichkeit einer zweiwertigen Variable berechnet wird (verfügbar spätestens an Position $[SP]$ oder nicht verfügbar), und nicht die tatsächliche Position in der Startsequenz (der Montage). Folgendes Beispiel soll klar machen, zu welchem Problem dies führt: angenommen, es würde berechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Auftrag für die Oberfläche eine passende Karosserie aus dem Rohbau an seiner geplanten Position verfügbar hätte, dann wüsste man, mit welcher Wahrscheinlichkeit dieser Auftrag nicht später als seine geplante Position in die Oberfläche gesendet werden könnte, bspw. [80%]. Es bliebe dann eine Restwahrscheinlichkeit von [20%], dass der Auftrag später als seine geplante Position gesendet würde. Fraglich wäre dann, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Auftrag an welcher Position gesendet würde, damit die Wahrscheinlichkeitsfunktion für die $[OPC]$ der Oberfläche berechnet werden könnte. Für dieses Problem der Erzeugung einer positionsbezogenen Wahrscheinlichkeitsfunktion fehlt in den in dieser Arbeit vorgestellten Modellen ein Lösungsansatz.

Eine Reduktion einer oder mehrerer stochastischer Verteilungen im Modell auf deskriptive Parameter wie beispielsweise den Erwartungswert schließt sich nach den Untersuchungen in dieser Arbeit aus, weil es die Randbereiche der Verteilungen sind, die ursächlich für die Nicht-Verfügbarkeit von Karosserien sind.

Zusammenfassung

Die kritische Würdigung der analytischen Modellen zeigt, dass sich diese Modelle aktuell nur sehr eingeschränkt für die taktische Produktionsplanung der Karosserieverfügbarkeit eignen können.

Fabrikstrukturen mit zwei Gewerken können nicht detailliert abgebildet werden, also eignen sich die Modelle nicht für diese Anwendungsfälle. Selbst im einfachen Fabrikmodell kann die Autokorrelation nur unvollständig abgebildet werden, es fehlt also ein wichtiger Teil des Wirkmechanismus, weshalb die absolute Höhe der verfügbaren oder nicht verfügbaren Karosserien im allgemeinen nicht valide bestimmt werden kann. Die analytischen Modelle könnten demnach nur dann angewendet werden, wenn der Effekt der allgemeinen Autokorrelation vernachlässigbar gering ist, oder exogen berücksichtigt wird. Es bleibt allerdings der Vorteil der exakten Berechenbarkeit und damit die Integrierbarkeit in übergeordnete Berechnungsmodelle. Ein Einsatzgebiet könnte der Vergleich von Szenarien sein, in denen es um eine Indikation der Wirkung bestimmter Sachverhalte auf die Karosserieverfügbarkeit geht, durchaus auch im operativen Planungszeitraum; ein konkretes Beispiel könnte die Beurteilung von konkreten Reihenfolgen hinsichtlich der Tauschbarkeit der Karosserien sein.

6.2 Simulationsmodelle

Aufgrund der im Abschnitt 6.1 dargestellten Limitierung analytischer Verfahren ist für viele Fragestellungen sicherlich die Simulation das Verfahren der Wahl. In diesem Abschnitt wird das in dieser Arbeit verwendete Simulationsverfahren vorgestellt (Abschnitte 6.2.1 bis 6.2.4). Außerdem wird die Wirkung des Informationsverlusts auf die Modellvalidität im Rahmen der Modellbildung untersucht (Abschnitt 6.2.5).

6.2.1 Positionsbezogene Simulation

Alle Bewegungen, die Karosserien und Aufträge in den Simulationsmodellen in dieser Arbeit vollziehen, werden in der Dimension der Positionen in Reihenfolgen durchgeführt. Es werden keine Parameter beziehungsweise Eingangsdaten wie Taktzeiten, Arbeitszeitmodelle und ähnliches verwendet, sondern es findet ausschließlich ein Vergleich von Reihenfolgepositionen an den Objekten „Karosserie“ und „Auftrag“ statt. Eine zeitliche Dimension ist für die Simulationsexperimente im Rahmen dieser Arbeit nicht notwendig, da alle Wirkgrößen in den Positionsverschiebungen und dem Füllstand und Inhalt des Karosseriesortierers abgebildet sind:

- Verändern Karosserien oder Aufträge ihre relative Lage zueinander, findet dies in den Positionsverschiebungen Ausdruck, beispielsweise wenn Karosserien ausgeschleust werden oder Karosserien relativ zu der Position Ihres assoziierten Auftrags in der geplanten Montagesequenz früher in den Karosseriebau eingesteuert werden.
- Sind Ankunfts- und Abgangsrate aufeinanderfolgender Gewerke unterschiedlich, dann findet dies Ausdruck in der Veränderung des Füllstands des Karosseriesortierers, beispielsweise in dem Fall, in dem der Karosseriebau im Dreischicht- und die Montage im Zweischichtbetrieb arbeiten.¹⁷⁰
- Bei der Verfügbarkeitsprüfung werden nur die Karosserien betrachtet, die sich an der Position der Verfügbarkeitsprüfung im Karosseriesortierer befinden.

¹⁷⁰Vgl. Abschnitt 4.1.6.

In Abschnitt 4.2 wurde geschrieben, dass die Festlegung für welchen Auftrag an welcher Position die Verfügbarkeit geprüft wird, Teil des Lösungsverfahrens ist. An den folgenden beiden Abbildungen 57 und 58 wird das in dieser Arbeit verwendete Simulationsverfahren zur Festlegung der Position der Verfügbarkeitsprüfung und damit zur Lösung des formalen Modells vorgestellt. Der erste Schritt des Simulationsalgorithmus ist die Erzeugung der $[M]$ Fahrzeugaufträge $[a]$. Es werden in allen Simulationsstudien dieser Arbeit keine Produktionsaufträge erzeugt, sondern empirische Produktionsaufträge verwendet. Im zweiten Schritt wird für die zu produzierenden Fahrzeugaufträge eine geplante Montagereihenfolge erzeugt. Diese kann die empirische sein, beispielsweise in der „Trace Driven-Simulation“ in Kapitel 4.3, oder es werden Auftragsreihenfolgen zufällig erzeugt, beispielsweise in Kapitel 5. Da jeder Fahrzeugauftrag eine bestimmte Karosserievariante $[v]$ für die Montage benötigt, enthält die geplante Montagesequenz auch die Information über die Reihenfolge der benötigten Karosserievarianten und damit über die Variantenstruktur, beziehungsweise die Distanz gleicher Karosserievarianten. Nachdem die Fahrzeugaufträge in eine eindeutige Montagereihenfolge gebracht wurden, wird jedem Auftrag eine Positionsnummer $[SP^{PAS}]$ zugeordnet, beginnend mit $[1]$. Es wird dann jeder Position $[SP^{SCS}]$ ein Füllstand im Karosseriesortierer $[SC_P^{SP}]$ zugeordnet. Die Folge der $[SC_P^{SP}]$ in der $[SCS]$ stellt den Füllstandsverlauf des Karosseriesortierers dar. Dieser kann grundsätzlich statisch oder dynamisch sein, die Werte können empirisch abgeleitet, beispielsweise der empirische Füllstandsverlauf (dynamisch und empirisch) oder der empirische Mittelwert (statisch und empirisch), oder frei gewählt sein, beispielsweise bei Ermittlung der nicht verfügbaren Karosserien bei steigender Sortierkapazität (statisch und frei gewählt). Im nächsten Schritt wird die geplante Start-Reihenfolge des Karosseriebaus erzeugt, indem die geplante Position der Fahrzeugaufträge in der Montage um die geplante Positionsverschiebung verschoben wird. Es kann dabei passieren, dass Aufträge auf der gleichen geplanten Startposition für den Karosseriebau positioniert würden. In diesen Fällen wird zufällig entschieden, welcher Auftrag eine entsprechende höhere oder niedrigere Reihenfolgennummer erhält, so dass letztlich wieder eine eindeutige Reihenfolge mit strikt aufsteigender Reihenfolgennummer $[SP^{PBS}]$ entsteht. Alternativ könnte die geplante Start-Reihenfolge des Karosseriebaus auch auf Basis von Planungsverfahren erzeugt werden, die Abweichung $[PPC]$ zur geplanten Montagereihenfolge ergibt sich dann durch Positionsvergleich der Aufträge zwischen der geplanten Start-Sequenz des Karosseriebaus und der geplanten Montagesequenz. Im Rahmen dieser Arbeit waren die $[PPC]$ entweder die empirischen Werte oder wurden als $[0]$ angenommen. Im nächsten Schritt wird die tatsächliche Startreihenfolge des Karosseriebaus $[ABS]$ ermittelt durch Verschiebung der geplanten Startpositionen $[SP^{PBS}]$ um die Werte der $[SPC]$. Die $[SPC]$ in dieser Arbeit waren entweder die empirischen Werte, beispielsweise bei der Trace Driven Simulation, oder wurden als $[0]$ angenommen. Auch hier können sich durch die Verschiebung wieder mehrfach belegte Sequenzpositionen in der tatsächlichen Start-Reihenfolge des Rohbaus ergeben, analog der $[PBS]$ wird auch hier wieder eine eindeutige Reihenfolge durch Vergabe einer neuen Reihenfolgepositionsnummer $[SP^{ABS}]$ erzeugt. Letztlich ergibt sich die Ausgangsreihenfolge des Karosseriebaus durch Verschiebung dieser $[ABS]$ um die $[PC]$. Als $[PC]$ werden ausschließlich die empirischen Werte verwendet, die Zuordnung der $[PC]$ zu den Karosserien erfolgt entweder empirisch oder zufällig, wobei sich die Zuordnungsverfahren

unterscheiden: in einigen Studien werden aus den variantenspezifischen Positionsverschiebungen zufällig ausgewählte zugeordnet (beispielsweise spezifische Positionsverschiebungen der einzelnen Lackvarianten), in anderen gibt es keinerlei Querstruktur und damit keinerlei gezielte Zuordnung bestimmter Positionsverschiebungen zu bestimmten Varianten. Nachdem auch hier wieder Eindeutigkeit in der Reihenfolge hergestellt wurde, ergibt sich die eindeutige Ausgangsreihenfolge $[ABE]$. Diese Ausgangsreihenfolge ist identisch mit der Eingangsreihenfolge in den Karosseriesortierer, dementsprechend bestimmt diese Ausgangsreihenfolge letztendlich, welche Karosserien für welchen geplanten Montageauftrag bei gegebener Sortierkapazität verfügbar sind. Das zweite Ablaufdiagramm in Abbildung 58 zeigt den Algorithmus zur Festlegung der



Abbildung 57: Ablaufdiagramm I: Ermittlung der Positionsverschiebungen

tatsächlichen Eingangs- oder Startreihenfolge in die Montage. Da die Mechanismen, die einen bestimmten Füllstand im Karosseriesortierer in realen Produktionen erzeugen, in diesen Modellen nicht modelliert wurden, der Füllstand im Sortierer aber eine wichtige Wirkgröße im System der Karosserieverfügbarkeit ist, müssen die Daten über den jeweils gültigen Füllstand exogen gegeben sein. Es gibt für jeden realisierten Montagetak, für jede Position, einen Wert für den Füllstand im Karosseriesortierer $[SC_P^{SP}]$. Es wird für den ersten Montagetak festgelegt, dass entsprechend der $[SP^{ABE}]$ die ersten $[n = SC_P^{SP=1}]$ Karosserien im Karosseriesortierer verfügbar sind. Ist für einen Montageauftrag keine passende Karosserie im Karosseriesortierer verfügbar, dann wird dieser zurückgestellt, das heißt, dieser Auftrag wird in diesem Montagetak nicht mehr betrachtet; es wird nun aus den verbliebenen Aufträgen, die noch nicht in die Montage gesendet und für die in diesem Takt die Verfügbarkeit einer Karosserie noch nicht geprüft wurde, derjenige mit der niedrigsten $[SP^{PAS}]$ ausgewählt und es wird für diesen eine passende Karosserie gesucht. Der Vorgang wiederholt sich, bis ein Auftrag gefunden wurde, der eine passende Karosserie verfügbar hat. Im nächsten Montagetak wird wieder mit der Karosse-

rieverfügbarkeitsprüfung für den Montageauftrag mit der niedrigsten Sequenznummer $[SP^{PAS}]$ begonnen, wobei die im vorherigen Montagetakt zurückgestellten Aufträge wieder berücksichtigt werden. Der Füllstand im Karoseriesortierer beträgt $[SC_P^2]$.

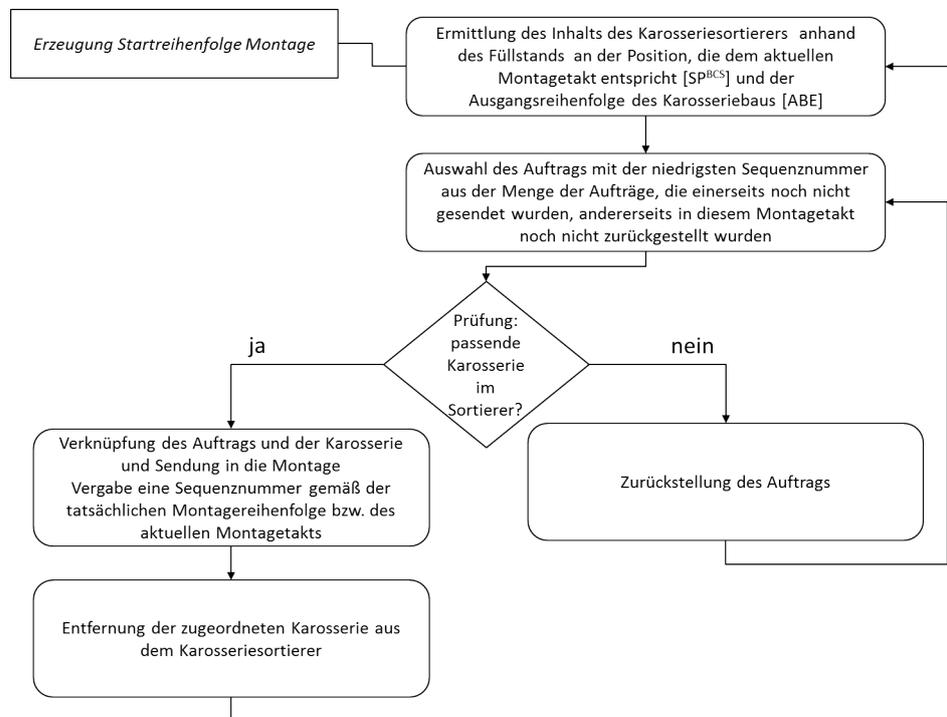


Abbildung 58: Ablaufdiagramm II: Erzeugung der Montage-Start-Reihenfolge

Die vorangegangene Beschreibung zeigt, wie hoch das Abstraktionsniveau der in dieser Arbeit durchgeführten Simulationsstudien ist. Um die Wirkung und Wechselwirkung der in Kapitel 4.1.9 gezeigten Einflußgrößen zu untersuchen, ist dieses Niveau angemessen. In tatsächlichen Planungsaufgaben wird es an verschiedenen Stellen des Modells den Bedarf geben, das System der Karosserieverfügbarkeit detaillierter darzustellen, sei es beispielsweise in der Struktur der Produktionsgewerke, der Fördertechnik oder in den Planungs- und Steuerungsalgorithmen, wie der Auftragseinplanung oder der Einsteuerung der Fahrzeugaufträge in die Montage. In den Studien dieser Arbeit wird gezeigt, dass es bestimmte Phänomene gibt und diese sichtbar werden können. Es wird aber auch konstatiert, dass diese Effekte nicht sichtbar werden müssen, sei es, weil ein Effekt in einem konkreten Modell sehr schwach wirkt, sei es, weil dieser von stärkeren Effekten überlagert wird, oder sei es, dass er durch gegenläufige Effekte ausgeglichen wird.

6.2.2 Unterscheidung Terminating und Non Terminating Simulation

Law unterscheidet zwei grundlegende Formen der Simulation, die „Terminating Simulation“ und die „Nonterminating Simulation“. Die „Terminating Simulation“ ist charakterisiert durch ein bestimmtes Ereignis, welches einen Simulationslauf beendet. Solche Ereignisse können beispielsweise sein, dass eine vorgegebene Anzahl von Aufträgen produziert oder eine vorgegebene simulierte Zeit erreicht wurde. Experimente einer „Terminating Simulation“ liefern dann unabhängig und identisch verteilte Ergebnisse, wenn die Startbedingungen für jeden Simulationslauf

identisch, die Zufallszahlenströme, die in den Experimenten genutzt werden, hingegen verschieden sind.¹⁷¹ Unter den genannten Voraussetzungen können die Simulationsergebnisse gemäß Abschnitt 6.2.4 ausgewertet werden.

Bei einer „Nonterminating Simulation“ existiert kein Ereignis, welches den Simulationslauf beendet. Insofern stellt sich die Frage nach charakteristischen Eigenschaften der Ergebnisreihen, beispielsweise nach dem Erwartungswert der „steady state distribution“. ¹⁷² Leider ist nicht ohne weiteres ersichtlich, wann sich eine Ergebnisverteilung im „steady state“ einstellt. Diesen Punkt in der Ergebnisfolge zu finden, wird das „startup problem“ oder „initial transient problem“ genannt.¹⁷³

Aufgrund des Untersuchungssettings in dieser Arbeit bietet es sich an, die Simulationsläufe in dieser Arbeit im Modus der „terminating simulation“ durchzuführen. Dies liegt darin begründet, dass die „Trace Driven Simulation“ mit einer fixen Anzahl von Produktionsaufträgen arbeitet. Wenn der letzte Auftrag produziert wurde, endet die Simulation. Da in dieser Arbeit zahlreiche Vergleiche mit der „Trace Driven Simulation“ durchgeführt wurden, und für die Simulationsexperimente die empirischen Daten verwendet wurden, wurde zum Zwecke der Konsistenz in der Simulationsmethode der Modus der „Terminating Simulation“ durchgängig angewendet. Trotzdem handelt es sich ja um sehr lange Simulationsläufe, und die Fragestellungen der „non terminating simulation“, nach Effekten der Ein- und Ausschwingphase, sind für die Beurteilung der Ergebnisse relevant und werden hier ausgeführt.

6.2.3 Einschwingphase und Ausschwingphase

Im Allgemeinen lässt sich zwischen der stochastischen Verteilungen der Simulationsergebnisse in der Einschwingphase (Transient Phase beziehungsweise Transient Distribution) und der eingeschwungenen Phase (Steady State Phase beziehungsweise Steady State Distribution) unterscheiden. Beide Phasen weisen eine stochastische Charakteristik auf, die in Abhängigkeit vom Anwendungsfall von Interesse sein kann. Betrachtet man einen stochastischen Prozess beziehungsweise eine Sequenz von Beobachtungen $[Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots]$ mit Index $[i]$ dann wird $[F_i(y | I) = P(Y_i \leq y | I)]$ definiert als die bedingte Verteilungsfunktion der Zufallsvariable $[Y_i]$, wobei $[I]$ bestimmte initiale Bedingungen repräsentiert. In der Einschwingphase wird $[F_i]$ für jedes $[i]$ und jede Konfiguration initialer Bedingungen $[I]$ unterschiedlich sein. Wenn die Verteilung $[F_i(y | I)]$ für $[i \rightarrow \infty]$ und für alle Konfigurationen der Startbedingungen $[I]$ gegen $F(y)$ konvergiert, dann heißt $[F(y)]$ die gleichgewichtige Verteilung (steady state distribution). Obgleich die Konvergenzeigenschaft nur für $[i \rightarrow \infty]$ gilt, merkt Law an, dass in der Praxis ab einem bestimmten Index $[i = k]$ alle $[Y_k, Y_{k+1}, \dots]$ approximativ gleich verteilt sind. Wenngleich die gleichgewichtige Verteilung dann nicht mehr von den initialen Bedingungen $[I]$ abhängt, so gilt dies für die Konvergenzgeschwindigkeit nicht. ¹⁷⁴

Bezogen auf die Simulation der Karosserieverfügbarkeit werden im Folgenden einige Aspekte vorgestellt, die die Existenz einer Einschwingphase theoretisch begründen. Im Anhang wird un-

¹⁷¹Vgl. Law (2015), S.497.

¹⁷²Vgl. Law (2015) S.494ff.

¹⁷³Vgl. ebd S.511.

¹⁷⁴Vgl. Law (2015), S.491ff und Welch in Lavenberg (1983), S.273ff.

tersucht, ob in den Simulationsuntersuchungen dieser Arbeit signifikante Effekte einer etwaigen Einschwing- und Ausschwingphase zu erwarten und wie diese gegebenenfalls zu berücksichtigen sind.

Zunächst wird der Karosseriebestand im Sortierer betrachtet. Der Sortierer ist zu Beginn der Simulation leer. Aufgrund der Auftragsproduktion (Built to order) gibt es im System der Karosserieverfügbarkeit zu jeder Karosserie einen assoziierten Auftrag. Man kann den Sortierer und die ganze Produktion mit Karosserien und assoziierten Aufträgen füllen, oder einfach den Montageprozess erst dann starten, wenn der gewünschte Füllstand, im Sinne einer Vorproduktion, im Karosseriesortierer erreicht ist. In beiden Fällen liegt ab dem Beginn der Produktion im Gewerk der Montage der definierte Füllstand an Karosserien im Karosseriesortierer vor, so dass sich aus den Initialbedingungen des Sortierers kein Grund für eine abweichende Verteilungsfunktion bezogen auf die Simulationsergebnisse ergibt.

Für den Tauschprozess ist der Sachverhalt anders einzuschätzen. Im eingeschwungenen Zustand hat ein fokussierter Auftrag genau dann eine Karosserie verfügbar, wenn das Angebot an Karosserien den Bedarf an Karosserien zum Zeitpunkt des Bedarfs des fokussierten Auftrags deckt oder übersteigt. Teil der Gruppe der Bedarfsträger ist der fokussierte Auftrag selbst, und sind Aufträge, die in der geplanten Sequenz eine niedrigere Sequenznummer aufweisen, und noch keine Karosserie verfügbar hatten, also unter Umständen vorrangig zu bedienen sind. In der Gruppe der Karosserieanbieter ist zum Einen der fokussierte Auftrag selbst enthalten, als auch Aufträge, die gemäß geplanter Sequenz eine höhere Sequenznummer aufweisen, also für die Sendung in die Montage noch nicht vorgesehen sind, deren Karosserien aber zu früh im Karosseriesortierer eintreffen. Betrachtet man den Beginn der Simulation, beispielsweise den ersten Auftrag der geplanten Montagesequenz mit der Sequenznummer [1], dann ist offensichtlich, dass es keine Aufträge mit kleinerer Sequenznummer geben kann, die zum Zeitpunkt der Verfügbarkeitsprüfung für den Auftrag mit Sequenznummer [1] einen Bedarf entfalten können. Insofern tragen die ersten Aufträge der Sequenz kein Tauschrisiko. Betrachtet man das Ende der Simulation, wenn diese mit einer fixen Anzahl von Aufträgen $[M]$ durchgeführt wird, wie beispielsweise bei einer Trace Driven Simulation, und fokussiert den letzten Auftrag der geplanten Montagesequenz mit der Sequenznummer $[M]$, kann es keine nachfolgenden Aufträge mit höherer Sequenznummer geben, die unter Umständen eine Karosserie bereitstellen können. In Modus einer „Non Terminating Simulation“, die kein definiertes Ende aufweist, gibt es keine Ausschwingeffekte. In einer „Terminating Simulation“ sind die letzten Aufträge benachteiligt bezüglich der Chance aus dem Tauschprozess. Aus diesen Überlegungen bezüglich des Tauschprozesses zu Beginn und zum Ende der Simulation, ergibt sich, dass von der gleichgewichtigen Verteilungsfunktion abweichende Verteilungen in der Einschwingphase und gegen Ende der Simulation möglich sind.

Zuletzt werden noch die Positionsverschiebungen betrachtet. Die Gruppe der Positionsverschiebungen teilt sich in positive und negative Verschiebungen, also Verzögerungen und Beschleunigungen. Zu Beginn der Simulation, können negative Positionsverschiebungen, also Beschleunigungen nur eingeschränkt realisiert werden, da es noch keine oder nur wenige Vorgängerkarosserien gibt. Würde beispielsweise die assoziierte Karosserie des Auftrags mit der Nummer eins in der Startsequenz des Karosseriebaus eine Positionsverschiebung von $[-50]$ zugewiesen bekommen,

könnte dieser Wert nicht umgesetzt werden, da es noch keine Vorgängerkarosserien gibt. Diese Karosserie könnte im frühesten Fall den Karosseriebau an erster Position verlassen. Verzögerungen können hingegen zu Beginn der Simulation vollständig umgesetzt werden. Gegen Ende der Simulation können die Verzögerungen nicht mehr uneingeschränkt realisiert werden. Betrachtet man die assoziierte Karosserie des letzten Auftrags in der Startsequenz des Karosseriebaus, dann ist offensichtlich, dass diese an keiner späteren Position als der letzten realisiert werden kann. Bezüglich der Positionsverschiebungen werden die Ergebnisse der Karosserieverfügbarkeit zu Beginn der Simulation also vergleichsweise schlechter sein, da nur die Verzögerungen uneingeschränkt umgesetzt werden können, gegen Ende der Simulation vergleichsweise besser, weil nur noch die Beschleunigungen uneingeschränkt umgesetzt werden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unter den oben beschriebenen Bedingungen die Einflussgrößen „Tauschprozess“ und „Positionsverschiebungen“ jeweils zu Beginn und Ende der Simulation entgegengesetzte Effekte mit sich bringen, also eine Aussage ohne die Stärke der einzelnen Effekte zu kennen nur für den konkreten Untersuchungsfall gemacht werden kann.

Die Modelle in dieser Arbeit wurden bezüglich der Wirkung von Ein- und Ausschwingeffekten untersucht, die Ergebnisse zeigen, dass es keine signifikanten Ein- und Ausschwingeffekte gibt und die Daten vollständig verwendet werden können.¹⁷⁵

6.2.4 Auswertung der Simulationsergebnisse

Dieser Abschnitt dient dem Zweck, eine geeignete Methode zu beschreiben, mit der Simulationsergebnisse analysiert werden können um der Problematik der strukturellen Unsicherheit zu begegnen.¹⁷⁶ Dafür werden allgemein formulierte Vorgehensweisen aus der Literatur auf den Anwendungsfall der Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit übertragen. Es wird damit die theoretische Grundlage der Vorgehensweise in den für diese Arbeit durchgeführten Simulationsstudien beschrieben. Die hier skizzierten Überlegungen können über den Beschreibungs- und Dokumentationszweck für diese Arbeit hinaus der praktischen Orientierung bei der Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit dienen.

Den Kern der hier thematisierten Problematik, der sich im Zusammenhang mit der Nutzung von Ablaufsimulationsmodellen ergibt, beschreibt Law treffend folgendermaßen: „[...] a simulation is a computer-based statistical sampling experiment. Thus if the results of a simulation study are to have any meaning, appropriate statistical techniques must be used to design and analyze the simulation experiments“.¹⁷⁷ Im Rahmen der taktischen Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit ist es im Allgemeinen das Ziel, Aussagen über das zukünftige System zu treffen, die den zukünftigen Ergebnissen so nahe kommen, wie dies erforderlich ist. Diese Aussagen werden auf Basis von Planungsmodellen getroffen, die hinreichend valide sein sollten. Diese Planungsmodelle sind eine Abbildung eines nicht existenten, weil zukünftigen Systems. Die sich daraus ergebende informatorische Unsicherheit bezüglich des zukünftigen Systems ist unvermeidbar und im Planungsprozess zu berücksichtigen. In einem Simulationsmo-

¹⁷⁵Für die Details der Untersuchung siehe Anhang.

¹⁷⁶Vgl. zu Formen der Unsicherheit Kapitel 1.2.

¹⁷⁷Law (2015), S.488.

dell als Planungsmodell, welches stochastische Elemente aufweist, liegt neben der planungsrelevanten informatorischen Unsicherheit zwangsläufig auch strukturelle Unsicherheit vor, weil mindestens eine Variable des Modells eine Zufallsvariable ist. Die Simulationsergebnisse sind somit unweigerlich auch Zufallsvariablen beziehungsweise Zeitreihen, weil diese Realisationen eines stochastischen Prozesses sind. Um Aussagen über die wahren Ergebnisse des Simulationsmodells zu erzeugen, ist es im Allgemeinen nicht praktikabel, alle möglichen Ergebnisse eines Simulationsmodells zu betrachten. Deshalb sind auf Basis von Stichproben bestimmte statistische Parameter der relevanten Zufallsvariablen des Simulationsmodells zu schätzen, in der Hoffnung (und mit statistischer Absicherung), dass die wahren Parameter hinreichend nahe bei den geschätzten liegen, und damit Aussagen über das Verhalten des Systemmodells (und darauf aufbauende Planungsergebnisse) mit hinreichender Wahrscheinlichkeit zutreffen.

Wie Law anmerkt, ist eine notwendige Voraussetzung für die klassische Schätzung von Parametern bestimmter Zufallsvariablen, wie Erwartungswert und Varianz, dass die Realisationen dieser Zufallsvariablen unabhängig und identisch verteilt sind.¹⁷⁸ Für Zeitreihen, die eine Folge von Realisationen von Zufallsvariablen darstellen, gilt, dass für die Schätzung von Erwartungswert und Autokovarianzfunktion des zugrunde liegenden stochastischen Prozesses, dieser zumindest schwach stationär sein muss; eine Voraussetzung, die im Allgemeinen bei Simulationsläufen und den daraus resultierenden Zeitreihen nicht als gegeben angesehen werden kann. Ein stochastischer Prozess heißt schwach stationär, wenn dieser

- Mittelwertstationär: $E(Y_t) = \mu$
- Varianzstationär: $Var(Y_t) = \sigma^2$
- Kovarianzstationär: $Cov(Y_{t+\tau}, Y_t) = \gamma_t$

ist.¹⁷⁹ Das heißt für das in dieser Arbeit behandelte System der Karosserieverfügbarkeit, dass, wenn sicher wäre, dass der stochastische Prozess der Ergebnisse schwach stationär ist, man die oben genannten Parameter aus einem Simulationslauf schätzen könnte. Wenn dies nicht sicher wäre, könnte man Testverfahren durchführen, um zu prüfen, ob die Nullhypothese der Stationarität beziehungsweise Nicht-Stationarität verworfen werden muss.¹⁸⁰

Unterstellt man Nicht-Stationarität in der Ergebnisverteilung eines Simulationslaufs, dann ergeben sich für die Parameterschätzung grundsätzlich zwei Ansätze:

1. Anwendung von Schätzverfahren, für die Stationarität keine notwendige Voraussetzung ist
2. Durchführung einer hinreichenden Anzahl von Simulationsläufen (independence over runs).¹⁸¹

Auf den ersten Ansatz soll hier nicht weiter eingegangen werden. Beim zweiten Verfahren, der „independence over runs“, geht man davon aus, dass durch eine hinreichend große Anzahl von

¹⁷⁸Vgl. Law (2015), S.488ff. und zur Unabhängigkeit und identischen Verteilung von Zufallsvariablen siehe beispielsweise Fahrmeier et.al.(2007), S.238ff. und S.313ff.

¹⁷⁹Vgl. zur Stationarität, auch strengen Stationarität, Schlittgen (2012), S.13 oder Neusser (2006), S.12ff.

¹⁸⁰Vgl. auch Kapitel 4.3.

¹⁸¹Vgl. Law (2015), S.489ff.

Simulationsläufen unabhängig und identisch verteilte Realisationen von Zufallsvariablen erzeugt werden können, so dass die klassischen Methoden der Parameterschätzung anwendbar sind (nicht die Verfahren der Zeitreihenstatistik).¹⁸² Diese Aussage soll im Folgenden kurz reflektiert werden: Unabhängigkeit zwischen Simulationsläufen ist offensichtlich gegeben, wenn es keinerlei Wirkungsverbindung zwischen den Läufen gibt, wenn also die Ergebnisse unterschiedlicher Läufe sich paarweise in keiner Weise beeinflussen. Die identische Verteilung der Zufallsvariablen kann nur gegeben sein, wenn alle strukturellen Elemente identisch sind, und außer den Zufallszahlenströmen keine weiteren Parameter des Simulationsmodells verändert werden, d.h. die Startbedingungen, die Parameter der verwendeten Verteilungen und die Modellstruktur müssen über alle Läufe stabil sein. Das hieße, würden in einem Lauf die gleichen Zufallszahlenströme wie in einem anderen Lauf verwendet werden, müssten die Ergebnisse der beiden Läufe identisch sein. Es sei hier angemerkt, dass die Verteilungen unter den o.g. Voraussetzungen zwar identisch, aber weiterhin unbekannt sind.

Die Zeitreihe der Ergebnisse eines Simulationslaufs sei definiert als $[Y_i]$ mit $[i \in \mathbb{N}]$, die $[y_{j,i}]$ mit $[j \in \{1, \dots, m\}]$ bilden die Realisationen der $[Y_j]$ des zugrunde liegenden stochastischen Prozesses im Simulationslauf $[i]$. Es ergibt sich dann über $[n]$ Simulationsläufe mit $[m]$ Zufallsvariablen je Lauf die folgende Matrix der Realisationen der Zufallsvariablen:

$$\begin{array}{cccccc} y_{1,1} & \cdots & y_{j,1} & \cdots & y_{m,1} & \\ \vdots & \ddots & \dots & \ddots & \dots & \\ y_{1,i} & \cdots & y_{j,i} & \cdots & y_{m,i} & \\ \vdots & \ddots & \dots & \ddots & \vdots & \\ y_{1,n} & \cdots & y_{j,n} & \cdots & y_{m,n} & \end{array}$$

Davon ausgehend, dass $[n]$ eine hinreichend große Anzahl der Simulationsläufe ist, gilt beispielsweise

$$\bar{y}_j(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{j,i}$$

als ein erwartungstreuer Schätzer des Erwartungswerts $[E(Y_j)]$.

Für $[n]$ wird in dieser Arbeit im Allgemeinen der Wert $[n = 30]$ gesetzt, das heißt, es werden für jedes Experiment $[30]$ Simulationsläufe mit jeweils unterschiedlichen Zufallszahlenströmen, aber sonst gleichen Parametern und gleicher Struktur durchgeführt. Als Kennzahl zum Vergleich unterschiedlicher Modelle wird die Anzahl der nicht verfügbaren Karosserien verwendet. Die kumulierte Anzahl der nicht verfügbaren Karosserien ist dann $\left[NVK_M^i = \sum_{a=1}^M \left(1 - BAV_{a,i}^{SPBCS,I} \right) \right]$ für jede Beobachtung $[i \in \{1, \dots, 30\}]$ und für die Gesamtanzahl der untersuchten Aufträge $[M]$. Die Schätzung des Erwartungswert erfolgt dann mit $\left[\overline{NVK}_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NVK_M^i \right]$.

Ist die Variation einer bestimmten Wirkgröße zu untersuchen, dann wird ein weiterer Index eingesetzt, beispielsweise für unterschiedlichen Auftragsreihenfolgen. Hierfür wird als Index der Reihenfolge $[RF]$ definiert, mit $[RF \in \{1, \dots, R\}]$. Die kumulierte Anzahl der zurückgestellten Karosserien ist dann $\left[NVK_M^{RF,i} = \sum_{a=1}^M \left(1 - BAV_{a,i,RF}^{SPBCS,I} \right) \right]$ für jede Beobachtung

¹⁸²Vgl. Law (2015), S.489.

$[i \in \{1, \dots, 30\}]$ und jeweils für die Gesamtanzahl der untersuchten Aufträge $[M]$. Als Kennwert einer speziellen Reihenfolge wird die Variable $\overline{NVK}_M^{RF} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NVK_M^{RF,i}$ verwendet.

Grundsätzlich können verschiedene Indikatoren für die Qualität der Karosserieverfügbarkeit verwendet werden. Die Auswahl hängt ab vom Untersuchungsdesign, im realen Planungsfall von der Zielstellung. In dieser Arbeit werden im Wesentlichen zwei Kenngrößen verwendet, zum einen die kumulierte Anzahl nicht verfügbarer Karosserien, zum anderen die nicht verfügbare Anzahl der Karosserien in einem definierten Abschnitt der Produktionssequenz.

Ziel der hier durchgeführten Simulationsstudien ist es nicht, den Grad zu ermitteln, mit dem ein bestimmter Zielwert erreicht wird, oder nicht, sondern lediglich festzustellen, ob eine bestimmte Ursache eine signifikante Wirkung entfaltet beziehungsweise entfalten könnte. Ferner spielt die Trace Driven Simulation und der hierbei verwendete empirische Datensatz eine wichtige Rolle in dieser Arbeit. Es wurde oben bereits erläutert, dass aus diesem Grund die Simulationsform der Terminating Simulation der Non-Terminating Simulation zum Zwecke der besseren Vergleichbarkeit vorgezogen wurde. Wenn die Anzahl der in der Simulation durchgeführten Produktionstakte in jeder Beobachtung, beziehungsweise in jedem Simulationslauf, identisch ist, dann ist auch die Anzahl der kumulierten Ergebniswerte identisch. Deshalb stellt die kumulierte Anzahl nicht verfügbarer Karosserien einen gut vergleichbaren Indikator für die Anzahl und Verteilung der Risikokarosserien in einem Simulationslauf dar. Da es sich um eine absolute Größe handelt, lassen sich auch geringere Veränderungen ablesen. Ferner eignet sich die grafische Darstellung der kumulierten Wertereihe sehr gut, um Dynamik in der Ergebnisverteilung feststellen zu können. Es sei hier auf den geschwungenen Kurvenverlauf der Trace Driven Simulation verwiesen (siehe Abbildung 27).

6.2.5 Modellbildung und Informationsverlust - über das Problem der Abstraktion und der Idealisierung bei der Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit

Grundsätzlich müssen für die Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit Annahmen über das Verhalten der relevanten Größen des realen Systems in der Zukunft getroffen und in einem Modell abgebildet werden. Im Zuge der Modellierung soll durch Abstraktion das Wesentliche vom Unwesentlichen getrennt werden, durch die Idealisierung das Modell vereinfacht werden. Dies führt dazu, dass im Planungsmodell, gegenüber dem realen System ein gewisses Maß an Information verloren geht, beziehungsweise nicht berücksichtigt wird.¹⁸³ In diesem Sinne wird beispielsweise bei Inman das zeitbezogene Verhalten der Karosserien durch statistische Positionsverschiebungsprofile abgebildet.¹⁸⁴ Die Idealisierung im Zuge der Modellierung ist mit Bedacht durchzuführen, Bandow et.al. schreiben hierzu: „Als Idealisierung wird im Allgemeinen eine Vereinfachung bezeichnet, die so weit geführt werden kann, als das vereinfachte System noch den Anforderungen der Aufgaben genügt“.¹⁸⁵ Dem Vorgang der Modellierung folgen die Schritte der Modellverifikation und der Modellvalidierung, die sicherstellen, dass das Modell zweckorientiert

¹⁸³siehe hierzu auch Abschnitt 3.1.

¹⁸⁴siehe beispielsweise Inman (2003).

¹⁸⁵Bandow et.al.(2010), S.18.

eingesetzt werden kann.¹⁸⁶

Eine grundsätzliche Frage, die sich vor dem dargestellten Hintergrund stellt, ist, inwieweit im Rahmen der Modellierung vorgenommenen Abstraktions- und Idealisierungsschritte die strukturelle Validität eines Planungsmodells des Systems der Karosserieverfügbarkeit beeinträchtigen. Betrachtet man den Vorgang der Abstraktion und der Idealisierung aus der Perspektive der Datenstruktur, dann führt jener im Allgemeinen dazu, dass ein Teil der empirischen Struktur aufgegeben wird, beziehungsweise nicht berücksichtigt wird; das die Quer- und Längsstruktur für die Ergebnisse im System der Karosserieverfügbarkeit relevant sind, wurde bereits gezeigt (siehe beispielsweise Kapitel 5). Erwähnt wurde aber bereits auch, dass der „Zweckorientierte Einsatz“ für die Beurteilung der Validität maßgeblich ist; dementsprechend ist der Verwendungszweck des Modells stets zu berücksichtigen. Die Relevanz der Abweichung der Ergebnisse durch Verlust in der Datenstruktur ist hinsichtlich der notwendigen Genauigkeit zu bewerten.

In der Literatur wurden im Rahmen der dargestellten Modelle verschiedene Formen der Abstraktion und Idealisierung angewendet, jede Form ist vor dem Hintergrund des jeweiligen Verwendungszwecks des Modells anders zu beurteilen. Viele Aspekte wurden in den vorangegangenen Kapiteln bereits dargelegt, es soll deshalb in diesem Abschnitt nicht erneut auf die Anwendung in der Literatur explizit eingegangen werden.

Im Folgenden werden in einer Simulationsstudie einige Arten der Abstraktion und Idealisierung auf ihre Wirkung bezüglich der Modellvalidität untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass ein Planungsmodell für die absolute Auslegung des Systems verwendet werden soll, Prozess- und Infrastrukturparameter sollen also explizit bestimmt werden. Deshalb ist es relevant, wie hoch die absolute Anzahl nicht verfügbarer Karosserien im System ist. Es wird ferner davon ausgegangen, dass Effekte der gemeinsamen Wirkung von Quer- und Längsstruktur, wie in Abschnitt 5.5 dargestellt, modellexogen berücksichtigt werden. Als Referenz wird das aus Abschnitt 5.5 bekannte Modell gewählt, in welchem die empirische Längsstruktur vollständig aufgelöst wurde, die Querstruktur hingegen erhalten blieb: der Zusammenhang von Auftrag, also Karosserievariante, Bestand im Sortierer und Positionsverschiebung entspricht der empirischen Struktur. Dieses Szenario ist als Referenz geeignet, weil die Effekte, die sich aus der zeitlichen Häufung von Risikokarosserien ergeben, wie sie beispielsweise im „Trace-Driven-Szenario“ auftreten, nicht vorhanden sind. Trotzdem ist die empirische Querstruktur erhalten, so dass man die schrittweise Abstraktion von Eingangsgrößen experimentell untersuchen kann. Weil die Auftragsreihenfolge zufällig ermittelt wird, und zahlreiche Experimente durchgeführt werden, ist von einem systematischen Effekt durch die Längsstruktur der Auftragsreihenfolge nicht auszugehen. Die Erwartung gegenüber den Ergebnissen der Simulationsexperimente ist nach den bisherigen Überlegungen klar: durch Abstraktion und Idealisierung wird das Zusammentreffen ungünstiger Faktoren im System der Karosserieverfügbarkeit seltener, die Anzahl der Risikokarosserien sinkt, und demnach auch die Anzahl nicht verfügbarer Karosserien.

Auch für diese Simulationsstudie wird erneut $[\overline{NVK}_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NVK_M^i]$, als Indikator für die Ergebnisse des Modellsystems verwendet (siehe hierzu Abschnitt 6.2.4). Experiment 4 stellt das Referenzmodell dar. Hier werden die empirischen Daten in der Querstruktur erhalten, die Längs-

¹⁸⁶Vgl. Bandow (2010), S.19.

Exp.	Sortierkapazität	Positionsverschiebungen	Mittelwert kumulierte NVK	Standardabweichung
1	Mittelwert	Variantenspezifisch je Lackvariante	1.225	34
2	Mittelwert	Variantenspezifisch je Karosserievariante	1.433	30
3	Mittelwert	Auftragsspezifisch	1.435	27
4	Auftragsspezifisch	Auftragsspezifisch	1.630	32

Tabelle 5: Ergebnisse bei Auflösung von Quer- und Längsstruktur

struktur wird durch zufällige Reihenfolgebildung aufgelöst. In Experiment 3 wird in einem ersten Schritt anstelle des auftragsbezogenen, empirischen Füllstands im Karosseriesortierer der Mittelwert des empirischen Verlaufs verwendet: $[SC^* = 454]$. Durch die Verwendung eines Skalars anstelle der auftragsspezifischen empirischen Werte werden zwei Idealisierungsschritte gleichzeitig vollzogen: der empirische Bezug von Auftrag und Bestand im Karosseriesortierer wird aufgelöst und es wird anstelle der empirischen Werteverteilung ein einzelner „repräsentativer“ Wert gesetzt, der Mittelwert. Falls ein Zusammenhang von hoher Positionsverschiebung, seltener Karosserievariante und geringem Bestand im Karosseriesortierer im Referenzmodell bestand, so wird dieser aufgelöst, ein Vorbote dafür, dass die Anzahl der nicht verfügbaren Karosserien sinken wird. Ferner werden durch die Verwendung des Mittelwerts ausschließlich moderate Werte des Karosseriebestands zugeordnet. Betrachtet man den Karosseriebestand im Sortierer als Regler für die Sensitivität der Aufträge gegenüber seltenen Karosserievarianten in Verbindung mit hohen Positionsverschiebungen, so ist festzustellen, dass eine besondere Sensitivität bestimmter Aufträge nicht mehr besteht. Die Ergebnisse des Simulationsexperiments sprechen nicht gegen die Thesen: Vergleicht man den Mittelwert der kumulierten $[\overline{NVK}_M]$, dann wird deutlich, dass dieser Schritt erwartungsgemäß zu einem erheblichen Informationsverlust in den Daten geführt hat. Bezogen auf das Referenzszenario gehen durch die Ersetzung der differenzierten und auftragsspezifischen Information über den Karosseriebestand durch deren Mittelwert ca. [12%] der $[\overline{NVK}_M]$ verloren.

In Experiment 2 wird der nächste Idealisierungsschritt vollzogen: die auftragsspezifischen Positionsverschiebungen werden ersetzt durch karosserievariantenspezifische Verteilungen. Die karosserievariantenspezifische Verteilung berücksichtigt sowohl Merkmale des Rohbaus, als auch der Lackfarbe. Klar ist, dass bei einer solchen Differenzierung für bestimmte seltene Verteilungen nur eine sehr kleine Datenmenge vorliegt. Betrachtet man die Ergebnisse des Experiments, so stellt man fest, dass sich der Mittelwert der $[\overline{NVK}_M]$ gegenüber Experiment 3 praktisch nicht verändert, die Standardabweichung nimmt allerdings leicht zu, was dafür spricht, dass die Ergebnisse etwas weiter streuen. Der Schluss der sich aus dieser Beobachtung ziehen lässt ist,

dass in diesem Fall, bei zufälliger Bildung der Auftragsreihenfolge, die Zuordnung der Positionsverschiebung über karosserievariantenspezifische Wahrscheinlichkeitsverteilungen im Mittel zur Bildung der gleichen Anzahl von Risikokarosserien führt, im Vergleich mit der auftragsspezifischen Zuordnung.

In Experiment 1 wird erneut ein Stück Querstruktur aufgegeben, anstelle von karosserievariantenspezifischen Verteilungen werden lackvariantenspezifische Verteilungen verwendet. Das Ergebnis zeigt einen erheblichen Verlust an nicht verfügbaren Karosserien. Bezogen auf die Experimente 2 und 3 reduziert sich die Anzahl der $[NVK]$ um etwa [15%]. Dies zeigt, dass durch die lackvariantenspezifische Zuordnung deutlich weniger Risikokarosserien entstehen. Die Lackvariante korreliert demnach weniger stark mit der Höhe der Positionsverschiebung, als die Karosserievariante. Bezogen auf das Experiment 4 liegt der kumulierte Effekt aus den Experimenten 1 und 3 bei etwa [25%].

Zusammenfassung

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Reihe von Simulationsexperimenten zeigt, dass der durch Abstraktion und Idealisierung im Rahmen der Modellbildung induzierte Verlust an Wirkstruktur erhebliche Auswirkung auf die Validität des Planungsmodells haben kann. Besonders deutlich wird dies im Vergleich zwischen dem Referenzmodell und dem Modell, in dem der Mittelwert des empirischen Bestandsverlaufs im Karosseriesortierer den empirischen Verlauf und die lackvariantenspezifischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Positionsverschiebungen die auftragsspezifische Zuordnung ersetzen. Hätte man unter den Modellannahmen des Experiments 1 eine Planung mit vollkommener Information über die Zukunft durchgeführt (i.e. Experiment 4), dann wäre die Karosserieverfügbarkeit deutlich zu optimistisch angenommen worden. Fraglich ist weiterhin, ob eine Planungsungenauigkeit diesen Maßes im konkreten Planungsfall mit den konkreten Zielen für das System der Karosserieverfügbarkeit akzeptabel ist, oder nicht. Es ist klar, dass es nicht das Ziel von Planungsmodellen ist, empirische Daten vollkommen „nachzufahren“ oder „nachzuproduzieren“. Das soll mit der Vorstellung dieser Untersuchungsergebnisse auch nicht impliziert werden. Vielmehr geht es darum, den Blick auf mögliche reale Zusammenhänge und deren mögliche Effekte zu schärfen, damit eine bewusste Planung möglich wird. Ein bestehendes System der Karosserieverfügbarkeit, welches Gegenstand von Planungsaktivitäten ist, könnte auf solche Zusammenhänge untersucht werden, für zukünftige Systeme könnten Annahmen über diese Zusammenhänge getroffen werden. Die Nichtberücksichtigung ist im Falle der Existenz der Zusammenhänge im Allgemeinen keine valide Lösung für das Planungsproblem.

7 Zielsystem

Im Kontext der robusten Planung des Systems der Karosserieverfügbarkeit ist das System der Ziele für die robuste Planung selbst und die operative Steuerung ein wichtiger Aspekt. Denn das Zielsystem ist der Bezugspunkt für die Ergebnisse der Planung und Steuerung des Systems. Es werden im Folgenden Sachverhalte untersucht, die bei der Formulierung der Ziele für die taktische Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit zu berücksichtigen sind. Die Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit sind natürlich nicht unbedingt stabil, aus der Perspektive der Datenreihen können diese eine Längsstruktur aufweisen. Beispielhaft wird diese deutlich an den Daten der realen Produktion, die für die Trace Driven Validierung herangezogen wurden.¹⁸⁷ Die nachfolgenden Statistiken zeigen dies noch einmal deutlich: es werden erneut über die Positionen Einheiten von je $[z = 1000]$ aufeinanderfolgenden Aufträgen in der geplanten Montagesequenz gebildet. Diese Einheiten entsprechen jeweils in etwa einem Produktionstag. Tabelle 6 zeigt die Anzahl der 1000er Einheiten, die wiederum eine bestimmte Anzahl $[NVK]$ aufweisen, sowie die kumulierte relative Häufigkeit. Die mittlere Anzahl $[NVK]$

Klasse [Anzahl NVK in 1000]	Anzahl	relative Häufigkeit kumuliert
0-9	17	22%
10-19	23	51%
20-29	19	75%
30-39	7	84%
40-49	3	87%
50-59	7	96%
60-69	3	100%

Tabelle 6: Histogramm der empirischen NVK in Abschnitten von je 1000 Aufträgen

beträgt etwa 22 Karosserien, die Standardabweichung liegt bei etwa 17 Karosserien, letztere ist also annähernd so hoch, wie der Mittelwert selbst, was für eine starke Streuung der Daten spricht. Abbildung 59 bestätigt dies. Diese Abbildung zeigt die Anzahl der 1000er Positionsbereiche, deren absolute Anzahl der $[NVK]$ in dem definierten Klassenbereich liegen. Der graue Balken markiert die Klasse, die den Mittelwert enthält. Es wird deutlich, dass die Verteilung der Ergebnisse sehr breit ist. Wie eine solche Schwankung in den Ergebnissen zu bewerten ist,

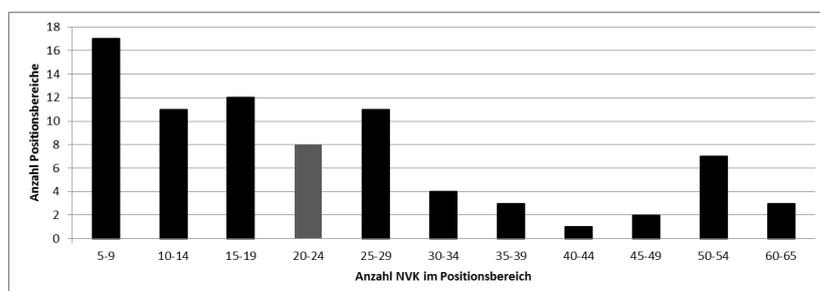


Abbildung 59: Anzahl NVK je 1000 Aufträge in den empirischen Ergebnissen

hängt von der Ausgestaltung des Zielsystems ab, dort muss die geforderte Qualität der Prozes-

¹⁸⁷ vgl. beispielsweise Abbildung 27.

sergebnisse definiert sein.

Kennzahlen im Zusammenhang mit dem System der Karosserieverfügbarkeit

Das Wesen der Produktion mit stabiler Auftragsfolge ist, dass eine geplante Reihenfolge von Aufträgen umgesetzt wird, mit einer definierten Umsetzungsqualität. Diese Umsetzungsqualität wird im Folgenden Reihenfolgegüte genannt. Es ist gerade die Reihenfolgegüte, aus der die Zielgrößen für die Karosserieverfügbarkeit abzuleiten sind, denn die Karosserieverfügbarkeit geht als Wirkgröße in die Umsetzung der geplanten Auftragsfolge ein. In der Literatur finden sich bereits Kennzahlen zur Reihenfolgegüte. Im Kontext der Produktionssteuerungsmethode „Perlenkette“ definieren Weyer und Spath für die Reihenfolgegüte die folgende Kennzahl:¹⁸⁸

$$RFG = \left[P^{Max} - P^{Min} + 1 - \left(\sum LV + \sum LN + \sum V + \sum N \right) \right] / [P^{Max} - P^{Min} + 1]$$

Hierbei bezeichnet $[P^{Max} - P^{Min}]$ den Bereich der Auftragsreihenfolge, für den der Kennzahlenwert ermittelt wird. $[P]$ steht hier für die Reihenfolgeposition des Auftrags.¹⁸⁹ Da die Kennzahl für einen Produktionstag ermittelt werden soll, bezeichnet $[P^{Max} - P^{Min}]$ die Anzahl der Aufträge, die am betrachteten Tag produziert wurden. Der Term $[\sum LV + \sum LN + \sum V + \sum N]$ fasst die Positionsverletzungen zusammen, die im Positionsbereich von $[P^{Max} - P^{Min}]$ entstanden sind: Hierbei bezeichnen $[N]$ und $[V]$ die Aufträge, die vorgezogen ($[V]$), beziehungsweise die zu spät ($[N]$) in die Montage gesendet werden. $[LN]$ und $[LV]$ bezeichnet die Lücken in der geplanten Reihenfolge, die dadurch entstehen, dass ein Auftrag seine ursprünglich geplante Position verlässt, sei es aufgrund eines Vorgriffs, oder eines Nachgriffs. Die Autoren berücksichtigen mit dieser Mess- und Berechnungsmethode, dass eine Reihenfolgeverletzung immer zu zwei Aktivitäten in der Produktion führt: der die Reihenfolge verletzende Auftrag wird an einer anderen Reihenfolgeposition produziert und an der ursprünglichen Reihenfolgeposition wird ein anderer Auftrag produziert. Dies kritisiert Meissner und definiert eine Kennzahl der „Reihenfolgentreue“:¹⁹⁰

$$RFT = 1 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Verletzungen_i \right)$$

Er entfernt sich von der Idee, einen Produktionstag als Basis für die Anzahl der untersuchten Aufträge zu verwenden, sondern definiert allgemeiner $[n]$ als die Anzahl der betrachteten Aufträge und setzt die Anzahl der betrachteten Aufträge, bei welchen eine Reihenfolgeverletzung festgestellt wurde, ins Verhältnis. Welche Sachverhalte als Verletzung zu werten sind, lässt er offen als vom Einsatzzweck der Kennzahl abhängig.

Diese beiden Kennzahlenvorschläge stehen hier beispielhaft für eine Klasse von Kennzahlen, die die allgemeine Qualität des Prozesserfolgs beschreiben, hier die Einhaltung der Soll-Reihenfolge

¹⁸⁸Vgl. Weyer, Spath (2001), S.118.

¹⁸⁹Die Autoren schreiben von der „Perle“ des Produktionstags mit der höchsten bzw. niedrigsten Reihenfolgenummer. Im Aufsatz wird es nicht explizit erwähnt, es ist aber davon auszugehen, dass die Autoren mit P die tatsächlich realisierte Reihenfolgeposition bezeichnen.

¹⁹⁰Vgl. Meissner (2009), S.102.

und somit als Qualitätsindikator betrachtet werden können. In die gleiche Klasse ist die Kennzahl des Servicelevels bei Inman einzuordnen, nur ist hier der Gegenstand nicht die Einhaltung der Soll-Reihenfolge, sondern die Verfügbarkeit der richtigen Karosserie.¹⁹¹ Die grundsätzliche Herausforderung bei solchen Qualitätsindikatoren ist, den konkreten systemische Zusammenhang herzustellen, in dem das System der Karosserieverfügbarkeit mit verbundenen Systemen steht. Je unkonkreter dieser Zusammenhang, desto herausfordernder ist eine wirtschaftliche und robuste Auslegung des Produktionssystems. Die Weite des Zeitraums oder des Positionsbereichs, der für die Kennzahlenbildung herangezogen wird, ist hierbei natürlich ein relevanter Aspekt, im Sinne der Konkretheit, der bei allen oben genannten Kennzahlen zu definieren ist. Eine Aggregation über einen langen Zeitraum, beispielsweise die mittlere Reihenfolgegüte eines Monats, kann problematisch sein, wenn es Prozessabhängigkeiten gibt, die beispielsweise auf den täglichen Ergebnissen beruhen. Wie sehr sich die langfristigen von den kurzfristigen Ergebnissen unterscheiden können, ist in Abbildung 60 an den empirischen Ergebnissen beispielhaft dargestellt. Die Kurve „Anzahl NVK Empirisch je 1000“ zeigt die Anzahl nicht verfügbarer Ka-

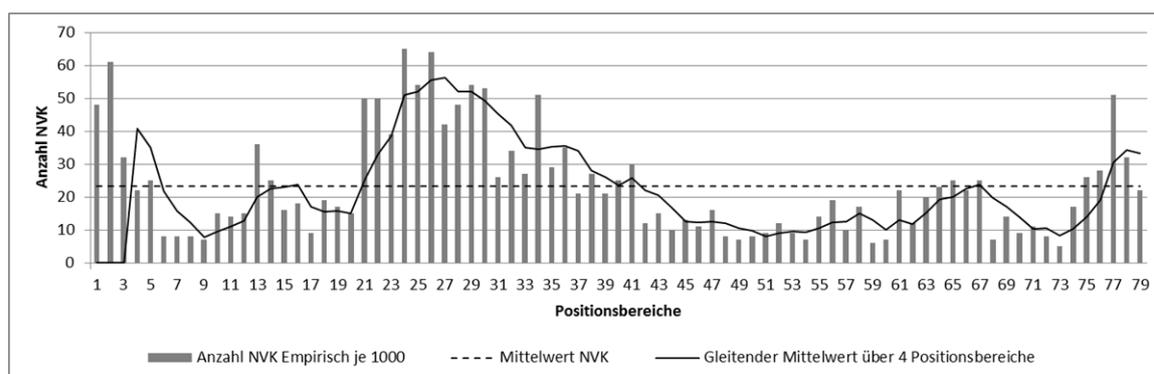


Abbildung 60: Aggregation der NVK über einen langen Zeitraum im Vergleich zur Aggregation über einen kurzen Zeitraum

rosserien je 1000 Aufträge der geplanten Montagesequenz, die Kurve „Mittelwert NVK“ zeigt die gemittelte Anzahl der NVK über alle 1000er Positionsbereiche, die dritte Kurve zeigt den gleitenden Mittelwert über je vier Positionsbereiche. Es wird deutlich, dass die Anzahl der NVK in einzelnen 1000er Bereichen, aber auch über die gemittelte Folge von Positionsbereichen vom Mittelwert stark abweicht. Unterstellt, dass die Positionsbereiche mit $[z = 1000]$ einer Tagesproduktion entsprechen, heißt das, dass sich die tägliche Qualität von der mittleren Qualität deutlich unterscheidet. Aber selbst eine vergleichsweise geringe Aggregation, beispielsweise für einen Produktionstag, wird nicht unbedingt den tatsächlichen Anforderungen gerecht, die an eine Ziel-Kennzahl für die Produktion mit stabiler Auftragsfolge gestellt werden können, wie im Folgenden gezeigt wird.

Versorgung des Montagebands - synchronisierter Teilestrom

Wenn die ursprünglich geplante Montagereihenfolge eingehalten wird, kann eine Versorgung des Montagebandes in Auftragsreihenfolge mit langfristigem Planungsvorlauf erfolgen. Dies kann

¹⁹¹Vgl. hierzu beispielsweise die Abschnitte 2.3 und 6.1.1.

in vielerlei Hinsicht von Vorteil sein. Wenn die Teileströme langfristig, der Teilebedarfsstrom hingegen kurzfristig festgelegt werden, und letzterer nicht exakt mit dem Teilebedarfsstrom auf Basis der ursprünglich geplanten Montagereihenfolge übereinstimmt, so muss es kurzfristige Reaktionsmöglichkeiten geben. Diese kurzfristigen Reaktionsmöglichkeiten erfordern eine Flexibilitätsstruktur die Flexibilitätskosten verursacht. Ein schematischer Ablauf des Prozesses ist in Abbildung 61 dargestellt. Die Abbildung 61 zeigt die tatsächliche Auftragsreihenfolge der

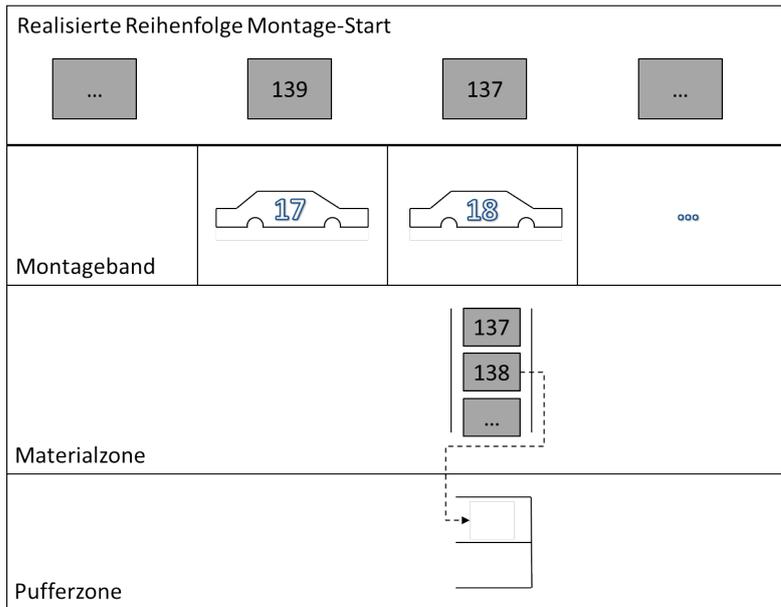


Abbildung 61: Montagemodell mit Teilebelieferung in der Sequenz der geplanten Start-Reihenfolge der Montage

Montage, das Montageband mit den Fahrzeugen in bestimmten Arbeitsstationen (17 und 18), eine Materialzone mit einem Montageteil, welches in Auftragssequenz angeliefert wird und einer Pufferzone, in welcher nicht benötigte Teile gespeichert werden können. Ohne Weiteres wird hier schon deutlich, dass im Falle der Belieferung in der Reihenfolge der eingeplanten Auftragssequenz eine Pufferzone notwendig ist, im Gegensatz zu einer Teilebelieferung mit kurzfristiger Sequenzbildung. Wird die ursprünglich geplante Montagesequenz nicht vollständig umgesetzt, wie in Abbildung 61 am Beispiel des fehlenden Montageauftrags mit der Nr. 138 dargestellt, so gibt es ein Teil im Teilestrom, welches nicht an der geplanten Position benötigt wird. Dieses Teil, hier im Beispiel mit der Nr. 138, muss zunächst aussortiert und gespeichert werden, bevor es zu dem Zeitpunkt, zu dem der wieder eingesteuerte Montageauftrag Nr.138 die Montagestation erreicht, wieder einsortiert werden muss. Es ergibt sich also im Vergleich zum Produktionssystem mit kurzfristigem Informationsvorlauf:

- eine zusätzliche Tätigkeit des Aussortierens
- die Notwendigkeit der physischen Speicherung des Teils (Flächenbedarf und Anlagenbedarf)
- eine zusätzliche Tätigkeit des Einsortierens

Wie diese zusätzlichen Aktivitäten und Speicherkapazitäten zu bewerten sind, hängt von vielerlei Gesichtspunkten ab, unter anderem von der Ausgestaltung des Montagesystems und den Eigenschaften der Teile (Motor vs. Heckleuchte), und wird hier nicht weiter diskutiert. Entscheidend ist, dass jede Karosserie, die nicht verfügbar ist, idealtypisch immer die gleichen zusätzlichen Aktivitäten an einer bestimmten Station verursacht, wobei diese natürlich nicht gleichzeitig auftreten, sondern je zurückgestelltem Auftrag zeitlich versetzt, gemäß der räumlichen Folge der Arbeitsstationen in Verbindung mit dem Montagetakt. Der Speicherbedarf für aussortierte Teile ergibt sich aus der Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge, also der kumulierten Anzahl zurückgestellter, aber noch nicht wiedereingesteuerter Aufträge an jeder Station. Analog der Fortschrittszahlendarstellung der Abbildung 20 in Abschnitt 4.1.6 zeigt Abbildung 62 die Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge schematisch und beispielhaft. Die Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge ergibt sich für jeden Montagetakt aus dem vertikalen Abstand zwischen der Kurve der kumulierten Auftragsrückstellungen und der Kurve der kumulierten wiedereingesteuerten Aufträge.

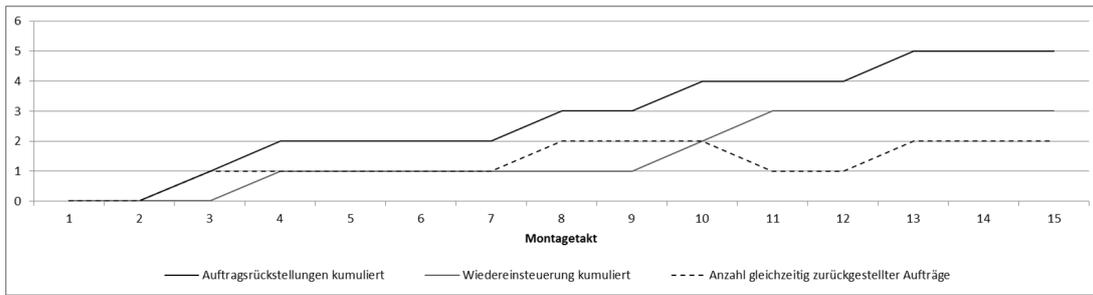


Abbildung 62: Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge

Die $[AGZA]$ erhöht sich mit jedem Auftrag, der nicht wie geplant in die Montage gesendet werden kann $[+1]$ und reduziert sich mit jedem Auftrag, der zurückgestellt war und an einer neuen Position in die Montage gesteuert wird $[-1]$. Die Kennzahl würde dann durch Kumulation der Einzelereignisse aufgebaut werden. Es sei $[E_a^{SPBCS}]$ eine Variable, die an einer Position $[SP]$ für einen Auftrag $[a]$ einen der drei Werte $\{-1, 0, 1\}$ annimmt, je nachdem, ob an dieser Position

- der Auftrag initial geprüft keine Karosserie verfügbar hat $[E_a^{SPBCS,I} = 1]$
- der zurückgestellte Auftrag wieder eingesteuert wurde $[E_a^{SPBCS} = -1]$
- der initial geprüfte Auftrag eine Karosserie verfügbar hat $[E_a^{SPBCS} = 0]$
- der nicht initial geprüfte Auftrag keine Karosserie verfügbar hat $[E_a^{SPBCS} = 0]$.

$$E_a^{SPBCS} = \begin{cases} -1 & \text{für } BAV_a^{SPBCS} = 1 \\ 1 & \text{für } BAV_a^{SPBCS,I} = 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} .$$

An jeder Position sind die $[E_i^{SPBCS}]$ zu addieren: $[E^{SPBCS} = \sum E_i^{SPBCS}]$. Hierbei ist $[i]$ ein

Index für die an Position $[SP^{BCS}]$ geprüften Aufträge. Die $[AGZA]$ an der Stelle $[SP]$ ergeben sich dann durch Kumulation der $[E^{SP^{BCS}}]$ mit dem Index $[sp]$:

$$AGZA^{SP} = \sum_{sp=1}^{SP^{BCS}} E^{sp^{BCS}}$$

Angenommen, im Prozess der operativen Produktionsplanung und -steuerung gäbe es das Ziel, einen kritischen Wert $[AGZA^{max}]$ nicht zu überschreiten, um die Konsequenzen, die aus einer Überschreitung resultieren, zu vermeiden. In der taktischen Produktionsplanung und Steuerung könnte das System so geplant werden, dass der kritische Wert im Planungsmodell in einem definierten Maß unterschritten wird. Qualitätsindikatoren wie die oben beschriebenen Kennzahlen des „Servicegrads“ oder der „Reihenfolgetreue“ sind für eine solche Aussage nicht geeignet, einerseits weil die Zeiträume, für die die Kennzahl ermittelt wird, nicht im Zusammenhang stehen, andererseits, weil die zeitliche Folge der Reihenfolgeverletzungen nicht berücksichtigt wird. Abbildung 63 dient nochmal dazu, schematisch den Unterschied zwischen Kennzahlen im Sinne eines Qualitätsindikators im Vergleich zu der vergleichsweise stärker operationalisierten Kennzahl $[AGZA]$ zu verdeutlichen: die hellgraue Reihe stellt die geplante Montagereihenfolge $[PAS]$ dar, die schwarze Reihe die realisierte Montagereihenfolge $[AAS]$. Es sei hier beispielhaft

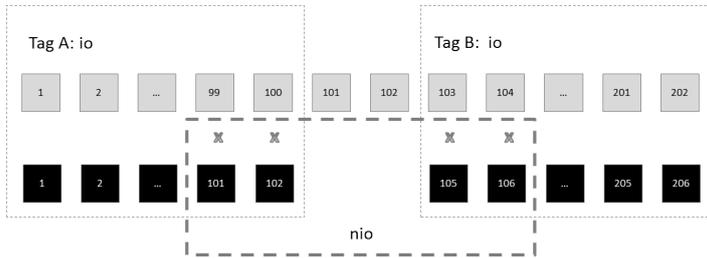


Abbildung 63: Kumulierte Anzahl NVK vs. tägliche NVK

unterstellt, dass täglich $[100]$ Aufträge produziert würden, die geforderte Reihenfolgetreue sei $[98\%]$ und es gelte $[AGZA^{max} = 2]$. Beide Kennzahlen werden auf Basis der täglichen Produktionsmenge erhoben. Die Kreuze markieren Aufträge, die zurückgestellt wurden. Beide Produktionstage, Tag A und Tag B, wären vor dem Zielkriterium der Reihenfolgetreue als erfolgreich einzustufen. Allerdings hätte die Tatsache, dass $[4]$ Aufträge in Folge zurückgestellt wurden und keiner der zurückgestellten Aufträge wieder eingesteuert wurde, die Verletzung der $[AGZA^{max}]$ zur Folge. Es kann also im Allgemeinen nicht davon ausgegangen werden, dass die Erfüllung der Qualitätsindikatoren die Erfüllung der operationalisierten Kennzahlen implizieren. Ferner wird konstatiert, dass es operationalisierte Kennzahlen in Bezug auf die Karosserieverfügbarkeit geben muss, wenn strukturelle Abhängigkeiten zwischen dem System der Produktion mit stabiler Auftragsfolge einerseits und dem umgebenden Produktionssystem andererseits gibt.

Zusammenfassung

Das Zielsystem, welches für die taktische Produktionsplanung der Karosserieverfügbarkeit definiert wird, muss die tatsächlichen Anforderungen des realen Produktionssystems wiedergeben.

Kennzahlen wie die Reihenfolgetreue und die Reihenfolgegüte können als Qualitätsindikatoren für die Produktion mit stabiler Auftragsfolge betrachtet werden und können somit, in einer geeigneten zeitlichen Aggregation auch ein gerechtfertigter Bestandteil des Zielsystems sein. Diese Kennzahlen sind aber für bestimmte Prozesse, beispielsweise die Versorgung des Montagebands, unter Umständen nicht ausreichend, weil diese den kumulativen Aspekt von Auftragsrückstellung und Wiedereinsteuerung nicht gerecht werden. Eine sinnvolle Ergänzung ist hier die Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge, die zu jeder Reihenfolgeposition angibt, wie viel zurückgestellte und noch nicht wiedereingesteuerte Aufträge vorliegen. Für die taktische Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit lässt sich generell festhalten, dass die Zielgrößen der Planung aus dem systemischen Zusammenhang dergestalt abzuleiten sind, dass sie diesen möglichst konkret abbilden, damit das System hinreichend robust, aber zu möglichst geringen Kosten, ausgelegt werden kann.

8 Zusammenfassung und weiterführende Fragestellungen

Gegenstand und Ziel der Arbeit ist es, einen integrierten und generischen Ansatz für die taktische Produktionsplanung des Systems der Karosserieverfügbarkeit zu finden. In Kapitel 4 wurde ein generisches Wirkmodell des Systems der Karosserieverfügbarkeit erzeugt, welches in der Literatur behandelte Aspekte integriert und um noch nicht behandelte Aspekte erweitert. Der Wirkmechanismus basiert auf den beiden direkten Einflußgrößen

- Variantenstruktur in der geplanten Montagereihenfolge
- Verhältnis von Vorlaufzeit und Durchlaufzeit / Positionsverschiebungen

und der indirekten Einflußgröße der Kapazität des Karosseriesortierers. Es wurde ferner gezeigt, dass der Wirkmechanismus zwei Formen der Autokorrelation beinhaltet, die

- allgemeine Autokorrelation durch Rückstellung von Aufträgen mit niedrigerer Reihenfolgennummer
- die variantenspezifische Autokorrelation durch offene Bedarfe von Vorgängeraufträgen.

Es wurden Methoden gezeigt, die bei der Beurteilung der Validität des Planungsmodells unterstützen, nämlich die Trace Driven Simulation in Verbindung mit statistischen Testverfahren. Es konnte gezeigt werden, dass aus Perspektive der verwendeten Verfahren, in diesem Untersuchungskontext von der Validität des Wirkmodells ausgegangen werden kann.

In Kapitel 5 wurden dann in verschiedenen Simulationsstudien die in Kapitel 4 identifizierten Wirkgrößen, beziehungsweise auch Wirkmechanismen, isoliert untersucht, die im realen System und in der Trace Driven Simulation aufgrund der Überlagerung der unterschiedlichen Wirkmechanismen nicht oder nur schwer beobachtet werden können. Es hat sich gezeigt, dass Effekte dieser Wirkgrößen in einer Laborumgebung sichtbar werden, weshalb diese Größen in der taktischen Produktionsplanung zu berücksichtigen sind. Ferner wurde gezeigt, dass Quer- und Längsstruktur, induziert über die Eingangsdaten und die Wirkstruktur im Modell, im Planungskontext zu berücksichtigen sind.

In Kapitel 6 wurde der bestehende analytische Ansatz von Robert R. Inman zur taktischen Produktionsplanung wesentlich erweitert und auf Modelle ausgedehnt, die den Tausch von Karosserien vorsehen. Allerdings wurde auch gezeigt, dass wesentliche Wirkmechanismen des Systems der Karosserieverfügbarkeit, die Autokorrelation, aktuell nicht abgebildet sind und dass die bestehenden Ansätze nur eine sehr einfache Fabrikstruktur mit zwei Gewerken und einem Tauschpunkt zulassen, und deshalb im Rahmen der taktischen Produktionsplanung nicht uneingeschränkt eingesetzt werden können. Es wurde ferner gezeigt, dass in der Literatur übliche Ansätze der Abstraktion und Idealisierung im Rahmen der Modellbildung aufgrund der Bedeutung von Quer- und Längsstruktur in den Wirkgrößen, beziehungsweise den Eingangsdaten, zu erheblichem Validitätsverlust führen können.

In Kapitel 7 wurde gezeigt, dass die Kennzahlen, die in der Literatur als Zielgrößen für die taktische Produktionsplanung eingesetzt werden, und als allgemeine Qualitätsindikatoren klassifiziert werden können, für bestimmte Planungskontexte und Wirkzusammenhänge um konkretere

Kennzahlen erweitert werden sollten. Konkreter kann sich sowohl auf die zeitliche, als auch auf die inhaltliche Dimension der Kennzahlen beziehen. Es wurde das Beispiel der Teileversorgung in Verbindung mit dem Einsatz der Kennzahl „Gleichzeitig zurückgestellte Aufträge“ vorgestellt. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich das folgende Rahmenkonzept für einen Handlungsablauf der taktischen Produktionsplanung formulieren:

- Zuerst sind aus dem Zielsystem die geforderten Ergebnisse für das zukünftige System der Karosserieverfügbarkeit abzuleiten. Hieraus ergeben sich Implikationen für die geforderte strukturelle Validität des Planungsmodells und Robustheit der Planungsergebnisse.
- Um die geforderte strukturelle Validität sicherzustellen, sind im ersten Schritt die für das Planungsmodell zu berücksichtigenden Einflußgrößen zu definieren. Wenn ein sehr abstraktes Modell wie in dieser Arbeit verwendet wird, dann sind dies die folgenden Wirkgrößen, die als stochastische Prozessmodelle im Planungsmodell enthalten sein sollten:
 - Variantenstruktur
 - Positionsverschiebungen
 - Sortierkapazität
 - Steuerungsalgorithmen
- Wird ein abweichendes Modellierungsverfahren verwendet, beispielsweise mit modellendogener Auftragseinplanung, oder endogener Produktionsstruktur der Produktionsgewerke, dann sind dementsprechend auch andere Variablen einzusetzen. Das Modell gewinnt an Detaillierung. Wirkmechanismen, die ansonsten nur exogen über die Eingangsdaten berücksichtigt werden können, werden endogen modelliert.
- Aus Perspektive der Modellart wird sich für die meisten Anwendungsfälle ein Simulationsmodell empfehlen, aus den in Abschnitt 6.1.3 genannten Gründen.
- Im nächsten Schritt ist das direkte Zusammenwirken der Wirkgrößen festzulegen, welches auch bei vollständiger stochastischer Unabhängigkeit der Eingangsdaten zum Tragen kommen würde. Selbst wenn Quer- und Längsstruktur nicht vorhanden sind, dann gibt es einen elementaren Wirkzusammenhang, der die oben genannten Wirkgrößen verknüpft. Hierzu gehört beispielsweise, dass Positionsverschiebungen Aufträgen zugeordnet werden, oder dass Karosserien im Karosseriesortierer ein- und ausgelagert werden, und im Zeitraum dazwischen warten.
- Durch eine Trace Driven Simulation kann zunächst eine wichtige Indikation bezüglich der Validität der Modellierung der bestehenden Produktionsstruktur gewonnen werden.
- Im nächsten Schritt ist der Zusammenhang zwischen den Eingangsdaten festzulegen, die Querstruktur. Beispielsweise könnten variantenspezifische Positionsverschiebungen zugeordnet werden. Ob solche Effekte relevant sind, kann für bestehende Prozesse aus den historischen Daten ermittelt werden, beispielsweise mit den Methoden aus dem Kapitel

5. Gibt es für Sachverhalte keine historischen Daten, können Informationen beispielsweise über Expertengespräche generiert werden.
- Im nächsten Schritt ist zu entscheiden, ob eine zusätzliche, nicht schon endogen berücksichtigte Längsstruktur Teil des Planungsmodells sein sollte. Auch hier können aus historischen Daten Strukturen ermittelt werden. Im Einzelfall ist zu prüfen, welche Strukturen auf zukünftige Szenarien übertragen werden sollten.
 - Zuletzt kann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um festzustellen, wie das Modell auf Veränderungen in den Eingangsdaten, also die Werte der Wirkgrößen, reagiert. Dieses Vorgehen erlaubt eine Indikation dafür, welche Puffer in der Auslegung möglicherweise zu berücksichtigen sind, um das System in der geforderten Robustheit auszulegen. Beispielsweise könnten verschiedene Formen der Längsstruktur im Modell implementiert werden und deren Auswirkung überprüft werden.

Aus dieser Darstellung ergeben sich zahlreiche Fragen für die weiterführende wissenschaftliche Arbeit:

- Wenn es empirisch eine Struktur in den Ergebnissen der relevanten Prozesse gibt, die einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse des Systems der Karosserieverfügbarkeit hat, dann ist zu prüfen, ob es verallgemeinerbare Verfahren gibt, die Muster in den Prozessergebnissen identifizieren, so dass diese Muster in Prozessmodellen berücksichtigt werden können. Beispielsweise wurde in Abschnitt 5.2 mittels einer einfachen Statistik gezeigt, dass der Anteil der verzögerten Karosserien an der Gesamtanzahl der Karosserien einer Karosserievariante mit der relativen Häufigkeit dieser Variante korreliert, ein Phänomen der Querstruktur. Es wurde auch der These nachgegangen, dass Positionsverzögerungen möglicherweise nicht ausschließlich zufällig verteilt, sondern auch strukturell verdichtet auftreten, in „Blöcken“. Fraglich wäre, ob es weitere Muster in Quer- und Längsstruktur gibt, beziehungsweise geben kann, denn die Struktur ist im Allgemeinen ja vom konkreten System abhängig, welches geplant wird.
- Wenn Strukturen identifiziert werden, stellt sich die Frage, wie Modelle stochastischer Prozesse aufgebaut sein könnten, beispielsweise für die Positionsverschiebungen in den Gewerken, die es erlauben, Längsstruktur in den Wirkgrößen zu berücksichtigen? Beispielsweise könnten Zeitreihenmodelle einen Entwicklungspfad bilden, die es erlauben, eine zeitliche Struktur in den Wertefolgen zu implementieren.
- Bezogen auf das Zielsystem stellt sich die Frage, ob es neben den dargestellten Kennzahlen weitere geben könnte, die helfen, das Zielsystem stärker zu operationalisieren.
- In Hinsicht auf die analytischen Modelle wurden einige wesentliche Fragestellungen schon aufgeworfen: wie könnten analytische Modelle aussehen, die die allgemeine Autokorrelation berücksichtigen? Wäre es unter Umständen hinreichend, die bestehenden Modelle mit einem weiteren Korrekturterm zu versehen, der den Effekt der allgemeinen Autokorrelation abbildet oder müsste die positive Rückkopplung und dementsprechend die Dynamik

im Wirkmechanismus explizit abgebildet werden, beispielsweise durch Systeme von Differenzgleichungen. Ferner stellt sich die Frage, ob es noch grundsätzlich andere Ansätze gibt, die es erlauben, auch kompliziertere und komplexere Fabrikstrukturen abzubilden.

A Formales Modell

Variable	Ggf. Formel	Beschreibung
\mathbb{Z}		Menge der ganzen Zahlen
\mathbb{N}		Menge der natürlichen Zahlen
DLZ		Durchlaufzeit
VLZ		Vorlaufzeit
WIP		Work in process; Umlaufbestand
TT		Taktzeit
$AGZA$		Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge
M		Anzahl Aufträge/Anzahl Karosserien im Modell
a		Auftragsnummer / Reihenfolgenummer PAS
b		Karosserienummer
$a = b$		assoziierter Auftrag und assozierte Karosserie
V		Anzahl der Karosserievarianten
v		Karosserievariante
p_v		Auftretenswahrscheinlichkeit von v
SC		Kapazität im Karosseriesortierer
SC_P		Physischer Bestand im Karosseriesortierer
SC_{vir}		Virtueller Puffer
SC_{eff}		Effektive Vorproduktion
\overline{SC}_h		Mittlerer Füllstand im Karosseriesortierer je Stunde
SP		Sequenzposition
PAS		Geplante Start-Sequenz Montage
PBS		Geplante Start-Sequenz Karosseriebau
ABS		Realisierte Start-Sequenz Karosseriebau

ABE		Realisierte Ende-Sequenz Karosseriebau
SCS		Sequenz der Füllstände im Karosseriesortierer
$AAS,$ AAS^a, AAS^b		Realisierte Start-Sequenz der Montage, für die Aufträge, für die Karosserien
$AAS_{a,b}$		Kombination aus Auftrag und Karosserie bei Start-Montage
PBE		Geplante Ende-Sequenz des Karosseriebaus
BCS		Sequenz der Verfügbarkeitsprüfungen
I	$SP^{BCS,I}$	Initiale Verfügbarkeitsprüfung
X	$SP^{BCS,X}$	Finale Zuordnung Auftrag und Karosserie
PC	$ABE - ABS$	Tatsächliche Positionsverschiebung im Karosseriebau
PPS	$PBS - PAS$	Positionsverschiebung von Start-Karosseriebau gegenüber Start-Montage
SPC	$ABS - PBS$	Positionsverschiebung des realisierten Starts zu dem geplanten Start in den Karosseriebau
OPC	$PPS + SPC + PC$	Gesamte Positionsverschiebung
$D_{v;r,q}^{PAS}$	$= SP_{a_r}^{PAS} - SP_{a_q}^{PAS}$	Distanz zweier Aufträge in der geplanten Montagesequenz
$D_{F,i,j}^{PAS}$	$= SP_{i,j}^{PAS} - SP_F^{PAS} $	Distanz des i 'ten Vorgängers/Nachfolgers zu F
\bar{D}_v	$= \frac{1}{p_v}$	mittlerer Distanz von v bei äquidistanter Reihenfolge
$D_{v,i}$	$= i \times \bar{D}_v$	Distanz des i 'ten Vorgängers/Nachfolgers bei äquidistanter Reihenfolge
F		Fokusauftrag

$BAV_{av}^{SPBCS,I}$	$= \begin{cases} 1 \text{ für } B_v^{SPBCS,I} \geq 1 \\ 0 \text{ für } B_v^{SPBCS,I} < 1 \end{cases}$	Prüfung, ob Karosserie für Auftrag a verfügbar / nicht verfügbar
$y_{v^*}^{SP}$	$= \begin{cases} 1 \text{ für } v_b^{SPABE} = v^* \\ 0 \text{ sonst} \end{cases}$	Prüfung, ob $v_b = v^*$ an der Position SP der ABE
$u_{v^*}^{SP}$	$= \begin{cases} 1 \text{ für } v_b^{SPAAS} = v^* \\ 0 \text{ sonst} \end{cases}$	Prüfung, ob $v_b = v^*$ an der Position SP der AAS
$B_{v^*}^{SPBCS}$	$= \sum_{i=1}^{SPBCS+SC_P^{SP}-1} y_{v^*}^i - \sum_{j=1}^{SPBCS-1} u_{v^*}^j$	Bestand der Karosserien der Variante $v = v^*$
$B_{v^*}^{SPBCS}$	$= B_F^{SPBCS} + \sum_{i=1}^S B_{is}^{SPBCS} + \sum_{i=1}^P B_{ip}^{SPBCS}$	Bestand der Karosserien der Variante $v = v^*$
B_F^{SPBCS}	$= \begin{cases} 1 \text{ für } OPC_F \leq SC_{eff,F}^{SPBCS} - 1 \\ 0 \text{ für } OPC_F > SC_{eff,F}^{SPBCS} - 1 \end{cases}$	Prüfung der Verfügbarkeit der Karosserie von F
B_{is}^{SP}	$= \begin{cases} 1 \text{ für } OPC_{is} \leq SC_{eff,F} - 1 - D_{F,i,s}^{PAS} \\ 0 \text{ für } OPC_{is} > SC_{eff,F} - 1 - D_{F,i,s}^{PAS} \end{cases}$	Prüfung der Verfügbarkeit der Karosserie des i 'ten Nachfolgers s
B_{ip}^{SP}	$= \begin{cases} -1 \text{ für } OPC_{ip} > SC_{eff,F}^{SP} - 1 + D_{F,i,p}^{PAS} \\ 0 \text{ für } OPC_{ip} \leq SC_{eff,F} - 1 + D_{F,i,p}^{PAS} \end{cases}$	Prüfung der Verfügbarkeit der Karosserie des i 'ten Vorgängers p
NVK_a	$= 1 - BAV_a$	Karosserie des Auftrags a nicht verfügbar
NVK_M	$= \sum_{a=1}^M NVK_a$	Kumulierte Anzahl nicht verfügbarer Karosserien über M
NVK_M^{Emp}, NVK_M^{TD}		NVK_M der empirischen Daten, beziehungsweise der Trace Driven Simulation
NVK_M^D		NVK_M der distanzbasierten Methode
\overline{NVK}_M	$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NVK_M^i$	Schätzer für den Erwartungswert der kumulierten Anzahl nicht verfügbarer Karosserien eines Modells
z		Abschnittsgröße
$H(), H_v()$		Verteilung der absoluten Häufigkeiten
$h(), h_v()$		Wahrscheinlichkeitsverteilung

$F(), F_v()$		Verteilungsfunktion
PBW, PBW_v	$= \min \{ \widehat{OPC} \} + \max \{ \widehat{OPC} \}$	Bandbreite der Positionsverschiebungen
$\left. \begin{array}{l} \{ \widehat{OPC} \}, \\ \{ \widehat{OPC}_v \} \end{array} \right\}$		Menge der OPC_a
$P(), P_v()$		Wahrscheinlichkeit, spezifische Wahrscheinlichkeit von v
$P(BAV = 1)$		Wahrscheinlichkeit, dass eine Karosserie verfügbar ist
NBS		Netto-Karosserieangebot
$\widetilde{OPC}, \widetilde{OPC}_v$		L-dimensionale Zufallsvariable der Positionsverschiebungen
L, L_v		Dimensionalität eines Elementarereignisses in der distanzbasierten Methode
$f(\widetilde{OPC}),$ $f_v(\widetilde{OPC}_v)$		Zuordnungsvorschrift, die jeder Realisation von \widetilde{OPC}_v einen Wert NBS zuordnet
$\tilde{P}(\widetilde{OPC}_v)$		Wahrscheinlichkeit, mit der eine bestimmte Realisation von \widetilde{OPC}_v eintritt
NBS_E		Ereignisgruppe, die alle Realisationen \widetilde{OPC}_v enthält, mit $f(\widetilde{OPC}_v) = NBS_E$
$\tilde{F}(\widetilde{OPC}),$ $\tilde{F}_v(\widetilde{OPC}_v)$		L-dimensionale Verteilungsfunktion der Positionsverschiebungen

Tabelle 7: Formales Modell

B Test auf Stationarität

KPSS-Test

Der von Kwiatkowski, Phillips, Schmidt und Shin entwickelte Test verwendet im Gegensatz zum Phillips-Perron-Test als Nullhypothese die Stationarität der Zeitreihe. Es kann sowohl auf trendstationäre als auch auf integrierte Prozesse getestet werden. Die Autoren gehen von der Annahme aus, dass sich eine Zeitreihe als Summe eines linearen Trends, eines Random Walks und eines stationären Prozesses darstellen lässt: $Y_t = \xi t + r_t + \varepsilon_t$, wobei $[\xi t]$ einen deterministischen Trend und $[\varepsilon_t]$ einen stationären Fehlerterm darstellt, welcher nicht Nid verteilt sein

muss. $[r_t]$ ist ein Random Walk, wobei $[r_t = r_{t-1} + u_t]$ gilt, mit $iid(0, \sigma_u^2)$ verteilten $[u_t]$. $[r_0]$ wird als eine Konstante angenommen. Unter der Nullhypothese, Stationarität der $[Y_t]$, ist $[\sigma_u^2 = 0]$, damit wird die Random Walk-Komponente zu einer Konstante und gleich $[r_0]$. Testet man nicht auf Trendstationarität, sondern auf einen integrierten Prozess, dann wird $[\xi = 0]$ angenommen.¹⁹² Die Autoren verwenden für den Test die folgende Teststatistik: $\left[\frac{1}{T^2} \sum \frac{S_t^2}{s^2(l)}\right]$, wobei $[S_t = \sum_{i=1}^t e_t]$ der Partialsummenprozess der Residuen und $[s^2(l)]$ ein Schätzer für die langfristige Varianz ist.¹⁹³ Unter der Nullhypothese sollte die Statistik sehr klein sein. Die Autoren haben für unterschiedliche Signifikanzniveaus kritische Werte tabelliert, die bei Überschreitung zu einer Ablehnung der Nullhypothese führen.¹⁹⁴

Signifikanzniveau	0,1	0,05	0,01
Kritischer Wert	0,347	0,463	0,739

Tabelle 8: Kritische Werte der KPSS-Statistik

Bei der Anwendung des KPSS-Tests ist zu berücksichtigen, dass α - und β -Fehler des Tests erheblich sein können, dass also die Nullhypothese verworfen wird, obwohl der wahre datengenerierende Prozess stationär ist, beziehungsweise, dass die Nullhypothese nicht verworfen wird, obwohl der datengenerierende Prozess nicht stationär ist.¹⁹⁵ Die Determinanten der Testfehler sind die Stichprobengröße $[T]$, der lag truncation Parameter $[l]$ und der wahre datengenerierende Prozess. Kwiatkowski et.al. zeigen beispielsweise, dass für einen $AR(1)$ -Prozess der Fehlerterme bei einem $AR(1)$ -Parameterwert von $[0,8]$, einem Wert $[l = 4]$ und einer Größe des Datensatzes von $[T = 80]$ die Nullhypothese in ca. 30% der Fälle verworfen wird, obwohl der dem Datensatz zugrunde liegende Prozess stationär ist. Wählt man den lag truncation Parameter höher, entschärft sich in diesem speziellen Fall das Problem, im allgemeinen gilt dies aber nicht. In vielen Konstellationen der oben genannten Determinanten wird bei hohem $[l]$, beispielsweise $[l = 12]$, die Nullhypothese zu selten abgelehnt. Dieser Effekt verschwindet erst bei großen Datensätzen, beispielsweise $[T = 500]$. Bezüglich des β -Fehlers sei nur kurz angemerkt, dass die Autoren beschreiben, dass die Mächtigkeit des Tests mit zunehmendem $[l]$ abnimmt, mit zunehmendem $[T]$ hingegen zunimmt.¹⁹⁶ Da der wahre datengenerierende Prozess unbekannt ist, ist die Einschätzung des Risikos eines α - oder β -Fehlers nicht unproblematisch. Für die Untersuchung der Stationarität wird für das konkrete System der Karosserieverfügbarkeit die Abschnittsgröße variiert mit $[z \in \{500, 1000, 2000\}]$; die Anzahl der Werte der Datenreihen variiert dementsprechend zwischen $[T \in \{160, 80, 40\}]$. Es werden für die empirische und die simulierte Datenreihe jeweils zwei Tests durchgeführt, einer mit niedrigem und einer mit mittlerem $[l]$, um die Sensitivität der Teststatistik gegenüber $[l]$ einschätzen zu können. Die Höhe von $[l]$ wird gemäß des

¹⁹²Vgl. Kwiatkowski et.al. (1992), S.162 und Neusser (2006), S.120.

¹⁹³Vgl. Kwiatkowski et.al. (1992), S.163ff.

¹⁹⁴Für die tabellierten kritischen Werte siehe Kwiatkowski et.al.(1992), S.166.

¹⁹⁵Vgl. zum α -Fehler Fahrmeier et.al.(2003), S.414.

¹⁹⁶Vgl. Kwiatkowski et.al.(1992), S.170ff.

verwendeten R-Pakets berechnet mit Hilfe von $\text{mod}\left(3\sqrt{\frac{T}{13}}\right)$ für niedriges $[l]$, beziehungsweise $\text{mod}\left(10\sqrt{\frac{T}{14}}\right)$ für mittleres $[l]$.

Zunächst wird durch eine Begutachtung der Datenreihe festgestellt, ob ein linearer Trend vorliegen könnte. Die Abbildungen sowohl der simulierten als auch der empirischen Daten deuten nicht auf einen linearen Trend hin, weshalb die Komponente des linearen Trends in der Regressionsgleichung entfallen kann und der Frage der Trendstationarität nicht nachgegangen wird (Siehe Abbildungen 28 und 29). Die Ergebnisse der Untersuchung sind in den Abbildungen 64 und 65 zusammengefasst. Die Interpretation der Ergebnisse wird an einem Beispiel erläutert.

T	Simuliert					
	500 / T=160		1000 / T=80		2000 / T=40	
lag truncation Parameter	l=2	l=9	l=2	l=6	l=1	l=4
KPSS-Statistik	0,898	0,372	0,537	0,297	0,438	0,239
P-Wert	<0,01	0,089	0,033	>0,1	0,061	>0,1

Abbildung 64: KPSS-Statistik der simulierten Ergebnisreihe

T	Empirisch					
	500 / T=160		1000 / T=80		2000 / T=40	
lag truncation Parameter	l=2	l=9	l=2	l=6	l=1	l=4
KPSS-Statistik	0,901	0,368	0,532	0,300	0,429	0,247
P-Wert	<0,01	0,091	0,035	>0,1	0,065	>0,1

Abbildung 65: KPSS-Statistik der empirischen Ergebnisreihe

Bei einer Abschnittsgröße von $[z = 1000]$ enthält die Datenreihe ca. $[80]$ Werte. Beim Test auf Integriertheit liefert die KPSS-Teststatistik bei einem lag truncation Parameter von $[l = 2]$ für die empirische Zeitreihe einen Wert von $[0, 53]$, für die simulierte Zeitreihe einen Wert von $[0, 54]$. Die tabellierten kritischen Werte zeigen, dass für beide Prozesse, bei einem Signifikanzniveau von ca. $[0, 025]$, die Annahme der Stationarität verworfen werden kann. Die Überschreitungswahrscheinlichkeiten, beziehungsweise die p-Werte, geben hier noch genauere Auskunft: für die empirische Zeitreihe beträgt der p-Wert $[0, 0345]$, für die simulierte Zeitreihe $[0, 03331]$, man kann also davon ausgehen, dass unter der Nullhypothese, das heißt im Falle eines stationären Prozesses, die ermittelten Statistiken oder extremere Werte mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als $[3, 5\%]$ vorkommen würden.¹⁹⁷

Verwendet man für den KPSS-Test einen höheren Wert für den lag truncation Parameter, nämlich $[l = 6]$, dann fällt das Testergebnis anders aus: die Teststatistik für beide Datenreihen liefert einen Wert von ca. $[0, 3]$, der tabellierte kritische Wert bei einem Signifikanzniveau von 10% beträgt $[0, 347]$; da dieser nicht überschritten wird, würde die Nullhypothese nicht abgelehnt werden.

¹⁹⁷Vgl. zu p-Werten Fahrmeier(2003), S.417.

Die Ergebnisse der Abbildung 65 werden nun im Gesamtzusammenhang interpretiert, die folgenden Aussagen sind für beide Datenreihen gültig: es zeigt sich, dass die Daten bei jeder Datensatzgröße sensitiv auf eine Variation des lag truncation Parameters reagieren, besonders stark bei einer Abschnittsgröße von $[z = 500]$. Mit höherem Wert für $[l]$ und einer Abschnittsgröße von $[1000]$ oder $[2000]$ kann die Nullhypothese der Stationarität beibehalten werden, wissend, dass die Wahrscheinlichkeit eines β -Fehlers mit sinkendem $[T]$ zunimmt. Bleibt die Frage, ob die kleineren oder die größeren Werte für $[l]$ maßgeblich für die Einschätzung sein sollten. Da beim Vorliegen autokorrelierter Fehlerterme, wovon nach den Abbildungen 66 und 67 auszugehen ist, die Wahrscheinlichkeit eines α -Fehlers bei Wahl eines sehr kleinen $[l]$ hoch ist und die Zunahme der Wahrscheinlichkeit eines β -Fehlers für mittleres $[l]$ (im Vergleich zu $[l = 12]$, wie von den Autoren als hoch ausgewiesen) moderat ist, wird von der Maßgeblichkeit des höheren $[l]$ ausgegangen. Demnach muss dann für kleinere Abschnittsgrößen die Nullhypothese verworfen werden, mit Signifikanzniveau $[0, 1 > \alpha > 0, 05]$, wohingegen die Nullhypothese für die Datenreihen mit höherer Abschnittsgröße beibehalten werden kann.¹⁹⁸ Mögliche Ursachen dafür, dass die Datenreihen der nicht verfügbaren Karosserien für kleine Abschnittsbereiche eine Beibehaltung der Nullhypothese der Stationarität nicht zulassen, könnten sein, dass diese Prozesse tatsächlich nicht stationär sind, oder, dass eine starke Autokorrelation bei gleichzeitiger Stationarität vorliegt, die mit zunehmender Abschnittsgröße abnimmt. Das sich die Autokorrelation bei Variation der Abschnittsgröße erheblich ändert, sei kurz am Verlauf der geschätzten Autokorrelationsparameter für $[z = 50]$ und $[z = 1000]$ demonstriert. Abbildung 66 zeigt, dass die Autokorrelationsparameter bei einer Abschnittsgröße von $[z = 50]$ selbst bei großen Lags noch signifikant sind, die Kurve klingt langsam ab. Im Gegensatz dazu fällt die Kurve bei einer Abschnittsgröße von $[z = 1000]$ schnell ab, so dass die Autokorrelationsparameter ab einem Lag von 6 praktisch nicht mehr signifikant von Null verschieden sind. Offensichtlich sinkt die Autokorrelation in der Datenreihe durch Erhöhung der Abschnittsgröße erheblich.

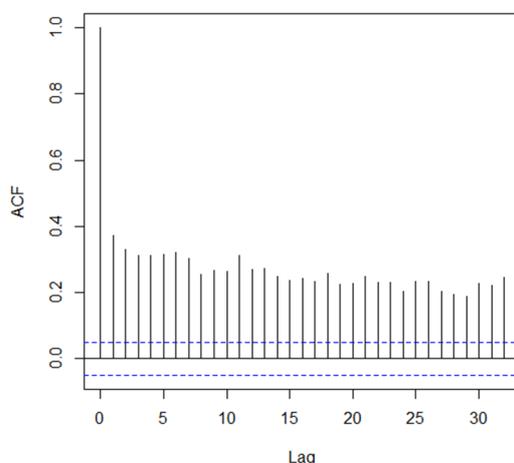


Abbildung 66: ACF der empirischen NVK bei einer Abschnittsgröße von 50

¹⁹⁸Bei einer Abschnittsgröße von 50 beträgt der Wert der KPSS-Statistik 2,117 bei niedrigem und 0,9254 bei hohem $[l]$.

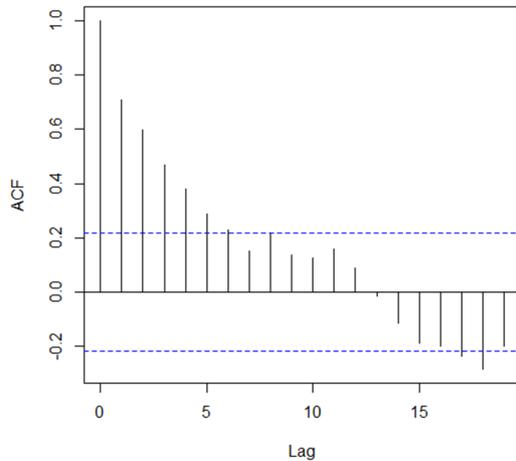


Abbildung 67: ACF der empirischen NVK bei einer Abschnittsgröße von 1000

Dickey-Fuller-Test

Beim Dickey-Fuller-Test wird eine Regression der Zeitreihe auf

$$Y_t = \text{deterministische Komponente} + \phi Y_{t-1} + Z_t$$

durchgeführt, beziehungsweise im Fall des Augmented-Dickey-Fuller-Tests auf

$$Y_t = \text{deterministische Komponente} + \phi Y_{t-1} + \gamma_1 \nabla Y_{t-1} + \dots + \gamma_{p-1} \nabla Y_{t-p-1} + Z_t.$$

Hierbei sind die $[Y_t]$ die Ergebnisse des stochastischen Prozesses, $[\nabla Y_{t-1} + \dots + \nabla Y_{t-p-1}]$ sind verzögerte Differenzen, beispielsweise ist $[\nabla Y_{t-1} = Y_{t-1} - Y_{t-2}]$.¹⁹⁹ Die deterministische Komponente lautet allgemein $[\alpha + \delta t]$, enthält die Datenreihe annahmegemäß keinen Trend, dann gilt $[\delta = 0]$. Der Fall $[\alpha = \delta = 0]$ kann hier ausgeschlossen werden, da die Anzahl der $[NVK]$ nicht um $[0]$ schwankt, es wird also $[Y_t = \alpha + \phi Y_{t-1} + Z_t]$ als Regressionsgleichung verwendet. Die Nullhypothese des Tests lautet dann $[\phi = 1]$, es wird also im Gegensatz zu dem KPSS-Test unterstellt, die Zeitreihe sei nicht stationär. Fraglich ist dann, ob die Nullhypothese der Nicht-Stationarität verworfen werden kann, oder nicht.

Ausgewertet wird die t-Statistik $[DF_t = (\hat{\rho} - 1) (\hat{\sigma}_{\hat{\rho}})]$. Es wurden von Dickey-Fuller kritische Werte zu unterschiedlichen Signifikanzniveaus tabelliert, die, sollte der Wert der t-Statistik kleiner als der entsprechende tabellierte kritische Wert sein, zu einer Ablehnung der Nullhypothese führen. Der Test wurde durchgeführt für die empirische und die simulierte Datenreihe und jeweils für die drei Abschnittsgrößen $[z = 500]$, $[z = 1000]$ und $[z = 2000]$. Die Ergebnisse sind zusammengefasst in Abbildung 68. Der Vergleich mit Tabelle 9 zeigt, dass zum Signifikanzniveau $[\alpha = 0,01]$ die Ergebnisse für $[z = 1000]$ und $[z = 500]$ kleiner als die kritischen Werte sind, die Nullhypothese also abgelehnt werden kann; für $[z = 2000]$ kann die Nullhypothese nur zum

¹⁹⁹Vgl. Neusser (2011), S.121 ff.

Signifikanzniveau $[\alpha = 0,05]$ abgelehnt werden.

T	Empirisch			Simuliert		
	500 / T=160	1000 / T=80	2000 / T=40	500 / T=160	1000 / T=80	2000 / T=40
Dickey-Fuller-Statistik	-5,560	-3,714	-3,058	-5,684	-3,989	-3,135
p-Wert	<0,1	0,029	0,158	<0,1	0,014	0,128

Abbildung 68: Zusammenfassung der Ergebnisse des Dickey-Fuller-Tests

Signifikanzniveau	T=25	T=50	T=100	T $\rightarrow \infty$
0,01	-3,75	-3,59	-3,5	-3,42
0,05	-2,99	-2,93	-2,90	-2,96

Tabelle 9: Kritische Werte der t-Statistik für das Modell mit Achsenabschnitt und ohne Trend

C Ein- und Ausschwingphase

Im Rahmen dieser Arbeit liegt das Interesse auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung des gleichgewichtigen Zustands. Im Bewusstsein, dass die Verteilungsfunktionen der Ergebnisse in der Einschwingphase von der gleichgewichtigen Verteilungsfunktion in eine unbekannte Richtung abweichen kann, stellt sich die Frage, welche Effekte dominieren, wie lange die Einschwingphase dauert und welche Ergebnisse gegen Ende der Simulation verworfen werden sollten.

Um die Länge der Einschwingphase zu beurteilen schlägt Welch vor, unabhängige Simulationsläufe zu erzeugen (independence over runs), Punktschätzungen für Verteilungsparameter der einzelnen Beobachtungen durchzuführen und die Konvergenz der geschätzten Parameter mit zunehmendem Index zu untersuchen.²⁰⁰ Formal ist das Verfahren zur Schätzung des Erwartungswerts wie folgt: es werden $[L]$ Simulationsläufe $[V]$ durchgeführt, in einem Simulationslauf werden $[n = 1, \dots, N]$ Messungen erhoben. $[n]$ ist hierbei ein Zeit- oder Positionsindex. Es werden dann für jeden Zeit- oder Positionsindex $[n]$ die Erwartungswerte mit Hilfe des arithmetischen Mittels über die $[L]$ Simulationsläufe geschätzt, so dass sich ein stochastischer Prozess der Erwartungswertschätzungen ergibt, mit: $\hat{\mu}_n = \bar{V}_n = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L V_{ln}$. Hier gilt, je größer $[L]$ ist, die Anzahl der Simulationsläufe, desto enger liegt das arithmetische Mittel als Punktschätzer beim wahren Erwartungswert. Welch weist darauf hin, dass die Konvergenz des Erwartungswerts ein notwendiges, aber kein hinreichendes Kriterium für die Konvergenz der Wahrscheinlichkeitsverteilungen gegen eine gleichgewichtige Verteilung ist und schlägt deshalb vor, auch weitere Parameter zu schätzen, wie beispielsweise die Varianz.²⁰¹ Das Verfahren funktioniert analog der Erwartungswertschätzung, unter Verwendung der Funktion für die Stichprobenvarianz: $\hat{\sigma}_n^2 = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L (V_{ln} - \hat{\mu}_n)^2$.²⁰²

Um für das System der Karosserieverfügbarkeit zu einer Einschätzung zu kommen über die Richtung der Effekte, die in Abschnitt 6.2.3 erwähnt wurden, und die Dauer der Ein- und

²⁰⁰ Vgl. Welch in Lavenberg (1983), S.289 ff.

²⁰¹ Vgl. Welch in Lavenberg (1983), S.290.

²⁰² Vgl. Welch in Lavenberg (1983), S.294.

Ausschwingphase, wurde eine Simulationsstudie durchgeführt. Hierfür wurden für jeden Simulationslauf sowohl die Reihenfolge der geplanten Montagesequenz, als auch die Zuordnung der Positionsverschiebungen neu bestimmt. Für jeden eingestellten Wert der Sortierkapazität wurden [50] Beobachtungen durchgeführt, also Reihenfolge und Positionsverschiebungen fünfzigfach neu bestimmt. Die Sortierkapazität wurde variiert von [$SC^* = 150$] bis [$SC^* = 600$] in Schritten zu je [50] Plätzen. Ziel ist, den stochastischen Raum der Wirkung aus der Zuordnung von Auftragsreihenfolge und Positionsverschiebung authentisch darzustellen und gleichzeitig die Sensitivität der Ein- und Ausschwingphase über unterschiedliche Kapazitäten im Karoseriesortierer zu untersuchen. Wie im Abschnitt 4.2 beschrieben, ist die Karosserieverfügbarkeit eines Auftrags [BAV] eine binäre Variable, deren Werte [1] für „Karosserie verfügbar“ und [0] für „Karosserie nicht verfügbar“ stehen; für die [NVK] gilt [$NVK = 1 - BAV$]. Beobachtungen, die dann mit dem Index [n] indiziert werden können, entstehen durch Summierung der Binärvariablen [NVK] über Indexbereiche mit jeweils gleicher Länge, es werden also die nicht verfügbaren Karosserien über einen bestimmten Indexbereich gezählt. Die Simulationsstudie wurde je Lauf mit [$M = 79.922$] Aufträgen durchgeführt (Terminating Simulation), es kann also sowohl Ein- als auch Ausschwingeffekte geben. Bei einer Bereichslänge von [100] entstehen also ca. [799] Messwerte. Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse wurde auch diese Bereichslänge variiert, um einschätzen zu können, ab welchem Aggregationsniveau der Binärvariablen Ein- und Ausschwingeffekte sichtbar sind oder verschwinden. Die letzten Aufträge, für die sich kein vollständiger Indexbereich mehr ergibt, wurden verworfen.

Welch merkt an, dass durch Mittelwertbetrachtung unter Umständen langfristige Trends schwer zu identifizieren sind. Er schlägt vor, gleitende Mittelwerte zu berechnen, die wie nachfolgend definiert sind:

$$\bar{\mu}(n; K) = \begin{cases} (2K + 1)^{-1} \sum_{k=-K}^K \hat{\mu}_{n+k} & \text{für } n \geq K + 1 \\ (2n - 1)^{-1} \sum_{k=-(n-1)}^{n-1} \hat{\mu}_{n+k} & \text{für } n < K + 1 \end{cases} \quad .^{203}$$

Diesem Vorschlag folgend werden zunächst die langfristigen Effekte bezüglich der Mittelwerte mit einer Bereichslänge von [1000] und einem gleitenden Mittelwert von [$K = 2$] Beobachtungen untersucht. Es werden die Sortierkapazitäten von [$SC^* \in \{150, 350, 600\}$] betrachtet. Die Abbildung 69 zeigt keine auffälligen Schwankungen im gleitenden Mittelwert, also keine größeren langfristigen Effekte der Ein- und Ausschwingphase. Die Grafik lässt bei [$SC^* = 600$] auf einen leichten Anstieg der gleitenden Mittelwerte in der Einschwingphase schließen, was in den folgenden Detailbetrachtungen aber noch näher zu beleuchten ist.

Sortierkapazität [$SC^* = 150$]

Die Abbildung 70 zeigt bei einer relativ geringen Sortierkapazität von [$SC^* = 150$] auf den ersten Blick keine erhebliche Abweichung früher geschätzter Erwartungswerte von folgenden Werten. Die Erwartungswerte der späten Bereiche sind vergleichsweise etwas niedriger. Bezüglich der Schätzung der Varianzen ist der erste Indexbereich völlig unauffällig, der letzte weist eine

²⁰³Vgl. Welch in Lavenberg (1983), S.293-294.

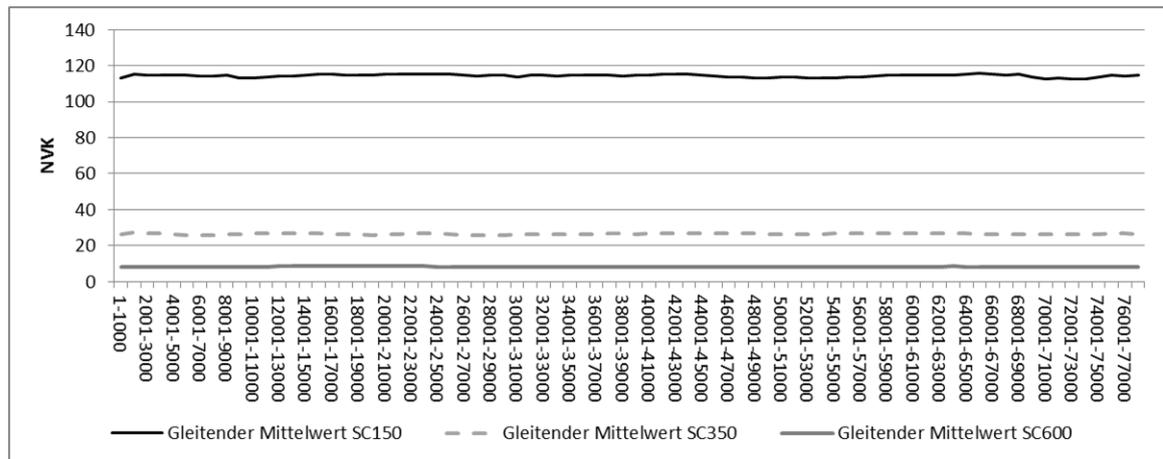


Abbildung 69: Gleitende Mittelwerte bei variierender Sortierkapazität und einem Indexbereich von 1000

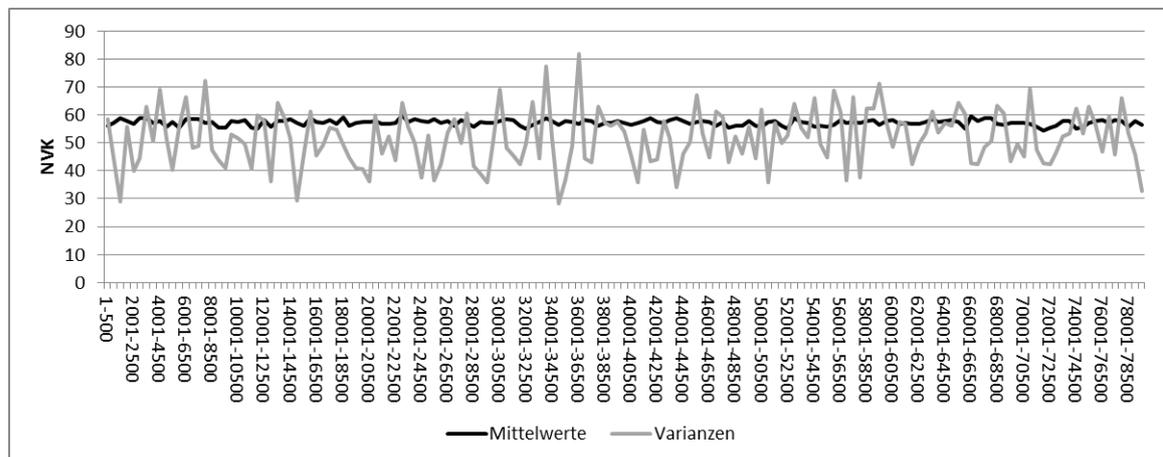


Abbildung 70: Mittelwerte und Varianzen bei einem Indexbereich von 500 Positionen und einer Sortierkapazität von 150

vergleichsweise geringe Varianz auf [32, 70]. Die minimale Varianz der Reihe liegt aber tiefer bei [28, 25]. Bei einer Indexbereichsgröße von [500] und einer Sortierkapazität von [$SC^* = 150$] scheinen Ein- und Ausschwingphase bezüglich beider geschätzter Parameter unauffällig. Ein tieferer Blick, mit verkleinertem Indexbereich (100) und Fokus auf den frühen und späten Werten zeigt ebenso keine auffälligen Abweichungen. Zusammengefasst heißt dies, dass die Untersuchung bei einer Sortierkapazität von [$SC^* = 150$] keine auffälligen Werte zeigt.

Sortierkapazität [$SC^* = 350$]

Da bei einer Sortierkapazität von [$SC^* = 350$] ein Indexbereich von [100] Positionen je Beobachtung nur noch eine kleine Anzahl von nicht verfügbaren Karosserien je Beobachtung liefert, wird sich auf den Indexbereich von [500] Positionen beschränkt. Abbildung 72 zeigt für [$SC^* = 350$] keine Auffälligkeiten bezüglich der Mittelwerte oder Varianzen der frühen Beobachtungen, wie bei [$SC^* = 150$] liegen die späten etwas niedriger.

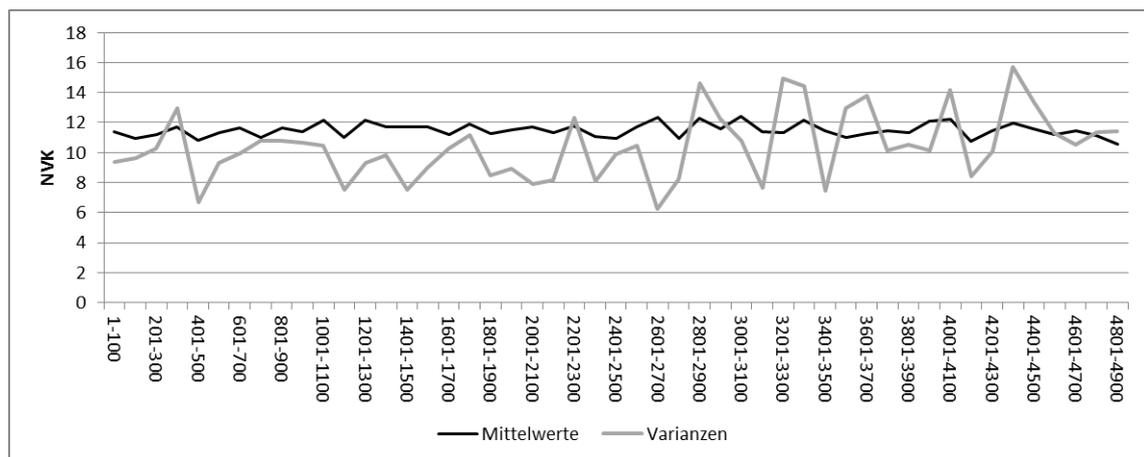


Abbildung 71: Mittelwerte und Varianzen bei einem Indexbereich von 100 Positionen und einer Sortierkapazität von 150 und einer Beschränkung auf frühe Werte

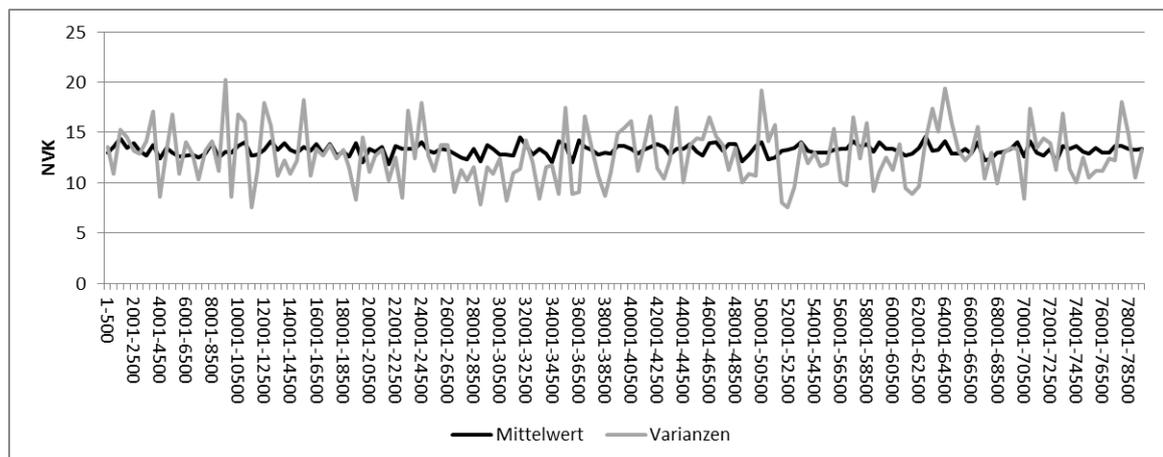


Abbildung 72: Mittelwerte und Varianzen für einen Indexbereich von 500 Positionen und einer Sortierkapazität von 350

Sortierkapazität [$SC^* = 600$]

Für die Sortierkapazität von [$SC^* = 600$] werden aufgrund der geringen Anzahl der [NVK] noch die arithmetischen Mittel und die Varianzen jeweils für die Indexbereiche [2500] und [1000] untersucht. Keine der Datenreihen weist in der Einschwing- oder in der Ausschwingphase signifikante Werte auf.

Zusammenfassend lässt sich auf Basis dieser statistischen Auswertung urteilen, dass bei den Sortierkapazitäten von [$SC^* \in \{150, 350, 600\}$] durch grafische und tabellarische Begutachtung der arithmetischen Mittelwerte, Varianzen, gleitenden Mittelwerte der arithmetischen Mittel und Varianzen weder in der Ein- noch in der Ausschwingphase ein signifikantes Verhalten identifiziert werden konnte, die Simulationsergebnisse also über den vollständigen Wertebereich verwendet werden können.

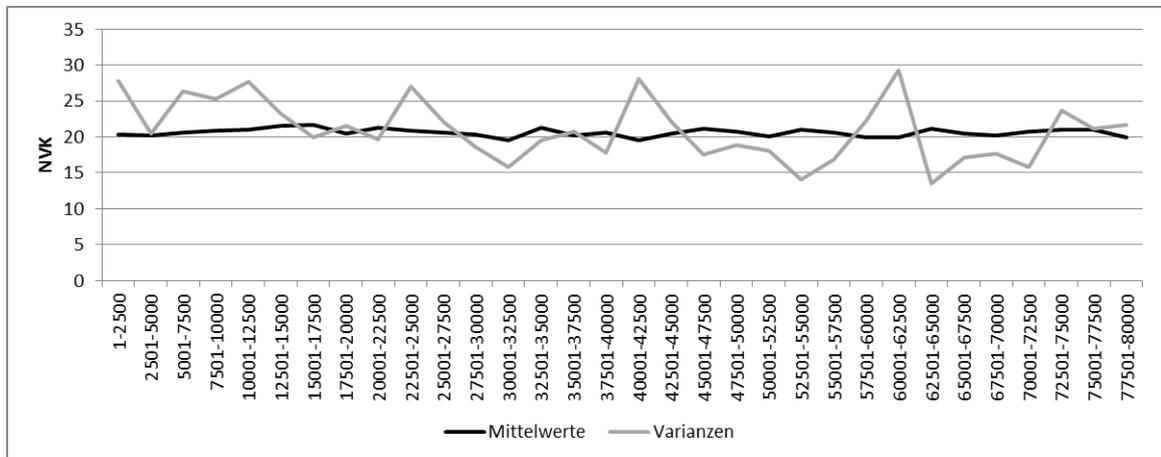


Abbildung 73: Mittelwerte und Varianzen für einen Indexbereich von 2500 und einer Sortierkapazität von 600

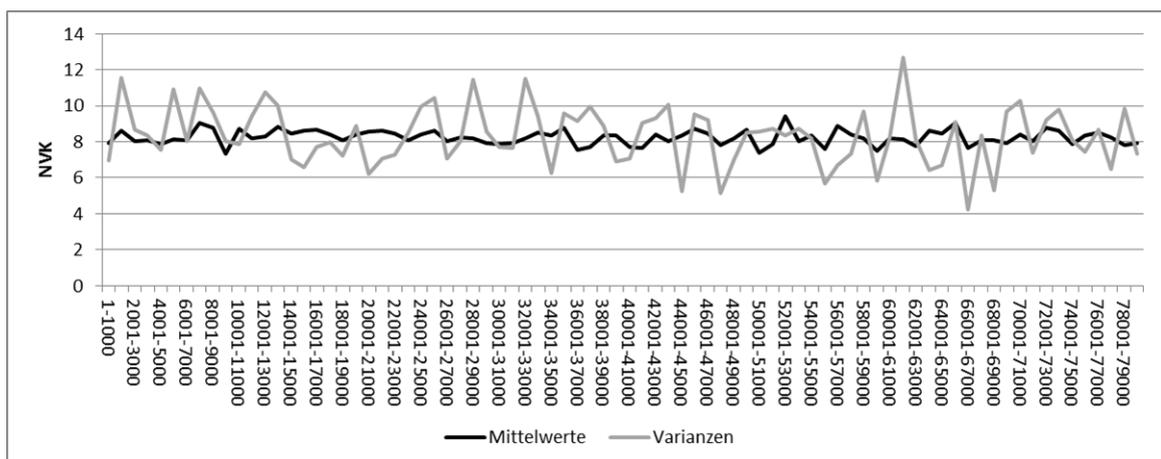


Abbildung 74: Mittelwerte und Varianzen für einen Indexbereich von 1000 und einer Sortierkapazität von 600

Index

A

Anzahl gleichzeitig zurückgestellter Aufträge,
54, 144

ASRS, 20

Auftrag, 35, 68

Auftrag, assoziierter, 57, 68

Auftrag, Nachfolge-, 57

Auftrag, Vorgänger-, 57

Auftragseinplanung, 37

Auftragsproduktion, 39

Autokorrelation, allgemeine, 54

Autokorrelation, variantenspezifische, 58

B

Built to Order, 35

D

Distanzen, 72

Durchlaufzeit, 46

Durchlaufzeit, brutto, 47, 50

Durchlaufzeit, geplante, 47

Durchlaufzeit, netto, 47, 49

Durchlaufzeit, realisierte, 47

Dynamik in der Struktur des Prozesses, 48

Dynamik, strukturell, 48

F

Fokusauftrag, 57

K

Karosserie, 68

Karosserie, assoziierte, 57, 68

Karosserie, Nachfolge-, 57

Karosserie, Vorgänger-, 57

Karosserieverfügbarkeit, 7, 72

L

Längsstruktur, 78

P

Planung, 10

Positionsverschiebung, 69

Produktion mit stabiler Auftragsfolge, 8

Produktionsplanung, 10

Produktionsplanung, taktische, 10

Pull-Prinzip, 38

Push-Prinzip, 38

Q

Querstruktur, 78

R

Risikokarosserie, 66, 108

Robustheit, 11

S

Sensitivität, 11

Sequenzposition, 69

Sortierkapazität, 71

System der Karosserieverfügbarkeit, 7

T

Taktische Produktionsplanung, 10

Tauschrisiko, 58, 132

U

Unsicherheit, 11

V

Variante, 68

Variantenfließfertigung, 36

Variantenproduktion, 39

Variantenstruktur, 64

Virtueller Puffer, 62, 71

Vorlaufzeit, 51

Vorlaufzeit, brutto, 52

Vorlaufzeit, geplante, 52

Vorlaufzeit, netto, 52

Vorlaufzeit, realisierte, 52

W

Wartezeit, geplante, 52

Literatur

- [1] Altemeier, Simon; Helmdach, Marcel; Koberstein, Achim; Dangelmaier, Wilhelm: Reconfiguration of assembly lines under the influence of high product variety in the automotive industry – a decision support system, *International Journal of Production Research*, Vol.48, Nr.21, S.6235-6256, Taylor & Francis, 2010.
- [2] Arnold, Dieter; Furmans, Kai: *Materialfluss in Logistiksystemen*, 6.Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2009.
- [3] Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel, Tempelmeier, Horst (Hrsg.): *Handbuch der Logistik*, 3.Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2008.
- [4] Bandow, Gerhard; Holzmüller, Hartmut H. (Hrsg.): „Das ist gar kein Modell!“, Gabler, Wiesbaden 2010.
- [5] Becker, Christian; Scholl, Armin (2006a): A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European Journal of operational research*, 168, S.694-715, Elsevier B.V., 2006.
- [6] Becker, Christian; Scholl, Armin (2006b): State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing, *European Journal of operational research*, 168, S.666-693, Elsevier B.V., 2006.
- [7] Bossel, Hartmut: *Systeme, Dynamik, Simulation*, Books on Demand GmbH, Norderstedt 2004.
- [8] Boysen, Nils; Fliedner, Malte; Scholl, Armin (2007a): Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung: Planungshierarchie und Elemente einer Hierarchischen Planung, *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Jg. (2007), H 7/8, S.759-793, Gabler Verlag, 2007.
- [9] Boysen, Nils; Fliedner, Malte; Scholl, Armin (2007b): A classification of assembly line balancing problems; *European Journal of operational research*, 183, S.674-693, Elsevier B.V., 2007.
- [10] Boysen, Nils; Fliedner, Malte; Scholl, Armin: Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique, *European Journal of operational research*, 192, S.349-373, Elsevier B.V., 2009.
- [11] Boysen, Nils; Fliedner, Malte; Scholl, Armin (2010b): Level scheduling under limited resequencing flexibility, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 22, 236–257, Springer Science+Business Media, 2010.
- [12] Boysen, Nils; Scholl, Armin; Wopperer, Nico: Resequencing of mixed-model assembly lines: Survey and research agenda, *European Journal of Operations Research*, 216, S.594-604, Elsevier B.V., 2011.

- [13] Boysen, Nils; Golle, Uli; Rothlauf, Franz: The car resequencing problem, Working Papers in Information Systems and Business Administration, 01/2010, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 06/2010.
- [14] Bungartz, Hans-Joachim; Zimmer, Stefan; Buchholz, Martin; Pflüger, Dirk: Modellbildung und Simulation, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2009.
- [15] Chen, Bor Chung; Sargent, Robert G.: Using standardized time series to estimate confidence intervalls for the difference between two stationary stochastic processes, Operations Research, Vol.35, Nr.3, S.428-436, 1987.
- [16] Dangelmaier, Wilhelm: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2009.
- [17] Decker, Maria: Variantenfließfertigung, Physica Verlag, Heidelberg 1993.
- [18] DIN EN ISO 8402 Qualitätsmanagement, 1995.
- [19] Ding, F.-Y; Sun, H.: Sequence alteration and restoration related to sequenced parts delivery on an automobile mixed-model assembly line with multiple departments, International Journal of Production Research, Vol.42, No.8, S.1525-1543, Taylor & Francis, 2004.
- [20] Dörmer, Jan; Günther, Hans-Otto; Gujjula, Rico: Master production scheduling and sequencing at mixed-model assembly lines in the automotive industry, Flexible Services and Manufacturing Journal, 27, S.1–29, Springer Science+Business Media, 2015.
- [21] Dyckhoff, Harald: Produktionstheorie, 5. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg 2006.
- [22] Dyckhoff, Harald; Spengler, Thomas S.: Produktionswirtschaft, 3.Auflage, Springer, Berlin Heidelberg 2010.
- [23] Emde, Simon; Boysen, Nils; Scholl, Armin: Balancing mixed-model assembly lines: a computational evaluation of objectives to smoothen workload, International Journal of Production Research Vol. 48, No.11, S.3173-3191, Taylor & Francis, 2010.
- [24] Engelhard-Nowitzki, Corinna; Nowitzki, Olaf; Zsifkovits, Helmut (Hrsg.): Supply Chain Network Management, Gabler, Wiesbaden 2010.
- [25] Fahrmeier, Ludwig; Künstler, Rita; Pigeot, Rita; Tutz, Gerhard: Statistik, 6. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg 2007.
- [26] Franz, Christian; Koberstein, Achim; Suhl, Leena: Dynamic resequencing at mixed-model assembly lines, International Journal of Production Research Vol. 53, No.11, S.3433-3447, Taylor & Francis, 2015.
- [27] Franz, Christian; Hällgren, Eric Caap; Koberstein, Achim: Resequencing orders on mixed-model assembly lines: Heuristic approaches to minimise the number of overload stations, International Journal of Production Research Vol. 52, No.19, S.5823-5840, Taylor & Francis, 2014.

- [28] Furnier, Xavier; Agard, Bruno: Improvement of earliness and lateness by postponement on an automotive production line, *International Journal of flexible manufacturing systems*, 19, S.107 - 121, Springer Science+Business Media, 2007.
- [29] Gebhard, Marina: *Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit*, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009.
- [30] Gudehus, Timm: *Logistik 1; 4.Auflage*, Springer, Berlin, Heidelberg 2012.
- [31] Gujjula, Rico; Günther, Hans-Otto: Resequencing Mixed-Model Assembly Lines under Just-In-Sequence constraints, *International Conference on Computers & Industrial Engineering*, S.668-673, 2009.
- [32] Gushikin, Oleg; Caprihan, Rahul; Stecke, Kathryn E.: Least in-sequence probability heuristic for mixed-volume production lines, *International Journal of Production Research* Vol. 46, No.3, S.647-673, Taylor & Francis, 2008.
- [33] Herold, Lothar: *Kundenorientierte Prozesssteuerung in der Automobilindustrie*, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden 2005.
- [34] Hopp, Wallace J.; Spearman, Mark L.: *Factory Physics*, 3.Edition, McGraw-Hill/Irwin, New York 2008.
- [35] Hsu, D.A.; Hunter, J.S.: Analysis of simulation-generated responses using autoregressive models, *Management Science*, Vol.24, No.2, S.181-190, 1977.
- [36] Inman, Robert R.: ASRS sizing for recreating automotive assembly sequences, *International Journal of Production Research* Vol.41, No. 5, S.847-863, Taylor & Francis Ltd, 2003.
- [37] Jahnke, Hermann: *Produktion bei Unsicherheit*, Physica-Verlag, Heidelberg 1995.
- [38] Kleijnen, Jack P.C.: Verification and validation of simulation models, *European Journal of Operational Research*, 82, S.145-162, Elsevier Science B.V., 1995.
- [39] Kleijnen, Jack P.C.; Bettonvil, Bert; Van Groenendaal, Willem: Validation of Trace-Driven Simulation Models: A Novel Regression Test, *Management Science*, Vol.44, No.6, S.812-818, 1998.
- [40] Kern, Werner; Schröder, Hans Horst.; Weber, Jürgen (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*, 2. Auflage, Schäffer-Poeschel, Stuttgart 1996.
- [41] Klug, Florian: *Logistikmanagement in der Automobilindustrie*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2010.
- [42] Kwiatkowski, Denis; Phillips, Peter C.B.; Schmidt, Peter; Shin, Yongcheol: Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root, *Journal of Econometrics*, 54, S.159-178, 1992.

- [43] Lavenberg, Stephen S.(Hrsg.): Computer Performance Modeling Handbook, Academic Press. Inc., New York 1983.
- [44] Law, Averill M.: Simulation Modeling and Analysis, 5. Auflage, International Edition, Mc Graw-Hill, New York 2015.
- [45] Lochmann, Mario: Operative Planung und Steuerung von Mehrprodukt-Fließlinien, Gabler Verlag und Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden 1999.
- [46] Lödding, Hermann: Verfahren der Fertigungssteuerung, 2.Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2008.
- [47] Meißner, Sebastian: Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung, Dissertation TU München 2009.
- [48] Meyer, Herbert: Supply chain planning in the German automotive industry, OR Spectrum 26, S.447-470, 2004.
- [49] Neusser, Klaus: Zeitreihenanalyse in den Wirtschaftswissenschaften, B.G.Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006.
- [50] Rabe, Markus; Spiekermann, Sven; Wenzel, Sigrid: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2008.
- [51] Reichhuber, Alexander W.: Strategie und Struktur in der Automobilindustrie, Dissertation, Gabler, Wiesbaden 2010.
- [52] Roodbergen, Kees Jan; Vis, Iris F.A.: A survey of literature on automated storage and retrieval systems, European Journal of Operational Research, 194, S.343 - 362, Elsevier Science B.V., 2009.
- [53] Sauerbier, Thomas: Theorie und Praxis von Simulationssystemen: Eine Einführung für Ingenieure und Informatiker, Vieweg, Wiesbaden 1999.
- [54] Schuh, Günther (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung, 3.Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006.
- [55] Schuh, Günther; Stich, Volker, Produktionsplanung und -steuerung 1, 4.Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- [56] Staehle, Wolfgang: Kennzahlen und Kennzahlensysteme als Mittel der Organisation und Führung von Unternehmen, Springer, Wiesbaden 1969.
- [57] Töpfer, Armin: Erfolgreich Forschen, 2.Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2010.
- [58] Trapletti, Adrian; Hornik, Kurt; LeBaron, Blake: Time series analysis and computational finance; Version 0.10-34, veröffentlicht am 20.02.2015 um 14:16:24 Uhr.
- [59] Unbehauen, Heinz; Ley, Frank: Das Ingenieurwissen Regelungs- und Steuerungstechnik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2014.

- [60] Weber, Wolfgang; Kabst, Rüdiger: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre, 7.Auflage, Gabler/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009.
- [61] Weyer, Matthias: Das Produktionssteuerungskonzept Perlenkette und dessen Kennzahlensystem, Dissertation, Helmesverlag, Karlsruhe 2002.
- [62] Weyer, Matthias; Spath, Dieter: Das Kennzahlensystem des Produktionssteuerungskonzepts "Perlenkette", ZWF, 96, S.166-119, Carl Hanser Verlag, München, 2001.
- [63] Wunsch, Gerhard; Schreiber, Helmut: Stochastische Systeme, 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006.