

Hannes Schollenberger

Analyse und Verbesserung der Arbeitsabläufe in Betrieben der Reparaturlackierung



Hannes Schollenberger

**Analyse und Verbesserung der Arbeitsabläufe
in Betrieben der Reparaturlackierung**

Analyse und Verbesserung der Arbeitsabläufe in Betrieben der Reparaturlackierung

von
Hannes Schollenberger



universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, genehmigt von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der
Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2006

Referenten: Prof. Dr. O. Rentz
Prof. Dr. G. Bol

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de



Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Universitätsverlag Karlsruhe 2006
Print on Demand

ISBN 3-86644-012-X

*para Mónica, Sebastián y Elisa
por ser como son y hacer de mi lo que soy*

meiner Großmutter

Der beste Beweis für Weisheit ist beständig gute Laune.

Michel de Montaigne (1533 - 1592)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) der Universität Karlsruhe (TH) in den Jahren 2001 bis 2006. Grundlage der Untersuchungen war ein umfangreiches Forschungsprojekt zur Bestimmung des Arbeitszeitbedarfs in Herstellerwerkstätten der Autoreparaturlackierung, das im Auftrag des Verbands der Automobilindustrie (VDA) zwischen Juni 2001 und Februar 2003 durchgeführt wurde.

Zur Entstehung dieser Arbeit haben mehrere Personen direkt und indirekt beitragen. Ihnen möchte ich an dieser Stelle danken:

- Herrn Prof. Dr. O. Rentz, Leiter des IIP, für die Möglichkeit an seinem Institut zu wirken und zu lernen sowie die Betreuung der Arbeit,
- Herrn Prof. Dr. G. Bol für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht der Arbeit,
- Frau PD Dr. J. Geldermann für die zahlreichen anregenden Diskussionen, die fachliche Führung und das Teilen wertvoller Erfahrungen,
- meinen Kollegen der Arbeitsgruppe für Technikbewertung und Risikomanagement, Frau Dr. N. Avci, Herrn N. Peters, Herrn M. Treitz, Herrn V. Bertsch und Herrn J. Ludwig für die sehr gute Zusammenarbeit und ihre Unterstützung,
- den Mitgliedern des Arbeitskreises Lack im VDA sowie den an den Studien beteiligten Werkstätten für die erfolgreiche und freundschaftliche Zusammenarbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Familien und meinen Freunden, die mir stets mit dem notwendigen Verständnis, einer beständige Geduld und einer verlässlichen Unterstützung zur Seite standen: *Gracias por todo.*

Karlsruhe, im März 2006

Hannes Schollenberger

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Lösungsansatz	3
2 Produktintegrierter Umweltschutz	7
2.1 Emissionsminderung auf betrieblicher Ebene	8
2.2 Produktintegrierte Ansätze	11
2.3 Lösemittelreduzierte Lacksysteme als Minderungsmaßnahme	14
2.3.1 Der Aufbau von Lacksystemen	14
2.3.2 Zusammenhang zwischen Lackaufbau und VOC-Emissionen	16
2.3.3 Wasserbasierte Lacke	19
2.3.4 Festkörperreiche Flüssiglacke	20
2.3.5 Pulverlacke	21
2.3.6 Fallbeispiel Autoreparaturlackierung	22
3 Bestehende Ansätze zur Lösung der vorliegenden Planungsaufgabe	25
3.1 Produktionswirtschaftliche Einordnung der Reparaturlackierung	25
3.1.1 Die Reparaturlackierung als Dienstleistung	25
3.1.2 Planung im Kontext der Reparaturlackierung	27
3.2 Belegungsplanung bei Reihenfertigung	28
3.2.1 Grundlagen der Ablaufplanung	28
3.2.2 Ansätze der Ablaufplanung bei Reihenfertigung	32
3.2.3 Schlussfolgerungen für die Planung in der Reparaturlackierung	36
3.3 Arbeitszeiten als Maß des Arbeitsablaufs	36

3.3.1	Arbeitszeitstudien als Verfahren zur Prozessbeschreibung und -bewertung	37
3.3.2	Besonderheiten bei handwerklichen Tätigkeiten	39
3.4	Methoden zur Berücksichtigung von Unsicherheiten	41
3.4.1	Fehlerrechnung	42
3.4.2	Ansätze der Fuzzy-Theorie	43
3.4.3	Monte-Carlo-Simulation	45
3.4.4	Auswahl eines Verfahrens zur Abbildung der Unsicherheit der Ar- beitszeiten in der Reparaturlackierung	48
4	Analyse der Arbeitsabläufe in der Reparaturlackierung	51
4.1	Charakterisierung der Reparaturlackierung	52
4.1.1	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen	52
4.1.2	Die Reparaturlackierung im Kontext der Automobilbranche	53
4.1.3	Umweltrechtliche Rahmenbedingungen	55
4.2	Arbeitszeitstudien in der Reparaturlackierung	60
4.2.1	Der Lackierprozess als Reihenfertigung	60
4.2.2	Umfang und Durchführung der Datenerhebung	64
4.2.3	Vorgehensweise bei der Bestimmung der Zeitparameter	67
4.3	Ergebnisse der Zeitstudien	76
4.3.1	Charakterisierung des Datensatzes	76
4.3.2	Zeitparameter	79
4.3.3	Ermittelte Unsicherheiten	87
5	Verbesserung der Auftragsreihenfolge unter Berücksichtigung von Unsicher- heiten	97
5.1	Umsetzung der Ablaufplanung	98
5.1.1	Planungsbedingungen der Reparaturlackierung	98
5.1.2	Definition des Planungsproblems	100
5.1.3	Abbildung der Unsicherheit	101
5.1.4	Softwaretechnische Umsetzung	106
5.2	Ergebnisse der Berechnungen	107
5.2.1	Gewählte Beispielaufträge	107
5.2.2	Die deterministische Lösung des Problems	111
5.2.3	Ergebnisse unter Berücksichtigung der unsicheren Datengrundlage	115
5.3	Bedeutung der Ergebnisse für die Praxis	128

6 Handlungsempfehlungen für Reparaturlackierbetriebe	133
6.1 Reihenfolge der Auftragsbearbeitung	134
6.1.1 Bearbeitungsreihenfolge bei drei Maschinen und einem Vorbereiter .	134
6.1.2 Bearbeitungsreihenfolge bei drei Maschinen und zwei Vorbereitern .	138
6.2 Gute Betriebspraxis	142
6.2.1 Materialbereitstellung	142
6.2.2 Gruppieren von Aufträgen gleicher Farbe	144
6.2.3 Gruppieren bestimmter Teilarbeiten	146
6.2.4 Schleifarbeiten	148
7 Schlussfolgerungen und Ausblick	151
7.1 Bedeutung von Zeitstudien im Kontext produktintegrierter Umweltschutz- maßnahmen	152
7.2 Möglichkeiten der Verbesserung des Arbeitsablaufs in der Kfz-Reparatur- lackierung	153
7.3 Neuere Entwicklungen und Erweiterungsmöglichkeiten des Ansatzes	158
8 Zusammenfassung	163
Literaturverzeichnis	167
A Programmcode des Ansatzes zur Ablaufplanung	189
B Daten der Fallstudien	195

Abbildungsverzeichnis

2.1	Klassifizierung betrieblicher Umweltschutztechnologien	9
2.2	Darstellung der Phasen des Produktes Lack	12
2.3	Maßnahmen zur Minderung von VOC-Emissionen	13
2.4	Veränderung der Emissionszahl in Abhängigkeit von Festkörper (C_{FK}) und Wasseranteil (C_W) bei einem Auftragswirkungsgrad $\eta = 35\%$	18
2.5	Ansätze zur Minderung von VOC-Emissionen in der Reparaturlackierung .	24
3.1	Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Fertigungsumgebungen . .	30
3.2	Einflussfaktoren auf den Zeitbedarf in der Autoreparaturlackierung	41
3.3	Dreieckige Zugehörigkeitsfunktion der Bearbeitungszeit p_{ij}	44
3.4	Häufigkeitsverteilung der Vorbereitungszeit eines Auftrags	46
4.1	Zeitplan zur Umsetzung der EU-Lösemittel-Richtlinie	56
4.2	Beispiel für das Layout der Lackiererei einer Autoreparaturwerkstatt . . .	66
4.3	Zuordnungsprozess zur Einteilung der Schritte	70
4.4	Residual- gegen tatsächlichen Wert am Beispiel eines Arbeitsschrittes . . .	73
4.5	<i>Scale-Location Plot</i> für den Datensatz aus Abbildung 4.4	73
4.6	QQ-Plot der Residualwertes des Datensatzes aus Abbildung 4.4	74
4.7	Cook'sche Entfernungen der Messwerte des Arbeitsschrittes aus Abbildung 4.4	74
4.8	Anzahl der Daten pro Arbeitsschritt	77
4.9	Beispiel für den Datensatz des Arbeitsschrittes Basislack spritzen 1.Gang .	77
4.10	Aufteilung der Arbeitsschritte auf die unterschiedlichen Kategorien	78
4.11	Verteilung der Bearbeitungsflächen der aufgenommen Aufträge	79
4.12	Histogramm der Quotienten $\frac{LS_{cor}}{LS_{all}}$	83
4.13	Histogramm der Quotienten $\frac{LMS_{cor}}{LMS_{all}}$	83
4.14	Histogramm der Quotienten $\frac{LTS_{cor}}{LTS_{all}}$	83
4.15	Anzahl der konstanten Schritte mit zugehöriger Anzahl an Ausreißern . . .	85
4.16	Anzahl der flächenabhängigen Schritte mit zugehöriger Anzahl an Ausreißern	85

4.17 Vergleich der berechneten und gemessenen Zeiten für zehn Aufträge der Reparaturlackierung	87
4.18 Histogramm der Messwerte des Arbeitsschrittes <i>IRT-Strahler aufstellen</i> . .	88
4.19 QQ-Diagramm der Messwerte des Arbeitsschrittes aus Abbildung 4.18 . . .	89
4.20 QQ-Diagramm der logarithmierten Messwerte des Arbeitsschrittes aus Ab- bildung 4.18	89
4.21 Beispiele für den Vergleich der kumulierten Häufigkeitsfunktion mit den theoretischen Verteilungen	89
4.22 Histogramm der Gesamtfläche der bearbeiteten Aufträge	90
4.23 QQ-Plot der Flächenwerte größer 10 dm^2 zweier Fahrzeugmodelle	91
4.24 QQ-Plot der logarithmierten Flächenwerte größer 10 dm^2 zweier Fahrzeug- modelle	91
4.25 Vergleich der kumulierten Häufigkeitsfunktionen der Flächenwerte aus Ab- bildung 4.23 und der zugehörigen Normalverteilung	92
4.26 Vergleich der kumulierten Häufigkeitsfunktionen der Flächenwerte aus Ab- bildung 4.24 und der zugehörigen log-Normalverteilung	92
4.27 Beispielhafte Darstellung der Ermittlung der Bearbeitungszeit eines Auf- trags in der Autoreparaturlackierung	96
5.1 Vorgehensweise bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktio- nen der Bearbeitungszeiten der einzelnen Jobs auf den Maschinen	105
5.2 Relative Verbesserung der Zykluszeit im deterministischen Fall	112
5.3 Anzahl der optimalen Reihenfolgen im deterministischen Fall	112
5.4 Berechneter Belegungsplan für das Fallbeispiel T11	113
5.5 Belegungsplan ohne Totzeiten für das Fallbeispiel T11	114
5.6 Berechneter Belegungsplan für das Fallbeispiel T21	115
5.7 Belegungsplan ohne Totzeiten für das Fallbeispiel T21	115
5.8 Mittlere relative Verbesserung der Zykluszeit für die 12 Fallbeispiele unter Berücksichtigung der Unsicherheit	116
5.9 Histogramme der relativen Zeitersparnis für Besetzung 1	118
5.10 Histogramme der relativen Zeitersparnis für Besetzung 2	119
5.11 Histogramme der minimalen Zykluszeiten für Besetzung 1	121
5.12 Histogramm der minimalen Zykluszeiten für Besetzung 2	122
5.13 Histogramm der Anzahl optimaler Reihenfolgen für Besetzung 1	124
5.14 Histogramm der Anzahl optimaler Reihenfolgen für Besetzung 2	125
5.15 Relative Verbesserung der Zykluszeit der 12 Fallbeispiele für die determi- nistischen Eingangstabellen der Ziehung 703	126

5.16	Histogramm der relativen Verbesserung der Zykluszeit für alle Fallbeispiele der Besetzung 1	132
5.17	Histogramm der relativen Verbesserung der Zykluszeit für alle Fallbeispiele der Besetzung 2	132
6.1	Vergleich des Anteils der Wegezeit an der Gesamtzeit des Auftrags	144
6.2	Gesamtfläche und Zeitersparnis bei gemeinsamer Füllerapplikation mehrerer Aufträge	148
6.3	Prozentuale Anteile der Arbeitsabschnitte für drei Aufträge	149

Tabellenverzeichnis

3.1	Zielgrößen der Ablaufplanung	31
4.1	Marktanteile bei Wartung und Reparatur	52
4.2	Maximale VOC-Gehalte der Einsatzmaterialien der Reparaturlackierung mach dem vereinfachten Reduzierungsplan	58
4.3	Definition der Lackstufen für metallische Untergründe	62
4.4	Definition der Lackstufen für Kunststoff	63
4.5	Übersicht über die untersuchten Werkstätten	64
4.6	Charakterisierung der untersuchten Werkstätten	65
4.7	Auswahl verwendeter Arbeitsschritte	67
4.8	Vergleich der Steigungen der Regressionsgeraden der unterschiedlichen Schätzverfahren	80
4.9	Vergleich des flächenabhängigen Zeitbedarfs der einzelnen Lackstufen	84
4.10	Minima, Maxima und Mittelwerte der relativen Standardabweichung der Arbeitsschritte	92
4.11	Unsicherheiten der Arbeitsabschnitte der Lackstufen	94
5.1	Die neun gewählten Aufträge des Fallbeispiels T11	108
5.2	Übersicht über die Daten der Fallstudie 1 der Besetzung 1	110
5.3	Relative Standardabweichung der minimalen Zykluszeiten für Besetzung 1	120
5.4	Relative Standardabweichung der minimalen Zykluszeiten für Besetzung 2	120
5.5	Überblick über die Verbesserung der Gesamtbearbeitungszeit	127
5.6	Einsparmöglichkeiten bei der Betriebszeit der Kombikabine für Besetzung 1	130
6.1	Häufigkeit der Nummer des zuletzt bearbeiteten Auftrags der optimalen Reihenfolgen für Besetzung 1	135
6.2	Häufigkeit der Nummer des zuerst bearbeiteten Auftrags der optimalen Reihenfolgen für Besetzung 1	135
6.3	Ergebnisse des Tests auf Hypothese 1 für Besetzung 1	136

6.4	Ergebnisse des Tests auf Hypothese 2 für Besetzung 1	136
6.5	Häufigkeit der Nummer des zuletzt bearbeiteten Auftrags der optimalen Reihenfolgen für Besetzung 2	138
6.6	Häufigkeit der Nummer des zuerst bearbeiteten Auftrags der optimalen Reihenfolgen für Besetzung 2	139
6.7	Ergebnisse des Tests auf Hypothese 1 für Besetzung 2	139
6.8	Ergebnisse des Tests auf Hypothese 2 für Besetzung 2	139
6.9	Ergebnisse des Tests auf Hypothese 3 für Besetzung 2	140
6.10	Doppelt auftretende Arbeitsschritte bei gleichzeitiger Füllerapplikation . .	147
B.1	Übersicht über die Daten der Fallstudie 2 für Besetzung 1	196
B.2	Übersicht über die Daten der Fallstudie 3 für Besetzung 1	197
B.3	Übersicht über die Daten der Fallstudie 4 für Besetzung 1	198
B.4	Übersicht über die Daten der Fallstudie 5 für Besetzung 1	199
B.5	Übersicht über die Daten der Fallstudie 6 für Besetzung 1	200
B.6	Übersicht über die Daten der Fallstudie 1 für Besetzung 2	201
B.7	Übersicht über die Daten der Fallstudie 2 für Besetzung 2	202
B.8	Übersicht über die Daten der Fallstudie 3 für Besetzung 2	203
B.9	Übersicht über die Daten der Fallstudie 4 für Besetzung 2	204
B.10	Übersicht über die Daten der Fallstudie 5 für Besetzung 2	205
B.11	Übersicht über die Daten der Fallstudie 6 für Besetzung 2	206

Abkürzungsverzeichnis

AZT	Allianz Zentrum für Technik
DAT	Deutsche Automobil- und Treuhand GmbH
d.h.	das heißt
F	Finsh
L	Lackierung
LG	Leistungsgrad
LHS	<i>Latin Hypercube Sampling</i>
LMS	<i>Least Median of Squares</i>
LS	<i>Least Sum of Squares</i>
LTS	<i>Least Trimmed Sum of Squares</i>
MwSt.	Mehrwertsteuer
pdf	<i>probability density function</i> (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion)
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (ehemals Reichsverband für Arbeitszeitermittlung)
s.o.	siehe oben
SVS	Stundenverrechnungssatz
u.a.	unter anderem
UV	Ultraviolettstrahlung
V	Vorbereitung
VDA	Verband der Automobilindustrie
vgl.	vergleiche
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i> (flüchtige organische Verbindungen)
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Die Minderung der Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen, zu denen auch die flüchtigen organischen Verbindungen (*Volatile Organic Compounds*, VOC) zählen, war und ist einer der Schwerpunkte nationaler und internationaler Umweltpolitik und -gesetzgebung. Beginnend mit dem 1979 getroffenen Übereinkommen über die weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung [233] wurden in den letzten 25 Jahren in Europa schadstoffbezogene wie auch branchenspezifische Regelungen zur Verminderung der VOC-Emissionen verabschiedet.

Der sich wandelnde Charakter umweltpolitischer Instrumente hin zu produktintegrierten Ansätzen (Primärmaßnahmen) hat einen verstärkten Einfluss auf einen Großteil industrieller Aktivitäten. Führt der Einsatz von Sekundärmaßnahmen der Emissionsminderung lediglich zu einer Erweiterung des Prozesses durch Ergänzung um eben jenen Schritt der Minderung durch z.B. thermische Verfahren, greifen produktintegrierte Ansätze häufig direkt in den Prozessablauf ein und erfordern eine entsprechende Anpassung desselbigen. Dies gilt auch für den Bereich der Lackanwendung, der auf Grund der eingesetzten Lösemittel für einen bedeutenden Anteil der VOC-Emissionen in Europa verantwortlich ist [164].

Die Autoreparaturlackierung¹, die bei einem Volumenanteil von ca. 2% am Farbenmarkt [31] für ca. 10% der VOC-Emissionen aus der Lackanwendung verantwortlich ist [76], ist einer der ersten Sektoren aus dem Bereich der Oberflächenbehandlung, der direkt von einer Produktrichtlinie betroffen ist [56]. Diese begrenzt den maximalen Anteil an Lösemitteln in den eingesetzten Lack- und Verbrauchsmaterialien².

¹ Der Sektor der Autoreparaturlackierung kann unterteilt werden in die PKW- und die Nutzfahrzeugreparaturlackierung. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird unter dem Begriffen *Autoreparaturlackierung*, *Kfz-Reparaturlackierung* und *Reparaturlackierung* ausschließlich die Lackierung von instandgesetzten PKWs verstanden.

² Hierzu zählen vor allem unterschiedliche Reinigungsmittel und Schleifpasten.

Die daraus resultierende Notwendigkeit, neue Produkte einzusetzen, verlangt Anpassungen der bisherigen Prozesse der Reparaturlackierung. Wegen der höheren Preise der neuen Materialien sind Maßnahmen erforderlich, um wirtschaftliche Nachteile zu vermeiden. Hierbei spielen nicht nur gesteigerte Effizienzen beim Materialeinsatz eine Rolle [179], sondern auch die Arbeitsabläufe, die ebenso ein Verbesserungspotenzial aufweisen [198]. Vor allem ein verbesserter Einsatz der Arbeitskräfte im Betrieb erscheint in Folge des hohen Personalkostenanteils von großer Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit der Reparaturlackierbetriebe [96, 183].

Veränderungen im Arbeitsablauf als Folge des Einsatzes neuer Materialien können mit Hilfe von REFA-Zeitstudien erfasst werden [174]. Im Zusammenhang mit dem Arbeitsablauf in der Reparaturlackierung müssen dabei zwei wichtige Aspekte unterschieden werden:

1. Veränderungen der Arbeitsweise bei bestimmten Arbeitsschritten bzw. Teilabschnitten des Gesamtprozesses.
2. Die Reihenfolge, in der die zu bearbeitenden Aufträge durchgeführt werden, d.h. die Ablaufplanung.

Eine Verbesserung der Abläufe in den genannten Aspekten führt zu einem verbesserten Personaleinsatz und damit zu einer Steigerung der Effizienz des Prozesses. Diese ist zudem notwendig, da reduzierte Schadensumfänge und abnehmende Auftragszahlen als Folge zunehmender Sicherheitsinstrumente im Fahrzeug (Einparkhilfen etc.) sowie im Straßenverkehr (z.B. verkehrsberuhigte Zonen mit Tempolimit 30) den Wettbewerbsdruck auf die Reparaturwerkstätten erhöhen und voraussichtlich zu einer Reduzierung der Anzahl der Betriebe in Deutschland von derzeit rund 12.500 auf ca. 8.000 führen werden [65].

Auf Grund der geringen Personalkapazität kleinerer Betriebe, die auch den Sektor der Reparaturlackierung dominieren [184, 193], und der sehr variierenden Produktionsweise stehen in der Autoreparaturlackierung keine Instrumente zur Betriebssteuerung zur Verfügung. Diese jedoch könnten zur Steigerung der tatsächlichen Kapazität als Folge eines verbesserten Arbeitsablaufs in den Betrieben führen.

Von großer Bedeutung bei der Ablaufplanung allgemein ist die Unsicherheit [63]. Neben der zufälligen Unsicherheit, wie sie durch unvorhergesehene Veränderungen des Produktionssystems, z.B. durch Maschinenstillstände, verursacht werden, sind auch die Planungsdaten unsicher. Diese Unsicherheiten können dazu führen, dass Lösungen des deterministischen Falls in der Praxis undurchführbar werden [175]. Durch die empirische Bestimmung

und Berücksichtigung bestehender Unsicherheiten können die betriebsindividuellen Besonderheiten der Reparaturlackierung bei der Ablaufplanung besser berücksichtigt werden.

Bei der Reparaturlackierung ist die Lackierkabine zentrales Element des Prozesses. Ihre Bedeutung ist vergleichbar mit der einer Engpassstelle bei automatisierten Produktionssystemen [90], da durch Anzahl und Art der eingesetzten Lackierkabinen die Anzahl der durchführbaren Aufträge beschränkt wird. Das Bestreben eines Lackierbetriebes sollte folglich die optimale Auslastung der Kabine sein [10, 94].

An die Umsetzung produktintegrierter Umweltschutzmaßnahmen in der Reparaturlackierung stellen sich folglich besondere Anforderungen auf Grund des handwerklichen Charakters des Prozesses. Zudem handelt es sich um einen Sektor mit hoher Variabilität in Ausstattung und Arbeitsweise. Daneben bietet der Einsatz neuer Produkte die Möglichkeit, vorherrschende Prozesse zu analysieren und dadurch zusätzliches Einsparpotenzial zu identifizieren. So können neben einer wirtschaftlichen Umsetzung der notwendigen Maßnahmen, Handlungsempfehlungen als Reaktion auf steigenden Wettbewerbsdruck innerhalb des Sektors entwickelt werden.

1.2 Zielsetzung und Lösungsansatz

Die Verpflichtung zum Einsatz produktintegrierter Minderungsmaßnahmen wird Prozesse und Abläufe in der Reparaturlackierung beeinflussen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die **Analyse** des Arbeitsablaufs in der handwerklichen Reparaturlackierung sowie dessen mögliche **Verbesserung** unter Berücksichtigung vorherrschender Unsicherheiten. Des Weiteren soll das Verbesserungspotenzial auf der Ebene einzelner Arbeitsschritte identifiziert und **Handlungsempfehlungen** für die Realisierung möglicher Zeitersparnisse abgeleitet werden.

Ausgangspunkt der Untersuchung sind umfangreiche Arbeitszeitstudien nach REFA. Der sich daraus ergebende Datensatz wird mit Hilfe statistischer Methoden analysiert und der Zeitbedarf der einzelnen Arbeitsschritte der Reparaturlackierung bestimmt. Zudem werden aus den Daten die in der Praxis herrschenden Unsicherheiten ermittelt.

Die **aggregierten** Werte des Zeitbedarfs sowie deren Unsicherheiten sind die Grundlage der Ablauf- bzw. Reihenfolgenplanung. Dabei wird ein Verfahren zur Reihenfolgenplanung mit der Monte-Carlo-Simulation verknüpft, wodurch eine Abbildung der Unsicherheiten möglich wird. Dabei soll der Einfluss der Unsicherheiten auf die Ergebnisse der

Ablaufplanung untersucht sowie das Verbesserungspotenzial für das Anwendungsbeispiel Reparaturlackierung bestimmt werden.

Unter Verwendung der Arbeitszeiten auf **disaggregierter** Ebene können Schwachstellen des Arbeitsablaufs identifiziert werden. Mit einem Vergleich einzelner Arbeitsschritte können Aussagen hinsichtlich des Einflusses der Werkstattausstattung auf den Zeitbedarf getroffen werden. Zudem kann die aus der Anpassung des Betriebsablaufs resultierende Zeitersparnis bestimmt werden. Daraus lassen sich Handlungsempfehlungen für die Reparaturlackierung ableiten und deren Einsparpotenzial teilweise quantifizieren.

Der Aufbau der Arbeit gestaltet sich folgendermaßen: Zunächst wird auf den produktintegrierten Umweltschutz im Allgemeinen eingegangen. Ausgehend von Möglichkeiten der Emissionsminderung auf betrieblicher Ebene und einer entsprechenden Klassifizierung der Maßnahmen (Kapitel 2.1) werden Hintergrund, Art der Anwendung und Wirkungsweise produktintegrierter Ansätze näher erläutert (Kapitel 2.2). Ein Schwerpunkt wird dabei auf die Minderungsmöglichkeiten für VOC-Emissionen gelegt. Diese werden größtenteils von nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen emittiert, zu denen auch die Werkstätten der Reparaturlackierung zählen. Schließlich wird mit den lösemittelreduzierten Lacksystemen die gängigste produktintegrierte Minderungsmaßnahme der Oberflächenbeschichtung vorgestellt (Kapitel 2.3). Hierbei wird neben den unterschiedlichen Lösungsansätzen speziell das gewählte Anwendungsbeispiel der Reparaturlackierung betrachtet.

Im Anschluss wird auf bestehende Ansätze zur Lösung des vorliegenden Planungsproblems näher eingegangen. Nach einer produktionswirtschaftlichen Einordnung der Reparaturlackierung (Kapitel 3.1) wird die Planung bei Reihenfertigung ausführlicher beschrieben (Kapitel 3.2). Dabei wird zunächst ein Überblick über die Grundlagen der Ablaufplanung gegeben. Anschließend werden die unterschiedlichen Ansätze der Ablaufplanung bei Reihenfertigung behandelt. Die Arbeitszeit als Maß des Arbeitsablaufs (Kapitel 3.3) ist Gegenstand des folgenden Abschnitts. Im Kontext dieser Arbeit sind dabei besonders Arbeitszeitstudien als Verfahren zur Prozessbeschreibung und -bewertung von Interesse sowie die bei handwerklichen Tätigkeiten zu berücksichtigenden Besonderheiten. Für die sich daraus ergebende notwendige Abbildung der Unsicherheit werden unterschiedliche Methoden beschrieben (Kapitel 3.4) und ein für das behandelte Problem geeignetes Verfahren ausgewählt.

Kapitel 4 widmet sich dem Anwendungsbeispiel Reparaturlackierung. Nach einer Charakterisierung des betrachteten Sektors unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und rechtlicher Rahmenbedingungen (Kapitel 4.1) werden die Grundlagen der durchgeführten Arbeitszeitstudien beschrieben (Kapitel 4.2). Zunächst wird der Prozess der Reparaturlackie-

nung als Reihenfertigung dargestellt, dann werden Umfang und Durchführung der Datenerhebung erläutert. Schließlich wird ausführlich auf die Vorgehensweise zur Bestimmung der Zeitparameter eingegangen. Zu den für den weiteren Verlauf relevanten Ergebnissen der Zeitstudien (Kapitel 4.3) gehören die allgemeine Charakterisierung des erhaltenen Datensatzes, die berechneten Zeitparameter, mit deren Hilfe der Zeitbedarf der Reparaturlackierung auf unterschiedlichen Aggregationsstufen ermittelt werden kann, sowie die empirischen Unsicherheiten, die die in der Praxis herrschende Vielfalt bei Ausstattung und Durchführung wiedergeben.

Für die Umsetzung der Ablaufplanung (Kapitel 5.1) müssen die Planungsbedingungen der Kfz-Reparaturlackierung betrachtet werden. Darauf aufbauend kann das Planungsproblem für das Anwendungsbeispiel definiert und die Unsicherheit entsprechend abgebildet werden. Durchgeführt wird die Berechnung der optimalen Reihenfolgen mittels eines dafür erstellten computergestützten Programms. Die Ergebnisse der Ablaufplanung (Kapitel 5.2) basieren auf repräsentativen Beispielaufträgen. Um den Einfluss der Unsicherheit auf die Lösungen des Ablaufplanungsproblems und die ermittelte Zeitersparnis untersuchen zu können, werden sowohl das deterministische als auch das stochastische Planungsproblem gelöst und die Ergebnisse vorgestellt. Abschließend wird dann auf die Bedeutung der erzielten Ergebnisse für die Praxis eingegangen (Kapitel 5.3).

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Ablaufplanung werden dann Handlungsempfehlungen in Form von Prioritätsregeln entwickelt, um zu untersuchen, inwieweit die ermittelte mögliche Zeitersparnis ohne Einsatz computerbasierter Verfahren in der Praxis realisiert werden kann (Kapitel 6.1). Daneben werden auf der Basis des Zeitbedarfs pro Arbeitsschritt weitere Handlungsempfehlungen für die Umsetzung einer guten Betriebspraxis entwickelt (Kapitel 6.2) und deren Einsparpotenzial untersucht. Wichtige Aspekte, die hierbei angesprochen werden, sind die Bereitstellung von Material und Werkzeugen, die Gruppierung von Aufträgen gleicher Farbe, die Ausführung bestimmter Arbeitsschritte kurz vor Ende des Arbeitstages sowie Bedeutung und Durchführung der Schleifarbeiten.

In den Schlussfolgerungen und dem Ausblick wird zunächst die Bedeutung von Arbeitszeitstudien im Kontext des produktintegrierten Umweltschutzes herausgearbeitet (Kapitel 7.1). Hierbei wird noch einmal auf die Arbeitszeit als Parameter für die Prozessbewertung sowie auf die angewendeten Auswertungsverfahren und deren Eignung eingegangen. Des Weiteren werden die Möglichkeiten zur Verbesserung des Arbeitsablaufs in der Reparaturlackierung abschließend bewertet (Kapitel 7.2). Im Mittelpunkt stehen dabei zum einen die unterschiedlichen Ansatzpunkte für eine Verbesserung, zum anderen wird die praktische Bedeutung der Ergebnisse zusammenfassend beurteilt. Bei den

neueren Entwicklungen (Kapitel 7.3) im Bereich der Reparaturlackierung wird vor allem auf Lack- und Karosseriezentren eingegangen. Für eine Weiterentwicklung des angewendeten methodischen Ansatzes lassen sich entweder die Zielgrößen oder die Annahmen hinsichtlich Art und Anzahl der Maschinen des Ablaufplanungsproblems erweitern bzw. modifizieren.

2 Produktintegrierter Umweltschutz

Strategische Ansätze der Emissionsminderung lassen sich in emissions- bzw. quellenorientierte und immissions- bzw. wirkungsorientierte Ansätze unterteilen [113]. Hinsichtlich der Quellen der Emission kann zwischen stationären und instationären bzw. mobilen Quellen unterschieden werden.

In der Umweltpolitik haben sich die quellenorientierten Ansätze etabliert. Zunächst wurde dabei in Deutschland das Instrumentarium des Ordnungsrechtes eingesetzt und ein Fokus auf Herstellungsprozesse gelegt. Dadurch wurde der Einsatz nachgeschalteter Technologien (sekundäre bzw. additive Maßnahmen) stimuliert und auf eine sachgemäße Entsorgung der Abfälle geachtet [189]. So konnten die Emissionen wichtiger Luftschadstoffe (CO, SO_x, Staub) drastisch reduziert werden. Bei einigen Schadstoffen, wie beispielsweise flüchtigen organischen Verbindungen (*Volatile Organic Compounds* (VOC)), stellen sich andere Herausforderungen, so dass auf zusätzliche Ansätze und Instrumente zurückgegriffen werden muss³.

Diese Instrumente setzen ebenso wie sekundäre Maßnahmen an der Betriebsebene an und haben daher Auswirkungen auf Prozesse und Abläufe (Kapitel 2.1). Ihre Umsetzung hängt von den jeweiligen Rahmenbedingungen des betroffenen Sektors bzw. Unternehmens ab, wobei sowohl die technische Machbarkeit als auch die ökonomische Adäquanz zu berücksichtigen sind [176]. Zu den durch die neueren Instrumente forcierten Lösungen gehören produktintegrierte Ansätze (Kapitel 2.2), die die Emissionen unter Betrachtung sämtlicher Lebensphasen eines Produktes zu reduzieren versuchen. Dabei stellen lösemittelreduzierte Lacksysteme ein Beispiel für eine produktintegrierte VOC-Minderungsmaßnahme aus dem Sektor der Lösemittelherstellung bzw. -anwendung dar (Kapitel 2.3).

³ Der Begriff *VOC* umfasst eine Vielzahl von Verbindungen. Daher handelt es sich auch bei VOC-Emissionen in der Regel um ein Stoffgemisch unterschiedlicher Zusammensetzung [127]. Die EU-Lösemittelrichtlinie (1999/13/EC) definiert „eine organische Verbindung, die bei 293,15 K einen Dampfdruck von 0,01 kPa oder mehr hat oder unter den jeweiligen Verwendungsbedingungen eine entsprechende Flüchtigkeit aufweist. Im Sinne dieser Richtlinie gilt der Kreosotanteil, der bei 293,15 K diesen Dampfdruck übersteigt, als flüchtige organische Verbindung“ [58].

2.1 Emissionsminderung auf betrieblicher Ebene

Ein Großteil der Schadstoffemissionen aus stationären Quellen sind Folge industrieller Aktivitäten. Eine Verringerung kann nur mittels Maßnahmen, die auf der Betriebs- bzw. Anlagen- oder der Prozessebene ansetzen, erreicht werden. Der dafür notwendige finanzielle Aufwand ist stark branchenabhängig. Während sich der Gesamtaufwand für Umweltschutz von Seiten der Industrie auf 0,7 % des Produktionswertes beläuft, werden z.B. in der chemischen Industrie 3 % des Gesamtumsatzes für Maßnahmen zur Erhaltung der Umwelt ausgegeben⁴. Manche Großunternehmen geben bis zu 20 % ihrer Fertigungskosten für Umweltschutzmaßnahmen aus [150].

Primäre Anforderungen an betriebliche Umweltschutzmaßnahmen sind die Verbesserung der Ressourceneffizienz sowie die medienübergreifende Reduzierung der Emissionen. Die zu diesem Zweck einsetzbaren Maßnahmen lassen sich bezüglich der eingesetzten Techniken in additive und integrierte Ansätze unterteilen⁵ (vgl. Abbildung 2.1).

Durch die Verwendung additiver Technologien, auch als „end-of-pipe“ Technologien bzw. sekundäre Maßnahmen bezeichnet, wird ausschließlich nachsorgender Umweltschutz betrieben [120]. Ziel dieser, der Produktion nachgeschalteten, Techniken ist entweder die Transformation entstandener Emissionen in Stoffe mit geringerer Umweltrelevanz (z.B. thermische Nachverbrennung, Biowäscher, etc.) oder die Rückgewinnung bzw. Rückführung eingesetzter Stoffe (z.B. Lösemittel durch Kondensationsverfahren). Auf Grund der Nachschaltung treten keine Verfahrensänderungen mit entsprechenden Aufwendungen in der Produktion auf. Dies gilt sowohl für den Prozess als auch dessen Ablauf [220].

Integrierte oder primäre Maßnahmen hingegen sind in den Produktionsprozess eingebettet und reduzieren die Entstehung umweltschädlicher Produkte, indem sie an den Emissionsquellen ansetzen. Dadurch sind sie noch mehr als die additiven Maßnahmen stark branchen- bzw. prozessspezifisch⁶. Bei einer Vielzahl primärer Minderungsmaßnahmen (z.B. Lackauftragsverfahren mit höherem Wirkungsgrad) steht der notwendigen Investition eine kostengünstigere Produktion und niedrigere Entsorgungskosten gegenüber, bedingt durch die Verringerung der eingesetzten Rohstoffe. Bei additiven Maßnahmen

⁴ Im Jahr 1996 lagen die Ausgaben der Chemischen Industrie für Maßnahmen der Luftreinhaltung bei 770 Mio € und gingen im Jahr 2001 auf 460 Mio € zurück, was auf das frühzeitige Engagement dieser Branche zurückzuführen ist. Andere Branchen des produzierenden Gewerbes, so z.B. Kokereien und Mineralölverarbeitung, steigerten im selben Zeitraum ihre Ausgaben von 340 Mio € auf 520 Mio € [216].

⁵ Die in Abbildung 2.1 genannte *umweltfreundliche Produktpolitik* stellt im Kontext dieser Arbeit keine Technologie des Umweltschutzes dar, sondern eine Anzahl von Maßnahmen.

⁶ Vgl. *Irink* [105] für ein Beispiel aus der Lackanwendung.

hingegen ist dies nur bei der Erzeugung marktfähiger Produkte der Fall (z.B. bei der Kondensation von Lösemitteln), da mit diesen Erlöse erzielt werden können⁷ (vgl. u.a. [34]).

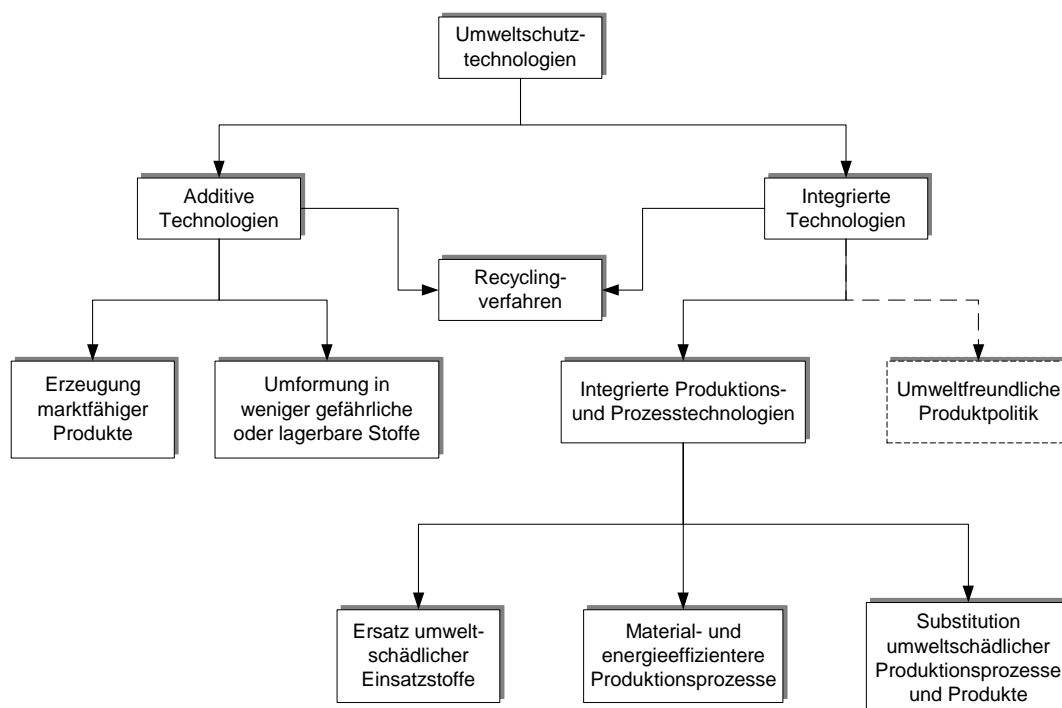


Abbildung 2.1: Klassifizierung betrieblicher Umweltschutztechnologien (in Anlehnung an [24])

Bis in die neunziger Jahre konzentrierten sich die Umweltschutzmaßnahmen in erster Linie auf die Verringerung des Schadstoffeintrags in die Luft [120]. Durch die Errichtung von Abluftreinigungsanlagen konnte in kurzer Zeit ein erheblicher Beitrag zur Reduzierung von Emissionen aus bestehenden Anlagen geleistet werden [197]. Dies gilt auch für die VOC-Emissionen bei genehmigungsbedürftigen Anlagen wie z.B. Raffinerien oder Lackierereien

⁷ Nichtsdestotrotz kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass primäre Maßnahmen in der Gesamtbetrachtung kostengünstiger sind als Sekundärmaßnahmen, wie *Rentz* [177] an ausgewählten Beispielen zeigt.

der Automobilproduktion. Eine weitere Minderung bestimmter Schadstoffe (u.a. VOC) wurde in der Folge durch die vermehrte Umsetzung integrierter Ansätze erreicht⁸.

Die umweltpolitisch bedeutendste Richtlinie auf europäischer Ebene, die einen integrierten Ansatz verlangt und direkte Konsequenzen auf Betriebsebene hat, ist die Richtlinie 1996/61/EG zur Integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) [55]. Sie beinhaltet die grundlegenden Anforderungen, die für neue oder bestehende Anlagen der im Anhang I der Richtlinie genannten Sektoren gelten. Diese grundlegenden Anforderungen umfassen eine Reihe von Maßnahmen zur Bekämpfung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie zur Abfallreduzierung [203]. Dabei werden Ansätze bevorzugt, die direkt an der Quelle ansetzen.

Zentrales Element dieser Richtlinie sind die Besten Verfügbaren Techniken (BVT), die Mindestanforderungen (Emissionsgrenzwerte, Ressourcenbedarf etc.) an die einzusetzenden Techniken⁹ für die einzelnen Sektoren definieren (vgl. u.a. [72, 107, 110]). Diese sind bei der Anlagenzulassung zu erfüllen und damit Grundlage des Genehmigungsverfahrens. Dadurch werden Mindeststandards für Prozesse bzw. Anlagen festgelegt, ohne eine bestimmte Technik im Detail vorzuschreiben [110].

Zu den betroffenen Industriesektoren der IVU-Richtlinie zählen auch Anlagen zur Behandlung von Oberflächen unter Verwendung organischer Lösemittel, deren Lösemitteldurchsatz größer als 150 kg/h bzw. 200 t/a ist [107]. Grund hierfür sind die dabei auftretenden Lösemittel- bzw. VOC-Emissionen. VOC tragen als Ozonvorläufersubstanzen zur Bildung des Sommersmogs bei. Auf Grund der negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, aber auch durch seine Phytotoxizität und den damit verbundenen negativen Einfluss auf z.B. die Produktivität im Gartenbau [29], stand und steht die Minderung troposphärischen Ozons im Fokus umweltpolitischer Strategien der Luftreinhaltung. Dies zeigt sich an den umfassenden Abkommen und Richtlinien auf europäischer und internationaler Ebene der letzten Jahrzehnte (vgl. u.a. [57, 180, 181, 233]).

Die Verwendung organischer Lösemittel bzw. lösemittelhaltiger Produkte ist für mehr als 50 % der anthropogenen Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus stationären Quellen verantwortlich [156]. 40 % der emittierten VOC dieser Kategorie stammen aus der

⁸ In diesem Zusammenhang weist *Börger* [25] berechtigterweise darauf hin, dass es sich beim (produktions)integrierten Umweltschutz nicht um eine „*neue Denkrichtung der Verfahrenstechnik*“ handelt, sondern dieser eine zwangsläufige Anpassung „*an veränderte Randbedingungen bei Auslegung und Betrieb von Anlagen*“ ist.

⁹ Unter Technik wird dabei „*sowohl die angewandte Technologie als auch die Art und Weise, wie die Anlage geplant, gebaut, betrieben und stillgelegt wird*“ verstanden [55].

Anwendung von Farben und Lacken. Der Sektor der Farben und Lackanwendung wird dominiert von kleinen und mittleren Unternehmen. So fallen beispielsweise in Deutschland nur 1 % der Anlagen zur Oberflächenbehandlung unter die seit März 1986 anwendbare Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) [145]. Dies führt dazu, dass 60 % der relevanten Emissionen aus nicht-genehmigungsbedürftigen Anlagen kommen, bei denen zudem auf Grund ihrer geringen Größe der Einsatz nachgeschalteter Emissionsminderungsmaßnahmen aus wirtschaftlichen bzw. technischen Gründen ausscheidet [7, 193]. Hier kann der Einsatz produktions- und produktintegrierte Minderungsmaßnahmen zu einer substantiellen Minderung der Lösemittlemissionen führen¹⁰.

2.2 Produktintegrierte Ansätze

Integrierte Minderungsmaßnahmen bzw. Umweltschutztechnologien lassen sich im weiteren Sinne in produktions- und produktorientierte Ansätze¹¹ unterteilen [177]. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich produktorientierte Ansätze betrachtet und näher beschrieben, weiterführende Informationen zu prozessintegrierten Ansätzen und Beispiele hierzu finden sich u.a. in [23, 33, 110, 205, 209]. Vor dem Hintergrund der VOC-Emissionsminderung wird dabei unter einem produktintegrierten Ansatz eine Maßnahme verstanden, die zu einer Minderung der Emissionen durch Verhinderung ihrer Entstehung selbst beiträgt. Dies kann sowohl bei der Herstellung des Produktes als auch bei dessen Gebrauch der Fall sein¹².

Produktintegrierte bzw. produktbezogene Minderungsmaßnahmen entstehen im Zusammenhang mit dem Einsatz eines neuen Produktes, der im Vergleich zu einem Referenzprodukt zu einer geringeren Umweltbelastung führt [176]. Produktintegrierte Ansätze beziehen sich allgemein auf die fünf Phasen eines Produktes: Werkstoffherstellung, Produktion, Nutzung, Recycling und Entsorgung (Abbildung 2.2). Vor dem Hintergrund der Minderung von VOC-Emissionen, die hauptsächlich aus dem Einsatz von Lacken resul-

¹⁰ Auch *Rentz* [177] stellt in seiner Übersicht fest, dass bei der VOC-Minderung eine Tendenz zur Verwendung von Primärmaßnahmen besteht.

¹¹ Gerade im Bereich der Lackanwendung bietet sich ein zusätzliches Potenzial zur Verminderung des Materialverbrauchs und damit der Emissionen durch eine Verbesserung der Betriebsorganisation bzw. des Betriebsablaufs. Mögliche Maßnahmen sind z.B. die Schulung der Mitarbeiter sowie eine Umstellung der Reinigungsprozesse (vgl. [158]). Auf diese Möglichkeiten soll hier nicht detailliert eingegangen werden, jedoch finden sich in Kapitel 6 Handlungsempfehlungen für die Reparaturlackierung, die zusätzlich zu einer Minderung der Umwelteinwirkungen führen.

¹² Beispiele für solche Maßnahmen sind u.a. die Eliminierung des Bleis aus Benzin, die Reduzierung des Phosphatgehaltes in Waschmitteln oder die Entschwefelung von Mitteldestillaten [177, 189]

tiert, kann die Reparaturlackierung als die Nutzungsphase des Produktes Lack verstanden werden (vgl. Abbildung 2.2 und Kapitel 4.1). Diese ist hinsichtlich der VOC-Emissionen die bedeutungsvollste Lebensphase, da bei Werkstoffherstellung und Produktion in nahezu geschlossenen Systemen gearbeitet wird und so die Lösemittelverluste $<1\%$ betragen [7, 228]. Je nach betrachteter Lebensphase eines Produktes werden für die Umsetzung produktintegrierter Maßnahmen unterschiedliche Ansätze verfolgt [85].

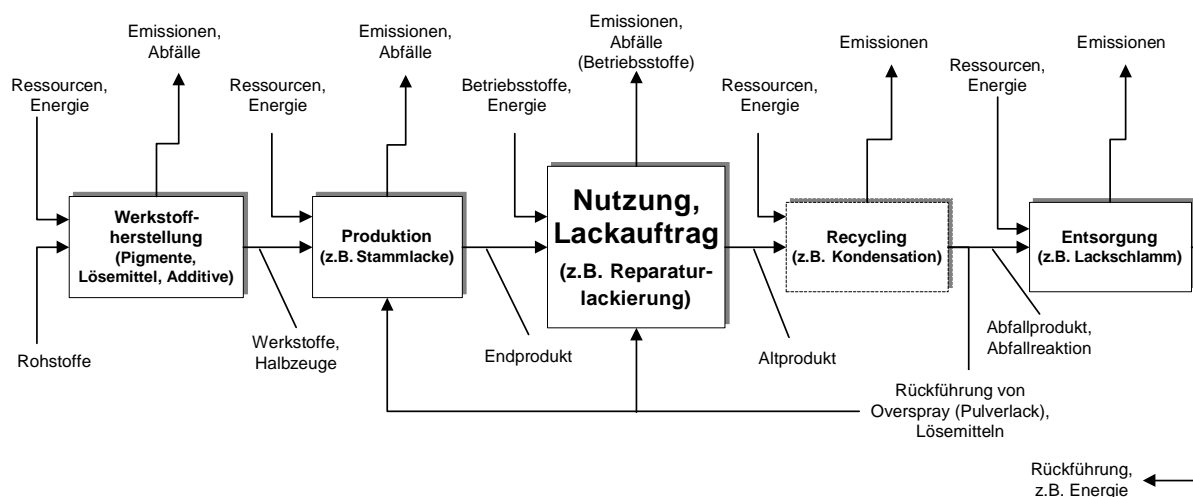


Abbildung 2.2: Darstellung der Phasen des Produktes Lack (in Anlehnung an [85])

Das stoffliche Recycling ist ein Beispiel für eine produktbezogene Maßnahme. Es besitzt eine besondere Bedeutung bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes, da durch die Rückführung von Kuppelprodukten in den Produktionskreislauf bzw. die Wiederverwendung von Produkten nach der Gebrauchsphase eine Verminderung des Ressourcenverbrauchs erzielt werden kann¹³ [218]. Bei luftgängigen Emissionen, die ein spezielles Kuppelprodukt darstellen [177], hängt es jedoch stark vom jeweiligen Schadstoff ab, ob eine Rückführung in den Prozess technisch und ökonomisch sinnvoll ist.

Im Fall von VOC-Emissionen stellt die Rückgewinnung und der erneute Einsatz eine mögliche Minderungsmaßnahme dar (Abbildung 2.3). Diese wird jedoch nur dann eingesetzt, wenn sie sich als kostengünstiger im Vergleich zum Einsatz alternativer Produkte erweist bzw. aus der Rückführung der wiedergewonnenen Lösemittel eine Reduzierung des Einsatzes neuer Lösemittel resultiert, wie z.B. bei der Herstellung lösemittelhaltiger Farben [161]. Da Anlagen zur Rückgewinnung von VOC zu den additiven Maßnahmen zählen, sollen sie hier nicht weiter betrachtet werden.

¹³Vgl. Kaysser und Kott [116] für ein Beispiel der Bewertung unterschiedlicher Prozessalternativen aus dem Baubereich.

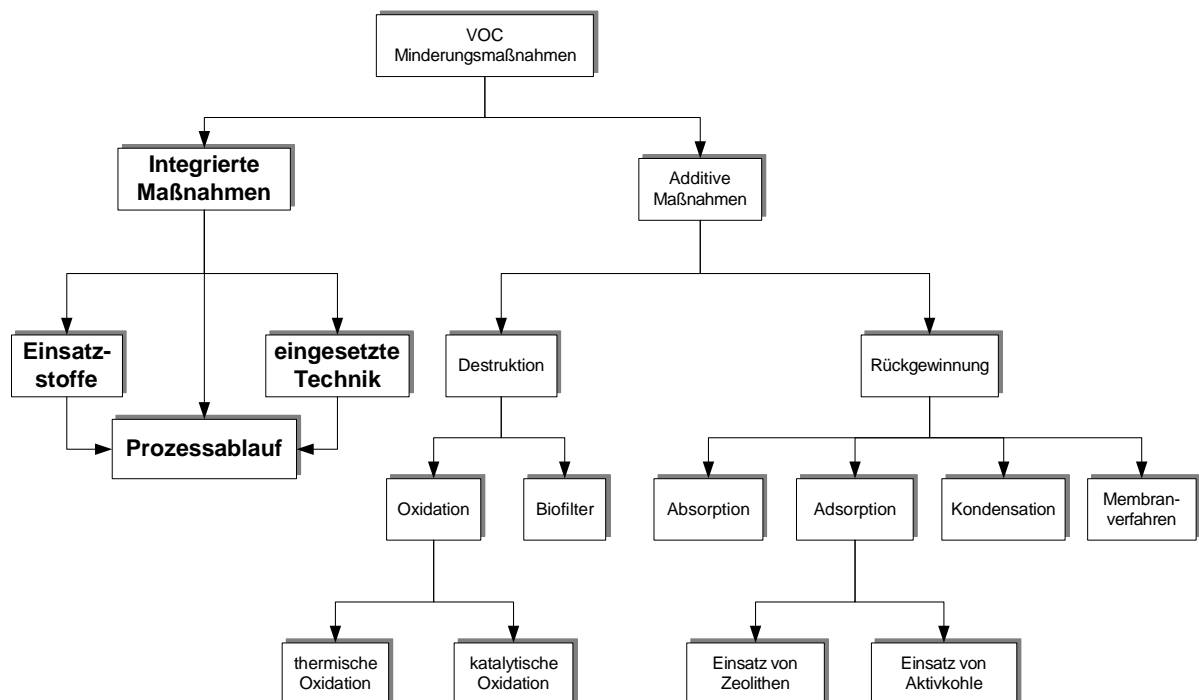


Abbildung 2.3: Maßnahmen zur Minderung von VOC-Emissionen (in Anlehnung an [117])

Bei industriellen Tätigkeiten der Lösemittelanwendung bieten sich hinsichtlich produktintegrierter Minderungsmaßnahmen zwei Wege an. Der Einsatz des lösemittelhaltigen Produktes (z.B. Lack, Klebstoff etc.) kann vollständig durch Veränderungen des Hauptproduktes eliminiert werden (vgl. u.a. [141]). Im Falle der Klebstoffe können beispielsweise bestehende Klebeverbindungen bei einem Kunststoffbauteil durch Steck- oder Schraubverbindungen ersetzt werden. Auf eine Beschichtung mit lösemittelhaltigen Farben und Lacken, die z.B. zum Zweck der Wetterbeständigkeit bei Holzelementen eingesetzt wird, kann bei einem Substratwechsel auf Kunststoff verzichtet werden (z.B. Fensterrahmen im Baubereich). Gleiches gilt häufig auch im Falle eines Wechsels von Metall auf Kunststoff [59].

Ist ein vollständiger Verzicht auf die Funktionalität des lösemittelhaltigen Produktes nicht möglich, so kann eine Minderung der VOC-Emissionen durch eine Reduzierung des Lösemittelgehaltes des verwendeten Produktes bzw. durch den Einsatz eines lösemittelfreien Ersatzproduktes gleicher Funktionalität erreicht werden. So können z.B. flüssige Beschichtungen durch Folien oder Klebstoffe auf Lösemittelbasis durch Produkte auf Wasserbasis ersetzt werden [71, 163].

Bei der Oberflächenbeschichtung mit Lacken liegt die Besonderheit der Verwendung von Lösemitteln darin, dass sie in der Regel eine Hilfestellung im eigentlichen Beschichtungsprozess übernehmen, d.h. eine Art „Katalysator“ im Prozess darstellen, da sie an sich nicht verbraucht werden, sondern lediglich einen Phasenübergang von flüssig zu gasförmig durchlaufen. Besonders im Fall der Lackanwendung werden sie allein zur Einstellung bestimmter Eigenschaften (Viskosität, Lösungs- und Verdunstungsverhalten) der Farben und Lacke verwendet, wobei letztendlich eine schnelle Verdunstung der Lösemittel erwünscht ist [81].

Wegen der an die Oberfläche gestellten Anforderungen ist eine Substitution des Lacks z.B. durch Folie nicht möglich (vgl. u.a. [18, 164, 204]). Daher stellen einzig lösemittelreduzierte Lacksysteme eine mögliche Strategie zur produktintegrierten Minderung der Lösemittelmmissionen bei der Oberflächenbeschichtung von Automobilen dar. Das gilt auch für die handwerkliche Reparaturlackierung¹⁴. Zudem sprechen auch die begrenzten Möglichkeiten zur Deckung des Kapitalbedarfs im Sektor der Reparaturlackierung [240], der durch eine hohe Anzahl an Kleinbetrieben charakterisiert ist (vgl. Kapitel 4.1.1), für einen Ersatz bzw. eine Reduzierung der Lösemittel als Minderungsmaßnahme für VOC-Emissionen aus der Anwendung¹⁵.

2.3 Lösemittelreduzierte Lacksysteme als Minderungsmaßnahme

2.3.1 Der Aufbau von Lacksystemen

Um die Wirkung des Einsatzes lösemittelreduzierter Lacksysteme beurteilen zu können, wird im Folgenden zunächst der Aufbau von Lacksystemen beschrieben. Grundsätzlich bestehen sie aus vier unterschiedlichen Bestandteilen [87]:

¹⁴Die hier nicht näher angesprochenen produktionsintegrierten Minderungsmaßnahmen setzen bei der Lackanwendung meist an der Applikationstechnik an und können durch ihren Auftragswirkungsgrad charakterisiert werden. Da in der handwerklichen Reparaturlackierung einzig Spritzapplikationsverfahren zum Einsatz kommen, ist deren Minderungspotenzial meist begrenzt. So liegt der Wirkungsgrad dieser Art der Applikation bei der Nasslackierung mit ca. 35 - 40 % deutlich unter dem von z.B. Tauchverfahren, die bis zu ca. 95 % erreichen [151]. Eine Untersuchung der Minderungsmöglichkeiten durch den Einsatz verbesserter Spritzverfahren für das Beispiel der Reparaturlackierung wurde von *Rentz et al.* [179] durchgeführt.

¹⁵Auch *Schnitzer* [197] sieht die Zukunft des integrierten Umweltschutzes nicht in verbesserten oder vollkommen geschlossenen Systemen, sondern in der Vermeidung kritischer Stoffe (hier: Lösemittel).

- Filmbildner
- Pigmente und Füllstoffe
- Additive bzw. Hilfsstoffe
- Lösemittel

Filmbildner des Lacks sind in der Regel oligomere oder polymere organische Materialien, die durch industrielle Synthesen oder chemische Abwandlung von Naturstoffen hergestellt werden. Dabei werden zwei Gruppen unterschieden: höher molekulare Harze, bei denen durch das Verdunsten der Lösemittel eine physikalisch trocknende Filmbildung stattfindet, und niedermolekulare Harze, bei denen durch den Einsatz von Wärme oder Katalysatoren eine chemische Vernetzung stattfindet [153]. Die Filmbildner verleihen der getrockneten Lackschicht ihre spezifischen Eigenschaften, z.B. ihre Resistenz gegen äußere Einflüsse (Licht, Chemikalien, etc.).

Farbe und Deckvermögen des Lacks werden durch die **Pigmente und Füllstoffe** bestimmt [81]. Chemisch handelt es sich um unlösliche Verbindungen, die meist anorganischen Ursprungs sind (z.B. Eisenoxid). Die Pigmente des Lacks bestimmen die optischen Eigenschaften durch selektive Absorption, gerichtete Reflexion und Lichtstreuung. Die Füllstoffe definieren durch ihre Eigenschaften die mechanische Resistenz der Lackschicht und damit z.B. auch den Schleifaufwand.

Die **Additive** des Lacks erfüllen unterschiedliche Aufgaben. Sie vereinfachen die Herstellung der Lacke, verbessern deren Stabilität bei der Lagerung und erhöhen die Sicherheit bei der Verarbeitung [153]. So ermöglichen spezielle Dispergiermittel die Einarbeitung der Pigmente bei der Herstellung des Lacks, während Netzmittel die Haftung der Pigmente und Filmbildner auf problematischen Untergründen verbessern.

Nichtflüchtige Additive, Pigmente und Füllstoffe bestimmen den Festkörper eines Lacks. Dieser ist definiert als der nichtflüchtige Massenanteil des Lacks in Prozent und wird bei vorgegebenen Bedingungen (Trockentemperatur und -zeit) bestimmt [193].

Die Aufgabe der **Lösemittel** besteht darin, die festen Bestandteile der Lacke für die jeweiligen Beschichtungsverfahren in die gewünschte Verarbeitungsviskosität zu bringen. Die Auswahl der Lösemittel (organisch und/oder wässrig) für das jeweilige Lacksystem hängt zum einen von den eingesetzten Filmbildnern ab. So bestimmen die Lösemittel die Anordnung der Filmbildner und damit speziell bei physikalisch trocknenden Lacken die Eigenschaften des getrockneten Lackfilms. Zum anderen hängt die Wahl der Lösemittel

vom Substrat ab, auf das der Lack aufgetragen wird. Gerade bei Kunststoffen ist dabei dessen Quellbarkeit zu berücksichtigen [81].

In der Reparaturlackierung werden fast ausschließlich Lacksysteme mit schnell trocknenden Polyacrylaten oder Polyestern verwendet, speziell bei Basis- und Klarlacken. Auf Grund der hohen Reaktivität dieser Filmbildner werden sie erst kurz vor dem Auftrag mit den Härtern bzw. Katalysatoren (meist Isocyanate) durch Mischen zusammengeführt. Bei den Reparaturlacken handelt es sich also um Zwei-Komponenten Systeme bzw. 2K-Lacke. Die hohen Ansprüche der Kunden, speziell an die optischen Eigenschaften der Autolackierung [204], führen zudem zu besonderen Anforderungen an Pigmente und Füllstoffe der Reparaturlacke.

2.3.2 Zusammenhang zwischen Lackaufbau und VOC-Emissionen

Die Reduzierung der VOC-Emissionen während des Lackauftrags bestimmt die Effizienz der Emissionsminderungsmaßnahme. Entscheidend ist dabei, wie hoch die Emissionen pro Menge getrocknetem Lack auf dem Objekt sind, da der trockene Lackfilm die eigentliche Zielgröße der Lackierung darstellt [50]. Eine Größe, mit der dieser Zusammenhang beschrieben werden kann, ist die Emissionszahl E [151]:

$$E = \frac{M_{LM}}{\rho \cdot A \cdot d} = \frac{1}{\eta \cdot C_{FK}} (1 - C_{FK} - C_W) \quad (2.1)$$

wobei gilt:

$$\begin{aligned} C_{FK} &= \frac{M_{FK}}{M_L} = \frac{M_{FK}}{(M_{FK} + M_{LM} + M_W)} \\ C_W &= \frac{M_W}{M_L} = \frac{M_W}{(M_{FK} + M_{LM} + M_W)} \\ C_{LM} &= \frac{M_{LM}}{M_L} = \frac{M_{LM}}{(M_{FK} + M_{LM} + M_W)} = 1 - C_{FK} - C_W \\ \eta &= \frac{\rho \cdot A \cdot d}{M_{FK}} \end{aligned}$$

mit

- M_{LM} [kg] : Masse der eingesetzten organischen Lösemittel
- ρ [kg/m³] : Dichte des getrockneten Lackfilms auf dem Objekt
- A [m²] : beschichtete Fläche
- d [μ m] : mittlere Schichtdicke des getrockneten Lacks
- η [-] : Auftragswirkungsgrad bzw. Transferkoeffizient
- C_{FK} [-] : Festkörper des spritzfertigen Lacks
- C_W [-] : Massenanteil des Wassers im spritzfertigen Lack

C_{LM} [-] : Massenanteil der organischen Lösemittel im spritzfertigen Lack

M_{FK} [kg]: Masse des eingesetzten Festkörpers

M_L [kg] : Masse des eingesetzten Lacks

M_W [kg] : Masse des eingesetzten Wassers

Gleichung 2.1 verdeutlicht, dass es mehrere Parameter gibt, deren Veränderung zu einer Verringerung der Emissionszahl und damit der Emissionen während des Lackauftrags führt. Zunächst kann der Auftragswirkungsgrad, der das Verhältnis zwischen auf dem Bauteil verbleibenden und insgesamt eingesetztem Festkörper beschreibt, erhöht werden. Dadurch wird die insgesamt einzusetzende Lackmenge verringert. So können auch bei gleichbleibendem Lösemittelanteil des Lacks, die VOC-Emissionen reduziert werden. Eine Erhöhung des Wirkungsgrads kann durch eine Reduzierung des Overspray, d.h. dem nicht auf dem Objekt verbleibenden Lack, erreicht werden. Da der Overspray wiederum durch die Applikationstechnik bestimmt wird (z.B. elektrostatische an Stelle von konventionellen Spritzverfahren), handelt es sich um eine prozessintegrierte Minderungsmaßnahme, die hier nicht näher betrachtet werden soll.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen produktintegrierte Maßnahmen, wie sie durch die Lackrichtlinie vorgeschrieben sind (vgl. Kapitel 4.1.3). Diese zielen auf eine Erhöhung des Festkörpers und eine Substitution der organischen Lösemittels durch Wasser ab. Abbildung 2.4 zeigt den Wirkungszusammenhang zwischen der Emissionszahl E und dem Festkörper C_{FK} eines Lacks bei einem konstanten Auftragswirkungsgrad von $\eta = 35\%$. Dargestellt ist dieser Zusammenhang für drei unterschiedliche Wassergehalte C_W (0%, 50% und 75%).

Entsprechend lassen sich drei Ansätze für produktintegrierte Minderungsmaßnahmen ableiten [50]:

1. Die Erhöhung des Anteils an Wasser als Lösemittel (zu Lasten der organischen Lösemittel)
2. Die Erhöhung des Festkörpers.
3. Die vollständige Eliminierung der Lösemittel (wässrig und organisch).

Jede der angesprochenen Strategien bedeutet einen Eingriff in das System Lack bzw. eine seiner Komponenten (vgl. Kapitel 2.3.1). Daneben erfordern neue Lackprodukte in der Regel auch Anpassungen der Applikationstechnik und des Prozessablaufs. Aus den

genannten Ansatzpunkten ergibt sich der Einsatz folgender Lackprodukte zur Minderung der VOC-Emissionen in der Lackanwendung:

- wasserbasierte Lacke, bei denen vorwiegend Wasser als Lösungsmittel verwendet wird (Kapitel 2.3.3),
- festkörperreiche Lacke, die einen erhöhten Festkörper aufweisen (Kapitel 2.3.4), und
- Pulverlacke, die keinen Einsatz von Lösemitteln erfordern (Kapitel 2.3.5)¹⁶.

Die mittleren Anteile an Festkörper, Wasser und Lösemitteln der genannten Lacksysteme sind ebenso wie die Zusammensetzung der konventionellen Lacke in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt. Dabei wird von einem konstanten Auftragswirkungsgrad $\eta = 35\%$ ausgegangen. Durch den Vergleich der zugehörigen Emissionszahlen kann das relative Potenzial der Emissionsminderung, das sich durch den Einsatz dieser produktintegrierten Minderungsmaßnahmen erzielen lässt, abgeschätzt werden.

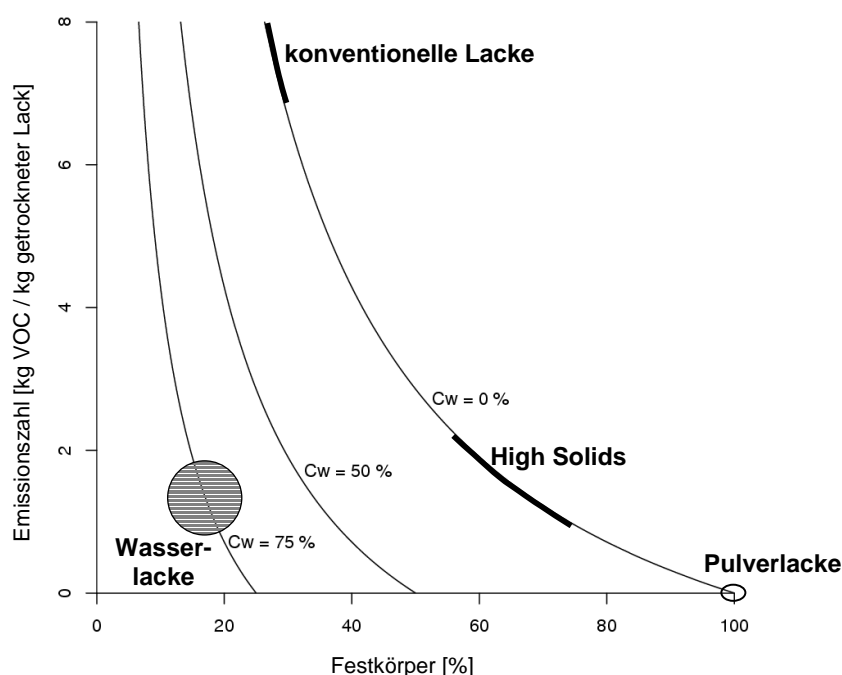


Abbildung 2.4: Veränderung der Emissionszahl in Abhängigkeit von Festkörper (C_{FK}) und Wasseranteil (C_W) bei einem Auftragswirkungsgrad $\eta = 35\%$

¹⁶Auf Grund der bisher geringen Bedeutung, speziell auch im Automobilbereich, wird auf eine Beschreibung der strahlenhärtender Lacksysteme verzichtet. Informationen hierzu finden sich u.a. in [92, 215].

2.3.3 Wasserbasierte Lacke

Der Vorteil hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von Lackprodukten auf Wasserbasis beruht auf dem verringerten Gehalt organischer Lösemittel sowie den Möglichkeiten des Recyclings der Lackpartikel, z.B. durch Ultrafiltration oder andere mechanische Recyclingverfahren [50]. Die Verwendung des Wassers als Lösemittel erfordert den Einsatz wasserlöslicher oder in Wasser dispergierbarer Filmbildner. Trotz an die wässrige Umgebung angepasster Komponenten ist es notwendig, einen geringen Anteil Lösemittel als Lösungsvermittler und zur Verbesserung der Verlaufseigenschaften des Lacks zuzusetzen. Daher enthalten heute verfügbare Produkte zwischen 3 - 18 Gew.-% organische Lösemittel [7].

Um eine problemlose Umstellung von konventionellen auf wasserverdünnbare Lacksysteme durchzuführen, müssen neben anwendungstechnischen Fragestellungen auch lacktechnische Probleme, die auf den Dipol-Charakter des Wassers zurückzuführen sind, gelöst werden. Hierzu zählen u.a. (vgl. [81, 153]):

- *Benetzung*: Die zu lackierenden Untergründe sind mit Wasser schwerer benetzbar als mit organischen Lösemitteln. Bereits geringe Verschmutzungen führen zu Störungen in der Filmbildung.
- *Schaumbildung*: Der Seifencharakter der meisten wasserverdünnbaren Filmbildner (Polyester und Alkydharze) und Emulgatoren führt zur Schaumbildung.
- *Höhere Verdunstungswärme*: Zur Trocknung wasserbasierter Lacksysteme muss oftmals mehr Energie als bei konventionellen Lacken aufgewendet werden, um vergleichbare Trocknungsgeschwindigkeiten zu erreichen. Grund ist die höhere Verdunstungswärme des Wassers im Vergleich zu organischen Lösemitteln.
- *Relative Luftfeuchtigkeit*: Die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung beeinflusst die Verdunstungsgeschwindigkeit des Wassers erheblich. Je höher sie ist, desto langsamer läuft die Verdunstung ab. Die Applikation der Lacke ist daher nur in einem bestimmten Luftfeuchtigkeitsintervall möglich, da die Trocknung weder zu schnell (z.B. Blasenbildung) noch zu langsam (z.B. Verweilzeit des Objektes im Trockenofen) ablaufen darf.
- *Korrosion*: In Folge der korrosiven Eigenschaften des Wassers müssen Leitungen der Applikationseinrichtungen in Kunststoff oder Edelstahl ausgeführt sein.

Auf der anderen Seite ermöglicht die elektrische Leitfähigkeit des Bestandteils Wassers eine Applikation wasserbasierter Lacksysteme mittels einer Elektrotauchlackierung [231]. Diese zeichnet sich durch einen hohen Auftragswirkungsgrad (ca. 95 %) aus und wird bei metallischen Objekten sehr häufig eingesetzt. Besonders bei einer komplizierten Objektgeometrie (z.B. Rohkarosse eines Automobils) gilt dieses Verfahren heute als Standard für den Auftrag des Korrosionsschutzes [181].

Ein weiterer Vorteil von Wasserlacken liegt in der Nichtbrennbarkeit sowohl des Produktes als auch des Sprühnebels bei Spritzapplikation. Dadurch fällt weniger Aufwand für bauliche Maßnahmen des Brandschutzes sowie entsprechende Versicherungsprämien an [146].

Der Marktanteil wasserbasierter Lacksysteme im Bereich der Schutzlacke (Bauten- und Korrosionsschutz) liegt in Europa bei ca. 10 %. Die Weiterentwicklung bei Harzen und anderen Lackbestandteilen wird zu einer forcierten Anwendung wasserbasierter Systeme führen. In einigen Bereichen der Industrielackierung werden bereits Zwei-Komponenten (2K-) und UV-trocknende Lacksysteme auf Wasserbasis erfolgreich eingesetzt. Auch der Einsatz von Applikationstechniken mit höherem Auftragswirkungsgrad, z.B. druckreduzierter Spritzpistolen mit höherem Auftragsvolumen (*High-Volume-Low-Pressure*), fördert die Anwendung von Lacken mit Wasser als Lösemittel auf Grund der besseren Wirtschaftlichkeit [19]. Für das Jahr 2010 wird mit einem Marktanteil von 30 % gerechnet [27].

2.3.4 Festkörperreiche Flüssiglacke

Die Entwicklung festkörperreicher Flüssiglacksysteme (*High-Solids* [47]) begann verstärkt in den 80er Jahren des vorherigen Jahrhunderts [231]. In der Anwendung setzten sich diese Lacke mit höherem Festkörper in den letzten Jahren langsamer durch als vorhergesagt, da zum einen die Entwicklung der entsprechenden Ersatzstoffe für viele Anwendungen länger dauerte als erwartet und zum anderen die Wasserlacke und ihre Eigenschaften sich schnell entwickelten [17]. Ein Großteil der eingesetzten Materialien erreicht einen Festkörper von 45 % bis 55 % und trägt so zu einer Reduzierung der VOC-Emissionen des Sektors der Lackanwendung bei. Seit kurzem sind auch Produkte mit einem Festkörper von bis zu 85 % verfügbar. Trotzdem übersteigt aktuell der Anteil der Festkörper der eingesetzten *High-Solids* im Allgemeinen nicht 72 %. In manchen Anwendungsbereichen kommt dabei superkritisches Kohlendioxid zum Einsatz, das als Ersatz für organische Lösemittel verwendet wird [81].

High-Solids stellen eine Weiterentwicklung der konventionellen lösemittelhaltigen Lacksysteme dar und zeichnen sich durch einen im Vergleich geringeren Anteil flüchtiger Inhaltsstoffe aus¹⁷. Für die Formulierung von festkörperreichen Lacksystemen werden Filmbildner mit niedrigem Molekulargewicht eingesetzt, so dass es bereits bei geringen Lösemittelzusätzen zu einem raschen Sinken der Viskosität kommt [231]. Das niedrigere Molekulargewicht der Filmbildner führt andererseits zu Problemen bei der Filmbildung während der Trocknung des Lacks. Zu den am häufigsten auftretenden Schwierigkeiten zählen u.a. die Läuferneigung, das Pigmentausschwimmen, die schlechtere Haftung auf metallischen Untergründen und die Kraterneigung [17, 128].

Verarbeitet werden können festkörperreiche Lacke mit den gleichen Applikationsverfahren wie konventionelle Lacke. Ihr Einsatz bietet sich besonders dann an, wenn eine Emissionsminderung unter Beibehaltung der Applikationstechnik, d.h. mit geringem Investitionsaufwand, durchgeführt werden soll. Zudem zeigen sie einen höheren Deckungsgrad. Die Lackschicht wird in kürzerer Zeit aufgebaut. Auch der Energiebedarf kann verringert werden, da auf Grund der geringeren Lösemittelanteile das Luftvolumen der Trockenkabine reduziert werden kann, ohne dabei an Lösemittelkonzentrationen nahe der Explosionsgrenzen zu gelangen [128].

2.3.5 Pulverlacke

Beim Pulverlackieren handelt es sich um kein Nasslackierverfahren wie bei den *High-Solids* oder den Wasserlacken, sondern um den Auftrag thermoplastischer und duromerer Kunststoffe in Pulverform. Das Pulverlackieren ist ein recht junges Verfahren, das erst in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts erste Anwendung fand [231].

Auf Grund der Lösemittelfreiheit und des trockenen Auftragsverfahrens treten beim Einsatz von Pulverlacken weder Lösemittlemissionen noch Abwasser auf. Zudem kann durch die Rückgewinnung und Wiederverwendung des Oversprays ein Auftragswirkungsgrad größer 98 % erreicht werden. Derzeit werden Pulverlacke vorwiegend im elektrostatischen Spritzverfahren appliziert. Die dabei eingesetzten Techniken zeichnen sich durch geringe Investitionen und Betriebskosten aus [81].

Als ungünstig erweisen sich die hohen Schichtdicken größer 60 μm , die auf die Korngröße von 30 - 40 μm zurückzuführen sind. Das schränkt zum einen die Wirtschaftlichkeit in der

¹⁷Per Definition zählen auch Wasser- und Pulverlacke zu den festkörperreichen Lacken. Da diese jedoch eigene Technologien auf Grund ihrer Applikations- bzw. Härtungstechnik darstellen, werden sie in der Regel eigenständig betrachtet [17].

Anwendung ein und beeinflusst zum anderen die Oberflächenqualität negativ. Die zum Einbrennen des Pulverlacks hohen Temperaturen schränken die Auswahl an verwendbaren Untergrundmaterialien ein, da nur temperaturunempfindliche Objekte beschichtet werden können (hauptsächlich Metall-, aber auch Glasuntergründe). Auch schnelle Farbtonwechsel, wie sie z.B. bei der Reparaturlackierung vorkommen, sind problematisch auf Grund des hohen Reinigungsaufwands [147, 247].

Pulverlacke werden vermehrt in unterschiedlichen Bereichen der Oberflächenbehandlung eingesetzt. Die verfügbaren Methoden der Pulverlackverarbeitung haben sich dabei als einsetzbar erwiesen [129]. Besonders bei Weißer Ware (Kühlschrank, Waschmaschine, etc.) und im Bereich der Architektur sind Pulverlacke weit verbreitet. Im Automobilbereich werden zunehmend Anbau- und Kleinteile mit Pulverlacken beschichtet. Auch in der Serienlackierung finden Pulverfüller und Pulverklarlack vermehrt Einsatz. Der heutige Anteil in diesem Bereich wird auf 5 % geschätzt [81].

Die Gründe für die zunehmende Bedeutung von Pulverlacken umfassen u. a. die Wirtschaftlichkeit durch die Rückgewinnungs- und Wiederverwendungsmöglichkeit, die leicht automatisierbare Applikation und die offensichtlichen Vorteile hinsichtlich der Umwelteinwirkung. Neue Spritzpistolen und schnellere Applikationsverfahren werden entwickelt, um die Marktdurchdringung zu beschleunigen [221]. Der Marktanteil von Pulverlacken stieg von nur 1 % im Jahr 1990 auf knapp 10 % im Jahr 2002 [81, 151].

2.3.6 Fallbeispiel Autoreparaturlackierung

Welches der vorgestellten Lacksysteme bei der Oberflächenbeschichtung Einsatz findet, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Zu diesen zählen [50]:

- Applikationsverfahren einschließlich Trocknung
- Untergrundmaterial (Kunststoff, Metall, Holz, etc.)
- Objektgröße und Geometrie
- Geforderte Eigenschaften des getrockneten Lackfilms
- Farbtonpalette bzw. dekorative Eigenschaften
- Behördliche Auflagen

Bei der Autoreparaturlackierung führen diese Faktoren zu einem zunehmenden Einsatz wasserbasierter Lacksysteme [133]. Entscheidende Argumente sind zum einen die Farbtonvielfalt, die durch die Serienlackierung vorgegeben wird und auf wasserbasierten Produkten basiert. Auch behördliche Auflagen, besonders die von der EU im April 2004 verabschiedete Richtlinie 2004/42/EC (vgl. [56] und Kapitel 4.1.3), führen zu einer Favorisierung der Wasserlacksysteme. Pulverlacksysteme scheiden auf Grund der Temperaturempfindlichkeit bestimmter Komponenten des Fahrzeugs (Kunststoffteile, Fahrzeugelektronik etc.) sowie der häufigen Farbtonwechsel und der Farbeffekte aus¹⁸ [79].

Eine Umstellung von lösemittel- auf wasserbasierte Lacksysteme in der Reparaturlackierung stellt neben der Anpassung bestimmter Anlagenteile¹⁹ auch einen Eingriff in die bestehenden Prozessabläufe dar. So erfordert der Auftrag von Wasserbasislacken eine aufwändigere Vorbereitung der Oberfläche, die fett- und lösemittelfrei sein muss, um Kraterbildung zu vermeiden [81]. Auch die Spritzpistolen müssen sorgfältiger gereinigt werden, da angetrocknete Lackreste so gut an Edelstahl haften, dass sie meist nur mit Lösemitteln bzw. Abbeizern entfernt werden können. Wird keine Anpassung der Trockenleistung vorgenommen, ist auf Grund der höheren Verdunstungsenergie des Wassers mit verlängerten Ablüft- und Zwischenablüftzeiten zu rechnen. Die höhere Deckkraft wasserbasierter Lacksysteme führt zu einer geringeren Schichtdicke des getrockneten Lackfilms und damit zu einem verringerten Aufwand beim Auftrag. Auch die Vorbereitungszeit des Lacks wird dadurch reduziert, da ein Spritzgang weniger erforderlich ist.

Abbildung 2.5 fasst die Möglichkeiten der VOC-Emissionsminderung in der Reparaturlackierung nochmals zusammen. Der Einsatz wasserbasierter Lacksysteme, der die Motivation für diese Arbeit ist, stellt dabei einen möglichen Weg der Minderung dar. Dessen Umsetzung führt zu modifizierten Prozessabläufen, die wiederum eine Veränderung der Bearbeitungszeit in der Reparaturlackierung zur Folge haben. Die bisher verwendeten Abrechnungsmethoden zwischen Werkstätten und Automobilherstellern, Kunden und Versicherungen basieren jedoch auf den Auftragszeiten unter Einsatz konventioneller Lacke. Parallel zum steigenden Einsatz wasserbasierter Lackprodukte gibt es auch Weiterentwicklungen bei Werkzeugen (z.B. Schleiftechniken) und Applikationstechniken, die zu zusätzlichen Veränderungen der Bearbeitungszeit führen.

¹⁸Bei der Serienlackierung ist ein Einsatz von Pulverlacken, speziell Klarlacke, möglich, da hier die in der Regel rein metallische Rohkarosserie behandelt und entsprechend getrocknet wird.

¹⁹Hierzu zählen z.B. eine Umstellung der verwendeten Materialien der Anlagenteile, die direkten Kontakt mit dem Wasserlack haben, aus Gründen des Korrosionsschutzes. Zudem muss die Steuerung der Trockenkabinen verändert werden, um dem erhöhten Energiebedarf sowie der Kontrolle der notwendigen Verminderung der Luftfeuchtigkeit Rechnung zu tragen [178].

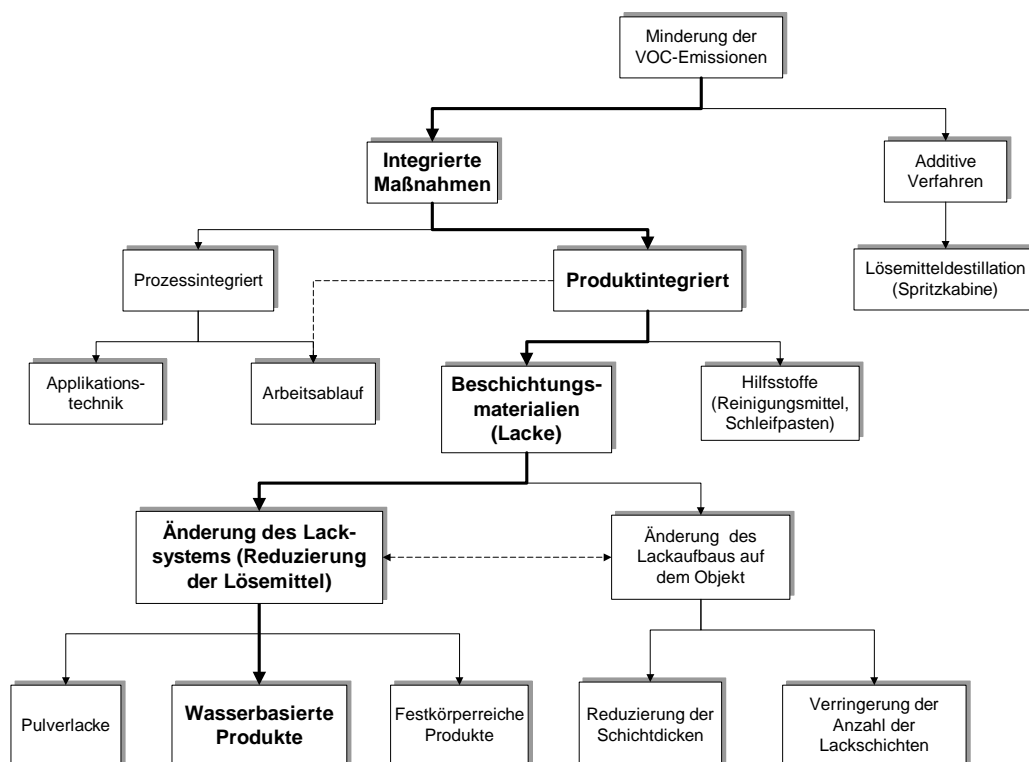


Abbildung 2.5: Ansätze zur Minderung von VOC-Emissionen in der Reparaturlackierung

Um die beschriebenen Veränderungen im Prozessablauf der Reparaturlackierung beschreiben und bewerten zu können, ist die Aufnahme von Zeitdaten notwendig (vgl. Kapitel 4). Neben deren Verwendung für die angesprochene Darstellung aktueller Bearbeitungszeiten können die Daten für den Zeitbedarf als Grundlage für die Kostenkalkulation in der Reparaturlackierung, sowohl bei Kundenaufträgen als auch im Gewährleistungsfall, verwendet werden. Einmal vorhanden, ist es möglich, sie auch für die Durchführung einer Ablaufplanung einzusetzen (vgl. Kapitel 5), um so eine zusätzliche Verbesserung der innerbetrieblichen Abläufe und damit einen effizienteren Einsatz des Produktionsfaktors Arbeitskraft zu ermöglichen. Daneben ist auch eine Schwachstellenanalyse bestehender Abläufe möglich, aus der weitere Handlungsempfehlungen für einen verbesserten Prozessablauf für Werkstätten der Reparaturlackierung entwickelt werden können (vgl. Kapitel 6).

3 Bestehende Ansätze zur Lösung der vorliegenden Planungsaufgabe

Für die Auswahl bzw. Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Ablaufplanung wird die Reparaturlackierung zunächst produktionswirtschaftlich eingeordnet (Kapitel 3.1), bevor im Anschluss ein Überblick über Methoden der Ablaufplanung gegeben wird (Kapitel 3.2). Hierbei werden speziell Verfahren behandelt, die für die Reihenfertigung geeignet sind. Für die Durchführung der Ablaufplanung müssen die Durchlaufzeiten bekannt sein. Da die Reparaturlackierung eine vorwiegend manuelle Tätigkeit ist, wird in Kapitel 3.3 auf die Arbeitszeit als Maß für die menschliche Arbeit bzw. als Größe für die Beschreibung des Arbeitsablaufs eingegangen. In Kapitel 3.4 werden Methoden zur Abbildung von Unsicherheiten vorgestellt, weil diese besonders bei der Planung von Tätigkeiten mit hohem manuellem Anteil zu berücksichtigen sind.

3.1 Produktionswirtschaftliche Einordnung der Reparaturlackierung

3.1.1 Die Reparaturlackierung als Dienstleistung

Das Ergebnis eines Produktionsprozesses²⁰ können materielle Güter, aber auch Dienstleistungen oder Informationen sein [54, 88]. Dabei sind Dienstleistungen im Allgemeinen dadurch gekennzeichnet, dass sie zu einer Veränderung bestimmter Ausprägungen eines bestehenden Objektes führen [196]. Ferner ist das Produkt (z.B. die lackierte Oberfläche) nicht lagerbar, da die Leistung direkt am Objekt des Kunden erbracht wird [112]. Folg-

²⁰Grundlagen der Produktion und des Konzeptes der Elementarfaktoren sowie weitere Informationen zu bestehenden produktionswirtschaftlichen Ansätzen finden sich in der entsprechenden Literatur (z.B. [38, 90, 196])

lich ist die Dienstleistungsproduktion auch durch einen synchronen Kontakt zwischen Leistungsgeber und Leistungsnehmer bzw. dessen Objekt gekennzeichnet.

Eine weitere Eigenschaft zahlreicher Dienstleistungen ist der auftragsindividuelle Charakter. Die zu erbringende Leistung ist vom Auftrag des Kunden abhängig und wird als Reaktion auf eine konkrete Nachfrage (Auftrag) erbracht. Zudem zeichnen sich Dienstleistungen dadurch aus, dass der so genannte externe Produktionsfaktor (z.B. das zu reparierende Fahrzeug) nicht im uneingeschränkten Verfügungsbereich des Leistungsträgers liegt und in der Regel vom Abnehmer der Dienstleistung gestellt wird.

Auf der Grundlage der genannten Unterschiede lässt sich die Dienstleistung nach *Krimm* [122] definieren als „*ein (materiell oder immateriell) wertschöpfender Prozeß, der durch Faktorenkombination mit mindestens einem externen Elementarfaktor erfolgt. Dieser besteht aus dem Objekt, an dem die Leistung erbracht wird.*“

Ziel einer Reparaturlackierung ist die Wiederherstellung einer Oberfläche, die bestimmte Funktionalitäten (z.B. Korrosionsschutz) und Kriterien (z.B. optische Erscheinung) zu erfüllen hat. Der Leistungserbringung geht ein konkreter Kundenauftrag voraus. Das zu bearbeitende Objekt Fahrzeug wird dabei vom Kunden bereitgestellt und ist Teil des Produktionsprozesses. Daher ist die Reparaturlackierung obiger Definition folgend als Dienstleistung einzuordnen. Auf Grund des Handwerkscharakters (Ortsgebundenheit, personelle Struktur [159]) der Unternehmung Reparaturlackierung, werden Betriebe der Reparaturlackierung den handwerklichen Dienstleistungsbetrieben zugeordnet.

Die Arbeitsleistung handwerklicher Tätigkeiten wird durch die herrschenden äußeren Arbeitsbedingungen beeinflusst [88]. Dazu zählen das Arbeitsverfahren, der Arbeitsplatz, der Werkraum sowie die Faktoren der Arbeitsermüdung. Neben diesen objektiven Bedingungen gibt es auch subjektive Faktoren, die die Arbeitsleistung beeinflussen. Zu diesen zählen z.B. das Verhältnis des Arbeitenden zu seinen Kollegen oder das Eignungsvermögen eines Arbeitenden für die von ihm auszuübende Tätigkeit. Die subjektiven Faktoren sollen im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Für weitere Informationen hierzu sei u.a. auf Arbeiten von *Gutenberg* [88] und *Luczak* [138] verwiesen.

Aus der Tatsache, dass die Reparaturlackierung den handwerklichen Dienstleistungen zugeordnet werden kann, ergeben sich zwei Besonderheiten bezüglich ihrer Planung:

- Auf Grund der Abhängigkeit vom externen Faktor *Kundenauftrag* kommt der kurzfristigen Ablaufplanung eine besondere Bedeutung zu, da eine mittelfristige Prognose bezüglich Art und Umfang der zu bearbeitenden Aufträge nicht zuverlässig möglich ist (vgl. Kapitel 3.1.2).

- Der hohe Anteil manueller Tätigkeiten und die damit verbundenene Schwankungen in der Leistungsbereitschaft und damit in der Kapazität einer Reparaturwerkstatt führen zu einer großen Unsicherheit bei den Durchlaufzeiten. Diese müssen daher bei einer Ablaufplanung entsprechend berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 3.4.4 bzw. Kapitel 5.1.3).

3.1.2 Planung im Kontext der Reparaturlackierung

Die Planung von Produktionsprozessen kann auf unterschiedlichen Ebenen ansetzen. Unterschieden wird zwischen strategischer, taktischer und operativer Planung [154, 196]. Kleinere Unternehmen, zu denen auch die meisten Reparaturlackierbetriebe zählen, besitzen meist ein schmales Produktprogramm, das oft nur aus einem Produkt, z.B. der zu lackierenden Oberfläche, besteht und nach den individuellen Wünschen der Kunden gefertigt wird [152]. Zudem sind die personellen Ressourcen, die den Planungsaufgaben zugeordnet werden können, begrenzt.

Die strategische Planung ist in der Kfz-Reparaturlackierung gleichbedeutend mit der Entscheidung, die Aktivität an sich weiterzuführen bzw. auszuweiten oder nicht²¹. Grund hierfür ist die spezifische Ausstattung der Lackierwerkstätten, die auf ein Produkt, das zu lackierende Fahrzeug, ausgerichtet ist. Das entscheidende Betriebsmittel ist die Lackierkabine, deren technische Lebensdauer 20 Jahre und mehr beträgt. Ist einmal die Entscheidung für die Reparaturlackierung gefallen, geht es in der taktischen Planung um die zu verwendenden Lacksysteme (z.B. wasser- oder lösemittelbasiert), um die Anzahl der Arbeiter und Angestellten, und um die technische Ausstattung hinsichtlich Werkzeuge und Applikationstechnik. Bedeutendster Faktor für die Erfüllung der Ziele der Reparaturlackierung ist der tatsächlich auftretende Einsatz an Elementarfaktoren für die Lackierung. Im Unterschied zu Planungsproblemen großer Unternehmen mit vielfältigem Produktprogramm und mehreren Standorten, ist für die Betriebe der Kfz-Reparaturlackierung die Planung der Durchführung der Kundenaufträge, d.h. die kurzfristige operative Planung, von entscheidender Bedeutung.

Ziel der kurzfristigen operativen Planung ist die Verteilung der Aufträge auf die vorhandenen Betriebsmittel bzw. Kapazitäten (*Termin- bzw. Kapazitätsplanung*) sowie die Festlegung der Reihenfolge der Bearbeitung auf den einzelnen Maschinen (*Ablauf- bzw. Maschinenbelegungsplanung*). Bei manuell geprägten Arbeitsabläufen, wie denen der Re-

²¹Fragen z.B. hinsichtlich der Zusammensetzung der Produktpalette stellen sich bei den Werkstätten der Reparaturlackierung nur sehr begrenzt und wenn, dann nur im Zuge einer Expansion.

paraturlackierung, kann dabei ein starker Einfluss der menschlichen Arbeitskraft auf die Kapazität des Produktionssystems beobachtet werden. Dieser ist Folge der Schwankungen des Leistungsvermögens, die sich bereits im Verlauf einer Arbeitswoche bemerkbar machen (vgl. Kapitel 3.3 und 4.2 sowie [174]).

Bei der operativen Planung hängen Vorgehensweise und Zielgrößen meist vom zu untersuchenden Fertigungstyp sowie den zu berücksichtigenden Restriktionen ab²². Bei der Einzelfertigung ist die Einhaltung von Lieferterminen die wichtigste Zielgröße. Das Hauptziel ist hier die bestmögliche Einplanung kurzfristig eingehender Kundenaufträge. Die operative Planung entspricht auf Grund des kurzen Planungshorizontes daher einer Ablauf- bzw. Belegungsplanung [68].

Dies trifft auch auf die Autoreparaturlackierung zu, deren Kapazitätsbedarf durch kurzfristig erteilte Kundenaufträge bestimmt wird (vgl. Kapitel 5.1.1). Die Einhaltung von Lieferterminen und die kürzest mögliche Bearbeitungszeit sind dabei die wichtigsten Anforderungen. Die Ablaufplanung stellt daher ein geeignetes Instrument zur Planung der Reihenfolge, in der vorhandene Kundenaufträge erfüllt werden sollen, dar.

3.2 Belegungsplanung bei Reihenfertigung

3.2.1 Grundlagen der Ablaufplanung

Ziel der Ablaufplanung, auch als Scheduling bezeichnet, ist die Bestimmung der Reihenfolge der Abarbeitung der einzelnen Aufträge sowie die Planung der Maschinenbelegung für eine Periode (meist ein Tag oder eine Woche) auf Basis einer genauen Zeiteinteilung. Neben dem Zeitbedarf der einzelnen Arbeitsschritte müssen auch Transport- oder Rüstzeiten berücksichtigt werden. Bei der Ermittlung der Maschinenbelegung sind Kapazitätsrestriktionen zu beachten (vgl. u.a. [44, 80, 217]). Allgemein kann ein Problem der Ablaufplanung folgendermaßen charakterisiert werden [140, 155]:

- n Aufträge oder Jobs $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ müssen bearbeitet werden.
- m Maschinen²³ $\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ stehen dafür zur Verfügung. Eine Teilmenge davon wird für die Auftragsbearbeitung benötigt.

²²Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Fertigungstypen findet sich in der entsprechenden Literatur (u.a. [38, 54, 80])

²³Der Begriff Maschine wird stellvertretend für eine beliebige Ressource verwendet. Konkret kann es sich dabei z.B. um Maschinen, Personen oder Arbeitsplätze handeln

- Die Maschinen- und Auftragsreihenfolge bei der Abarbeitung können vorgegeben sein.
- Jeder Bearbeitungsschritt O_{ij} eines Jobs J_j an einer Maschine M_i wird durch eine Bearbeitungszeit p_{ij} beschrieben.

Des Weiteren werden auftragsbezogene Bereitstellungstermine (*release dates*) r_j und/oder Fälligkeitstermine (*due dates*) d_j berücksichtigt. Allgemeine, auftrags- und maschinenbezogene Rahmenbedingungen werden mittels Prämissen beschrieben [38, 44]. Die technischen Randbedingungen des Ablaufplanungsproblems werden hauptsächlich durch die Reihenfolge, mit der die Maschinen durchlaufen werden, bestimmt [155, 169]. Generell lassen sich dabei fünf Typen unterscheiden (Abbildung 3.1):

- *Open-Shop*: Für keinen der einzuplanenden Aufträge (*job*) liegt eine bestimmte Durchlaufreihenfolge bezüglich der Maschinen vor.
- *Job-Shop*: Jeder Auftrag besitzt seinen individuellen Durchlauf, d.h. jeder Job durchläuft die Maschinen in einer eigenen Reihenfolge.
- *Flow-Shop*: Alle Jobs besitzen die gleiche Maschinenreihenfolge.
- *Permutation Flow-Shop*: Die Jobs mit identischer Maschinenreihenfolge durchlaufen die einzelnen Maschinen in der gleichen Reihenfolge. Es kommt zu keinem „Überholen“ eines Jobs durch einen anderen.
- *Ein-Maschinen Problem*: Die Aufträge werden an einer einzelnen Maschine abgearbeitet.

Zielgrößen der Ablaufplanung sind entweder entscheidungsrelevante Kosten, festgelegte Mengen oder vorgegebene Zeitziele [44, 130]. Letztere werden am häufigsten bei der Ablaufplanung verwendet [118]. In vielen Fällen können die Wert- bzw. Kostengrößen durch Zeitgrößen substituiert werden, wodurch jedoch einige Voraussetzungen als erfüllt angenommen werden [38]. Tabelle 3.1 zeigt eine Auswahl an Zielgrößen mit zugehörigen Zielfunktionen und Nebenbedingungen.

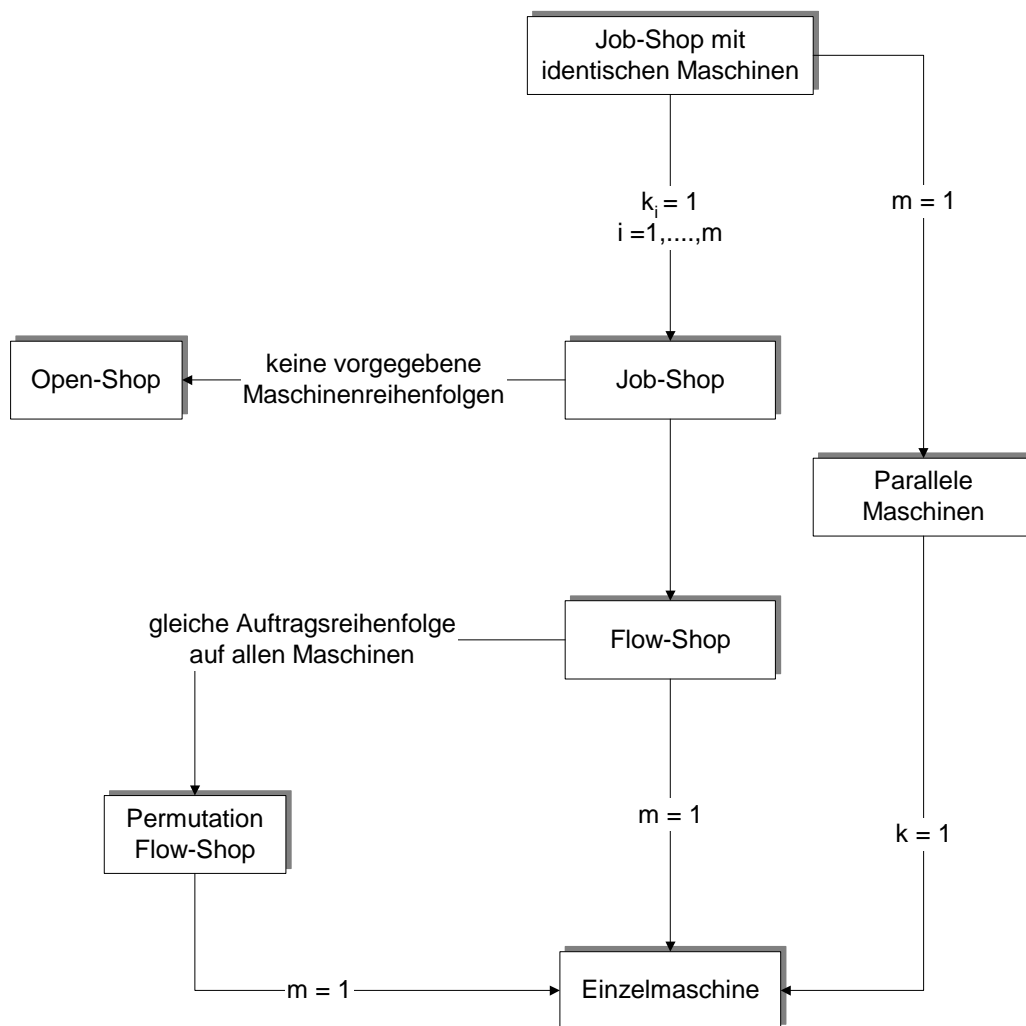


Abbildung 3.1: Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Fertigungsumgebungen [140]

Bei der Autoreparaturlackierung wiederholen sich die Prozessabschnitte unabhängig vom Schadensumfang des zu lackierenden Bauteils in der gleichen Reihenfolge (vgl. Kapitel 5.1.1). Definiert man die einzelnen Abschnitte als Maschinen, so handelt es sich aus Sicht der Ablaufplanung somit um eine Reihen- bzw. Flow-Shop Fertigung. Da zudem auf Grund des manuellen Charakters der Tätigkeit keine Taktzeiten vorgeben werden, spricht man auch von einem Flow-Shop ohne Zeitzwang. Im Folgenden wird daher schwerpunktmäßig auf die Ablaufplanung für Flow-Shop Umgebungen eingegangen.

Tabelle 3.1: Zielgrößen der Ablaufplanung (in Anlehnung an [26, 38, 169])

Zielgröße/Zielfunktion	Definitionen
<p>Minimierung der Terminabweichung:</p> $T_{max} = \max \{T_j\} \rightarrow \text{Min!}$ <p>bzw.</p> $\sum_{j=1}^n T_j = \sum_{j=1}^n \max \{L_j, 0\} \rightarrow \text{Min!}$	$L_j = (r_j + p_j) - d_j = C_j - d_j$ $T_j = \max \{L_j, 0\}$ <p>mit:</p> $L_j = \begin{cases} > 0, \text{ Terminüberschreitung} \\ < 0, \text{ Terminunterschreitung} \end{cases}$ <p>n: Anzahl der Jobs r_j: Bereitstellungstermin von Job j p_j: Bearbeitungsdauer von Job j d_j: Fälligkeitstermin von Job j C_j: Fertigstellungstermin von Job j</p>
<p>Maximale Maschinen- bzw. Kapazitätsauslastung:</p> $b_{aus} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{ij} + \sum_{i=1}^m t_i^e} \rightarrow \text{Max!}$	<p>mit:</p> <p>n: Anzahl der Jobs m: Anzahl der Maschinen p_{ij}: Bearbeitungszeit von Job j auf Maschine i t_i^e: Gesamtleerzeit der Maschine i</p>
<p>Minimale Gesamtbearbeitungsdauer:</p> $C = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (p_{ij} + t_{ij}^w) \rightarrow \text{Min!}$	<p>mit:</p> <p>n: Anzahl der Jobs m: Anzahl der Maschinen p_{ij}: Bearbeitungszeit von Job j auf Maschine i t_{ij}^w: Wartezeit von Job j vor Maschine i</p>
<p>Minimale Zykluszeit (<i>makespan</i>) der Aufträge^a:</p> $C_{max} = \max \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \rightarrow \text{Min!}$	<p>mit:</p> <p>n: Anzahl der Jobs C_j: Fertigstellungstermin von Job j</p>

^a Sofern alle Aufträge zum Zeitpunkt Null starten können, ist die Minimierung der Zykluszeit identisch mit der Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit [130].

3.2.2 Ansätze der Ablaufplanung bei Reihenfertigung

Bei Reihenfolgenproblemen kann zwischen statischen und dynamischen sowie zwischen deterministischen und stochastischen Fragestellungen unterschieden werden. Ein Problem gilt als statisch, wenn eine Lösung für eine abgeschlossene Menge J an Jobs und M an Maschinen gesucht wird (vgl. Kapitel 3.2.1). Ein deterministisches Problem geht von festen Bearbeitungszeiten aus. Die meisten Flow-Shop Probleme unterstellen statische Bedingungen [53]. Unterschiede bestehen zudem hinsichtlich des Zielkriteriums (vgl. Tabelle 3.1), wobei die Minimierung der Zykluszeit am häufigsten verwendet wird.

Für die Lösung von Problemen der Ablaufplanung bei Reihenfertigung stehen unterschiedliche Verfahren in Abhängigkeit von der Ausgangslage und der Zielgröße zur Verfügung. Zu diesen zählen²⁴ [140]:

- Effizient optimierende Verfahren
- Enumerativ optimierende Verfahren
- Heuristische Verfahren

Effizient optimierende Verfahren zeigen den Vorteil, dass eine optimale Lösung des Problems in kurzer Zeit gefunden wird. Meist beinhaltet das entsprechende Verfahren eine einfache Regel, die die Menge aller möglichen Auftragsreihenfolgen schrittweise einschränkt [155]. In der Regel sind diese Verfahren nur auf spezielle Probleme bzw. sehr eng gefasste Problemklassen anwendbar [140]. Der Großteil der entwickelten Algorithmen bezieht sich auf Ein-Maschinen-Probleme bzw. einfache Flow-Shop Probleme.

So kann z.B. bei der Betrachtung zweier Maschinen M_1 und M_2 der Lösungsraum eingeschränkt werden, da für optimale Pläne gilt, dass die Reihenfolge auf beiden Maschinen dieselbe ist [111, 185]. *Johnson* [111] zeigt zudem, dass bei m Maschinen bei Minimierung der Zykluszeit die Reihenfolgen auf den ersten und den letzten beiden Maschinen identisch sind. Dies gilt jedoch nur bei uneingeschränkter Maschinenverfügbarkeit [2].

Der Johnson-Algorithmus kann unter besonderen Bedingungen auch für $m = 3$ angewendet werden. Dazu muss die mittlere Maschine (M_2) von einer der anderen beiden Maschinen dominiert werden, d.h. das Maximum der Bearbeitungszeiten auf Maschine M_2 ist kleiner als das Minimum der Bearbeitungszeiten auf Maschine M_1 oder Maschine M_3 [225]:

²⁴Auf wissensbasierte Verfahren, wie beispielsweise künstliche Neuronale Netze [206], soll im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden.

$$\begin{aligned} \min_{j=1}^n \{p_{1j}\} &\geq \max_{j=1}^n \{p_{2j}\} \\ &\text{oder} \\ \min_{j=1}^n \{p_{3j}\} &\geq \max_{j=1}^n \{p_{2j}\} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Liegt ein Problem mit geordneten Bearbeitungszeiten vor, d.h. gibt es eine dominierende Maschine, auf der jeder Job die maximale Bearbeitungszeit hat und ist diese Maschine die erste bzw. die letzte, so erhält man die optimale Lösung durch Ordnen der Jobs entsprechend der Bearbeitungszeiten auf der dominierenden Maschine [211, 212]. Ein Sonderfall liegt vor, wenn die Bearbeitungszeiten eines Jobs allein von der Geschwindigkeit der Maschinen abhängt [101].

Bei einer Maschinenanzahl $m > 3$ muss die Lösung nicht notwendigerweise Teil der Klasse der Permutationspläne sein, d.h. die Reihenfolge der Aufträge kann auf den einzelnen Maschinen unterschiedlich sein [26, 171]. Für die Lösung solcher $F || C_{max}$ Probleme²⁵ kommen Verfahren zur Lösung von Job-Shop Problemen zum Einsatz [131].

Bei **enumerativ optimierenden Verfahren** werden die Ablaufpläne sukzessive aufgebaut [51]. Dabei kann eine Enumeration für alle denkbaren Pläne erfolgen (vollständige Enumeration) oder nur für einen Teil der Ablaufpläne (unvollständige Enumeration), sofern eine explizite Berücksichtigung der Zielsetzung beim Aufbau der Liste der Ablaufpläne stattfindet [118]. Zu den enumerativen Verfahren zählen jene auf Grundlage der mathematischen Programmierung, die *Branch-and-Bound* Algorithmen sowie Ausschlussverfahren (*elimination methods*) [175].

Stärke der mathematischen Programmierung ist die gute Darstellung der Problemstruktur, die durch die Wahl der Zielgröße und die Definition der Nebenbedingungen bestimmt wird [175]. Auf Grund der hohen Komplexität ist die praktische Anwendung nur eingeschränkt möglich. Das Modell von *Manne* [142] führt z.B. bei Berücksichtigung von $n = 6$ Aufträgen und $m = 5$ Maschinen zu $2^{75} = 3,78 \cdot 10^{22}$ Anordnungsalternativen [118].

Bei den *Branch-and-Bound* Verfahren wird die Komplexität reduziert, indem nur gültige Lösungen, d.h. Lösungen, die Zielsetzung und Nebenbedingungen berücksichtigen, betrachtet und nach einem bestimmten Schema enumeriert werden [26]. Die Effizienz des

²⁵Die hier verwendete Notation beruht auf *Pinedo* [169]. F steht dabei für Flow-Shop und C_{max} für die Zielgröße der minimierten Zykluszeit. Die Verwendung der Bezeichnung C_{max} kommt daher, dass nach Definition die Zykluszeit dem Maximum der Fertigstellungzeitpunkte (*completion times*) der bearbeiteten Aufträge entspricht (vgl. Tabelle 3.1).

Verfahrens wird unter anderem durch die Wahl der oberen Schranke bestimmt und hängt damit vom Startwert des Algorithmus ab. Für deren Bestimmung werden häufig Heuristiken eingesetzt [155]. Die Unterschiede zwischen einzelnen *Branch-and-Bound* Verfahren resultieren aus der unterschiedlichen Bestimmung der unteren Schranke [11].

Ausschlussverfahren reduzieren die Menge zu betrachtender zulässiger Ablaufpläne auf der Grundlage von Ausschlusskriterien [140]. Diese werden so gewählt, dass dominierte Lösungen ausgeschlossen werden können und gleichzeitig sichergestellt ist, dass die optimale Lösung in der verbleibenden Teilmenge enthalten ist [224]. Dabei kann nicht immer ein Kriterium definiert werden, das zu einem Ausschluss bestimmter Reihenfolgen führt [223]. Erfüllt ein Ablaufproblem die Bedingungen für die Anwendung eines bestimmten Ausschlusskriteriums, ist eine deutliche Reduzierung der zu betrachtenden Reihenfolgen erreichbar (vgl. z.B. [213]).

Heuristische Verfahren untersuchen nicht alle Lösungen, sondern nur eine Teilmenge. Hierbei kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass sich die optimale Lösung in der Menge der nicht betrachteten Lösungen befindet. Der Ausschluss bestimmter Elemente aus der Lösungsmenge basiert auf Entscheidungsregeln, deren Qualität einen wesentlichen Faktor für die Güte der Lösung darstellt [44]. Ziel der heuristischen Verfahren ist, eine Lösung in kurzer Zeit zu finden, die so nah wie möglich am Optimum liegt [140].

Das *CDS-Verfahren*²⁶ verwendet den Johnson-Algorithmus für die Ermittlung der Lösungen von $m-1$ Zwei-Maschinen-Probleme, in die das Hauptproblem mit m Maschinen zerlegt wird. Aus den so erhaltenen $m-1$ Reihenfolgen wird die mit der geringsten Zykluszeit C_{max} als Lösung des Hauptproblems ausgewählt [28, 154]. Beim *Gupta Algorithmus* werden die auf m Maschinen zu bearbeitenden n Jobs aufsteigend nach der Hilfsgröße $f(j)$ sortiert. Bei den von *Dannenbring* [43] vorgeschlagenen Rapid-Access Verfahren (*RACS* und *RAES*) wird eine Gewichtungsvorschrift eingesetzt, die das komplexe Problem auf ein Zwei-Maschinen Problem reduziert. Dieses wird dann mit dem Johnson-Algorithmus gelöst.

Mit sämtlichen heuristischen Verfahren (Eröffnungsverfahren, lokale Suchverfahren, unvollständig ausgeführte exakte Verfahren) werden meist nur suboptimale Lösungen ermittelt. Die Einschränkungen in der Güte der Lösung fallen je nach Problem unterschiedlich aus (vgl. u.a. [191]). Näheres dazu findet sich in der entsprechenden Literatur [26, 155, 169].

²⁶Benannt nach H. Campbell, R.A. Dudek und M.L. Smith [28].

Neben den bereits genannten Verfahren finden noch weitere Ansätze Anwendung bei der Lösung von Flow-Shop Problemen. *Toktas et al.* [230] setzen zur Lösung ihres bikriteriellen Problems ein *Branch-and-Bound* Verfahren ein. Auch *Ladhari und Haouari* [126] und *Yokoyama und Santos* [242] verwenden diesen Ansatz, während z.B. *Ying und Liao* [241] auf einen Ameisenalgorithmus zurückgreifen. Das *Tabu Search* Verfahren wiederum wird von *Grabowski und Wodecki* [84] eingesetzt, um ein *Permutation Flow-Shop* Problem mit dem Ziel der Minimierung der Zykluszeit zu lösen.

Bei Ablaufplanungsproblemen in einer Flow-Shop Umgebung können unterschiedliche Nebenbedingungen berücksichtigt werden. *Kubiak et al.* [124] untersuchen ein Zwei-Maschinen-Problem unter der Annahme, dass die Maschinenverfügbarkeit zeitweise eingeschränkt ist. Sie definieren Eigenschaften, die von optimalen Reihenfolgen erfüllt werden müssen, und schlagen auf deren Grundlage einen *Branch-and-Bound* Algorithmus zur Lösung des Problems vor. *Aggoune* [2] beschreibt ebenfalls ein Problem eingeschränkter Verfügbarkeit auf Grund regelmäßiger Wartungsintervalle, die jedoch zu nicht genau vorhersagbaren Zeitpunkten auftreten können. Zur Lösung wird ein *Genetischer Algorithmus* sowie ein Verfahren des *Tabu Search* eingesetzt.

Neben der Verfügbarkeit der Maschinen ist auch die Möglichkeit der Zwischenlagerung der Aufträge vor Bearbeitung auf einer Maschine von Bedeutung. Diese kann uneingeschränkt, begrenzt oder gar nicht möglich sein [169]. Bei nicht möglicher Zwischenlagerung kann ein Job erst dann auf eine Maschine m wechseln, wenn diese freigegeben ist. Bis dahin blockiert²⁷ er die Maschine $m - 1$. Einen Sonderfall stellen *No-wait* Flow-Shop Probleme dar, bei denen beim Übergang eines Jobs von einer zur nächsten Maschine keine Wartezeit entstehen darf. Wird als Zielgröße die Minimierung der Zykluszeit verwendet, kann dieses Problem als *Traveling Salesman Problem* formuliert und mit den entsprechenden Methoden gelöst werden [51]. Hierbei bieten sich vor allem Metaheuristiken an [61].

Liegen zusätzlich parallele Maschinen innerhalb der einzelnen Abschnitte vor und verfügt das System über keine Lagerkapazität, so schlagen z.B. *Thornton und Hunsucker* [229] eine Heuristik zur Lösung vor, die unter Verwendung der Johnson Regel [111] „Kandidatenreihenfolgen“ generiert und davon ausgehend die bestmögliche Lösung sucht. Das *Simulated Annealing* stellt sich als der vorzuziehende Ansatz bei stochastischen Flow-Shop Problemen mit variabler Lagerkapazität heraus [83]. Eine umfassende Übersicht über weitere Lösungsansätze für Flow-Shop Probleme ohne Zwischenlagerung findet sich bei *Hall und Sriskandarajah* [91].

²⁷In der englischsprachigen Literatur wird der Fall ohne Zwischenlagerung daher häufig als *blocking* bezeichnet [169].

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Wahl des Ansatzes der Ablaufplanung maßgeblich von der Struktur des Problems bzw. der Fertigungsumgebung und der gewählten Zielgröße abhängt. Besitzt zudem die Exaktheit der Lösung eine hohe Bedeutung, so ist ein entsprechendes Optimierverfahren zu wählen. Genügt hingegen eine möglichst gute Lösung bei vertretbarem Aufwand, kann auf heuristische Ansätze zurückgegriffen werden.

3.2.3 Schlussfolgerungen für die Planung in der Reparaturlackierung

Für die Planungsaufgaben in der Reparaturlackierung stellt sich die Wahl der minimalen Zykluszeit als sinnvolle Zielgröße heraus. Wählt man zudem einen Planungshorizont von vier Tagen, der gleichbedeutend mit der maximalen Wartezeit der Kunden ist, kann von einer Erfüllung der Fälligkeitstermine ausgegangen werden. Da eine minimale Zykluszeit in der Regel mit einer hohen Auslastung der Maschinen einhergeht [26, 53], ist auch der Auslastung der Lackierkabine als zentralem Element der Planung der Autoreparaturlackierung Rechnung getragen.

Bei einem Flow-Shop Problem mit drei Maschinen und dem Kriterium der minimalen Zykluszeit gibt es stets eine optimale Lösung mit gleicher Reihenfolge auf allen Maschinen²⁸ [136]. Daher kann bei Unterteilung des Prozesses der Reparaturlackierung in drei Abschnitte (= drei Maschinen), wie sie in Mehrzahl der Werkstätten vorkommt (vgl. Kapitel 4.2.1), auch von einem *Permutation Flow-Shop* Problem ausgegangen werden (vgl. Kapitel 5.1.1). Die damit verbundene gleiche Reihenfolge der Abarbeitung der Aufträge auf allen Maschinen berücksichtigt dann auch, dass bei nahezu allen Werkstätten, auf Grund von Platzmangel, das Warten von mehr als einem Fahrzeug vor einem Arbeitsabschnitt, und damit ein Positionswechsel innerhalb der Reihenfolge, nicht möglich ist²⁹.

3.3 Arbeitszeiten als Maß des Arbeitsablaufs

Die Dauer eines Prozesses bzw. eines Arbeitsschrittes ist eine Kenngröße für den Arbeitsablauf und bei manuellen Tätigkeiten ein Maß für den Bedarf an menschlicher Ar-

²⁸Genau genommen gilt diese Annahme nur für den Fall rein regulärer Jobs, wie er auch bei der Reparaturlackierung auftritt. *Bouquard et al.* [22] zeigen, dass bei der gleichzeitigen Berücksichtigung von regulären und *no-wait* Jobs dies schon bei $m = 2$ Maschinen nicht mehr der Fall ist.

²⁹Eine detaillierte Beschreibung der Planungsbedingungen der Reparaturlackierung und des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Lösungsansatzes finden sich in Kapitel 5.1.1.

beitskraft. Der Zeitbedarf kann zum Vergleich zweier Standorte, bei denen die gleichen Prozesse stattfinden, benutzt werden. Auch eine Analyse des Prozesses und eine damit verbundene Identifizierung von Schwachstellen im Ablauf kann auf Grundlage des Zeitbedarfs durchgeführt werden [77].

Kann das quantitative Ergebnis eines Produktionsprozesses (= *Output*) durch den Arbeitenden beeinflusst werden, ändert es sich mit der insgesamt zu absolvierenden Arbeitszeit [88]. Daher ist gerade bei handwerklichen Dienstleistungen, wie der Autoreparaturlackierung, der bestmögliche Einsatz der menschlichen Arbeitskraft, die den dominierenden Produktionsfaktor darstellt, wichtig. Er steht somit bei Fragen der Prozessverbesserung im Mittelpunkt [122]. Die Veränderung des Arbeitszeitbedarfs ist somit die bedeutungsvollste Größe bei der Bestimmung eines möglichen Verbesserungspotenzials. Ihre Messung kann mittels Arbeitszeitstudien geschehen (Kapitel 3.3.1). Bei deren Durchführung und Auswertung müssen die Besonderheiten handwerklicher Tätigkeiten berücksichtigt werden (Kapitel 3.3.2).

3.3.1 Arbeitszeitstudien als Verfahren zur Prozessbeschreibung und -bewertung

Die Analyse eines Arbeitsablaufs erfordert eine Kenntnis der Verteilung des Zeitbedarfs auf die einzelnen Arbeitsabschnitte. Allgemein hängt von den Arbeitszeiten besonders bei manuellen Tätigkeiten die Produktionsleistung des Betriebes ab. Zudem werden Arbeitszeitwerte auch in der Planung, der Steuerung, der Kontrolle und als Grundlage der Entlohnung innerhalb eines Betriebes eingesetzt [95]. Der Verwendungszweck der Zeitdaten bestimmt den Umfang einer Zeitstudie und die Anforderungen, die für eine statistische Auswertung erfüllt sein müssen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Arbeitszeit bzw. deren Bedarf zur Ablaufplanung eingesetzt.

Grundsätzlich handelt es sich bei der Arbeitszeit um eine Größe, deren Ausprägung von mehreren Einflussfaktoren abhängt. Zu diesen zählen die eingesetzten Verfahren, das Layout des Arbeitsplatzes und des Werkraumes³⁰ sowie die Faktoren der Arbeitsermüdung (vgl. Kapitel 3.1 und [88]). Für die Charakterisierung eines gemessenen Zeitwertes im Rahmen einer Arbeitszeitstudie müssen daher folgende Daten bekannt sein [174]:

- Zeiten der Arbeitsschritte,
- Einflussgrößen, von denen die gemessene Dauer der Verrichtung abhängt,

³⁰Darunter sind allgemeine Umstände wie z.B. Temperatur, Lichtverhältnisse etc. zu verstehen.

- Bezugsmengen, auf die sich die Zeit bezieht, und
- Daten der Bedingungen, unter denen die Arbeit verrichtet wurde.

Zeitdaten weisen in der Regel eine Streuung auf. Diese ist sowohl menschlich als auch sachlich bedingt [115]. Die menschlich bedingte Streuung kann über den sogenannten Leistungsgrad (LG) teilweise beschrieben und aus den Daten eliminiert werden [38]. Er stellt ein Maß für die vom Ausführenden im Moment der Zeitaufnahme gebrachte Leistung dar. Diese wird u.a. beeinflusst vom Ermüdungsgrad, dem Ausbildungsstand, der Erfahrung und der momentanen Leistungsdisposition. Der Leistungsgrad wird in 10 % Abständen angegeben und liegt zwischen 70 % und 130 %. Eine feinere Unterteilung wird als nicht realisierbar angesehen [174], so dass trotz der Verwendung des Leistungsgrades eine Reststreuung bleibt. Die sachlich bedingte Streuung ist von einer Vielzahl schwer quantifizierbarer Faktoren abhängig. Sie verursachen den Großteil der Streuung der Zeitdaten. Je nach Fragestellung kann es beabsichtigt sein, diese Streuung abzubilden, um die Vielfalt der in der Realität herrschenden Zustände zu beschreiben (vgl. Kapitel 3.3.2 und [182]).

Bei Zeitstudien lassen sich drei Arten der Ermittlungsverfahren unterscheiden [162]. Bei der *rechnenden Zeitstudie* wird der zu betrachtende Prozess in elementare Bewegungen zerlegt, denen normierte Zeittabellenwerte zugeordnet werden. Bei den *orientierenden Zeitstudien* werden zunächst nur die Anteile der unterschiedlichen Zeitarten (Hauptarbeit, Rüstzeit etc.) bestimmt, ohne detaillierte Messungen durchzuführen. Bei der *messenden Zeitstudie* erfolgt die Bestimmung der Dauer eines Arbeitsschrittes direkt am Arbeitsplatz [174].

Bei der messenden Zeiterfassung stellt die Fortlaufszeitstudie nach REFA³¹ das beste Verfahren dar [115]. Die Zeit wird dabei in vier verschiedenen Kategorien ermittelt. Die Fortlaufzeit (t_f) gibt die komplette Dauer der Studie seit Beginn der Aufnahme an. Aus ihr lassen sich die anderen drei Kategorien ableiten [174]. Dafür müssen sowohl der Leistungsgrad (LG) als auch die Anzahl der an der Ausführung beteiligten Arbeiter (M) bekannt sein:

³¹Die Abkürzung REFA steht für den Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, früher Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung.

- t_f : Fortlaufzeit, entspricht der kumulierten Zeit, zu der der Arbeitsschritt beendet wurde. Damit lässt sich der chronologische Ablauf der Studien rekonstruieren.
- t_e : Einzelzeit, entspricht der realen Dauer des aufgenommenen Schrittes.
- t_n : Normalzeit (Soll-Einzelzeit), entspricht der Dauer des Arbeitsschrittes bezogen auf einen Leistungsgrad (LG) von 100 % ($t_n = t_e \cdot LG$).
- t_g : Grundzeit, entspricht der Normalzeit unter zusätzlicher Berücksichtigung der Anzahl M der an der Verrichtung beteiligten Arbeiter ($t_g = t_n \cdot M$).

Für die Beschreibung des Arbeitsablaufs sind letztendlich die Grundzeiten t_g der einzelnen Arbeitsschritte entscheidend, da mit ihnen der Zeitbedarf bei einer ausführenden Person unter der Annahme eines Leistungsgrades von 100 % (Normalleistung) beschrieben wird. Durch die Berücksichtigung des Leistungsgrades wird der Anteil der Streuung der Daten, der durch die unterschiedliche Arbeitsintensität hervorgerufen wird, größtenteils herausgenommen. Je nach untersuchtem Produktionssystem kann damit, auf Grund weiterer Einflussfaktoren, nur ein Teil der Streuung erklärt und eliminiert werden. Gerade bei Operationen mit hohem manuellen Anteil und sehr unterschiedlichen Produkten bzw. Objekten, wie sie u.a. bei handwerklichen Tätigkeiten mit Werkstattcharakter auftreten, bleibt der Großteil der Varianz der Daten erhalten.

3.3.2 Besonderheiten bei handwerklichen Tätigkeiten

Die Werkstattfertigung, zu der auch ein Großteil der handwerklichen Tätigkeiten und Dienstleistungen zählen, unterscheidet sich bei der Ablaufplanung in mehrfacher Hinsicht von den automatisierten Fertigungsprozessen, insbesondere den kontinuierlichen Verfahren. Zunächst tritt bei ihr das Dilemma der Ablaufplanung, die Minimierung der Durchlaufzeit bei gleichzeitiger Maximierung der Auslastung der Betriebsmittel, zum Vorschein [88]. Dadurch erlangt die Reihenfolgenplanung besondere Bedeutung und mit ihr die Ermittlung von Planzeiten [77].

Im Gegensatz zu automatisierten Fertigungsprozessen, bei denen die absolute Dauer eines Arbeitsschrittes von der Leistung und der Funktionsweise der Maschine sowie dem zu fertigenden Produkt abhängt und weitestgehend als konstant angenommen werden kann [37, 162], existieren bei manuellen Tätigkeiten Einflussfaktoren, deren quantitative Bedeutung nicht ohne Weiteres bestimmbar sind. Im Rahmen einer Zeitstudie ist daher mit einer hohen Streuung der Daten zu rechnen.

Der menschlich bedingte Einfluss auf die Arbeitszeit wird teilweise über den bei REFA-Studien verwendeten Leistungsgrad berücksichtigt, jedoch hängt dessen Bestimmung zum einen vom subjektiven Eindruck des Zeitnehmers ab, zum anderen ist der Wertebereich beschränkt (vgl. [174] und Kapitel 3.3.1). Daneben besteht auch ein sachlich verursachter Einfluss, der aus dem Fertigungstyp resultiert. So lassen sich die Einflussfaktoren auf die Arbeitszeit in der Autoreparaturlackierung in drei Gruppen einteilen (vgl. [157] und Abbildung 3.2):

1. Humanfaktoren:

Hierzu zählen die Einflüsse, die auf den Ausführenden wirken und dessen Leistungsfähigkeit positiv oder negativ beeinflussen. So ist z.B. davon auszugehen, dass Unterschiede zwischen einem Lackierer mit mehrjähriger Erfahrung und einem gerade fertig ausgebildeten Lackierer bestehen. Dessen geringeres Alter wiederum kann sich jedoch positiv auf die Leistungsfähigkeit auswirken.

2. Organisatorische Aspekte:

Zu dieser Gruppe gehören Faktoren, die u.a. durch das Layout des Arbeitsplatzes und der Werkstatt beeinflusst werden. Sind zu wenig Werkzeuge vorhanden, kann dies zu einer unnötigen Verlängerung der Rüstzeit führen. Gibt es keine Werkzeugwagen am Arbeitsplatz, nimmt der Weg zu, den der Lackierer zur Materialbeschaffung zurücklegen muss.

3. Bauteilbezogene Faktoren:

Art, Form und Beschaffenheit des Bauteils wirken sich ebenfalls auf die Dauer einzelner Arbeitsschritte aus. Für einen kleinflächigen Kotflügel mit einer leicht geneigten Fläche und einer hohen Kantenzahl ist z.B. beim Basislackauftrag mit einem größeren Zeitbedarf pro Flächeneinheit zu rechnen als bei einer großflächigen Motorhaube.

Die bei der Autoreparaturlackierung zu erwartende hohe Streuung der Daten als Folge der genannten Einflussfaktoren erfordert die Durchführung ausreichend vieler Zeitstudien und den Einsatz ausgewählter und am Datensatz getesteter statistischer Verfahren zur Datenanalyse (vgl. Kapitel 4.2.3.2). Nur so kann den bestehenden Anforderungen an eine realitätsnahe Abbildung des Arbeitsablauf mittels Planzeiten Rechnung getragen werden [95]. Im Rahmen einer Reihenfolgen- bzw. Ablaufplanung für die Reparaturlackierung muss die aus der Streuung resultierende Unsicherheit der Planung zudem unter Einsatz entsprechender Verfahren berücksichtigt werden.

Einflussfaktoren auf die Arbeitszeit		
Humanfaktoren <ul style="list-style-type: none"> • Ausbildung und Erfahrung • Biorhythmus • Training 	Organisatorische Aspekte <ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsplan • Anlagen • Werkzeuge • Werkstattdesign 	Bauteilbedingt <ul style="list-style-type: none"> • Fläche • Material • Zustand (ein- oder ausgebaut) • Schadenstiefe

Abbildung 3.2: Einflussfaktoren auf den Zeitbedarf in der Autoreparaturlackierung

3.4 Methoden zur Berücksichtigung von Unsicherheiten

Im Bereich der Ablaufplanung können generell zwei Arten von Unsicherheiten unterschieden werden. Zum einen kann es zu unvorhersehbaren Veränderungen des Produktionssystems, z.B. durch den Ausfall einer Maschine, kommen [207]. Auf diese Art der Unsicherheit soll hier nicht näher eingegangen werden. Zum anderen werden häufig Daten, z.B. Bearbeitungszeiten, verwendet, die mit einer hohen Unsicherheit belegt bzw. erst nach Durchführung der Operation genau bestimmbar sind [109, 132, 169]. Maschinenbelegungspläne, die auf rein deterministischen Daten aufbauen, können dadurch undurchführbar werden, da sie ein zu hohes Risiko der Nichterfüllung der entsprechenden Zielgröße (z.B. Termintreue) beinhalten [175]. Um dieses Risiko zu verringern, müssen die Unsicherheiten bei der Lösung der entsprechenden Ablaufprobleme, die damit zu stochastischen Problemen werden, beachtet werden.

Unsicherheiten in der Ablaufplanung können durch reaktives Scheduling berücksichtigt werden [9]. Hierbei wird die Veränderung der Bedingungen nach Beginn der Bearbeitung der geplanten Jobs durch eine „Reparatur“ des verletzten, ursprünglichen Plans eingebracht. Dieser Ansatz wird häufig in der Ablaufplanung verwendet, da Datenunsicherheiten erst während der Ausführung der Operation festgestellt werden können (vgl. u.a. [99]). Liegen Informationen bezüglich der Unsicherheiten der Eingangsdaten der Planung vor Beginn der Operation vor, können diese bereits vor Ausführung der Operation berücksichtigt werden. Man spricht dann von prädiktivem Scheduling. Generell stehen drei Verfahren zur Abbildung von Unsicherheiten zur Verfügung:

1. die *Fehlerrechnung* (Kapitel 3.4.1),
2. *Ansätze der Fuzzy-Theorie* (Kapitel 3.4.2), und
3. der Einsatz von Zufallszahlen, z.B. mittels *Monte-Carlo-Simulation* (Kapitel 3.4.3).

3.4.1 Fehlerrechnung

Bei der Fehlerrechnung wird die Unsicherheit des Endergebnisses aus den Unsicherheiten der Zwischenergebnisse berechnet. Für ein Ergebnis $W = f(x_1, \dots, x_n)$ von n direkt bestimmbar Größen x_1, \dots, x_n (z.B. Bearbeitungszeiten) gilt das Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Gauß, sofern die Funktion $f(x_1, \dots, x_n)$ nach x_i differenzierbar ist [15, 16]:

$$(\sigma_W)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta W}{\delta x_i} \Big|_{x=\mu} \right)^2 \cdot (\sigma_i)^2 + 2 \cdot \sum_{i < j} \left(\frac{\delta W}{\delta x_i} \Big|_{x=\mu} \right) \left(\frac{\delta W}{\delta x_j} \Big|_{x=\mu} \right) \cdot (\sigma_{ij}) \quad (3.2)$$

mit

- $(\sigma_W)^2$: Varianz des Ergebniswertes
- $(\sigma_i)^2$: Varianz des gemessenen Wertes x_i
- (σ_{ij}) : Kovarianz der Werte x_i und x_j

Sind die Merkmale unabhängig voneinander, vereinfacht sich die Gleichung dahingegen, dass der Kovarianzterm wegfällt. Für die Berechnung der Varianz eines Ergebniswertes aus den Varianzen der Eingangsdaten mittels Fehlerfortpflanzung müssen sehr häufig Annahmen getroffen werden. Besonders die Bestimmung der Kovarianz für mehr als zwei Eingangsgrößen x gilt als problematisch [35]. So kommt *Berne* [15] bei seiner Untersuchung zu dem Schluss, dass bei nicht bekannten Kovarianzen, aber vorliegenden Abhängigkeiten zwischen den Eingangsgrößen, die Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes zu einer Überschätzung der Varianz des Ergebniswertes führt.

Bei Parametern, die sich nicht mit einer Normalverteilung beschreiben lassen und deren Standardabweichung größer als 10 % ihrer Größenordnung ist, müssen die Kovarianzen bekannt sein, da dann die Abweichungen aus der Anwendung des vereinfachten Fehlerfortpflanzungsgesetzes³² nicht mehr zu vernachlässigen sind [226].

Neben der Anhängigkeit zwischen den Eingangsgrößen ist auch die Größe der Unsicherheit im Vergleich zum Absolutwert von Bedeutung. Liegt die Unsicherheit, beschrieben als doppelte Standardabweichung, über 100 %, kann nicht mehr von einer Normalverteilung der Abweichungen ausgegangen werden [104]. Sofern die Eingangsgrößen aggregierte und gemittelte Werte darstellen, ist der Ansatz der Fehlerfortpflanzung als ausreichend anzusehen. Bei großen Datenmengen, die eine quantitative Beurteilung der Unsicherheiten

³²Unter dem vereinfachten Fehlerfortpflanzungsgesetz wird Gleichung 3.2 unter Wegfall des Kovarianzterms verstanden.

zulassen, können die Vereinfachungen jedoch zu einer fehlerhaften Schätzung der Unsicherheit der Ergebniswerte führen (vgl. u.a. [15]).

Anwendung findet das Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Gauß oder eine entsprechend angepasste Form häufig in der Messtechnik zur Abschätzung systematischer Fehler [144], bei der Abschätzung der Größenordnung der Unsicherheiten aggregierter Größen wie z.B. bei nationalen Emissionsinventaren [103] oder bei der Untersuchung des Verhaltens eines Modells bei Berücksichtigung von Unsicherheiten (vgl. u.a. [102]).

Im Bereich der Ablaufplanung ist die Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes nicht bekannt. Auch bei einem rein enumerativen Verfahren erscheint eine Anwendung nur dann sinnvoll, wenn die Abschätzung der Extremfälle unter Verwendung der Grenzen des durch die Unsicherheit aufgespannten Intervalls von Interesse ist.

3.4.2 Ansätze der Fuzzy-Theorie

Die Fuzzy-Theorie beschreibt unsichere bzw. ungenaue Parameter mittels sogenannter Zugehörigkeitsfunktionen. Mit Hilfe dieser Funktion kann die Unsicherheit, hier verstanden als die Unkenntnis über den genauen Wert eines Parameters, nicht-stochastisch beschrieben werden, ohne eine Reduktion auf „mittlere“ Werte vorzunehmen [187]. Dieser Ansatz geht auf *Zadeh's* [243] Theorie der unscharfen Mengen (*fuzzy set theory*) zurück. Während im klassischen Sinne eine scharfe Abgrenzung zwischen den zwei Zuständen Zugehörigkeit (Objekt $a \in A$) und Nichtzugehörigkeit (Objekt $a \notin A$) getroffen wird, können unscharfe Mengen auch die Übergänge dazwischen abbilden. Ist X eine Menge von Punkten (z.B. Bearbeitungszeiten von Aufträgen), die hinsichtlich einer unscharfen Aussage (tatsächlicher Zeitbedarf in Minuten) zu bewerten sind, und x ein Element dieser Menge, so heißt:

$$\tilde{X} = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad \text{mit} \quad \mu_A : X \rightarrow [0, 1] \quad (3.3)$$

eine unscharfe Menge auf X (*fuzzy set in X*) [187]. Die Bewertungsfunktion μ_A wird Zugehörigkeitsfunktion (*membership function*), charakteristische Funktion oder Kompatibilitätsfunktion genannt. Als Pendant zum stochastischen Ansatz der Wahrscheinlichkeit bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilung wird bei der Fuzzy-Theorie auch von Möglichkeit bzw. Möglichkeitsverteilung gesprochen [245].

Die Zugehörigkeitswerte $\mu_A(x)$ beschreiben die subjektive Einschätzung der Zugehörigkeit in Abhängigkeit der Grundmenge. Damit stellt Fuzzy-Logik eine Möglichkeit dar, unscharfe bzw. unsichere Informationen und Daten mit vertretbarem Aufwand abzubil-

den, um realitätsnahe und hinreichend genaue Aussagen zu treffen [244]. Die Verwendung des Intervalls $[0, 1]$ als Wertebereich für die Zugehörigkeitsfunktion erlaubt eine anschauliche Darstellung (Abbildung 3.3). Die Form der Zugehörigkeitsfunktion (z.B. Dreieck, Trapez, S-Form etc.) hängt u.a. vom zu beschreibenden Objekt, aber auch von der Problemstellung und der angestrebten Lösung ab. Weitere grundlegende Informationen zur Fuzzy Logik finden sich u.a. in [187, 244, 245, 248].

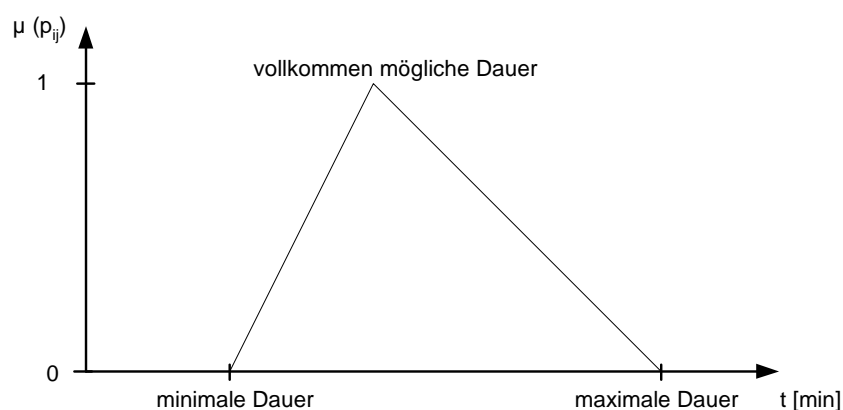


Abbildung 3.3: Dreieckige Zugehörigkeitsfunktion der Bearbeitungszeit p_{ij} (in Anlehnung an [238])

Die Fuzzy-Theorie findet in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung [246]. So ist sie weit verbreitet in der Regelungstechnik, da so Einflussfaktoren und Interdependenzen weniger aufwändig modelliert werden können als mit konventionellen, auf Differentialgleichungen basierenden Reglern [249]. Auch in der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung findet die Fuzzy-Theorie breite Anwendung, da häufig Unschärfen der Sprache abgebildet werden müssen [69, 187].

Ein Einsatz von Fuzzy-Zahlen in der Ablaufplanung ist zur Abbildung von Unsicherheiten vor allem dann angebracht, wenn frühere Daten, z.B. der Bearbeitungszeiten, nicht verfügbar sind und daher die Wahrscheinlichkeitsfunktionen nicht ermittelt werden können [52]. In diesem Fall können bestehende Unsicherheiten geschätzt und mittels Fuzzy-Zahlen abgebildet werden. Dies gilt unabhängig von der Art des Problems (z.B. Job-Shop, Flow-Shop, Open-Shop etc.).

Ablaufplanungsprobleme unterscheiden sich durch die Wahl des zu fuzzifizierenden Parameters. Oft beschrieben ist der Einsatz von Fuzzy-Bearbeitungszeiten, deren Zugehörigkeitsfunktion dann meist dreiecksförmig ist (vgl. Abbildung 3.3 und [238]). Diese zeigen,

ebenso wie die Trapezfunktionen, Vorteile bei der Umsetzung des Lösungsansatzes [160]. Daneben können die Fuzzy-Bearbeitungszeiten auch mittels Sechs-Punkt-Funktionen beschrieben werden [67], die real existierende Zusammenhänge besser beschreiben können (vgl. z.B. [234]).

Neben der Abbildung der eigentlich Unsicherheit können auch Nebenbedingungen und damit Präferenzen fuzzifiziert abgebildet werden. Dabei werden häufig fuzzifizierte Fälligkeitstermine verwendet. Als Zugehörigkeitsfunktion wird hier in der Regel ein rechtwinkliges Trapez verwendet [135]. *Konno und Ishii* [121] untersuchen ein Ablaufproblem unter Verwendung eines Repetierfaktors $r(i)$, dessen Verfügbarkeit durch eine Fuzzy-Zahl beschrieben wird. Auch die gemeinsame Betrachtung unsicherer Bearbeitungszeiten und flexibler Fälligkeitstermine wird oft beschrieben (z.B. [32, 106]).

Zur Lösung von Fuzzy-Ablaufproblemen werden optimale Verfahren ebenso eingesetzt wie Heuristiken. *Fortemps* [67] verwendet für sein Job-Shop Problem mit Fuzzy-Bearbeitungszeiten das *Simulated Annealing*, während *Hong und Chung* [98] einen Fuzzy-Johnson Algorithmus zur Lösung ihres Flow-Shop Problems einsetzen. Den Einsatz eines Fuzzy *Branch-and-Bound* Verfahrens untersuchen *Temiz und Erol* [227] für ein Flow-Shop Problem mit $m = 3$ Maschinen. Im Vergleich zu stochastischen Ansätzen ist der rechnerische Aufwand beim Einsatz der Fuzzy-Theorie meist geringer, besonders bei der Verwendung heuristischer Lösungsverfahren [12]. Weitere Beispiele für die Verwendung der Fuzzy-Theorie in der Ablaufplanung finden sich u.a. in [52, 210].

3.4.3 Monte-Carlo-Simulation

Bei der Monte-Carlo-Simulation handelt es sich um eine Simulationstechnik aus der Statistik, mit der die Abhängigkeit der Verteilungsfunktionen des Ergebnisses eines Gleichungssystems von der Verteilungsfunktion der Eingangsgrößen untersucht wird [16]. Die einfache Erweiterung deterministischer Modelle zu probabilistischen Modellen macht dabei den Vorteil der Methode aus.

Im Gegensatz zum deterministischen Fall werden bei der Monte-Carlo-Simulation die Eingangsgrößen mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben. Diese werden bestimmt durch den Typ der Verteilung (log-normal, normal, uniform etc.) und entsprechende Kenngrößen bzw. Momente [8, 170]. Die Kenngrößen der Verteilung können entweder aus vorliegenden Stichproben oder von Experten geschätzt werden³³. Die Eingangsgrößen werden

³³Bei der Bestimmung der Unsicherheiten von Emissionsinventaren mittels Monte-Carlo-Simulation beispielsweise beruht ein Großteil dieser Werte auf Expertenschätzungen [104, 232].

so erzeugt, dass sie die hinterlegte Verteilungsfunktion abbilden. Als Konsequenz ergibt sich, dass auch den Werten der Ergebnisgröße eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden kann [40].

Die Verteilung der Ergebnisgröße wird bestimmt, indem das Gleichungssystem für eine bestimmte Anzahl an zufällig ermittelten Werten der stochastischen Eingangsgrößen berechnet wird. Das bedeutet, dass aus der Menge der möglichen Werte der Eingangsgrößen jeweils ein Wert (= Realisierung) gezogen und für diese Werte das Gleichungssystem berechnet wird. Dieser Vorgang wird dann N -mal wiederholt (= N Ziehungen).

Aus der Menge der Ergebnisse können dann die Häufigkeitsverteilung und die zugehörigen Momente der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung geschätzt werden [137]. Je größer die Anzahl der Ziehungen, desto mehr gleicht die empirisch erhaltene Verteilungsfunktion der tatsächlichen Verteilung. Zudem nimmt auch der statistische Fehler (= Varianz) der Monte-Carlo-Simulation auf Grund der Proportionalität zu $\frac{1}{\sqrt{N}}$ mit steigender Anzahl der Ziehungen N ab [108]. Abbildung 3.4 zeigt ein Beispiel für eine Häufigkeitsverteilung einer Ergebnisgröße für $N = 10.000$ Ziehungen.

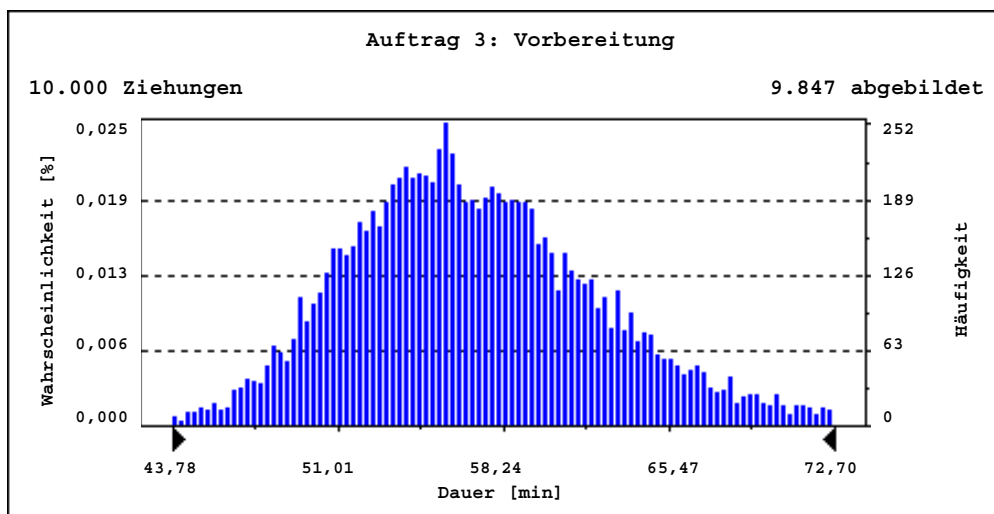


Abbildung 3.4: Häufigkeitsverteilung der Vorbereitungszeit eines Auftrags

Für die Durchführung der N Ziehungen stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die sich in der resultierenden Varianz³⁴ und damit in ihrer Güte unterscheiden [62, 186]. Ein häufig bei der Monte-Carlo-Simulation genutztes Verfahren ist das *Latin Hypercube Sampling* [78]. Dabei wird der Wertebereich, der durch die Verteilung und ihre Momente

³⁴Auf die Unsicherheit des Verfahrens selbst soll hier nicht explizit eingegangen werden. Überlegungen hierzu finden sich z.B. bei *Weise und Zhang* [239].

aufgespannt wird, in N -Intervalle gleicher Wahrscheinlichkeit unterteilt. Im Anschluss daran wird aus jedem Teilintervall ein Wert gezogen [35]. Dadurch wird die gesamte Verteilung abgedeckt und die Varianz der durch die Ziehungen abgebildeten Verteilung im Vergleich zur hinterlegten Verteilung deutlich reduziert [78].

Das hier beschriebene Verfahren der statistischen Simulation kann ebenso auf komplexere Zusammenhänge angewendet werden. So können, wie z.B. bei der Berechnung der Unsicherheiten von Emissionsinventaren, Ergebnisse eines probabilistischen Modells wiederum zu weiteren Größen aggregiert werden. Deren Verteilung hängt dann letztendlich von den Verteilungen der Eingangsgrößen ab [104]. Neben diesen linearen Zusammenhängen können auch nicht-lineare Beziehungen zwischen Eingangs- und Ergebnisgrößen beschrieben werden, wie sie bei der Fehlerfortpflanzung in Messsystemen auftreten können [13]. Eine weitere Stärke der Monte-Carlo-Simulation liegt in der Möglichkeit, Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen abzubilden sowie in der Verwendung empirischer Verteilungen bei der Beschreibung der Eingangsgrößen [1, 143].

Die Monte-Carlo-Simulation findet in verschiedenen Bereichen und zu unterschiedlichen Zwecken Anwendung:

- Bestimmung der Parameterunsicherheit bei hydrologischen Modellen (z.B. [125, 214])
- Abschätzung der Unsicherheiten von Messsystemen (z.B. [39, 41])
- Ermittlung von Messgenauigkeiten bei der Bestimmung von Radioaktivitäten (z.B. [15])
- Einsatz bei der Risikoabschätzung und der Umweltverträglichkeitsprüfung (z.B. [172])

Im Bereich der Ablaufplanung findet die Monte-Carlo-Simulation meist bei gleichzeitigem Einsatz der Simulationstechnik Anwendung. Diese wird häufig im Zusammenhang mit reaktivem Scheduling benutzt [100]. Ziel dabei ist, die Robustheit der Belegungspläne zu testen, wobei die unsicheren Ereignisse mittels Zufallszahlen generiert werden [194]. Beim prädiktiven Scheduling jedoch gibt es bisher noch wenige Beispiele für den Einsatz der Monte-Carlo Technik³⁵. Der Grund hierfür liegt in der fehlenden Möglichkeit,

³⁵ *Bassett et al.* [14] verwenden die Monte-Carlo Technik zur Ziehung von Zufallszahlen, die dann für die Berechnung von Reihenfolgen eingesetzt werden können. In diesem Beispiel werden aber weder eine robuste Reihenfolge noch Zykluszeiten berechnet, da das Ziel der Untersuchung die Ermittlung der günstigsten Planungsstrategie ist.

die Verteilungen der Eingangsgrößen aus historischen oder gemessenen Datensätzen zu beschreiben [42]. Zudem findet das Scheduling hauptsächlich in der Prozessindustrie Einsatz, in der ein meist hoher Automatisierungsgrad vorherrscht, so dass die Unsicherheit mehr von zufälligen Ereignissen (z.B. Maschinenstillstand) abhängig und damit schwerer vorhersagbar ist.

3.4.4 Auswahl eines Verfahrens zur Abbildung der Unsicherheit der Arbeitszeiten in der Reparaturlackierung

Bei den meisten Untersuchungen zum Thema Ablaufplanung unter Unsicherheit stehen entweder Fragen der Robustheit einer ermittelten Reihenfolge (z.B. [42, 134, 148, 194]) oder die Auswahl der bestmöglichen Planungsstrategie unter Unsicherheit (z.B. [14, 166, 167]) im Fokus. Die dabei berücksichtigten unsicheren Parameter sind entweder die Bearbeitungszeiten oder/und die Fertigstellungstermine. In einigen Beispielen wird auch die Maschinenverfügbarkeit bzw. die Verfügbarkeit einer weiteren Ressource als unsicher betrachtet (z.B. [132, 168]).

Die Unsicherheiten werden in den genannten Beispielen mittels gewählter Verteilungen beschrieben, die nicht auf empirischen Daten basieren. Sehr häufig wird dabei eine Exponentialverteilung angenommen [114, 132]. In manchen Fällen wird zudem davon ausgegangen, dass die Bearbeitungszeiten der einzelnen Jobs identische Verteilungen aufweisen. Manche Autoren verweisen dabei auf das Problem, dass keine historischen Daten zur Bestimmung empirischer Verteilungen vorliegen, sei es, da die zu planenden Jobs erstmalig ausgeführt werden oder keine Datenaufnahme stattfand [9].

Auf Grund der Tatsache, dass es sich bei den geschilderten Beispielen in der Regel mehr um theoretische Überlegungen als um praktische Anwendungsbeispiele handelt, und die Ziele der Untersuchungen von denen im Rahmen dieser Arbeit verfolgten abweichen, erscheint eine Verwendung der dort eingesetzten Verfahren und Ansätze als nicht zielführend. Zudem gibt es nur wenige Arbeiten, bei denen neben der Reihenfolge auch eine Methode zur Berechnung des Erwartungswertes der Zykluszeit entwickelt wird [82, 83, 166]. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher für die Berücksichtigung der Unsicherheiten die Monte-Carlo-Simulation verwendet. Die Gründe hierfür sind:

1. Die vorliegende umfangreiche Datengrundlage (Kapitel 4.3.1) ermöglicht die detaillierte Beschreibung der Unsicherheiten mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen [12].

2. Die Arbeitszeiten der einzelnen Schritte der Autoreparaturlackierung zeigen eine Unsicherheit von größtenteils deutlich über 100% .
3. Die Arbeitsschritte des Prozesses der Autoreparaturlackierung, deren Zeitbedarf nicht flächenabhängig ist, können nicht durch eine Normalverteilung beschrieben und die einzelnen Bearbeitungszeiten nicht stochastisch geordnet werden [66, 123].
4. Die ursprünglichen Aggregationsvorschriften der einzelnen Zeitparameter können beibehalten werden, d.h. die Komplexität des Ablaufplanungsproblems wird durch die Monte-Carlo-Simulation nicht beeinflusst.
5. Die Schwierigkeiten bei der Abbildung der Unsicherheit bei Verwendung eines optimierenden Verfahrens (vgl. [63, 100]) treten nicht auf.
6. Der Erwartungswert der Zykluszeit lässt sich empirisch ermitteln. Dadurch ist eine Evaluierung der praktischen Bedeutung der Ablaufplanung, die sich aus dem Unterschied zwischen der Zykluszeit der optimalen Reihenfolge und der Reihenfolge nach der *First-in-First-out*-Regel ergibt, möglich.

4 Analyse der Arbeitsabläufe in der Reparaturlackierung

Die handwerkliche Reparaturlackierung trug in den vergangenen Jahren erheblich zu den VOC-Emissionen in Deutschland und Europa bei [7, 19]. Das bestätigt auch der Marktanteil der Reparaturlacke in Europa. Gemessen an seinem Wert in Euro lag er im Jahr 2003 bei 14 % der Industrielacke und 7 % sämtlicher Farben und Lacke [31]. Durch diesen Beitrag zur Umweltbelastung und auf Grund der Dominanz von Klein- und Mittelbetrieben ist der Sektor als Folge integrierter Ansätze des Umweltschutzes neuen Herausforderungen ausgesetzt [56, 58].

Eine dieser Herausforderungen ist der vermehrte Einsatz von Lackmaterialien auf Wasserbasis (vgl. Kapitel 2.3.3). Daraus resultiert ein, gegenüber konventionellen Lackmaterialien, veränderter Lackierprozess, der neben einer Änderung des Materialverbrauchs auch Einflüsse auf die Arbeitszeit mit sich bringt. Eine Quantifizierung dieser Einflüsse ist mittels einer Arbeitszeitstudie möglich, für die eine Kenntnis der Rahmenbedingungen des Sektors notwendig ist (Kapitel 4.1). Hierbei ist neben wirtschaftlichen (Kapitel 4.1.1) und rechtlichen (Kapitel 4.1.3) Aspekten auch die Stellung des Sektors im Zusammenhang mit der Automobilproduktion zu berücksichtigen (Kapitel 4.1.2).

Neben den Rahmenbedingungen müssen der zu untersuchende Prozess sowie der Umfang der durchgeführten Studien bekannt sein. Dazu wird zunächst die Fertigungsumgebung der Reparaturlackierung beschrieben. Da der Arbeitsumfang eines Auftrags der Reparaturlackierung stark von Untergrundmaterial und Schadenstiefe bestimmt wird, findet zudem das Konzept der Lackstufen Anwendung (Kapitel 4.2.1). Anschließend werden Umfang und Durchführung der Datenerhebung näher beschrieben (Kapitel 4.2.2). Der Zeitbedarf eines Auftrags wird unter Verwendung unterschiedlicher Zeitparameter bestimmt. Die dabei gewählte Vorgehensweise zur Bestimmung dieser Parameter wird dargestellt (Kapitel 4.2.3), bevor die Ergebnisse der Arbeitszeitstudie erläutert werden (Kapitel 4.3).

4.1 Charakterisierung der Reparaturlackierung

4.1.1 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Der Sektor der Autoreparaturlackierung ist gekennzeichnet durch eine Vielzahl kleiner Betriebe. In Deutschland beispielsweise beschäftigen 65 % der Betriebe ein bis zwei, 18 % drei bis vier und 17 % fünf und mehr Mitarbeiter [179]. Zudem muss speziell in Deutschland zwischen freien und Vertragswerkstätten unterschieden werden. Vertragswerkstätten sind markengebundene Einrichtungen, in denen neben Aufträgen durch Privatkunden auch Gewährleistungs- und Versicherungsschäden bevorzugt bearbeitet werden. Zudem können Vertragswerkstätten auf Beratung durch den jeweiligen Automobilhersteller zurückgreifen und erhalten fahrzeugspezifische Informationen früher als freie Werkstätten [195]. Bei einigen Herstellern gehört zudem ein Großteil der Werkstätten der Niederlassungen zu 100 % zum Hersteller (z.B. BMW).

In vielen Betrieben nimmt die Reparaturlackierung den Stellenwert einer Nebentätigkeit ein. So gibt es zum einen Firmen, die hauptsächlich Karosseriearbeiten bzw. Reparaturarbeiten außer Karosserie (Motorwartung und -service etc.) leisten. Zum anderen existieren Automobilhändler und sonstige Betriebe z.B. Tankstellen, Do-it-yourself-Werkstätten (vgl. Tabelle 4.1). Neu hinzugekommen sind in den letzten Jahren die Lack- und die Lackier- und Karosseriezentren, bei deren Planung bereits großer Wert auf eine Optimierung der Arbeitsabläufe gelegt wird und sich entsprechende wirtschaftliche Erfolge zeigen [119]. Diese Zentren werden meist gemeinsam von mehreren Autohäusern bzw. Werkstätten und Automobilproduzenten in Ballungszentren errichtet [5].

Tabelle 4.1: Marktanteile bei Wartung und Reparatur [48]

	Vertragswerkstatt	Freie Werkstatt	Tankstelle	Do-it-yourself	k.A.
1980	48	15	4	26	7
1990	56	23	1	15	5
2000	57	24	0	13	6

In den Autoreparaturlackierbetrieben sind Umsatz und Beschäftigtenzahl in den letzten zehn Jahren rückläufig. So verringerte sich z.B. der Umsatz von 2,15 Mrd. € im Jahr 1991 auf 1,84 Mrd. € im Jahr 1996. Dies führte in mittelbarer Folge auch zum Schließen eines

größeren Lackieranlagenherstellers im Jahr 2003, obwohl dieser im Jahr 2002 noch einen Umsatz von 10,4 Mio. € erwirtschaftete [6]. Die Anzahl der Unfälle mit Schadensfällen pro 1.000 Fahrzeugen verringerte sich von 1990 bis 2000 durchschnittlich um 27% von 109 auf 80. Zu den Gründen für den Auftragsrückgang zählen, neben der allgemeinen wirtschaftlichen Lage, folgende [3, 7, 97]:

- Entwicklung und Ausrüstung von Fahrzeugen mit Sicherheitssystemen (z.B. Anti-blockiersystem),
- Maßnahmen zur Verbesserung der generellen Verkehrssicherheit (Tempo 30-Zonen, Verkehrsinseln, Erhöhung der Bußgelder),
- Art und Weise der Schadensabwicklung durch Versicherungen (Zahlung an Versicherungsnehmer ohne Reparaturnachweis),
- veränderte Einstellung der Bevölkerung zum Kfz (durch geringeren Statuswert werden nur größere Schäden behoben),
- Erweiterung der Europäischen Union (Export von Unfallfahrzeugen in Länder mit niedrigeren Lohnkosten).

Die veränderten Rahmenbedingungen führen zu einer Verringerung der durchschnittlichen Schadenssumme pro Pkw und damit zur Reduzierung des Auftragsvolumens für die Betriebe der Autoreparaturlackierung. Um Kunden stärker an die Werkstätten zu binden und den Qualitätsstandard der Betriebe hervorzuheben, werden daher verschiedene Konzepte angewendet. Dazu gehören die zeitwertgerechte Reparatur, die Eurogarant-Fachbetriebe [19] und der stop+go Auto Sofort Service [219]. Kennzeichen der zeitwertgerechten Reparatur ist die Reduzierung von Arbeitsschritten. Hierbei wird der Aufwand für die Behandlung des Untergrunds und der Demontage von Teilen dem Zeitwert des Fahrzeugs angepasst [193]. Mitgliedsfirmen des Zentralverbands Karosserie- und Fahrzeugtechnik bieten unter dem Namen *Eurogarant* eine Fachbetriebsgarantie für die an einem Kfz ausgeführten Reparaturarbeiten. So müssen z.B. Instandsetzungsfehler auf Kosten des Betriebes beseitigt werden, wenn sie innerhalb von maximal vier Jahren nach Abnahme des reparierten Fahrzeuges auftreten.

4.1.2 Die Reparaturlackierung im Kontext der Automobilbranche

Der Prozess der Reparaturlackierung ist erst in den letzten Jahren zum Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen geworden. Dabei standen sehr häufig Material- und Ener-

gieflussanalysen im Mittelpunkt [19, 70]. Der Arbeitszeitbedarf für die Ausführung der einzelnen Arbeitsschritte der Reparaturlackierung wurde bisher ausschließlich im Zusammenhang mit der Erstellung von Kalkulationssystemen³⁶ bzw. durch die Fahrzeughersteller selbst ermittelt. Das Interesse der Automobilhersteller an Zeitangaben resultiert aus den bestehenden Geschäftsverbindungen mit den Werkstätten. Sind die Voraussetzungen für einen Gewährleistungsfall erfüllt, kommt bei einer Kundenreklamation hinsichtlich der Qualität einer Lackierung der Hersteller für die Kosten einer eventuell notwendigen Reparaturlackierung auf. Grundlage für die Berechnung dieser Kosten ist der Bedarf an Arbeitszeit sowie der zugehörige Materialverbrauch. Die Personalkosten tragen dabei zwischen 65 und 70 % zu den Kosten der Lackierung bei [96].

Für die Berechnung der Verrechnungspreise zwischen den Werkstätten und den Automobilherstellern wird der Zeitbedarf der Arbeiten mit einem Stundenverrechnungssatz multipliziert und die Kosten des für die Ausführung des Auftrags notwendigen Materials (Lacke, Schleifscheiben etc.) entweder prozentual oder absolut zugeschlagen [3]. Bei der Arbeitszeit wird dabei nur die reine Auftragszeit berücksichtigt. Der Zeitbedarf, der durch nicht einem Auftrag zuzuordnenden Tätigkeiten, wie z.B. Instandhaltungs- oder Reinigungsarbeiten entsteht, ist über den entsprechenden Stundensatz abgedeckt [96]:

$$c_h = \frac{c_{all} + g}{t_{prod}} \quad (4.1)$$

mit

- c_h [€/h] : Stundenverrechnungssatz
- c_{all} [€] : Gesamtkosten außer Material
- g [€] : Gewinn
- t_{prod} [h] : produktive Stunden

Der Stundenverrechnungssatz (c_h) wird so kalkuliert, dass die Gesamtkosten³⁷ (c_{all}) der Unternehmung, inkl. der Kosten für Reparaturen und Instandhaltung der Anlagen (z.B. Lackierkabine), ebenso gedeckt werden, wie der kalkulatorische Unternehmerlohn und die notwendigen Rückstellungen [96].

³⁶Die bekanntesten Kalkulationssysteme sind die des Allianz Zentrums für Technik (AZT) bzw. der Firma Audatex und der Deutschen Automobil- und Treuhand GmbH (DAT). Sie werden von Versicherungen erstellt und die zu Grunde liegenden Zeiten werden in hauseigenen Werkstätten ermittelt.

³⁷Da das Material gesondert aufgeführt und abgerechnet wird, entsprechen die Gesamtkosten den Kosten der Kontenklasse 2 (neutrale Aufwendung und Erträge) und 4 (betriebliche Aufwendungen) des in der Reparaturlackierung verwendeten Spezialkontenrahmens SKR03 oder SKR04.

Die Höhe des Stundenverrechnungssatzes ist theoretisch frei bestimmbar, wird in der Praxis jedoch vom Markt bzw. den Konkurrenten mitbestimmt. Dabei haben die Betriebe Vorteile, bei denen die Kosten (c_{all}) der Reparaturlackierung auf Grund der Betriebspraxis (Arbeitsablauf und -organisation, Energieverbrauch, etc.) vergleichsweise gering sind. Aktuell liegt der Stundenverrechnungssatz für Karosseriearbeiten in Deutschland bei ca. 64 € zzgl. MwSt., für Lackierarbeiten bei ca. 87 € zzgl. MwSt. [49].

Neben der Geschäftsbeziehung im Gewährleistungsfall haben die Automobilhersteller in den letzten Jahren auch immer mehr beratende Tätigkeiten gegenüber den Lackierereien übernommen. Zusätzlich haben besonders in Deutschland die meisten Automobilhersteller mit dem Aufbau eigener Lackzentren begonnen und nehmen damit direkt am Markt der Reparaturlackierung teil (vgl. Kapitel 4.1.1).

4.1.3 Umweltrechtliche Rahmenbedingungen

Für die Autoreparaturlackierung sind besonders zwei in den letzten Jahren verabschiedete Richtlinien der Europäischen Union bzw. deren Umsetzung in nationales Recht von Bedeutung. Dies sind zum einen die Lösemittelrichtlinie (1999/13/EG) vom 11. März 1999 bzw. deren Umsetzung in deutsches Recht in Form der 31.BImSchV vom 21. August 2001 [58], sowie zum anderen die am 21. April 2004 verabschiedete Richtlinie 2004/42/EG „über die Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aufgrund der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Farben und Lacken und in Produkten der Kfz-Reparaturlackierung sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/13/EG“ [56].

4.1.3.1 Die EU-Lösemittel-Richtlinie und ihre Umsetzung in deutsches Recht

Die EU-Lösemittel-Richtlinie „über die Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen, die bei bestimmten Tätigkeiten und in bestimmten Anlagen bei der Verwendung organischer Lösungsmittel entstehen“ [58], setzt Vorgaben bezüglich maximaler VOC-Emissionen für Anlagen aus 20 lösemittelverarbeitenden Industrie- und Gewerbebranchen fest. Im Gegensatz zu bereits früher existierenden Ansätzen (Kalifornien: SCAQMD³⁸ VOC rule, 1988; Großbritannien: *Secretary of State's Guidance - Respraying of Road Vehicles PG6/34*, 1997) setzt die EU auf eine Lösung, die die Emissionen in die Umwelt direkt über Grenzwerte bzw. maximale Emissionsmengen beschränkt. Um Kleinbetriebe nicht über Gebühr zu belasten, wurde in dieser Richtlinie ein Verbrauchs-

³⁸South Coast Air Quality Management District

schwollenwert von 500 kg Lösemittel pro Jahr für die Kfz-Reparaturlackierung festgesetzt, den jedoch weniger als 10 % aller Betriebe in Deutschland unterschreiten [179].

Der in der Richtlinie verankerte Stufenplan sieht vor, Emissionsminderungen von 40 % in Stufe 1 und 60 % in Stufe 2 zu erreichen. Beim Zeitplan der Umsetzung wird dabei zwischen Alt- und Neuanlagen unterschieden (vgl. Abbildung 4.1). Um geeignete Werte für eine Emissionsreduzierung zu finden, wird in der Richtlinie davon ausgegangen, dass die in einem Musterbetrieb verwendeten Produkte einen Gesamtlösemittelanteil von 75 % aufweisen, was im Jahre 1992 in etwa zutraf (vgl. [30]). Diese Menge soll dann in Stufe 1 nur zu 60 % und in Stufe 2 lediglich zu 40 % in die Umwelt abgegeben werden dürfen.

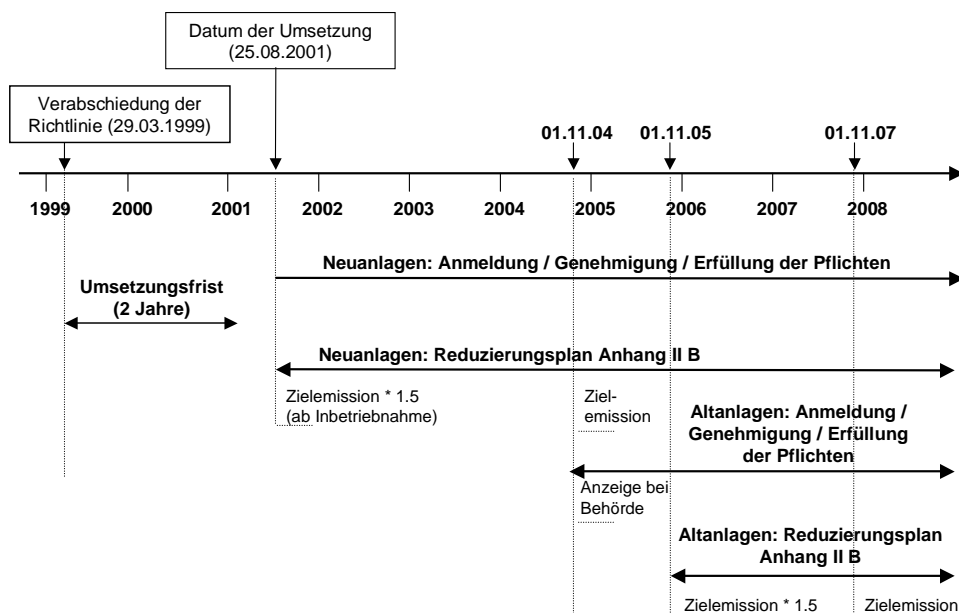


Abbildung 4.1: Zeitplan zur Umsetzung der EU-Lösemittel-Richtlinie (in Anlehnung an [73, 89])

Zur Umsetzung der Richtlinie 1999/13/EG in nationales Recht dient in Deutschland die 31. Verordnung des Bundesimmissionsschutzgesetzes („Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Lösungsmittel in bestimmten Anlagen - 31. BImSchV“ [21]) vom 21. August 2001, in Kraft getreten am 25. August 2001. Darin wird von der Möglichkeit einer Verschärfung der Vorgaben Gebrauch gemacht und der Verbrauchsschwellenwert für Betriebe der Fahrzeugreparaturlackierung auf null Tonnen pro Jahr festgelegt. Dadurch müssen sich auch Kleinunternehmen mit einer Reduzierung ihrer VOC-Emissionen befassen. Somit werden alle Betriebe in diesem Sektor von der Ver-

ordnung betroffen. Auf diese Art und Weise sollen Wettbewerbsverzerrungen vermieden werden [7].

Betriebe der Kfz-Reparaturlackierung werden in der Richtlinie bzw. ihrer Umsetzung in nationales Recht folgendermaßen definiert: „*Jede industrielle oder gewerbliche Tätigkeit einschließlich der damit verbundenen Reinigungs- und Entfettungstätigkeiten*

- (a) *zur Lackierung von Kraftfahrzeugen gemäß der Richtlinie 70/156/EWG³⁹ oder eines Teils dieser Kraftfahrzeuge im Zuge einer Reparatur, Konservierung oder Verschönerung außerhalb der Fertigungsanlagen,*
- (b) *zur ursprünglichen Lackierung von Kraftfahrzeugen gemäß der Richtlinie 70/156/EWG oder eines Teils dieser Kraftfahrzeuge mit Hilfe von Produkten zur Reparaturlackierung, sofern dies außerhalb der ursprünglichen Fertigungsstraße geschieht, oder*
- (c) *zur Lackierung von Anhängern (einschließlich Sattelanhängern) der Klasse O nach der Richtlinie 70/156/EWG.“ [21].*

Anhang III der 31. BImSchV legt die Emissionsgrenzwerte von 50 mg C/m³(i.N.) für gefasste behandelte Abgase bzw. 25 % der eingesetzten Lösemittel für diffuse Emissionen fest. Lösemittelgehalte unbehandelter, aber gefasster Abgase zählen zu den diffusen Emissionen. Die Anforderungen gelten auch als eingehalten, setzt ein Betreiber einen Reduzierungsplan nach Anhang IV Abschnitt A oder Abschnitt B der 31. BImSchV ein. Nähere Informationen hierzu finden sich u.a. bei [7].

Für die Autoreparaturlackierung definiert die deutsche Umsetzung der Lösemittel-Richtlinie eine weitere Möglichkeit. Nach Nr. 4 des Abschnitts C von Anhang IV gilt für nicht genehmigungspflichtige Anlagen der Autoreparaturlackierung die Zielemission als eingehalten, sofern die Einsatzstoffe die in Tabelle 4.2 genannten VOC-Werte nicht überschreiten. Dieser Weg wird als vereinfachter Reduzierungsplan bezeichnet.

4.1.3.2 Die Decopaint-Richtlinie

Als weitere Maßnahme zur Minderung der VOC-Emissionen wurde am 21.04.2004 die „*Richtlinie 2004/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004*

³⁹Richtlinie zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger 70/156/EWG vom 6.Februar 1970

Tabelle 4.2: Maximale VOC-Gehalte der Einsatzmaterialien der Reparaturlackierung nach dem vereinfachten Reduzierungsplan [21]

Einsatzstoff	VOC-Wert [g/l]	Anmerkung
Werkzeugreiniger	850	
Vorreinigungsmittel	200	
Spachtel	250	
Waschprimer	780	
Haftgrundierung	540	< 250 ab 1. Januar 2010
Grundierfüller	540	< 420 ab 1. Januar 2010
Schleiffüller	540	< 250 ab 1. Januar 2010
Nass-in-Nassfüller	540	< 420 ab 1. Januar 2010
Einschicht-Uni-Decklack	420	
Basislack	420	
Klarlack	420	Ab 1. Januar 2010 Anpassung an den Stand der Technik.
Spezialprodukte	840	Ab 1. Januar 2010 Anpassung an den Stand der Technik; der Anteil der Spezialprodukte an den gesamten Beschichtungsstoffen darf 10 % nicht überschreiten.

über die Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aufgrund der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Farben und Lacken und in Produkten der Fahrzeugreparaturlackierung sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/13/EG“ (Decopaint-Richtlinie) erlassen [56]. Als Motivation für diese branchenspezifische und produktbezogene Maßnahme gilt vor allem die Vermeidung von Handelshemmnissen und Wettbewerbsverzerrungen als Folge unterschiedlicher nationaler Grenzwerte der EU-Mitgliedsstaaten, wie sie aus der Umsetzung der EU-Lösemittel-Richtlinie resultieren.

Die Berücksichtigung möglicher negativer wirtschaftlicher Auswirkungen auf die betroffenen Sektoren zeigt sich in den folgenden Ansätzen, die sich in der Decopaint-Richtlinie wiederfinden:

- Übergangsmaßnahmen für Produkte, die vor Inkrafttreten der Decopaint-Richtlinie hergestellt wurden, sollen vorgesehen werden (Artikel 3).

- Die Mitgliedsstaaten können Einzellizenzen für begrenzte Mengen von Produkten erteilen, die nicht den Anforderungen der Richtlinie entsprechen (Artikel 3).
- Die Decopaint-Richtlinie soll nicht für Produkte gelten, die ausschließlich in Anlagen verwendet werden, welche die VOC-Emissionen durch Sekundärmaßnahmen derart reduzieren, dass die in der EU-Lösemittel-Richtlinie aufgeführten Bedingungen für den genehmigten Betrieb erfüllt werden (Artikel 3).

Die im Anhang II der Richtlinie für die Produkte der Fahrzeugreparaturlackierung festgelegten Grenzwerte entsprechen jenen der 31. BImSchV, mit Ausnahme der dort vorgesehenen weiteren Reduzierung zum Jahr 2010 (vgl. Anmerkungen in Tabelle 4.2). Auf Grund dieses Unterschiedes in den beiden Gesetzesvorschriften wird die letztendliche Durchsetzung der verschärften VOC-Gehalte ab 2010, wie sie in der EU-Lösemittel-Richtlinie vorgesehen sind, hauptsächlich von der technisch-wirtschaftlichen Machbarkeit bei der Herstellung der entsprechenden Produkte abhängen.

Die Richtlinie 2004/42/EG fördert damit schon vor Inkrafttreten in Deutschland den in der deutschen Umsetzung der Lösemittel-Richtlinie vorgesehenen vereinfachten Reduzierungsplan. Damit wird auch der Einsatz wasserbasierter Lackprodukte in der Reparaturlackierung forciert.

Als Folge der in den Kapiteln 4.1.1 bis 4.1.3 geschilderten Rahmenbedingungen ist in den nächsten Jahren mit folgenden wirtschaftlichen Veränderungen im Bereich der Kfz-Reparaturlackierung zu rechnen [7, 20, 48, 65]:

- Zunahme
 - der Anforderungen an die Lackierqualität,
 - der Kundenorientierung,
 - der zeitlichen Flexibilität,
 - der Investitionen für Werkstattausrüstung,
 - des Umweltschutzaufwands,
 - der Stundenverrechnungssätze,
 - der Zusammenarbeit mit Versicherungen, und
 - der zeitwertgerechten Lackierung.

- Abnahme
 - der Schadenshäufigkeit,
 - des Schadensumfangs,
 - der Belegschaft, und
 - der Umsätze.

4.2 Arbeitszeitstudien in der Reparaturlackierung

Die Durchführung einer Arbeitszeitstudie mit dem Ziel, den Zeitbedarf unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Technik zu bestimmen, erfordert eine detaillierte Beschreibung des Lackierprozesses (Kapitel 4.2.1). Um die am Markt herrschende Vielfalt in Sachen Ausstattung und Betrieb einer Werkstatt abbilden und statistisch bewerten zu können, werden entsprechende Anforderungen an Umfang und Art der Datenerhebung gestellt (Kapitel 4.2.2). Da die Berechnung des Zeitbedarfs eines Auftrags der Reparaturlackierung im Wesentlichen auf drei aggregierten Zeitparametern beruht, ist die Vorgehensweise bei deren Ermittlung ebenfalls von Bedeutung (Kapitel 4.2.3).

4.2.1 Der Lackierprozess als Reihenfertigung

Bezüglich des Ablaufs handelt es sich bei der Kfz-Reparaturlackierung um eine Reihenfertigung (vgl. Kapitel 3.2.2). Unabhängig vom Umfang der Arbeiten werden immer die gleichen Stationen (= Maschinen, Arbeitsabschnitte) durchlaufen:

- Vorbereitung:
Die Oberfläche des zu behandelnden Bauteils sowie die zu applizierenden Lacke werden für den Auftrag der Lackmaterialien vorbereitet.
- Lackierung:
Basis- und Klarlack werden aufgetragen, entsprechende Zwischenablüftzeiten werden berücksichtigt.
- Trocknung:
Die aufgetragenen Lackschichten werden unter Einsatz von Wärme getrocknet.

- Finish:

Die endgültige Qualität der Lackierung wird hergestellt, kleinere Unregelmäßigkeiten (z.B. Staubeinschlüsse) werden beseitigt.

Trotz des einheitlichen Ablaufs auf aggregiertem Niveau treten in Folge der variierenden Schadenstiefe Unterschiede in den durchzuführenden Arbeitsschritten und damit im Zeitbedarf auf. Der Prozess der Reparaturlackierung ist deshalb in vier Lackstufen eingeteilt, mit deren Hilfe ein bestimmter Arbeitsablauf und -umfang beschrieben werden kann [3].

Bei der Einteilung in die unterschiedlichen Lackstufen wird auf der bereits bestehenden Klassifizierung aufgebaut [237]. Die Lackstufe 1 beschreibt die Neuteillackierung, die Lackstufe 2 die Oberflächenlackierung und die Lackstufe 3 umfasst die Reparatur von Beschädigungen, bei denen auf Grund der Schadenstiefe ein kompletter Lackaufbau bestehend aus Grundierung, Füller, Basis- und Klarlack, auf maximal 50 % der Fläche notwendig umfasst. Die Lackstufe 4 unterscheidet sich von der Lackstufe 3 nur in der Größe der Fläche mit komplettem Lackaufbau, die hier mehr als 50 % der Gesamtfläche des Bauteils beträgt. Sowohl bei Lackstufe 3 als auch bei Lackstufe 4 kann zusätzlich Spachtelmasse zur Nivellierung tiefer Unebenheiten in der Oberfläche zum Einsatz kommen. Die Schrittfolge ist bei den beiden letztgenannten Stufen identisch.

Neben der Schadenstiefe haben auch das Untergrundmaterial (Stahl bzw. Aluminium oder Kunststoff) sowie der Zustand des Bauteils, d.h. ob das Bauteil ein- oder ausgebaut vorliegt, einen Einfluss auf den Prozess der Reparaturlackierung [81]. So muss beispielsweise bei Neuteilen aus Kunststoff kein Füller aufgetragen werden. Bei eingebauten Bauteilen sind zusätzliche Abdekarbeiten notwendig, um die Qualität der Lackierung nicht beschädigter Bauteile durch z.B. Wolkenbildung nicht zu beeinträchtigen [193].

Tabelle 4.3 zeigt die Definition der einzelnen Lackstufen für metallische Untergründe, Tabelle 4.4 beschreibt die Lackstufen für Kunststoffteile. Für eingebaute Teile der Lackstufe 2 und 3 wird nicht nach dem Untergrund unterschieden, da sie, unabhängig ob Kunststoff- oder Metallteil, die gleiche Schrittfolge aufweisen. Ausgebaute Kunststoffteile der Lackstufe 2 und 3 werden gesondert betrachtet, da hier auf Grund der Teilegeometrie Abdekarbeiten anfallen können, die entsprechend zu berücksichtigen sind. Eine Lackstufe 4 wird für Kunststoffteile nicht definiert, da der dann vorliegende Schaden am Kunststoff den Ersatz des Bauteils durch ein Neuteil erforderlich macht.

Bei der Lackstufe 1 (Schweißteil) müssen zusätzliche Arbeiten, die beim Einbau geschweißter Neuteile anfallen, berücksichtigt werden. Zum einen sind dies Spachtelarbeiten im Bereich der Schweißnähte der Verbindungsstellen, zum anderen Lackierarbeiten an den

angrenzenden Teilen, da bei einem Ersatz die entsprechenden Spachtelarbeiten auf beiden Seiten der Nähte durchgeführt werden müssen. Da diese Arbeiten unabhängig von der Fläche des ersetzten Bauteils sind, werden sie in Form eines konstanten, teilebezogenen Zuschlags berücksichtigt.

Tabelle 4.3: Definition der Lackstufen für metallische Untergründe

Name	Beschreibung
Lackstufe 1 (ausgebaut)	Neuteillackierung im ausgebauten Zustand. Die Neuteile sind Schraubteile (Montageteile).
Lackstufe 1 (eingebaut)	Lackierung neuer Ersatzteile im eingebauten Zustand. Die Ersatzteile sind Schraubteile.
Lackstufe 1 (Schweißteil)	Lackierung neuer Ersatzteile im eingebauten Zustand. Die Ersatzteile sind geschweißt. Deshalb fällt ein Mehraufwand für Spachtelarbeiten an den Schweißnähten und Lackierarbeiten in den angrenzenden Teilen an.
Lackstufe 2 (ausgebaut)	Oberflächenlackierung des leicht beschädigten Teiles. Das Teil liegt ausgebaut vor. Spachtel- und Füllerarbeiten sind nicht notwendig, da die Schadenstiefe nur gering ist.
Lackstufe 2 (eingebaut)	Oberflächenlackierung des am Fahrzeug befindlichen, leicht beschädigten Teiles.
Lackstufe 3 (ausgebaut)	Lackierung stark beschädigter Teile. Ein kompletter Lackaufbau ist nötig, zusätzlich werden Spachtelarbeiten berücksichtigt. Das Teil wird im ausgebauten Zustand bearbeitet.
Lackstufe 3 (eingebaut)	Lackierung stark beschädigter Teile. Ein kompletter Lackaufbau ist nötig, zusätzlich werden Spachtelarbeiten berücksichtigt. Das Teil wird am Fahrzeug bearbeitet.
Lackstufe 4 (ausgebaut)	Identisch mit Lackstufe 3 jedoch mit einem kompletten Lackaufbau auf mehr als 50 % der Bauteilfläche. Das Teil wird im ausgebauten Zustand bearbeitet.
Lackstufe 4 (eingebaut)	Identisch mit Lackstufe 3 jedoch mit einem kompletten Lackaufbau auf mehr als 50 % der Bauteilfläche. Das Teil wird am Fahrzeug bearbeitet.

Neben den Lackstufen mit ihrem entsprechenden Arbeitsumfang fallen je nach Bauteil und Schaden zusätzliche Arbeiten an, die jedoch nicht immer durchgeführt werden müssen. Diese Arbeiten werden separat ausgewiesen. Zu diesen Tätigkeiten zählen:

- Das Schwärzen des Hintergrundes,
- der Auftrag des Steinschlagschutzes,
- der Auftrag eines Haftprimers (Haftgrundes) bei manchen Kunststoffteilen und
- die Applikation eines zusätzlichen Korrosionsschutzes vor der Spachtelanwendung.

Tabelle 4.4: Definition der Lackstufen für Kunststoff

Name	Beschreibung
Lackstufe 1 (ausgebaut)	Neuteillackierung im ausgebauten Zustand. Im Gegensatz zu Metallteilen ist hier ein Füllerauftrag nicht nötig. Zusätzlich fallen bei manchen Kunststoffteilen Abdekarbeiten an, die anteilmäßig berücksichtigt werden.
Lackstufe 1 (eingebaut)	Neuteillackierung im eingebauten Zustand. Bei Kunststoff als Untergrund treten nur Schraubteile auf. Wie im ausgebauten Zustand ist auch hier eine Füllerapplikation nicht notwendig.
Lackstufe 2 (ausgebaut)	Oberflächenlackierung des leicht beschädigten Teiles. Das Teil liegt ausgebaut vor. Spachtel- und Füllerarbeiten sind nicht notwendig, da die Schadenstiefe gering ist. Bei manchen Kunststoffteilen fallen zusätzliche Abdekarbeiten an, die anteilmäßig berücksichtigt werden.
Lackstufe 2 (eingebaut)	Identisch Lackstufe 2 (eingebaut) bei Metallteilen.
Lackstufe 3 (ausgebaut)	Lackierung stark beschädigter Teile. Ein kompletter Lackaufbau ist nötig, zusätzlich müssen Spachtelarbeiten durchgeführt werden. Das Teil wird im ausgebauten Zustand bearbeitet. Bei manchen Kunststoffteilen fallen zusätzliche Abdekarbeiten an, die anteilmäßig berücksichtigt werden.
Lackstufe 3 (eingebaut)	Identisch Lackstufe 3 (eingebaut) bei Metallteilen.

Für im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Ablaufplanung (Kapitel 5) werden diese Arbeiten jedoch nicht explizit berücksichtigt, weil ihr Zeitbedarf im Verhältnis zur Gesamtauftragszeit mit ca. 5 % gering ist. Zudem müssen diese Tätigkeiten nicht bei jedem Bauteil notwendigerweise durchgeführt werden, so dass ihr realer Anteil noch deutlich unter 5 % liegt. Bei der Ablaufplanung wird also stets vom Mindestaufwand für die Wiederherstellung der Lackierung ausgegangen, wie er über die Lackstufen definiert ist.

4.2.2 Umfang und Durchführung der Datenerhebung

Die Daten der Arbeitszeitstudien basieren auf Untersuchungen, die in 28 Werkstätten in Europa im Zeitraum von August 2001 bis Juli 2002 durchgeführt wurden⁴⁰. Bei vier der 28 untersuchten Betriebe handelt es sich um freie Werkstätten, die restlichen 24 Vertragswerkstätten verteilen sich gleichmäßig auf die Marken Audi, BMW, Ford, Opel, Porsche und Volkswagen. Pro Betrieb wurde im Rahmen einwöchiger Aufenthalte von zwei REFA-Fachleuten der Zeitbedarf von Aufträgen der Reparaturlackierung gemessen. Dazu beobachtete jeweils ein Zeitnehmer einen Auftrag, so dass insgesamt der Zeitbedarf von 456 Aufträgen bestimmt wurde.

Zur Charakterisierung der Werkstätten wurden neben Informationen bezüglich der verwendeten Lacksysteme (Tabelle 4.5) auch Daten zur Betriebsstrukturen (vgl. Tabelle 4.6) sowie Zeichnungen des Werkstattlayouts aufgenommen (Abbildung 4.2). Diese Informationen sind vor allem im Zusammenhang mit der Analyse der Ausreißer bei den aufgenommenen Arbeitszeiten von Bedeutung (Kapitel 4.2.3.2), da manche Extremwerte aus dem Layout bzw. der Ausstattung einer Werkstatt resultieren [157].

Tabelle 4.5: Übersicht über die untersuchten Werkstätten

Land	Anzahl Werkstätten	Lacksystem
Deutschland	14	9 x wasserbasiert, 4 x konventionell, 1 x gemischt
Österreich	3	2 x wasserbasiert, 1 x gemischt
Italien	2	1 x wasserbasiert, 1 x konventionell
Schweden	2	2 x gemischt
Schweiz	2	1 x wasserbasiert, 1 x gemischt
England	2	2 x gemischt
Spanien	1	1 x gemischt
Holland	1	1 x gemischt
Frankreich	1	1 x wasserbasiert

⁴⁰Die Zeitstudien wurden im Rahmen des Projektes „Arbeitszeitstudie für die Autoreparaturlackierung in Herstellervertragswerkstätten“ aufgenommen. Das Projekt wurde vom Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) der Universität Karlsruhe gemeinsam mit der Firma Workline GmbH im Auftrag des Verbands der Automobilindustrie (VDA) unter Beteiligung der Marken Audi, BMW, Ford, Opel, Porsche und Volkswagen durchgeführt.

Tabelle 4.6: Charakterisierung der untersuchten Werkstätten

Nummer der Werk- statt	Arbeits- plätze	Füller- plätze	Anzahl der			Arbeiter
			Spritz- kabinen	Trocken- kabinen	Kombi- kabinen	
1	5	8	3	4		k.A.
2	4				1	2
3	9	9			2	6
4	14	7		4	2	8
5	8	6	1	1		4
6	5	5	1	2		3
7	9	1	1	1		9
8	5	3			1	2
9	6		2	2		6
10	9	1	2	2		10
11	5		2	2		4
12	9	9	2	2		10
13	10	2	2	2		6
14	7	4	2	2		10
15	4	4			4	7
16	1	1			1	2
17	3	3			2	4
18	7		2	2		6
19	7	2	2	2		4
20	4	4	2	2		5
21	2	2	1	1		3
22	5				3	8
23	6	6	2	2		5
24	5		2	2		3
25	5		1	1		6
26	14				5	9
27	12	2	1	1	1	8
28	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

k.A. = keine Angaben

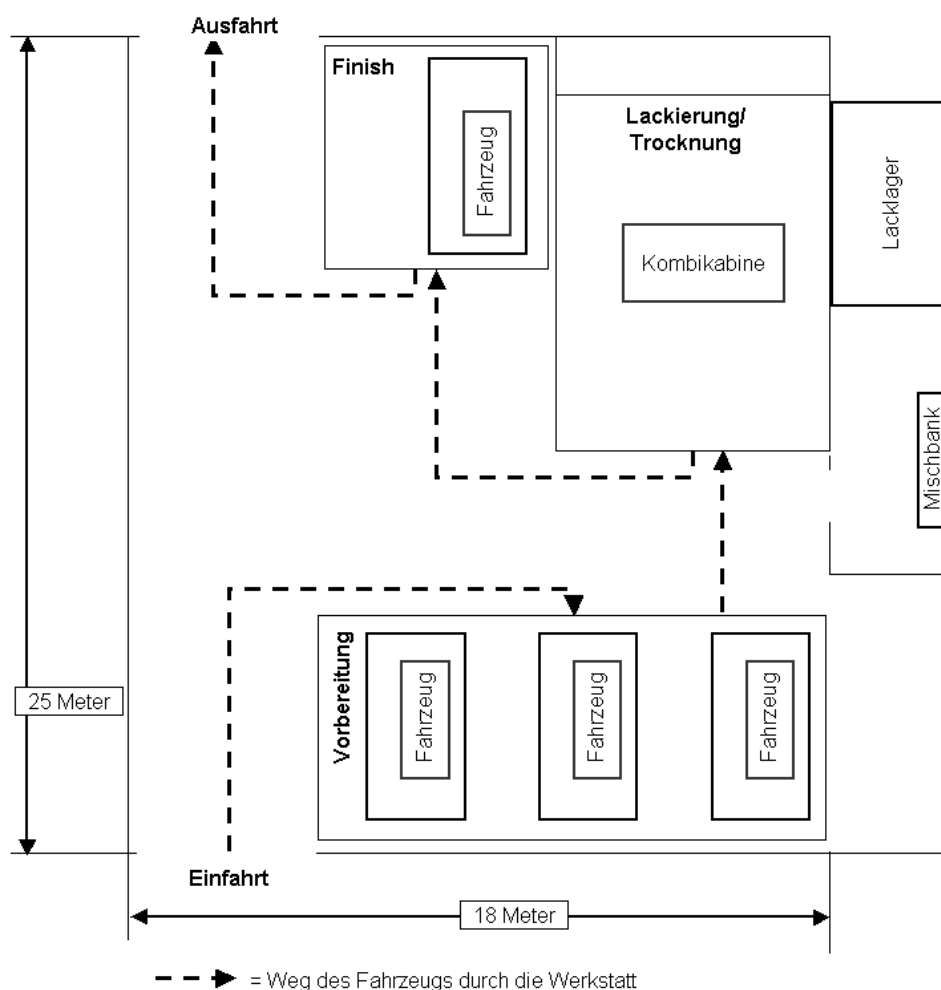


Abbildung 4.2: Beispiel für das Layout der Lackiererei einer Autoreparaturwerkstatt

Für die detaillierte Zeitaufnahme wurde der Prozess der Reparaturlackierung in 214 Arbeitsschritten aufgeteilt. Da es sich bei dem gewählten Messverfahren um eine Fortlaufszeitstudie handelt (vgl. Kapitel 3.3.1), muss jedem Arbeitsschritt neben einer Beschreibung der verrichteten Tätigkeit auch eine Zeitart zugeordnet werden⁴¹ (vgl. Tabelle 4.7). Mittels dieser Zuordnung können nach Abschluss der Messung eines Auftrags die für die spätere Zeitermittlung relevanten Schritte identifiziert werden. So werden z.B. Nebenzeiten ohne Berechnung (tnob) nicht weiter berücksichtigt, da sie entweder automatisch, also ohne Einsatz menschlicher Arbeitskraft ablaufen (z.B. Trocknung), oder nicht vom Lackierer, sondern vom Spengler zu vollziehen sind (z.B. *Montageteile abbauen*).

⁴¹Auf die Bedeutung der unterschiedlichen Zeitarten soll an dieser Stelle verzichtet werden, da dies für den weiteren Verlauf der Arbeit nicht von Bedeutung ist. Nähere Informationen dazu finden sich in der Veröffentlichung des Verbands für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (REFA) [174].

Tabelle 4.7: Auswahl verwendeter Arbeitsschritte

Nr.	Schritt	Zeitart (Zeittyp)
1	Auftrag entgegennehmen	Rüst- und Verteilzeit (trv)
2	Auftrag anstechen	Rüst- und Verteilzeit (trv)
3	Weg zum Abstellplatz	Sachliche Verteilzeit (tvs)
4	Farbtonfindung am Fahrzeug	Rüst- und Verteilzeit (trv)
5	Montageteile abbauen	Nebenzeit ohne Berechnung (tnob)
6	Fahrzeug vom Abstellplatz zum Arbeitsplatz	Werkzeugrüstzeit (trwg)
7	Teil vom Abstellplatz zum Arbeitsplatz	Transportzeit Teil (tverlaw)
8	Arbeitsplatz rüsten	Arbeitsplatzrüstzeit (trap)
9	Tempern	Nebenzeit ohne Berechnung (tnob)
10	Abdeckmaterial holen	Arbeitsplatzrüstzeit (trap)
11	Schweißanschlußstelle abdecken	Nebenzeit Abdecken (tnk)
12	Instandsetzungsstelle abdecken	Nebenzeit Abdecken (tnk)
13	Teilabdeckung entfernen	Nebenzeit Abdecken (tnk)
14	Abdeckung entfernen	Nebenzeit Abdecken (tnk)

Des Weiteren wurden ausschließlich dem Auftrag zuzuordnende Arbeiten berücksichtigt und aufgenommen. Auftragsunabhängige Rüst- und Verteilzeiten (z.B. Wartungsarbeiten, regelmäßige Reinigungsarbeiten, etc.) waren nicht Gegenstand der Untersuchungen, da diese bereits im Stundenverrechnungssatz der Werkstätten berücksichtigt sind (vgl. Gleichung 4.1). Persönliche Verteilzeiten wurden bei den Studien auf Grund der Fortschrittszeitmessung zwar mit aufgenommen, sind aber bei den ermittelten Zeitparametern der einzelnen Lackstufen außer Acht gelassen. Sie werden bei der Berechnung des Zeitbedarfs in Form eines prozentualen Zuschlags gemäß tarifvertraglichen Vereinbarungen berücksichtigt [182].

4.2.3 Vorgehensweise bei der Bestimmung der Zeitparameter

Die aus den REFA-Zeitstudien gewonnene, umfangreiche Datenmenge muss für die Berechnung des Zeitbedarfs in der Reparaturlackierung in Form von lackstufenbezogenen Zeitparametern wiedergegeben werden. Dies erfordert eine detaillierte Analyse der Daten sowie eine Bestimmung möglicher Abhängigkeiten zwischen Zeitbedarf, Bauteilfläche und Bauteilzustand unter Einsatz statistischer Verfahren.

4.2.3.1 Einteilung der Arbeitsschritte

Die gemessenen Zeitwerte werden auf Basis der einzelnen Arbeitsschritte ausgewertet. Dazu wird für jeden Schritt ein Zeitparameter berechnet. Die einzelnen Schritte können dabei in drei Typen unterteilt werden:

- Flächenabhängig:
Die Dauer der flächenabhängigen Arbeitsschritte hängt positiv von der Fläche ab, d.h. mit zunehmender Bearbeitungsfläche nimmt die Dauer zur Verrichtung linear zu. Typische Schritte sind Schleif- und Lackauftragsarbeiten.
- Auftragsbezogen:
Auftragsbezogene Arbeitsschritte treten einmalig pro Auftrag auf und werden als unabhängig von der Bauteilfläche betrachtet. Hierzu gehören z.B. die Schritte *Auftragsannahme* oder *Farbtonfindung*.
- Teilebezogen:
Teilebezogene Schritte treten einmal pro zu bearbeitendem Bauteil auf und sind konstant pro Teil. Die Arbeitsschritte *Teil in Trockenofen* oder *Ersatzteil-Aufkleber entfernen* gehören beispielsweise zu dieser Gruppe.

Die Entscheidung, zu welcher Gruppe ein Arbeitsschritt gehört, fällt in zwei Stufen. Zuerst wird bestimmt, welche Schritte von der Bearbeitungsfläche abhängen. Alle übrigen Schritte, die als konstant betrachtet werden können, werden daraufhin aufgeteilt in auftrags- und teilebezogene.

Die Identifizierung der Flächenabhängigkeit basiert dabei auf folgendem Vorgehen:

1. Zuerst wird mit Hilfe einer Korrelationsanalyse [188, 192, 235] für jeden Arbeitsschritt untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen aufgenommenen Zeiten und zu bearbeitenden Flächen vorliegt. Je nach Arbeitsschritt werden entweder die Gesamtfläche des Auftrags oder nur die Flächen der Teile bestimmter Lackstufen und Teilezustände berücksichtigt (z.B. beim Füllern nur Flächen der Lackstufen 1 (ohne Kunststoffteile) und 3). Das Signifikanzniveau wird mit $\alpha = 5\%$ angesetzt.
2. Die Schritte, die eine mathematisch begründbare Flächenabhängigkeit aufweisen (Ergebnisse unter Punkt 1), werden hinsichtlich ihrer realen Ausprägung überprüft. Demnach werden Flächenabhängigkeiten, für die es keine prozessbedingte

Begründung gibt, verworfen (z.B. Schleifmaschine rüsten). Diese Entscheidungen basieren auf Expertenwissen⁴².

Hinsichtlich der für die Korrelationsanalyse verwendeten Bezugsfläche, stellen die Arbeitsschritte des Spachtelns eine Ausnahme dar. Hier wird die zugehörige Spachtelfläche als Bezugsfläche gewählt, d.h. der berechnete Zeitparameter gibt den Zeitbedarf pro Quadratdezimeter Spachtelfläche an. Die entsprechenden Werte der Spachtelfläche wurden im Rahmen der Zeitstudien durch Messung bestimmt. Durch Multiplikation des so erhaltenen flächenabhängigen Zeitparameters mit dem mittleren, prozentualen Anteil der Spachtelfläche an der Bauteilfläche ergibt sich dann erneut eine Abhängigkeit von der Bearbeitungsfläche.

Aus dem oben beschriebenen Vorgehen wird ersichtlich, dass bei den flächenabhängigen Schritten die Lackstufenabhängigkeit bereits über die zu Grunde liegenden Flächen berücksichtigt ist. Bei einem Auftrag mit mehreren Bauteilen unterschiedlicher Lackstufe wurden bei der Korrelationsanalyse pro Arbeitsschritt nur die Bauteilflächen der Bauteile berücksichtigt, deren Lackstufe diesen Arbeitsschritt beinhaltet. Dazu wurde die Gesamtauftragsfläche, d.h. die Summe der einzelnen Bauteilflächen, lackstufenbezogen dargestellt. Die beschriebene Korrelationsanalyse wirkte besonders bei den Schritten entscheidungsunterstützend, bei denen es keine einheitliche Expertenmeinung gibt.

Die Schritte, die nicht als flächenabhängig eingestuft sind, werden durch konstante Zeiten beschrieben. Zudem wird auf Grundlage der Ergebnisse der Zeitstudien analysiert, ob der entsprechende Arbeitsschritt einmal pro Auftrag oder einmal pro zu bearbeitendem Bauteil zu verrichten ist. Für die Auswertung ist zudem entscheidend, ob ein Bauteil im eingebauten oder ausgebauten Zustand vorliegt. Abbildung 4.3 zeigt schematisch den Ablauf der Einteilung der einzelnen Schritte in die bei der Autoreparaturlackierung verwendeten Kategorien.

⁴²Im Rahmen des Projektes „Arbeitszeitstudie für die Autoreparaturlackierung in Herstellervertragswerkstätten“ wurden regelmäßig zwei- bis dreitägige Treffen mit den Vertretern des VDA-Arbeitskreises Lack abgehalten, bei denen u.a. die Ergebnisse der Korrelationsanalysen diskutiert wurden.

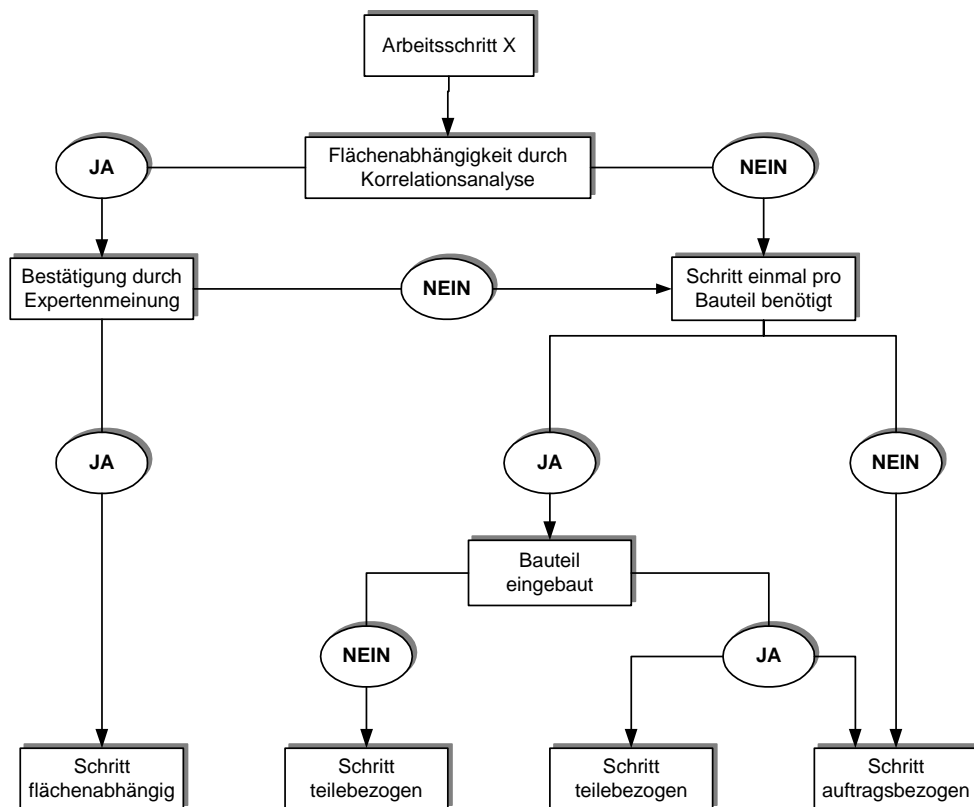


Abbildung 4.3: Zuordnungsprozess zur Einteilung der Schritte

4.2.3.2 Statistische Verfahren

Nach der Identifizierung der flächenabhängigen Schritte werden die zugehörigen Zeitparameter, die den Zeitbedarf pro Quadratmeter zu lackierender Fläche beschreiben, mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse bestimmt [208]. Dafür wird angenommen, dass es sich bei den gemessenen Arbeitszeiten um zufällige Stichprobenwerte einer zufallsverteilten Grundgesamtheit handelt [173].

Im Fall nur einer unabhängigen Variable X (z.B. die Bauteilfläche) wird dabei auf das einfache, lineare Regressionsmodell zurückgegriffen [4]:

$$E(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_i \quad (4.2)$$

mit

$E(Y_i)$: wahrer Wert der abhängigen Variable Y_i

β_0 : Achsenabschnitt, identisch mit $E(Y_i)$ bei $X_i = 0$

β_1 : Steigung der Regressionsgeraden

Da es sich bei den Werten Y_i um zufällige Beobachtungen handelt, muss zusätzlich ein zufälliger Fehler, der die Abweichungen vom wahren Wert $E(Y_i)$ beschreibt, berücksichtigt werden:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_i + \epsilon_i \quad (4.3)$$

wobei $i = 1, 2, \dots, n$ die konkrete Beobachtung bezeichnet. X_i und Y_i stellen die paarweise Beobachtung dar. Der Fehler ϵ_i ist normal verteilt mit Mittelwert Null und Varianz σ^2 . Die Parameter β_0 und β_1 werden aus den Daten geschätzt. Hierzu stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung (s. u.).

Für die flächenabhängigen Arbeitsschritte der Autoreparaturlackierung kann das statistische Modell (Gleichung 4.3) vereinfacht werden, indem der Achsenabschnitt gleich Null gesetzt wird. Dies kann damit begründet werden, dass keine Zeit für die Verrichtung notwendig ist, sofern keine Fläche zur Bearbeitung vorliegt. Das lineare Regressionsmodell für die Bestimmung des Zeitbedarfs der flächenabhängigen Arbeitsschritte der Reparaturlackierung lautet dann wie folgt [188, 235]:

$$t_i = \beta_1 \cdot A_i + e_i \quad (4.4)$$

mit

t_i [min] : gemessene Zeit t der Beobachtung i
 β_1 [min/dm²] Zeitbedarf pro Flächeneinheit
 A_i [dm²] : zur Beobachtung i gehörige Bearbeitungsfläche A
 e_i [min] : Abweichung zwischen gemessener Zeit t_i und geschätztem Wert \hat{t}_i

Die Abweichung e_i , die auch als Residualwert bezeichnet wird, berechnet sich nach folgender Formel:

$$e_i = t_i - \hat{t}_i \quad (4.5)$$

Da die Bestimmung des den flächenabhängigen Zeitbedarf beschreibenden Parameters β_1 auf den gemessenen Zeiten basiert, müssen vor Durchführung der Regressionsanalyse eventuelle Ausreißer im Datensatz, die das Ergebnis verfälschen könnten, identifiziert werden.

Ausreißerbestimmung

Der Wert der gemessenen Zeiten der einzelnen Arbeitsschritte hängt von unterschiedlichen Faktoren ab (Abbildung 3.2). Unabhängig von der daraus resultierenden Streuung der Daten, die sich im Endergebnis wiederfinden soll, sind auch Extremwerte in Folge von Messfehlern möglich. Daher ist die Anwendung von Verfahren zur Bestimmung von Ausreißern ein wichtiger Bestandteil der Datenanalyse. Diese Ausreißer können sowohl in positiver und negativer y-Richtung (sehr hohe bzw. sehr niedrige Zeiten im Vergleich zu den anderen Messwerten), als auch in x-Richtung auftreten. Letztere finden sich dann bei den flächenabhängigen Schritten, wenn bei einem Auftrag eine im Vergleich zum Rest der Aufträge wesentlich größere Bauteilfläche bearbeitet wurde.

Generell sind zwei Vorgehensweisen der Ausreißerbestimmung zu unterscheiden. Zum einen können Ausreißer mit entsprechenden Methoden identifiziert und gelöscht werden, zum anderen können robuste Methoden eingesetzt werden, die den Einfluss möglicher Ausreißer auf das endgültige Ergebnis reduzieren.

Zur Bestimmung der Ausreißer bei konstanten Zeiten (auftrags- und teilebezogene Schritte) wird folgendes Kriterium zu Grunde gelegt [192]:

$$\text{Ausreißer } x_i \text{ wird gelöscht, wenn } = \begin{cases} x_i < \bar{x} - 4 \cdot s; & \text{(unterer Ausreißer)} \\ x_i > \bar{x} + 4 \cdot s; & \text{(oberer Ausreißer)} \end{cases} \quad (4.6)$$

mit

- x_i : zu überprüfender Maximal- bzw. Minimalwert
- \bar{x} : arithmetisches Mittel der aufgenommenen Zeiten des betrachteten Schrittes (ohne x_i)
- s : Standardabweichung des Datensatzes (ohne x_i)

Bei einer Normalverteilung liegen 99,99 % der Daten im Intervall $[\bar{x} - 4 \cdot s, \bar{x} + 4 \cdot s]$ und selbst bei anderen Verteilungen liegen noch 94 % der Daten innerhalb dieses Bereiches [192].

Bei den flächenabhängigen Schritten werden für die Identifizierung der Ausreißer mehrere Parameter verwendet [149, 235, 236]. Einer davon ist die Entfernung des Datenpunktes von der Regressionsgeraden, beschrieben durch den Residualwert (vgl. Gleichung 4.5). Sind sämtliche Residualwerte zufällig ober- und unterhalb der Nulllinie verteilt und liegen fast alle innerhalb des Intervalls $[-2 \cdot s, 2 \cdot s]$ auf der Ordinatenachse, so gelten die

Annahmen der Regression erfüllt. Ein hoher Residualwert ist ein erster Anhaltspunkt für einen Ausreißer [188, 235]. Bei dem in Abbildung 4.4 dargestellten Beispiel des Arbeitsschrittes *Basislack spritzen 1.Gang* sind die Datenpunkte mit den Nummern 48, 91 und 191 mögliche Ausreißer auf Grund ihres hohen Residualwertes.

Ähnliche Aussagen wie aus der Betrachtung der Residualwerte können aus der Analyse des *Scale-Location plot* gezogen werden. Hierbei wird die Quadratwurzel des Residualwertes gegen den tatsächlichen Wert⁴³ dargestellt. Durch die Verwendung der Quadratwurzel wird der Einfluss einer möglichen Schiefe der zu Grunde liegenden Verteilung reduziert (Abbildung 4.5).

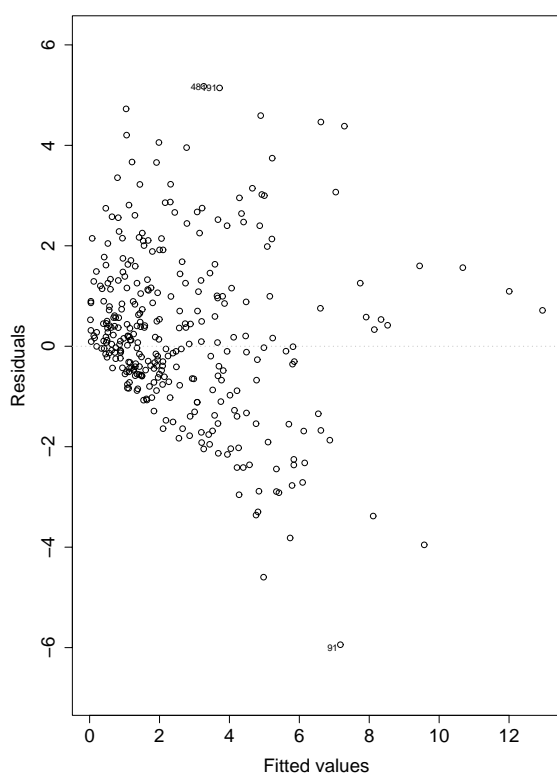


Abbildung 4.4: Residual- gegen tatsächlichen Wert am Beispiel eines Arbeitsschrittes

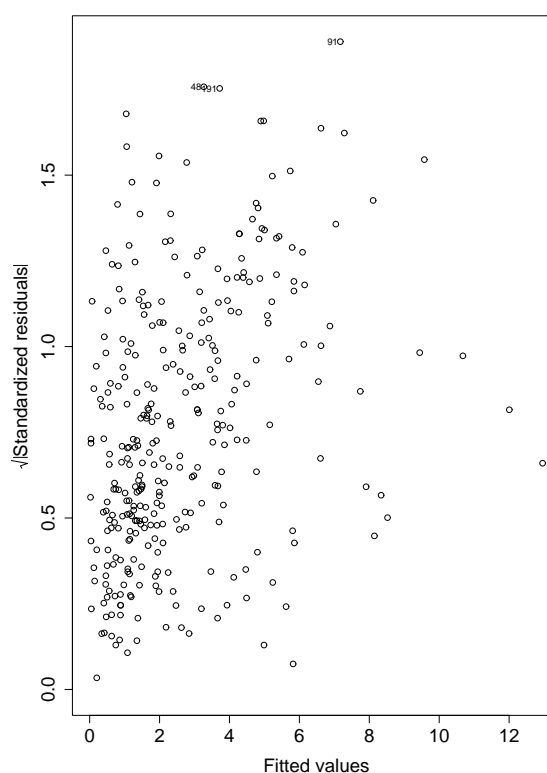


Abbildung 4.5: Scale-Location Plot für den Datensatz aus Abbildung 4.4

Ein weiterer Indikator für Ausreißer ist die Lage eines Punktes im Quantil-Quantil Diagramm (*QQ-Plot*). Hierbei wird die Normalverteilung der Residualwerte untersucht. Dazu

⁴³Der tatsächliche Wert wird aus dem Regressionsmodell berechnet. Im hier dargestellten Fall durch Multiplikation von β_1 mit A_i (vgl. Gleichung 4.4).

werden die Quantile der Verteilung der Residualwerte gegen die theoretischen Quantile einer Normalverteilung aufgetragen (Abbildung 4.6). Bei normalverteilten Residualwerten ist das Ergebnis eine Linie [60]. Residualwerte, die weit entfernt von der Linie liegen, weisen auf einen möglichen Ausreißer hin, da diese Werte nicht mit Hilfe der Normalverteilung erklärt werden können [4].

Der Einfluss eines Punktes auf das Ergebnis des Regressionsmodells kann durch den Wert der Cook'schen Entfernung (*cook's distance*) dargestellt werden [36]. Je höher der Wert der Cook'schen Entfernung ist, desto größer ist der Einfluss des zugehörigen Wertes und desto wahrscheinlicher handelt es sich um einen Ausreißer (Abbildung 4.7). Der Vorteil dieser Methode ist, dass nicht nur Ausreißer in Richtung der Ordinate (y-Achse), sondern auch solche, die auf Grund ihrer x-Koordinate als nicht zur Datenmenge zugehörig bestimmt werden (*leverage point*), identifiziert werden können. Bei den Arbeitszeiten der Reparaturlackierung sind dies Zeiten, die zu außergewöhnlich großen Bearbeitungsflächen gehören.

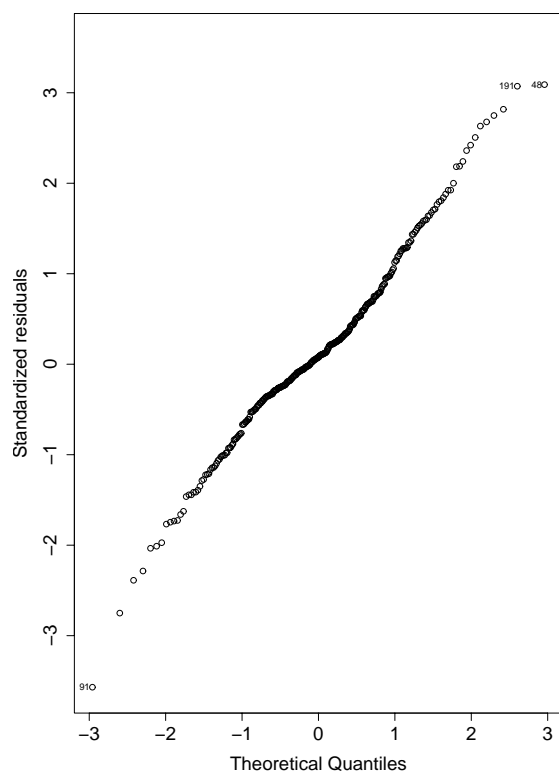


Abbildung 4.6: QQ-Plot der Residualwertes des Datensatzes aus Abbildung 4.4

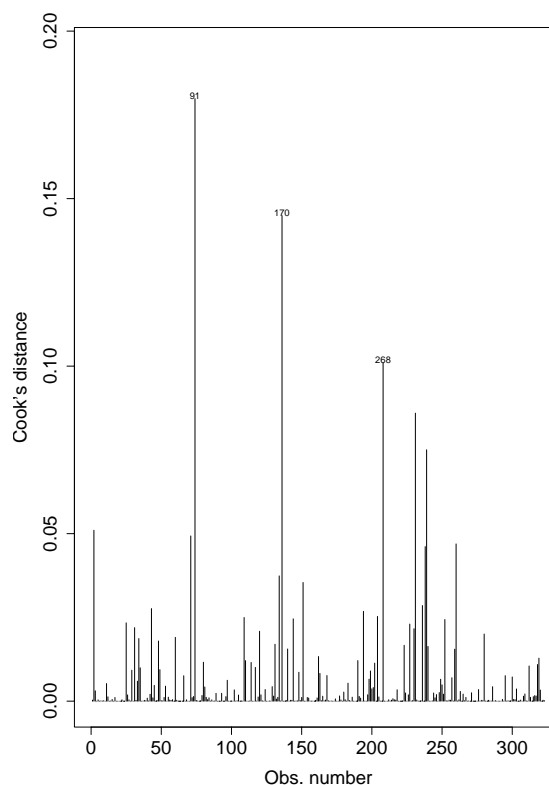


Abbildung 4.7: Cook'sche Entfernungen der Messwerte des Arbeitsschrittes aus Abbildung 4.4

Schätzverfahren der Regressionsanalyse

Ein wichtiger Aspekt bei der Beschreibung von Prozessen auf der Grundlage von Arbeitszeiten ist die Berücksichtigung bestehender Unterschiede in Arbeitsbedingungen und -weisen, besonders wenn allgemeine Erkenntnisse über den Prozessablauf als solchen gewonnen werden sollen. Gerade bei der Ermittlung der flächenabhängigen Arbeitsschritte muss daher eine sorgfältige Auswahl des anzuwendenden Verfahrens sichergestellt werden.

Bei der Regressionsanalyse kann auf drei unterschiedliche Schätzverfahren für die Steigung der Regressionsgeraden zurückgegriffen werden:

- Methode der kleinsten Abstandsquadrate (*Least Sum of Squares (LS)*)
- Methode des kleinsten Medians der Abstandsquadrate (*Least Median of Squares (LMS)*)
- Methode der kleinsten, beschränkten Abstandsquadrate (*Least Trimmed Sum of Squares (LTS)*)

Bei der LS-Methode wird die beste Schätzung der Steigung β_1 durch Lösen der folgenden Zielfunktion gefunden:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 \rightarrow \text{Min!} \quad (4.7)$$

Bei dieser Methode wird allen Residualwerten die gleiche Gewichtung zugewiesen. Es handelt sich daher um ein nicht robustes Verfahren, besonders im Fall einer geringen Anzahl paarweiser Beobachtungen. Eine mit der LS-Methode geschätzte Steigung ist nicht stabil im Falle eines Datensatzes, der Ausreißer beinhaltet [188, 208]. Eine entsprechende Ausreißerbetrachtung ist daher vorab unbedingt erforderlich.

Die LMS-Methode liefert die beste Schätzung, indem nach der Residualwertverteilung mit dem kleinsten Medianwert gesucht wird:

$$\text{med } e_i^2 \rightarrow \text{Min!} \quad (4.8)$$

Da hier der Median minimiert wird, ist dieses Verfahren sehr robust gegenüber Ausreißern sowohl in x- (vergleichsweise große Bauteilfläche) als auch in y-Richtung (Ausreißer bei den gemessenen Zeitwerten) [4].

Das dritte Verfahren (LTS) zielt ebenfalls auf eine Minimierung der Summe der Abstandsquadrate, jedoch wird hier nur eine Teilmenge der Abstandsquadrate berücksichtigt:

$$\sum_{i=1}^k e_i^2 \rightarrow \text{Min!} \quad (4.9)$$

wobei k ein Wert zwischen 1 und n (= Gesamtzahl an Messwerten) ist. Für $k = n$ erhält man das LS-Verfahren. Die höchste Robustheit erhält man für $k = \frac{n}{2}$ [208]. Da die Residualwerte vor Entnahme der Teilmenge der Größe nach aufsteigend sortiert werden, werden nur die kleineren Residualwerte in Betracht gezogen. Dadurch bleiben mögliche Ausreißer mit entsprechend hohen Residualwerten ohne Einfluss auf die Schätzung der Steigung.

Die drei genannten Methoden werden auf die Daten der flächenabhängigen Schritte der Arbeitszeitstudien angewendet und deren Einfluss auf das Endergebnis bestimmt und verglichen. Mittels dieser Ergebnisse wird dann die letztendliche zu verwendende Methode ausgewählt (vgl. Kapitel 4.3.2.1).

4.3 Ergebnisse der Zeitstudien

4.3.1 Charakterisierung des Datensatzes

Der Umfang der Daten, die für die Definition der Arbeitszeiten verwendet wurden, beläuft sich auf mehr als 15.000 Einzelwerte. Diese teilen sich auf 148 Arbeitsschritte auf, aus denen schließlich die Lackstufen und damit der Arbeitsablauf zusammengesetzt wird (vgl. Kapitel 4.2.1). Der Anzahl der Datenpunkte pro Arbeitsschritt reicht von 1 bis 336, wobei für mehr als die Hälfte der Schritte (90 von 148) mehr als 50 Daten vorliegen (Abbildung 4.8). Die Dauer der aufgenommenen Zeiten reicht von 0,02 min bis 166,98 min. Abbildung 4.9 zeigt ein Beispiel für den Arbeitsschritt *Basislack spritzen 1.Gang*. Dieser wurde 324 x gemessen, wobei die Dauer des Schrittes zwischen 0,04 min und 13,67 min lag.

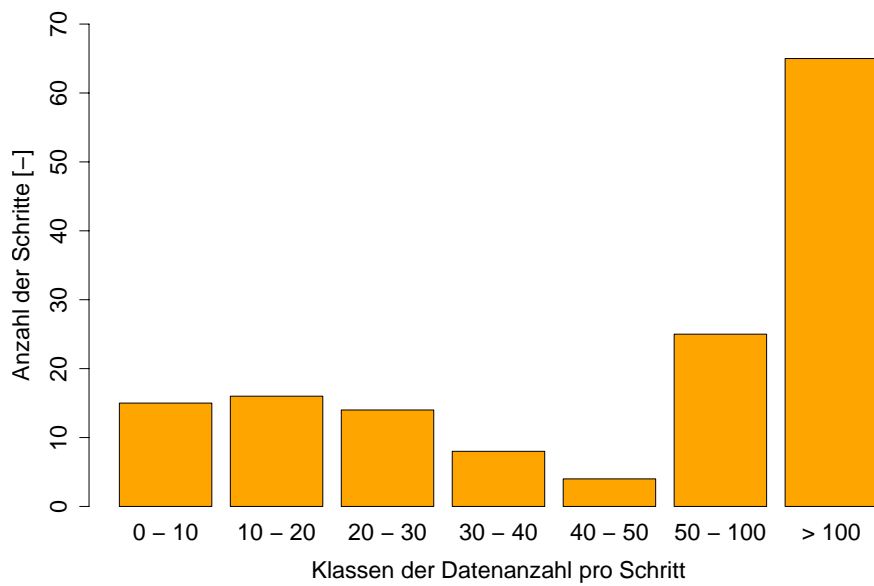


Abbildung 4.8: Anzahl der Daten pro Arbeitsschritt

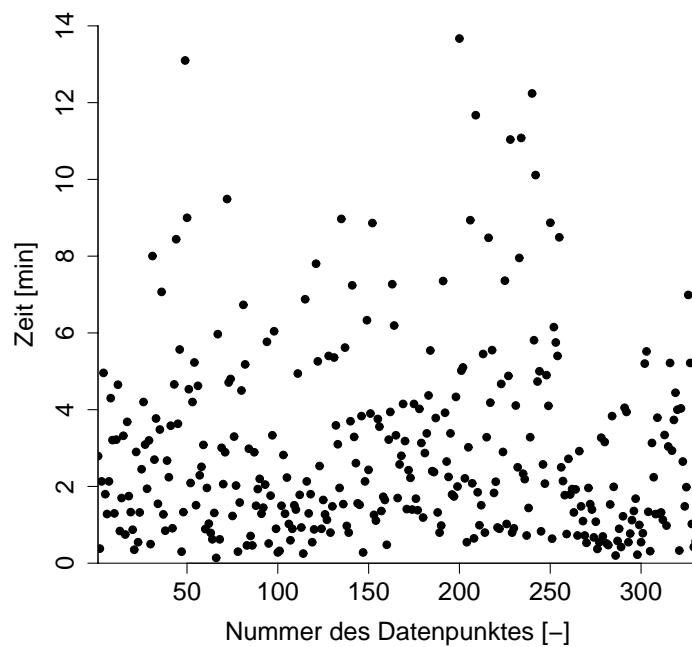


Abbildung 4.9: Beispiel für den Datensatz des Arbeitsschrittes Basislack spritzen 1.Gang

Von den insgesamt erfassten 214 Arbeitsschritten der Zeitstudie wurden 148 zur Beschreibung des Prozesses der Reparaturlackierung verwendet. Diese wurden dem Ablaufschema aus Abbildung 4.3 folgend in die drei Kategorien auftragsbezogen, teilebezogen und flächenabhängig eingeteilt. Die beiden Erstgenannten wiederum können zu den konstanten Arbeitsschritten zusammengefasst werden (Abbildung 4.10).

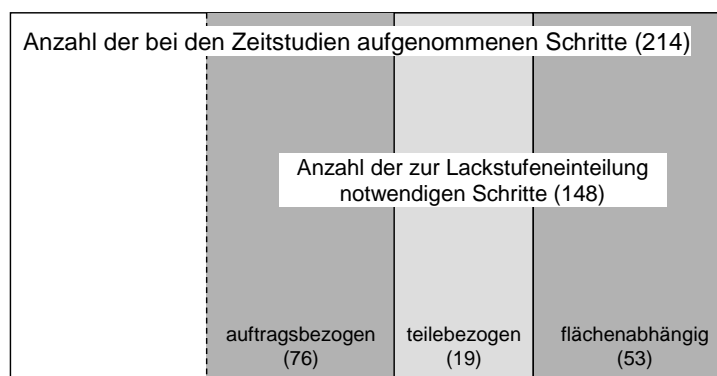


Abbildung 4.10: Aufteilung der Arbeitsschritte auf die unterschiedlichen Kategorien

Die für die Bestimmung der flächenabhängigen Parameter benötigten Bauteilflächen wurden den Datenbanken der Hersteller entnommen bzw. in Sonderfällen vor Ort gemessen. Je nach Auftrag mussten dabei sowohl die außen- als auch die innen liegenden Flächen ermittelt werden. Da es in Einzelfällen auf Grund des Charakters des Auftrags nicht möglich war, die Flächen zu ermitteln, basiert die Auswertung der flächenabhängigen Schritte auf einer Gesamtauftragszahl von 434 (im Vergleich zu 456 insgesamt aufgenommenen Aufträgen).

Die durchschnittliche Bearbeitungsfläche eines Auftrags beträgt unter Zugrundelegen der Außen- und Innenflächen $226,80 \text{ dm}^2$, der Wertebereich reicht von 3 dm^2 bis 1091 dm^2 . Abbildung 4.11 zeigt die Verteilung der Bearbeitungsflächen auf die unterschiedlichen Größenklassen.

Die Gesamtzahl aufgenommener Bauteile beläuft sich auf 1625. Bezogen auf das Untergrundmaterial liegt dabei der Schwerpunkt auf Stahlteilen, die 72 % der Bauteile darstellen. Bei den restlichen 28 % handelt es sich um Kunststoffteile, ausgenommen die neun aufgetretenen Aluminiumteile. Bei den aufgenommenen Lackstufen handelt es sich unabhängig vom Untergrundmaterial bei ca. 43 % um Teile der Lackstufe 3, bei ca. 30 % um Teile der Lackstufe 2 und bei ca. 27 % um Teile der Lackstufe 1. Eine Einordnung der beschädigten Bauteile in die Lackstufe 4 tritt nur in vier Fällen auf.

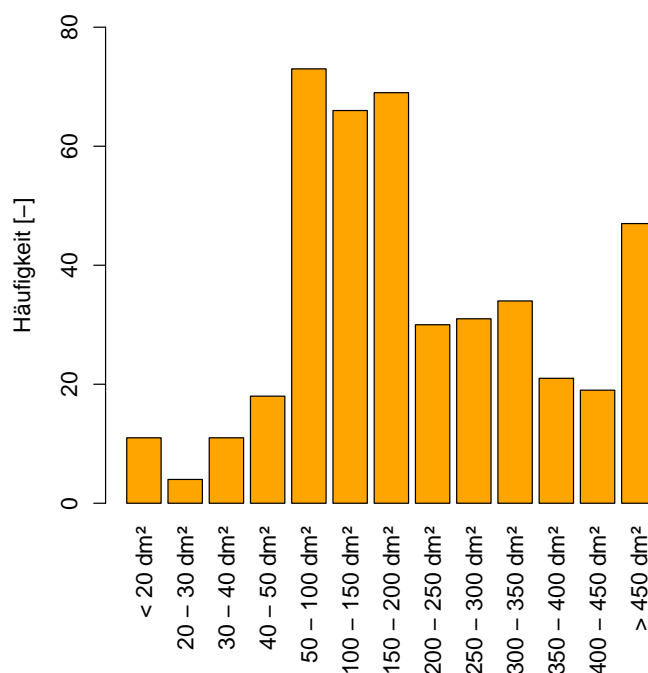


Abbildung 4.11: Verteilung der Bearbeitungsflächen der aufgenommenen Aufträge

4.3.2 Zeitparameter

Die bestmögliche Abbildung des Zeitbedarfs sowie der in der betrieblichen Praxis herrschenden Vielfalt bezüglich Ausstattung, Arbeitsweise, Form und Material der Bauteile etc. erfordert neben einer umfangreichen Datenaufnahme (vgl. Kapitel 4.3.1) auch eine entsprechende statistische Analyse der Daten. Dabei muss sowohl das im Rahmen einer linearen Regression zu verwendende Schätzverfahren (Kapitel 4.3.2.1) bestimmt werden als auch die eventuell vorhandenen Ausreißer identifiziert werden (Kapitel 4.3.2.2). Der Einsatz entsprechender statistischer Verfahren ermöglicht zudem die Beschreibung der vorhandenen Unsicherheiten, wie sie auch für den Einsatz der Monte-Carlo-Simulation im Rahmen der Reihenfolgenplanung benötigt werden (vgl. Kapitel 3.4.3).

4.3.2.1 Auswahl des Schätzverfahrens

Für die Auswahl eines geeigneten Schätzverfahrens der linearen Regression wurden die drei Methoden LS, LTS und LMS (vgl. Kapitel 4.2.3.2) sowohl auf den kompletten Datensatz (Notation *all*), d.h. inklusive möglicher Ausreißer, als auch auf den reduzierten Daten-

satz (Notation *cor*), d.h. nach Löschen der Ausreißer, der einzelnen, flächenabhängigen Arbeitsschritte angewendet.

Die Abweichung der Ergebnisse der LMS-Methode im Vergleich zur LS-Methode liegt zwischen $26,74\% - 100\% = -73,26\%$ und $221,76\% - 100\% = +121,76\%$. Die Werte der mit Hilfe der LTS-Methode berechneten Steigungen der Regressionsgeraden liegen im Bereich zwischen 31% und 146% der Ergebnisse der LS-Methode. Nach Entfernen der entsprechenden Ausreißer erhöht sich dieser Schwankungsbereich im Vergleich zur LS-Methode (vgl. fettgedruckten Werte in der Tabelle 4.8). Gleichzeitig reduzierten sich jedoch die Unterschiede zwischen den Methoden auf Ebene der einzelnen Arbeitsschritte.

Tabelle 4.8: Vergleich der Steigungen der Regressionsgeraden der unterschiedlichen Schätzverfahren

Nr. des Arbeitsschrittes	$\frac{\text{LMS}_{\text{all}}}{\text{LS}_{\text{all}}}$ [%]	$\frac{\text{LTS}_{\text{all}}}{\text{LS}_{\text{all}}}$ [%]	$\frac{\text{LMS}_{\text{cor}}}{\text{LS}_{\text{cor}}}$ [%]	$\frac{\text{LTS}_{\text{cor}}}{\text{LS}_{\text{cor}}}$ [%]
1	68,49	71,24	64,80	120,08
2	89,27	132,77	83,06	123,51
3	76,87	66,39	325,05	76,05
4	73,21	85,60	132,52	57,36
5	144,77	144,77	166,13	166,13
6	145,78	145,78	145,78	145,78
7	138,44	134,99	111,72	133,38
8	124,27	124,27	124,27	124,27
9	156,56	131,59	108,47	92,56
10	80,12	120,19	80,12	120,19
11	58,10	62,97	74,21	84,43
12	55,80	53,23	82,69	127,19
13	75,24	75,24	90,38	63,97
14	56,27	54,80	74,52	49,31
15	100,82	129,34	90,92	115,48
16	89,72	124,02	87,84	122,25
17	86,16	93,99	81,96	87,43
18	66,43	68,97	74,96	74,66
19	130,94	40,59	55,47	55,47
20	111,68	133,98	119,44	141,50
21	79,64	73,51	94,54	92,07

Tabelle 4.8: Vergleich der Steigungen der Regressionsgeraden der unterschiedlichen Schätzverfahren (Fortsetzung)

Nr. des Arbeitsschrittes	$\frac{LMS_{all}}{LS_{all}}$ [%]	$\frac{LTS_{all}}{LS_{all}}$ [%]	$\frac{LMS_{cor}}{LS_{cor}}$ [%]	$\frac{LTS_{cor}}{LS_{cor}}$ [%]
22	111,56	106,65	99,16	108,52
23	70,05	70,05	99,68	94,35
24	63,42	96,30	86,26	101,56
25	75,72	71,04	83,39	78,24
26	122,85	122,85	131,87	131,87
27	108,76	98,54	88,92	88,92
28	82,44	80,70	61,86	89,86
29	146,98	146,98	127,08	127,08
30	108,08	117,78	116,44	120,57
31	83,34	75,53	87,42	79,41
32	101,55	114,71	97,57	110,22
33	109,68	124,29	118,97	134,81
34	86,78	93,87	88,08	95,05
35	221,76	141,17	83,15	98,37
36	61,67	64,72	74,78	74,78
37	66,91	69,69	83,29	83,29
38	75,06	60,42	80,54	64,84
39	104,68	49,53	122,80	49,99
40	99,81	95,33	95,62	102,38
41	81,90	116,57	120,70	120,70
42	53,29	67,71	62,46	76,89
43	54,06	52,44	70,60	65,60
44	60,51	48,77	77,94	72,34
45	26,74	33,91	26,74	33,91
46	37,95	30,83	49,20	49,20
47	49,08	45,35	61,42	58,89
48	81,46	81,46	67,64	67,64

Fettgedruckt sind die Minima und Maxima der jeweiligen Spalte.

Die Robustheit einer Methode gegenüber Ausreißern wird analysiert, indem für jeden Arbeitsschritt das Verhältnis der berechneten Steigungen des Datensatzes mit und ohne Ausreißer errechnet wird. Der Wert 1 (= 100 %) steht dabei für unveränderte Werte, bei

Abnahme bzw. Zunahme des Zeitbedarfs pro Flächeneinheit (= Steigung) wird der Wert kleiner bzw. größer eins.

Durch Betrachtung der entsprechenden Histogramme der berechneten Quotienten der einzelnen Methoden kann die Robustheit abgeschätzt werden. Je mehr Werte nahe bei oder gleich eins vorliegen, desto robuster ist eine Methode gegenüber Extremwerten des Datensatzes. Die ermittelten Histogramme für die flächenabhängigen Arbeitsschritte der Autoreparaturlackierung (Abbildung 4.12 bis 4.14) zeigen eine von der LS- über die LMS- zur LTS-Methode zunehmende Robustheit. Bei der LS-Methode zeigen nur vier Zeitparameter eine Veränderung kleiner 2,5 % nach Entfernen der Ausreißer, wohingegen es bei der LMS-Methode 19 und bei der LTS-Methode 27 Zeitparameter sind. Diese Aussage deckt sich mit den generellen Aussagen der Literatur [188, 208].

Der Unterschied für die aggregierten Zeiten auf Ebene der einzelnen Lackstufen liegt im Vergleich zur Standardmethode LS etwa zwischen 15 % und 19 % bei der LMS-Methode und zwischen 13 % und 18 % bei der LTS-Methode (Tabelle 4.9). Diese Ergebnisse werden auf Grund der Kombination flächenabhängiger mit konstanten Zeiten für den vollständigen Zeitbedarf einer Lackstufe leicht abgeschwächt, da hierbei die Zeiten der konstanten Arbeitsschritte, die unabhängig vom Schätzverfahren sind, addiert werden. Für eine Bearbeitungsfläche von 100 dm² liegt dann bei Lackstufe A noch eine Abweichung von 6 % vor.

Die Anwendung der unterschiedlichen Schätzverfahren als Bestandteil der Bestimmung der flächenabhängigen Schritte zeigt einen deutlichen Einfluss auf den zu bestimmenden Zeitbedarf für die Arbeiten in der Reparaturlackierung. Eines der Hauptziele der durchgeführten Arbeitszeitstudien sowie der zu bestimmenden Zeitparameter ist die Beschreibung mittlerer Bedingungen. Weder sollten also die Abläufe neugebauter Betriebe als Grundlage für die Ermittlung des Zeitbedarfs dienen, noch ist die alleinige Abbildung der Abläufe in Werkstätten, die nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen, beabsichtigt. Daher erweist sich die Methode der kleinsten Abstandsquadrate (LS-Methode) trotz ihrer geringen Robustheit als geeignetste Methode, da hierbei alle berücksichtigten Datenpunkte gleichgewichtet werden. Bei den beiden anderen Methoden ist hingegen damit zu rechnen, dass Extremwerte, die aus dem Prozess herrühren⁴⁴, keine Berücksichtigung in den berechneten Parametern finden [199].

⁴⁴Diese Extrembedingungen können z.B. durch eine komplexe Bauteilgeometrie oder einen besonders schwierig zu treffenden Farbton bedingt sein (vgl. auch Abbildung 3.2)

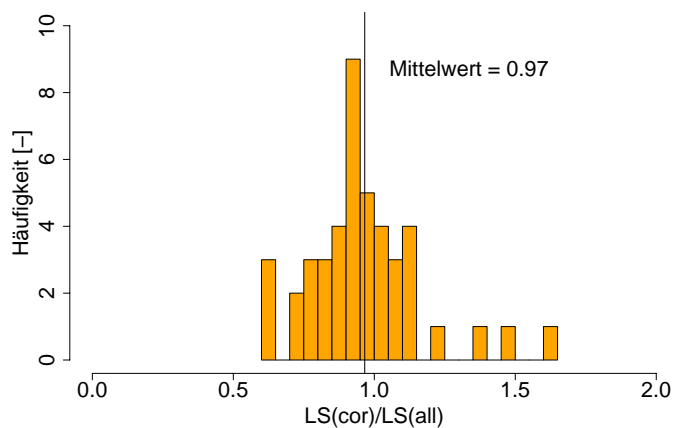


Abbildung 4.12: Histogramm der Quotienten $\frac{LS_{cor}}{LS_{all}}$

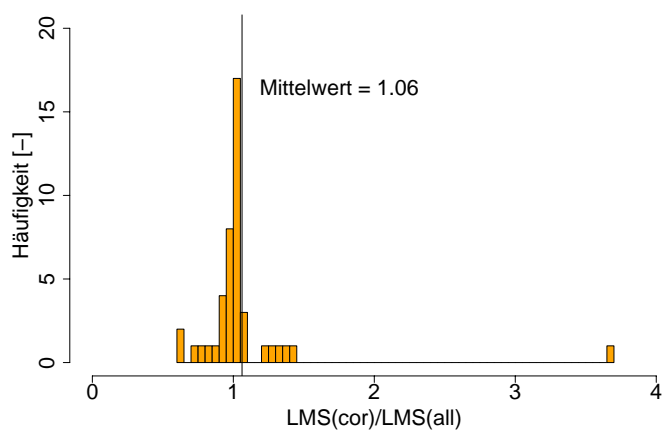


Abbildung 4.13: Histogramm der Quotienten $\frac{LMS_{cor}}{LMS_{all}}$

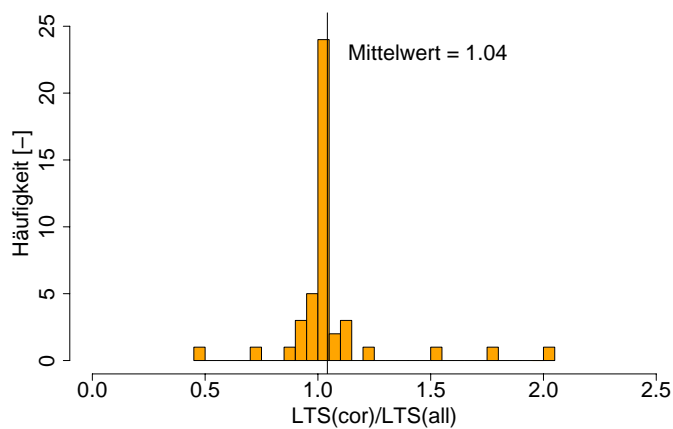


Abbildung 4.14: Histogramm der Quotienten $\frac{LTS_{cor}}{LTS_{all}}$

Tabelle 4.9: Vergleich des flächenabhängigen Zeitbedarfs der einzelnen Lackstufen

Lackstufe ¹	LS _{cor}	LMS _{cor}	LTS _{cor}
A	100,00 %	83,26 %	85,87 %
B	100,00 %	85,47 %	87,15 %
C	100,00 %	81,47 %	85,31 %
D	100,00 %	82,37 %	85,68 %
E	100,00 %	83,78 %	86,19 %
F	100,00 %	80,12 %	84,27 %
G	100,00 %	84,44 %	86,74 %
H	100,00 %	84,05 %	82,40 %
I	100,00 %	80,54 %	84,36 %
J	100,00 %	84,65 %	83,23 %

¹ Aus Gründen des Datenschutzes wird die Bezeichnung der Lackstufen hier anonymisiert wiedergegeben

4.3.2.2 Ergebnisse der Ausreißeranalyse

Die Ausreißer der konstanten (auftrags- und teilebezogenen) Arbeitsschritte wurden mit Hilfe des Intervallverfahrens identifiziert (Gleichung 4.6). Damit war es möglich, Extremwerte aus dem Datensatz zu löschen, ohne dabei die aus den unterschiedlichen Arbeitsweisen und -bedingungen resultierende Streuung der Daten stark zu beeinflussen.

Bei den teilebezogenen Arbeitsschritten wurde die Identifizierung der Ausreißer an den durch die Anzahl der Bauteile geteilten Zeiten durchgeführt, für die auftragsbezogenen Schritte wurden die gemessenen Werte verwendet. Insgesamt wurden bei den nicht von der Bauteilfläche abhängigen Arbeitsschritten 233 von 9140 Daten aus dem Datensatz entfernt, was einem Anteil von 2,49 % entspricht. Die absolute Anzahl gelöschter Ausreißer pro Arbeitsschritt lag dabei zwischen 0 und 36, wobei nur in 10 von 95 Fällen mehr als fünf Werte eliminiert wurden (vgl. Abbildung 4.15).

Auf Grund der geringen Robustheit der LS-Methode als Schätzverfahren (vgl. Kapitel 4.2.3.2 und Kapitel 4.3.2.1) ist die Identifizierung von Ausreißern für die flächenabhängigen Schritte notwendig. Hierbei finden die im Kapitel 4.2.3.2 beschriebenen Parameter Einsatz. Daten, bei denen drei oder vier Parameter auf einen Ausreißer hinwiesen, wurden hinsichtlich ihres Kontexts (Arbeitsschritt, Auftrag, Bemerkungen der Zeitnehmer)

genauer betrachtet und mit den Experten diskutiert (vgl. Kapitel 4.2.2). Dadurch konnte sichergestellt werden, dass nur Werte gelöscht wurden, für die keine Erklärung aus dem Ablauf der Zeitaufnahme möglich war. Insgesamt wurden 181 von 6712 Zeitwerten als Ausreißer identifiziert und gelöscht. Das entspricht einem Anteil von 2,63 % der aufgenommenen flächenabhängigen Zeiten. Die Zahl der pro Arbeitsschritt gelöschten Ausreißer liegt zwischen null und acht, wobei bei einem Viertel der Schritte (12 von 48) mehr als fünf Werte gelöscht wurden (Abbildung 4.16).

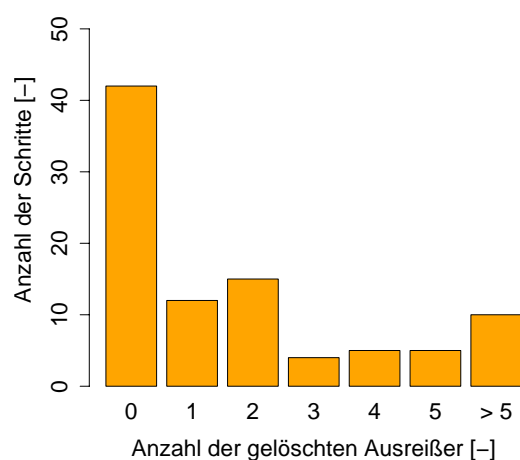


Abbildung 4.15: Anzahl der konstanten Schritte mit zugehöriger Anzahl an Ausreißern

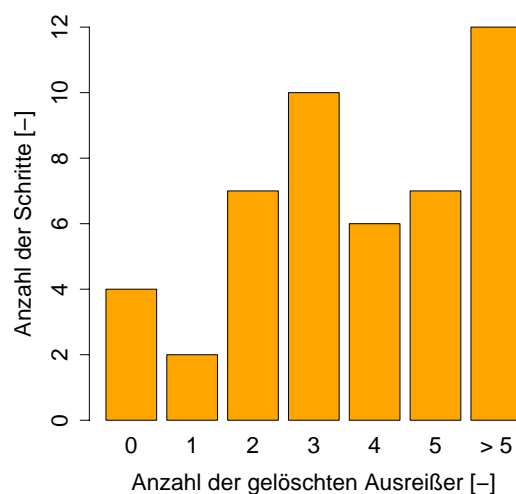


Abbildung 4.16: Anzahl der flächenabhängigen Schritte mit zugehöriger Anzahl an Ausreißern

4.3.2.3 Anmerkungen zur Auswertung

Der Einsatz der beschriebenen statistischen Verfahren ermöglicht zum einen eine Identifizierung der Ausreißer und zum anderen eine Gleichgewichtung der einzelnen Aufträge untereinander. Trotzdem ist es nicht möglich, den Beitrag der nicht numerischen Einflussfaktoren - Human- und organisatorische Faktoren (vgl. Abbildung 3.2) - auf die Varianz des Datensatzes zu quantifizieren. Daher basiert die Entscheidung, ob es sich bei einem Wert um einen Ausreißer handelt oder nicht, nicht nur auf quantitativen Daten. Zusätzlich wird der Kontext (bearbeitetes Bauteil, benutztes Werkzeug, etc.) des erhobenen Wertes mit einbezogen. Eine detaillierte Kenntnis des Prozesses ist notwendig, um diese nicht numerischen Faktoren und deren Einfluss abzuschätzen.

Folglich sind auch die Gründe für Extremsituationen ebenso wenig quantitativ fassbar wie die tatsächlichen Einflüsse der Arbeitsbedingungen. Das Verfahren der multiplen Regression, das die Möglichkeit bietet, komplexere Zusammenhänge zu beschreiben, scheidet damit für den Fall der Autoreparaturlackierung aus. Da in der Folge auch keine eindeutige Zuordnung der Ursachen für einen zeitintensiven Auftrag möglich ist, müssen die ermittelten Zeitparameter diese Extremsituationen vollständig berücksichtigen, um so die herrschende betriebliche Praxis im Mittel gut zu beschreiben.

Die Tauglichkeit der Kombination aus LS-Methode und Ausreißerbestimmung zur Analyse des Datensatzes der Arbeitszeitstudien in der handwerklichen Autoreparaturlackierung wird bestätigt durch den Vergleich zwischen den Reparaturzeiten, die mit Hilfe der ermittelten Parameter berechnet werden, und den für diese Aufträge gemessenen Werten. Dabei müssen die Anforderungen an die ermittelten Zeitparameter berücksichtigt werden. Neben der Beschreibung mittlerer Abläufe der Reparaturlackierung, gehört dazu auch der Anspruch, den Zeitbedarf über einen bestimmten Zeitraum richtig zu beschreiben. Daraus folgt, dass es nicht erforderlich ist, den Zeitbedarf eines jeden Auftrags richtig zu bestimmen, sondern die gesamte Dauer einer bestimmten Anzahl an Aufträgen möglichst genau abzubilden.

Die im Rahmen der beschriebenen Arbeitszeitstudien eingesetzten Verfahren der Datenanalyse führen zu einem Datensatz, auf dessen Grundlage Zeitparameter entwickelt wurden. Ein Vergleich zwischen dem gemessenen Zeitbedarf zehn kompletter Aufträge und dem mit Hilfe der Zeitparameter entwickelten zeigt, dass zwar Unterschiede für einzelne Aufträge bestehen, der berechnete Gesamtzeitbedarf aller Studien jedoch nur um 6% vom gemessenen Wert abweicht (vgl. Abbildung 4.17). Die in der Praxis herrschenden Bedingungen können also mit Hilfe der berechneten Zeitparameter trotz des nicht quantifizierbaren Einflusses unterschiedlicher Faktoren richtig abgebildet werden.

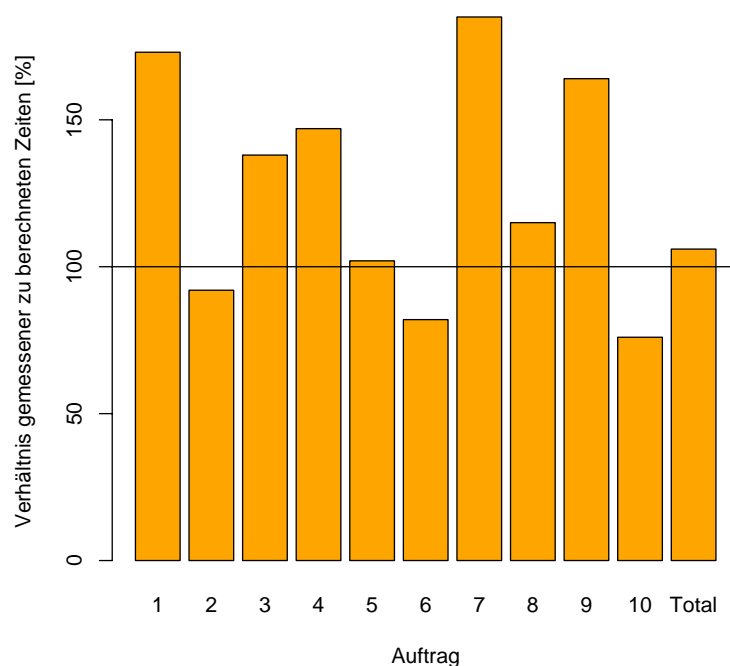


Abbildung 4.17: Vergleich der berechneten (= 100 %) und gemessenen Zeiten für zehn Aufträge der Reparaturlackierung

4.3.3 Ermittelte Unsicherheiten

4.3.3.1 Bestimmung der Unsicherheit der Arbeitsschritte

Für den Einsatz der Monte-Carlo-Simulation zur Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der Ablaufplanung (vgl. Kapitel 3.4.3) muss die dem Parameter zu Grunde liegende Verteilung bekannt sein. Für die Zeitparameter der Autoreparaturlackierung muss diese für jeden Arbeitsschritt unabhängig von dessen Art (flächenabhängig, teilebezogen oder auftragsbezogen) bestimmt werden. Auf Grund des manuellen Charakters der Reparaturlackierung kann von einem im statistischen Sinne 'natürlichen' Vorgang ausgegangen werden. Daher ist damit zu rechnen, dass die aufgenommenen Daten entweder normal- oder log-normalverteilt sind [208]. Mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests kann die Verteilung einer Stichprobe gegen die Verteilung der Grundgesamtheit, aus der diese stammt, getestet werden (vgl. u.a. [93, 170]).

Neben der Anwendung des Kolmogorov-Smirnov-Tests wurde anhand grafischer Methoden eine Abschätzung hinsichtlich der zu Grunde liegenden Verteilung getroffen. Zunächst wurde ein Histogramm der Daten erstellt (vgl. Abbildung 4.18). Die so ermittelte Verteilung wurde mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests überprüft. Da hierbei jedoch nur ein einzelner Wert ($\max c_k$) geprüft wird, wurden zusätzlich QQ-Diagramme (vgl. Kapitel 4.2.3.2) für die Ausgangsdaten (vgl. Abbildung 4.19) sowie für die logarithmierten Daten erstellt (vgl. Abbildung 4.20). Des Weiteren wurde die empirische kumulierte Häufigkeitsfunktion der theoretischen Verteilungsfunktion der log-Normalverteilung gegenübergestellt (vgl. Abbildung 4.21). Hierdurch konnten die Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests validiert werden, wie es u.a. von *Groß* [86] empfohlen wird. Unter Einsatz dieser Verfahren konnten für alle konstanten Arbeitsschritte (teile- und auftragsbezogen) die Verteilungen der Messdaten durch eine logarithmierte Normalverteilung (log-Normalverteilung) approximiert werden.

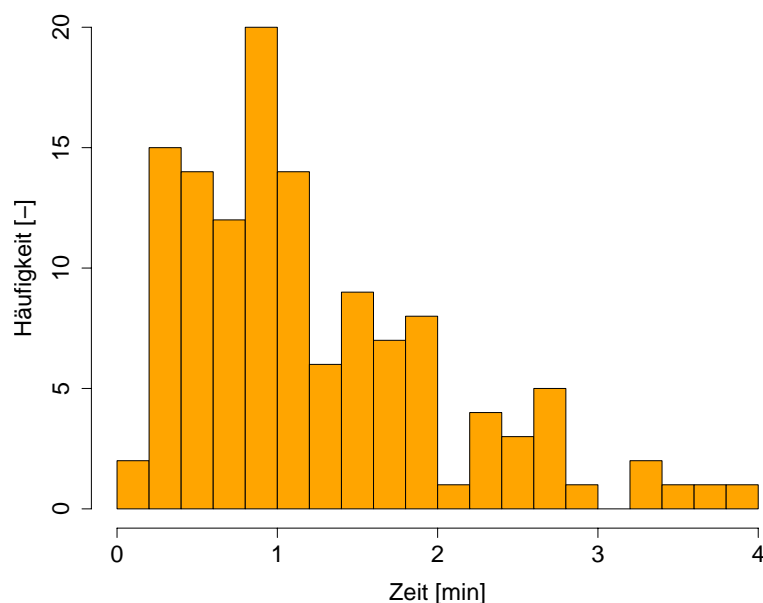


Abbildung 4.18: Histogramm der Messwerte des Arbeitsschrittes IRT-Strahler aufstellen

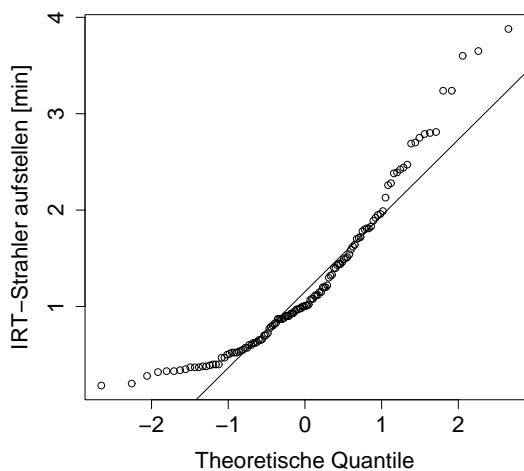


Abbildung 4.19: QQ-Diagramm der Messwerte des Arbeitsschrittes aus Abbildung 4.18

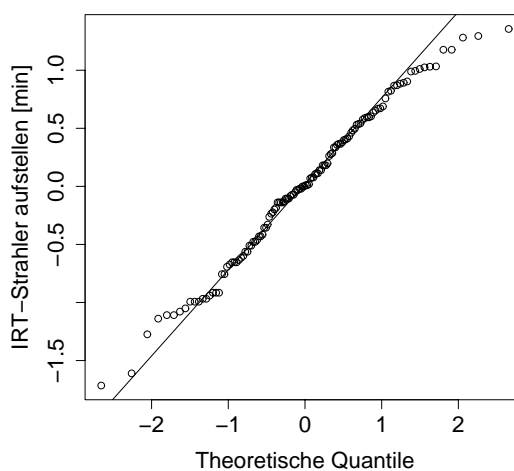


Abbildung 4.20: QQ-Diagramm der logarithmierten Messwerte des Arbeitsschrittes aus Abbildung 4.18

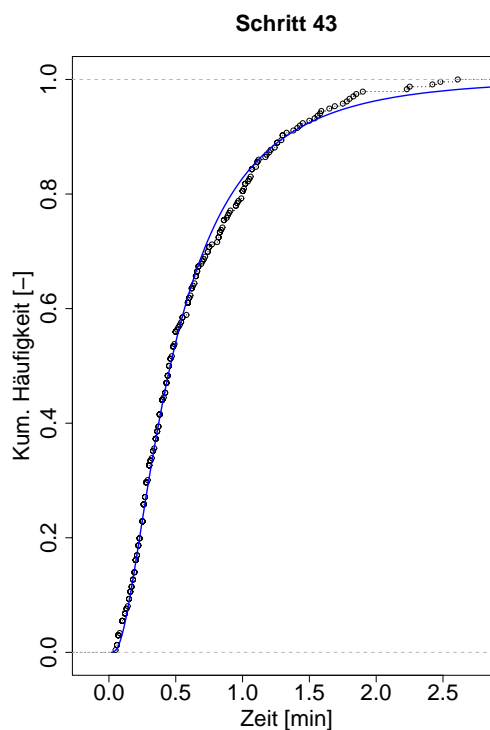
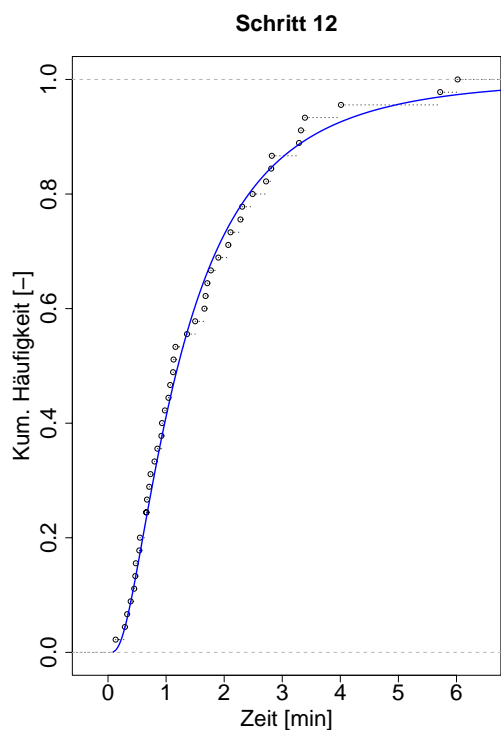


Abbildung 4.21: Beispiele für den Vergleich der kumulierten Häufigkeitsfunktion mit den theoretischen Verteilungen

Da es sich bei den Messwerten der flächenabhängigen Schritte um abhängige Variablen handelt, muss die Verteilung der verursachenden unabhängigen Variablen, der Fläche, betrachtet werden [188]. Hierbei muss zunächst untersucht werden, ob die den Studien zugehörigen Flächen als Stichprobe der Grundgesamtheit betrachtet werden können. Bei der Reparaturlackierung ist auf Grund der Schadensstruktur davon auszugehen, dass Bauteile der Front und des Hecks eines Fahrzeugs, namentlich Stoßfänger vorne und hinten sowie Kotflügel, überrepräsentiert sind. Großflächige Teile wie z.B. die Motorhaube oder Türen treten dagegen weniger häufig auf. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der Studien bestätigt.

Betrachtet man bei der Untersuchung hinsichtlich der Verteilung die Flächen der Aufträge, so ist mit einer Übergewichtung der kleineren Flächenwerte zu rechnen. Dies zeigt auch das Histogramm der entsprechenden Flächen (vgl. Abbildung 4.22). Durch die Reduzierung der Flächenwerte auf einzelne Modelle kann dieser Effekt eingegrenzt werden. Des Weiteren können auf Grund der Tatsache, dass Bauteile kleiner 10 dm^2 als Sonderfälle betrachtet werden, diese auch bei der Analyse der Flächenwerte ausgeschlossen werden.

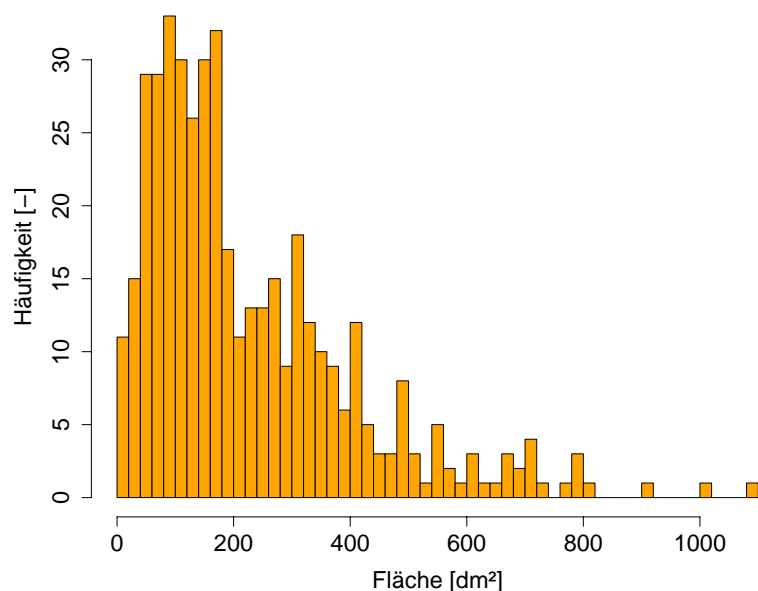


Abbildung 4.22: Histogramm der Gesamtfläche der bearbeiteten Aufträge

Die Ergebnisse der Anwendung der grafischen Methode auf den reduzierten Datensatz zweier Fahrzeuge zeigen eine etwas bessere Anpassung der Normalverteilung an den Da-

tensatz im Vergleich zur log-Normalverteilung (vgl. Abbildungen 4.23 und 4.24). Im weiteren Verlauf der Analysen der flächenabhängigen Arbeitsschritte wurde daher von einer zu Grunde liegenden Normalverteilung der Daten ausgegangen.

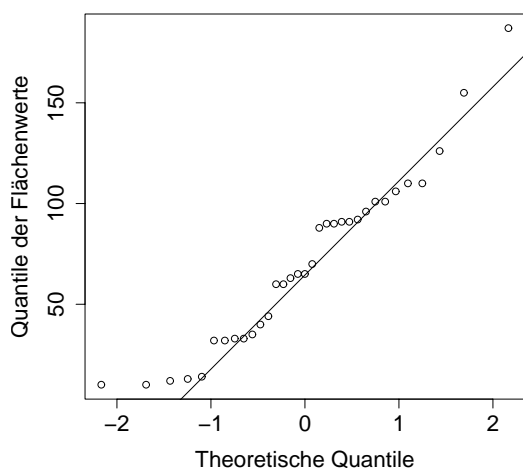


Abbildung 4.23: QQ-Plot der Flächenwerte größer 10 dm^2 zweier Fahrzeugmodelle

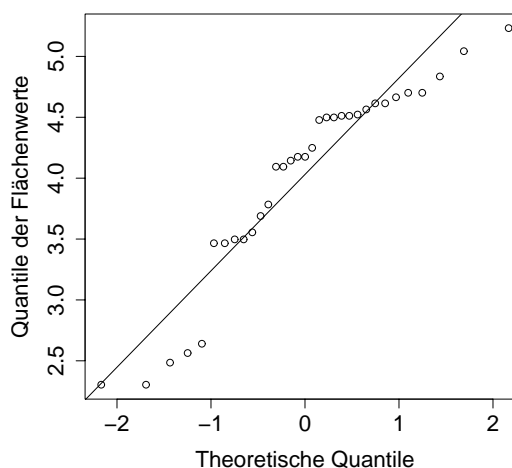


Abbildung 4.24: QQ-Plot der logarithmierten Flächenwerte größer 10 dm^2 zweier Fahrzeugmodelle

Neben dem Typ und dem Mittelwert muss bei zweiparametrischen Verteilungen (z.B. Normalverteilung) ein weiteres Moment bekannt sein, um die Unsicherheit der einzelnen Arbeitsschritte zu beschreiben. Sowohl für die konstanten als auch für die flächenabhängigen Schritte kann dafür die Varianz bzw. Standardabweichung der Daten benutzt werden. Diese werden bei den konstanten Arbeitsschritten direkt aus den korrigierten Datensätzen bestimmt, d.h. nach Löschen der Ausreißer. Als Standardabweichung der flächenabhängigen Parameter wird die Standardabweichung der geschätzten Steigung der Regressionsgerade verwendet. Die Unsicherheit definiert sich dann als die doppelte Standardabweichung [103].

Die flächenabhängigen Schritte zeigen die geringste Standardabweichung, die größten Werte treten bei den auftragsbezogenen Schritten auf (vgl. Tabelle 4.10). Im Mittel zeigen die teilebezogenen Schritte jedoch die größte Unsicherheit. Die Tatsache, dass die Standardabweichung bei den konstanten Schritten über 35 % liegt, unterstützt zudem die Approximation der entsprechenden Verteilung der Daten durch die log-Normalverteilung. Auch in der Literatur wird darauf verwiesen, bei normalverteilten Daten bei Werten über 35 %

relativer Standardabweichung die log-Normalverteilung als Approximation zu verwenden [190].

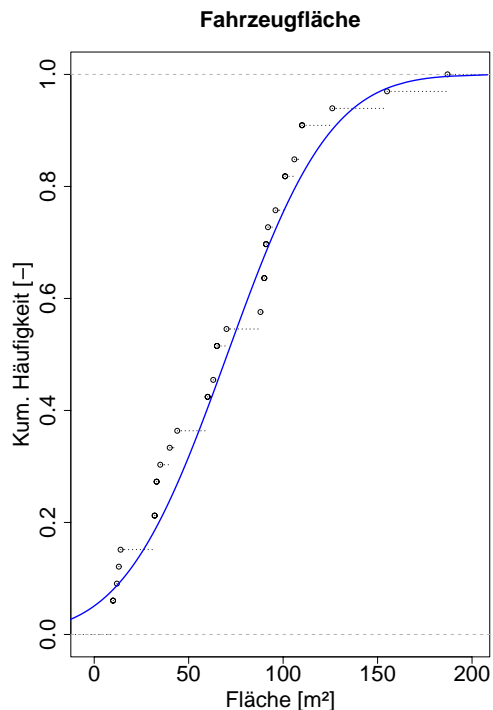


Abbildung 4.25: Vergleich der kumulierten Häufigkeitsfunktionen der Flächenwerte aus Abbildung 4.23 und der zugehörigen Normalverteilung

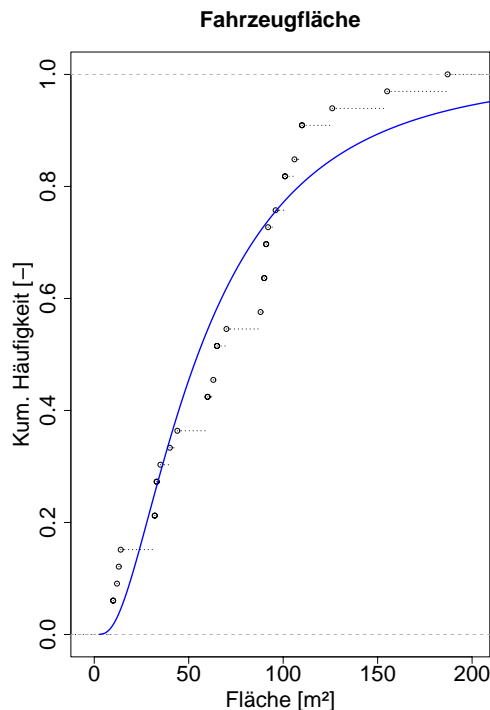


Abbildung 4.26: Vergleich der kumulierten Häufigkeitsfunktionen der Flächenwerte aus Abbildung 4.24 und der zugehörigen log-Normalverteilung

Tabelle 4.10: Minima, Maxima und Mittelwerte der relativen Standardabweichung der Arbeitsschritte

Schritttyp	Minimum [%]	Maximum [%]	Mittelwert [%]
flächenabhängig	2,74	32,58	7,63
teilebezogen	60,65	93,61	82,13
auftragsbezogen	45,59	107,78	77,68

4.3.3.2 Unsicherheiten der Arbeitsabschnitte der Lackstufen

Die Unsicherheiten der Arbeitsschritte werden zur Modellierung der Unsicherheiten der einzelnen Arbeitsabschnitte der Lackstufen benutzt (vgl. Kapitel 4.2.1). Grundlage hierfür ist der Aufbau der einzelnen Lackstufen aus den entsprechenden Arbeitsschritten sowie die Zuordnung der Schritte zu den drei Arbeitsabschnitten Vorbereitung, Lackierung/Trocknung und Finish⁴⁵. Die einzelnen Arbeitsabschnitte werden vor dem Hintergrund der durchzuführenden Ablaufplanung eingeteilt (vgl. Kapitel 5). Da bei der dort beschriebenen Beispielwerkstatt eine Kombikabine, in der Lackierung und Trocknung stattfinden, angenommen wird, werden die Abschnitte Lackierung und Trocknung zusammengefasst.

Die Unsicherheit der Arbeitsabschnitte der Reparaturlackierung wird mittels Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Die Anzahl der Ziehungen liegt bei $N = 10.000$, als Verfahren wird das Latin Hypercube Sampling (LHS) verwendet (vgl. Kapitel 3.4.3). Die Unsicherheit wird bestimmt als 95 %-Intervall, d.h. die negative Unsicherheit gibt die relative Abweichung des 2,5 % Quantils, die positive Unsicherheit gibt die relative Abweichung des 97,5 % Quantils vom Mittelwert an. Der Mittelwert wird als Schätzwert für den Erwartungswert der Verteilung verwendet.

Tabelle 4.11 zeigt die Ergebnisse der Unsicherheitsberechnung der Arbeitsabschnitte für die einzelnen Lackstufen. Da der Zeitbedarf eines Auftrags auf der Grundlage eines flächenabhängigen, eines teile- und eines auftragsbezogenen Parameters berechnet wird (vgl. Abbildung 4.27), müssen diese für die einzelnen Arbeitsabschnitte separat ausgewiesen werden. Dabei zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Arbeitsabschnitten. Das Finish zeigt nahezu bei allen Lackstufen die größte Unsicherheit bei flächenabhängigen und auftragsbezogenen Schritten. Der Grund hierfür ist die Unsicherheit der einzelnen Arbeitsschritte dieses Abschnittes, die deutlich über denen der anderen Arbeitsabschnitte liegen.

Auch zwischen den einzelnen Lackstufen gibt es einige Unterschiede. Die Unsicherheit der flächenabhängigen Arbeitsschritte der Lackierung bei eingebauten Teilen ist nahezu dreimal so groß wie die bei ausgebauten Bauteilen. Dies erklärt sich aus der Berücksichtigung der Abdekarbeiten bei eingebauten Teilen, die nicht nur einen deutlich höheren Absolutwert haben als die restlichen flächenabhängigen Schritte des Arbeitsabschnitts Lackierung/Trocknung, sondern mit 10,04 % auch eine höhere Unsicherheit zeigen.

⁴⁵Für die alleinige Beschreibung der Unsicherheit des Prozesses der Reparaturlackierung hätte auch die komplette Lackstufe verwendet werden können.

Tabelle 4.11: Unsicherheiten der Arbeitsabschnitte der Lackstufen (Angaben in Prozent)

Lackstufe			Zeittyp	Vorbereitung		Lackierung ¹		Finish	
1	M	aus	f	-4,47	4,31	-2,88	2,84	-10,90	11,07
			t	-43,02	75,72	-52,52	91,51	-83,87	238,06
			a	-28,98	43,55	-39,31	64,25	-70,86	153,15
1	M	ein	f	-4,26	4,41	-6,18	6,19	-10,78	11,10
			t	-56,02	106,84	-	-	-	-
			a	-25,86	37,70	-37,84	60,48	-65,03	131,69
1	M	S	f	-5,11	5,12	-6,24	6,21	-10,87	10,41
			t	-24,40	45,95	-2,83	2,86	-10,50	10,46
			a	-26,51	36,65	-37,47	61,27	-63,68	132,88
1	K	aus	f	-5,98	5,35	-2,91	2,81	-10,76	10,85
			t	-52,27	99,26	-	-	-	-
			a	-29,88	44,17	-40,64	65,13	-70,93	153,14
1	K	ein	f	-5,17	5,18	-6,19	6,13	-11,00	10,98
			t	-71,32	181,29	-	-	-	-
			a	-28,57	38,61	-36,92	61,43	-63,62	134,90
2	M	aus	f	-5,47	5,58	-2,91	2,84	-11,19	11,12
			t	-58,51	119,38	-52,03	89,97	-83,87	238,31
			a	-31,70	45,77	-39,59	64,21	-70,98	152,91
2	M	ein	f	-5,51	5,46	-6,15	6,19	-10,60	10,88
			t	-	-	-	-	-	-
			a	-29,00	41,56	-37,65	60,70	-64,47	133,68
2	K	aus	f	-6,20	5,65	-2,91	2,84	-11,19	11,12
			t	-58,51	119,38	-52,03	89,97	-83,87	238,31
			a	-31,26	45,17	-39,59	64,21	-70,98	152,91
2	K	ein	f	-5,51	5,46	-6,15	6,19	-10,60	10,88
			t	-	-	-	-	-	-
			a	-29,00	41,56	-37,65	60,70	-64,47	133,68
3	M	aus	f	-5,34	5,34	-2,91	2,86	-10,96	11,07
			t	-46,86	84,91	-52,61	92,01	-83,88	239,59
			a	-27,71	40,24	-40,21	66,34	-70,97	153,23
3	M	ein	f	-4,87	4,91	-6,19	6,23	-10,41	10,59
			t	-64,61	146,12	-	-	-	-
			a	-25,11	35,67	-37,39	59,34	-63,56	134,01

Tabelle 4.11: Unsicherheiten der Arbeitsabschnitte der Lackstufen (Fortsetzung)

Lackstufe			Zeittyp	Vorbereitung		Lackierung ¹		Finish	
3	K	aus	f	-5,45	5,11	-2,91	2,86	-10,96	11,07
			t	-46,86	84,91	-52,61	92,01	-83,88	239,59
			a	-27,24	39,67	-40,21	66,34	-70,97	153,23
3	K	ein	f	-4,87	4,91	-6,19	6,23	-10,41	10,59
			t	-64,61	146,12	-	-	-	-
			a	-25,11	35,67	-37,39	59,34	-63,56	134,01
4	M	aus	f	-5,34	5,34	-2,91	2,86	-10,96	11,07
			t	-57,04	117,60	-52,61	92,01	-83,88	239,59
			a	-29,49	43,11	-40,21	66,34	-70,97	153,23
4	M	ein	f	-7,06	7,05	-6,19	6,23	-10,41	10,59
			t	-64,61	146,12	-	-	-	-
			a	-26,76	38,82	-37,39	59,34	-63,56	134,01

M = Metall; K = Kunststoff; aus = ausgebaut; ein = eingebaut;
f = flächenabhängig; t = teilebezogen; a = auftragsbezogen
¹ beinhaltet auch die Trocknung

Die ermittelten Unsicherheiten der einzelnen Arbeitsabschnitte liegen im Fall der konstanten Arbeitsschritte deutlich über den Annahmen, die im Rahmen der stochastischen Ablaufplanung von anderen Autoren getroffen wurden. So setzen z.B. *Lin et al.* [134] die Unsicherheit der Prozesszeiten in einem Beispiel der chemischen Industrie mit 15 % an.

Der Zeitbedarf und die ermittelten Unsicherheiten der einzelnen Arbeitsabschnitte der Reparaturlackierung stellen die Grundlage für die im folgenden Kapitel beschriebene Ablaufplanung dar. Abbildung 4.27 fasst daher nochmal abschließend den Zusammenhang zwischen den Zeitparametern, den Lackstufen und den Bauteilen zusammen, die gemeinsam die Arbeitszeit eines Auftrags und damit den Zeitbedarf der einzelnen Arbeitsabschnitte bestimmen. Bei einem mehrteiligen Auftrag, d.h. einem Auftrag mit mehr als einem Bauteil, wird dabei zunächst der Zeitbedarf der Arbeitsabschnitte der einzelnen Bauteile, getrennt nach Art des Arbeitsschrittes (flächenabhängig, teilebezogen, auftragsbezogen), ermittelt. Dieser hängt von der Lackstufe und Bauteilfläche ab. Die so erhaltenen Zeitwerte werden für jeden Abschnitt separat zu einem Zeitwert zusammengefasst. Anschließend werden die entsprechenden Arbeitsabschnitte der jeweiligen Bauteile aufsummiert. Doppelt auftretende auftragsbezogene Arbeitsschritte werden dabei eliminiert. Der Zeitbedarf des gesamten Auftrags, ohne Berücksichtigung der einzelnen Arbeitsabschnitte, berechnet sich durch Addition der Zeitbedarfe der Arbeitsabschnitte.

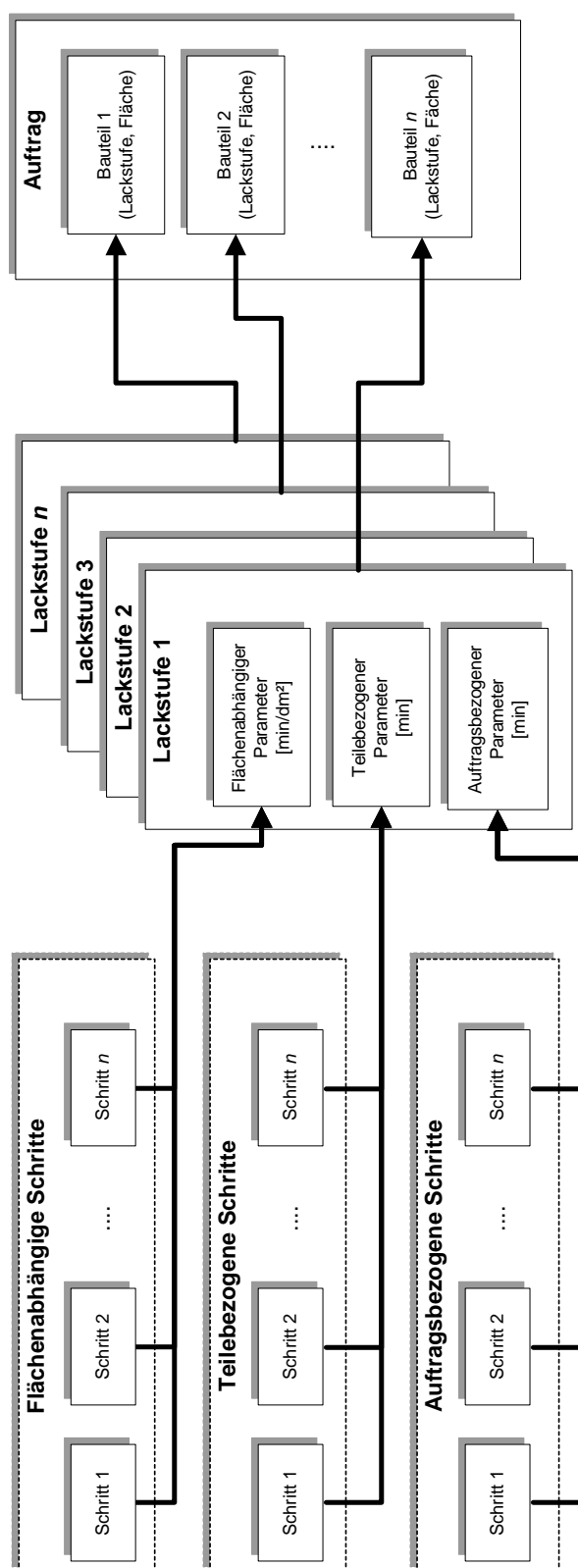


Abbildung 4.27: Beispielhafte Darstellung der Ermittlung der Bearbeitungszeit eines Auftrags in der Autoreparaturlackierung

5 Verbesserung der Auftragsreihenfolge unter Berücksichtigung von Unsicherheiten

Die Motivation für eine Ablaufplanung in der Reparaturlackierung und der damit verbundenen Ermittlung einer optimalen Reihenfolge der Auftragsbearbeitung liegt vor allem in der Verbesserung des Auslastungsgrades der Lackierkabine. Sie stellt das zentrale Element des Prozesses dar. Dabei ist sie nicht nur der Anlagenteil mit der höchsten Investition, sondern auch die Engpaßstelle hinsichtlich des Auftragsablaufs. Eine Steigerung ihrer Auslastung ist daher gleichbedeutend mit einer Steigerung der Kapazität des Betriebes.

Bevor das zu untersuchende Planungsproblem formuliert werden kann (Kapitel 5.1.2), müssen die in der Reparaturlackierung herrschenden Planungsbedingungen herausgearbeitet werden (Kapitel 5.1.1). Wichtig ist dies vor allem im Hinblick auf die Wahl des Zeithorizontes der Planung, die Anzahl der Aufträge und die Formulierung möglicher Nebenbedingungen. Da im Rahmen dieser Arbeit besonders der Einfluss der Unsicherheit auf die Planung untersucht wird, ist die gewählte Vorgehensweise zur Abbildung der Unsicherheiten darzustellen (Kapitel 5.1.3).

Für die Lösung des Ablaufplanungsproblems und die Untersuchung des Einflusses der Unsicherheit auf Tauglichkeit und Ergebnisse der Ablaufplanung werden Beispielaufträge definiert (Kapitel 5.2.1). Um die Variation der zu bearbeitenden Aufträge, wie sie in der Praxis herrscht, nachzubilden, werden insgesamt 12 Fallbeispiele mit jeweils neun Beispielaufträgen berechnet. Da bei handwerklichen Tätigkeiten die Unsicherheit der Planung von Bedeutung ist, werden die Ergebnisse des entwickelten stochastischen Ansatzes mit denen der deterministischen Lösung verglichen (Kapitel 5.2.2 und 5.2.3). Dabei werden vor allem die Zykluszeit, deren mittlere Verbesserung im Vergleich zu einer Bearbeitung in der Reihenfolge des Eintreffens der Aufträge sowie die Anzahl der optimalen Lösungen betrachtet.

Aus diesen Vergleichen lässt sich der Einfluss der Unsicherheit auf die ermittelte Verbesserung bestimmen. Dadurch können die in der Praxis umsetzbaren Einsparpotenziale unter Berücksichtigung der herrschenden Bedingungen bewertet und die Relevanz der Planung für die Praxis abgeschätzt werden. Dafür werden die aus den ermittelten Zeitersparnissen erzielbaren Erlöse berechnet (Kapitel 5.3).

5.1 Umsetzung der Ablaufplanung

5.1.1 Planungsbedingungen der Reparaturlackierung

Für Formulierung und Lösung eines Planungsproblems müssen die Rahmenbedingungen des zu untersuchenden Fallbeispiels bestimmt werden. Deren Genauigkeit hängt vom Ziel der Planung ab und muss im Verhältnis zur Qualität der verwendeten Daten stehen. Neben Daten zum Produktionssystem selbst (z.B. Fertigungstyp, Anzahl der Maschinen) müssen prozessbedingte Nebenbedingungen (z.B. Totzeiten, Zwischenlagerung) und weitere Kriterien (z.B. Fertigstellungszeitpunkt) abgeleitet werden (vgl. Kapitel 3.2.2).

Die Autoreparaturlackierung entspricht auf Grund ihrer Struktur dem Fertigungstyp der Einzelfertigung im Werkstatttyp (vgl. Kapitel 4.1.1). Der Prozess der Reparaturlackierung selbst kann dabei in vier voneinander unabhängige Arbeitsabschnitte Vorbereitung (V), Lackierung (L), Trocknung (T) und Finish (F) unterteilt werden (vgl. Kapitel 4.2.1).

Jeder der vier Arbeitsabschnitte kann als eigenständig betrachtet werden, vergleichbar einer freistehenden Maschine in einer Werkstatt. Wartezeiten (Totzeiten) zwischen den einzelnen Blöcken sind möglich. Die Dauer eines Arbeitsabschnitts hängt von der Lackstufe und dem Umfang des Auftrags, d.h. der Anzahl der Bauteile und deren Fläche, ab und kann unter Einsatz der in der Arbeitszeitstudie ermittelten Zeitparameter berechnet werden (vgl. Kapitel 4.3.2).

Wichtige Kapazitätsdeterminanten einer Reparaturwerkstatt sind die Anzahl der Arbeiter (N), die tägliche Betriebszeit (T) sowie die Organisation in Form der räumlichen Anordnung der Betriebsmittel (Werkstattlayout). Des Weiteren sind die feste Reihenfolge der Bearbeitung (Vorbereitung \rightarrow Lackierung \rightarrow Trocknung \rightarrow Finish) sowie die Anzahl gleichzeitig bearbeitbarer Arbeitsabschnitte zu beachten. Deren Maximum hängt von der Anzahl der Lackierer und der Menge der spezifischen Vorbereitungs- und Finishplätze ab. Diese müssen bestimmte Kriterien erfüllen, damit dort die entsprechenden Arbeiten durchgeführt werden können. So müssen z.B. am Vorbereitungsplatz Absaugeinrichtun-

gen vorhanden sein, da mit dem Füller ein lösemittelhaltiges Lackprodukt aufgetragen wird. Die Verwendung von Vorbereitungsplätzen als Finishplatz ist zudem auf Grund der notwendigen Rangierarbeiten in vielen Werkstätten nicht möglich, da diese ein Layout aufweisen, das einen „Fluss“ der Fahrzeuge durch die Anlage ohne Kreuzung beabsichtigt (vgl. Abbildung 4.2).

Zusätzlich stellt die Anzahl der vorhandenen Lackier- sowie Trockenkabinen eine Restriktion für die Reparaturlackierung dar. Die maximal parallel durchführbaren Lackierungen bzw. Trocknungsvorgänge entsprechen der Anzahl der Lackier- bzw. Trockenkabinen. Beim Einsatz von Kombikabinen werden die Arbeitsabschnitte Lackierung und Trocknung zu einem Abschnitt zusammengefasst. In der Praxis handelt es sich bei den meisten Spritzkabinen um Kombikabinen [193].

Schließlich ist der Zeitraum, für den die Ablaufplanung durchgeführt werden soll, zu bestimmen. Geht es um eine Kapazitätserweiterung bzw. um einen Werkstattneubau, so sollte der Planungshorizont mindestens ein Betriebsjahr bzw. 240 Arbeitstage betragen [201]. Bei der prädiktiven Ablaufplanung hingegen, d.h. der Feinplanung wie sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird, ist der Planungshorizont so zu wählen, dass trotz der hohen Variabilität der Auftragsstruktur und der schwierigen Prognostizierbarkeit des Auftragsaufkommens eine Planungsbasis gegeben ist, die allgemeine Schlüsse zulässt. Zudem kann durch die Wahl des Planungshorizontes ein Teil der einzuhaltenden Nebenbedingungen erfüllt werden (vgl. Kapitel 5.1.2).

Daneben sind weitere Aspekte zu berücksichtigen. Zu diesen gehört z.B. die maximale Standzeit eines Fahrzeugs, die gleichbedeutend mit der maximalen Wartezeit des Kunden auf sein Fahrzeug ist. Bei Lackschäden beträgt sie maximal vier Tage. Des Weiteren können zusätzliche Serviceleistungen erbracht werden. Zu diesen zählen z.B. eine Fahrzeugwäsche oder die Komplettpolitur des Fahrzeugs.

Um solche Serviceleistungen anbieten zu können, müssen deren Kosten über den Stundenverrechnungssatz der Werkstatt gedeckt werden (vgl. Kapitel 4.1.2). Durch einen verbesserten Arbeitsablauf und eine optimierte Auftragsreihenfolge kann es möglich sein, die Aufträge schneller zu bearbeiten, als dies durch die Vorgabezeiten der Lackierung bestimmt wird. Die sich daraus ergebende, verfügbare Arbeitszeit kann für die Durchführung der Serviceleistungen verwendet werden. So muss allein das zusätzlich verwendete Material über den Stundenverrechnungssatz gedeckt werden. Bei der Planung kann diese Zusatzleistung über einen gesonderten Arbeitsabschnitt berücksichtigt werden. Die zugehörige Dauer kann aus dem Zeitbedarf des einzuplanenden Auftrags abgeleitet werden.

5.1.2 Definition des Planungsproblems

Der Fertigstellungstermin (*due date*) für Aufträge in der Reparaturlackierung sollte spätestens vier Tage nach Annahme des Auftrags liegen (vgl. Kapitel 5.1.1). Durch die Wahl einer Planungsperiode von ebenfalls vier Tagen kann daher als alleinige Zielgröße die Zykluszeit (*makespan*) für alle einzuplanenden Aufträge verwendet werden. Das Kriterium *Fertigstellungstermin* kann dann unberücksichtigt bleiben. Ferner ist eine Verwendung von z.B. Straftermen für die Behandlung von Aufträgen, bei denen der Fertigstellungstermin überschritten wird, nicht notwendig. Es handelt sich damit um ein verhältnismäßig einfaches Problem der Reihenfolgenplanung, das jedoch die existierenden Bedingungen der Reparaturlackierung gut widerspiegelt⁴⁶.

Die Anzahl der Maschinen wird mit drei angenommen. Maschine M_1 entspricht dem Vorbereitungsplatz, Maschine M_2 der Kombikabine und Maschine M_3 dem Finishplatz. Auf Grund der Verwendung von drei Maschinen gibt es stets eine optimale Lösung, die einen Permutationsplan darstellt [136], d.h. es findet kein Positionswechsel der Aufträge statt. Eine Zwischenlagerung einzelner Aufträge vor einer Maschine ist daher nicht erforderlich. Durch die ausschließliche Betrachtung von Permutationsplänen wird die Tatsache berücksichtigt, dass bei vielen Betrieben die Anzahl der Stellplätze innerhalb der Werkstatt begrenzt ist (vgl. Abbildung 4.2), weshalb unterschiedliche Reihenfolgen auf den einzelnen Maschinen in der Praxis nicht möglich sind. Die Definition der unterschiedlichen Arbeitsabschnitte als Maschinen hat zudem den Vorteil, dass eine unterschiedliche Anzahl an Arbeitern über die entsprechenden Bearbeitungszeiten berücksichtigt werden kann und das Ablaufproblem an sich unverändert bleibt⁴⁷.

Die zu minimierende Zielgröße *Zykluszeit* berechnet sich dann für das formulierte Planungsproblem rekursiv nach folgender Formel [169]:

⁴⁶ *Dudek et al.* [53] kritisieren in ihrer Übersicht, dass viele Flow-Shop Probleme keinen praktischen Hintergrund haben („*The problem as described seldom or never exists.*“) und sehen eine Herausforderung darin, die Balance zwischen Theorie und praktischer Anwendung zu finden: „*One of the most difficult problem that every researcher should face is that of determining a balance between the investigation of abstract concepts and investigations that have an intermediate application. [...] the optimal path lies somewhere between the two extremes.*“

⁴⁷ Generell ist auch eine Definition der Lackierer als Maschine denkbar. Dies würde voraussetzen, dass jeder Lackierer einen eigenen Auftrag bearbeitet. Die Struktur des Ablaufplanungsproblems wäre dann abhängig von der Anzahl der Lackierer und nicht mehr allein von der Anzahl der Arbeitsabschnitte. Bei dem hier gewählten Ansatz wird jedoch davon ausgegangen, dass bei der Vorbereitung mehrere Lackierer an einem Auftrag arbeiten (vgl. Kapitel 5.2.1). Die Zahl der Maschinen bleibt daher auf drei begrenzt.

$$\begin{aligned}
C_{i1} &= \sum_{l=1}^i p_{l1} & i &= 1, \dots, m \\
C_{1k} &= \sum_{l=1}^k p_{1l} & k &= 1, \dots, n \\
C_{ik} &= \max(C_{(i-1)k}, C_{i(k-1)}) + p_{ik} & i &= 2, \dots, m, \quad k = 2, \dots, n
\end{aligned} \tag{5.1}$$

mit

C_{i1}	: Fertigstellungszeitpunkt von Job 1 auf Maschine i
p_{l1}	: Bearbeitungszeit von Job 1 auf Maschine l
m	: Anzahl der Maschinen (hier: $m = 3$)
C_{1k}	: Fertigstellungszeitpunkt von Job k auf Maschine 1
p_{1l}	: Bearbeitungszeit von Job l auf Maschine 1
n	: Anzahl der Jobs (hier: $n = 9$)
C_{ik}	: Fertigstellungszeitpunkt von Job k auf Maschine i
p_{ik}	: Bearbeitungszeit von Job k auf Maschine i

5.1.3 Abbildung der Unsicherheit

Durch die Berücksichtigung der Unsicherheit, die bei der Autoreparaturlackierung vergleichsweise hoch ist (vgl. Kapitel 4.3.3), wird das zu lösende Ablaufplanungsproblem komplexer. Die Bedingungen, die für eine einfache Lösung des Problems zu erfüllen sind, müssen nicht für alle Ziehungen der Monte-Carlo-Simulation gegeben sein. So können z.B. die Eigenschaften einer dominierenden Maschine (vgl. Kapitel 3.2.2) auf Grund der sich mit jeder Ziehung ändernden Verhältnisse zwischen den Bearbeitungszeiten der Aufträge, nicht als gegeben angenommen werden.

Auf Grund der umfangreichen Datengrundlage der Arbeitszeitstudien kann für jeden Arbeitsschritt eine eigene Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt werden. Die einzelnen Bearbeitungszeiten können dann im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation durch unabhängige Ziehungen aus unterschiedlichen Verteilungen ermittelt werden. Für diesen Fall konnte *Pinedo* [166] zeigen, dass es keine optimale Reihenfolge gibt, die mit effizienten Verfahren (z.B. Heuristiken) ermittelt werden kann und die zu erwartende Zykluszeit minimiert.

Daher wird zur Lösung der stochastischen Ablaufplanung ein vollständig enumeratives Verfahren gewählt und mit einer Monte-Carlo-Simulation gekoppelt. Für jedes Fallbeispiel

werden $N = 1.000$ Ziehungen durchgeführt. Bei jeder Ziehung wird unter Verwendung des LHS (vgl. Kapitel 3.4.3) eine neue Eingangsdatentabelle ermittelt. Für diese Tabelle werden dann nach folgendem Algorithmus die optimalen Reihenfolgen bestimmt:

1. Berechnung der Zykluszeit $C_{max,i}$ für jede denkbare Reihenfolge S_i mit $i = 1, \dots, x$ und $x = n!$
2. Bestimmung des Minimums C_{min} aus $C = \{C_{max,1}, \dots, C_{max,x}\}$ der Zykluszeiten
3. Ermittlung der zum Minimum gehörenden Reihenfolgen S_i .

Mögliche Ansätze der stochastischen Programmierung (vgl. u.a. [46, 148, 165]), wie sie häufig zur Bestimmung der Robustheit einer ermittelten Auftragsreihenfolge eingesetzt werden, bleiben hier unberücksichtigt, da das Ziel der Berechnungen nicht die Bestimmung eines möglichst robusten Belegungsplans ist, sondern der Einfluss der hohen Unsicherheiten der Autoreparaturlackierung auf die Ergebnisse der Ablaufplanung untersucht werden soll. Dabei soll der vollständige Lösungsraum berücksichtigt werden.

Auf Grund der Verwendung des vollständig enumerativen Verfahrens kann auf eine Beschränkung der Bearbeitungszeiten auf ganze Zahlen verzichtet werden. Dies ist z.B. bei manchen heuristischen Verfahren nötig, um den Komplexitätsgrad nicht zu erhöhen (vgl. u.a. [14]). Ein kontinuierlicher Lösungsraum wird somit bei dem hier beschriebenen Ansatz sichergestellt.

Um Ziehungen der Eingangstabelle durchführen zu können, müssen die Verteilungen der Bearbeitungszeiten der drei Abschnitte Vorbereitung, Lackierung/Trocknung und Finish bekannt sein. Für jedes Fallbeispiel werden diese mittels Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Jeder Auftrag besteht aus einer unterschiedlichen Anzahl B an Bauteilen, die jeweils durch ihre Fläche A_i und eine spezifische Lackstufe (vgl. Kapitel 4.2.1) charakterisiert sind. Der Zeitbedarf der Abschnitte eines Auftrags berechnet sich dann wie folgt:

$$\begin{aligned}
TV &= \sum_{i=1}^B \left(\sum_{k \in KV_i} tf_k \cdot A_i + \sum_{l \in LV_i} tt_l + \sum_{o \in OV_i} ta_o \right) \\
TL &= \sum_{i=1}^B \left(TZ + \sum_{k \in KL_i} tf_k \cdot A_i + \sum_{l \in LL_i} tt_l + \sum_{o \in OL_i} ta_o \right) \\
TF &= \sum_{i=1}^B \left(\sum_{k \in KF_i} tf_k \cdot A_i + \sum_{l \in LF_i} tt_l + \sum_{o \in OF_i} ta_o \right)
\end{aligned} \tag{5.2}$$

mit

TV [min]	: Vorbereitungszeit des Auftrags
TL [min]	: Lackier- und Trockenzeit des Auftrags
TF [min]	: Finishzeit des Auftrags
A_i [dm ²]	: Fläche des Bauteils i
TZ [min]	: Trockenzeit (lackstufenunabhängig)
tf_k [min/dm ²]	: Zeitbedarf des flächenabhängigen Schrittes k
tt_l [min]	: Zeitbedarf des teilebezogenen Schrittes l
ta_o [min]	: Zeitbedarf des auftragsbezogenen Schrittes o
KV_i	: Menge der Indizes ^a der zur Vorbereitung des Bauteils i gehörenden flächenabhängigen Arbeitsschritte
LV_i	: Menge der Indizes der zur Vorbereitung des Bauteils i gehörenden teilebezogenen Arbeitsschritte
OV_i	: Menge der Indizes der zur Vorbereitung des Bauteils i gehörenden auftragsbezogenen Arbeitsschritte
KL_i	: Menge der Indizes der zur Lackierung des Bauteils i gehörenden flächenabhängigen Arbeitsschritte
LL_i	: Menge der Indizes der zur Lackierung des Bauteils i gehörenden teilebezogenen Arbeitsschritte
OL_i	: Menge der Indizes der zur Lackierung des Bauteils i gehörenden auftragsbezogenen Arbeitsschritte
KF_i	: Menge der Indizes der zum Finish des Bauteils i gehörenden flächenabhängigen Arbeitsschritte
LF_i	: Menge der Indizes der zum Finish des Bauteils i gehörenden teilebezogenen Arbeitsschritte
OF_i	: Menge der Indizes der zum Finish des Bauteils i

gehörenden auftragsbezogenen Arbeitsschritte

^a Jeder Arbeitsschritt ist durch eine spezifische Nummer (= Index) gekennzeichnet.

Sämtliche Zeitparameter der Arbeitsschritte sind, ebenso wie die Trockenzeit, durch Verteilungen beschrieben (vgl. Kapitel 4.3.3.2). Bei der Bauteilfläche handelt es sich um einen deterministischen Wert. Die dargestellte Berechnung wird entsprechend der gewählten Anzahl an Ziehungen ($N = 10.000$) wiederholt. Zur Generierung der Zufallszahlen auf Grundlage der Verteilungen der Zeitparameter wird ebenfalls das LHS verwendet.

Nach Durchführung der Monte-Carlo-Simulation für jeden der neun Aufträge erhält man die Eingangsdatentabelle, bei der den Bearbeitungszeiten eines jeden Jobs auf jeder der drei Maschinen (Vorbereitung, Lackierung/Trocknung und Finish) eine Verteilung hinterlegt ist (Abbildung 5.1). Diese bestimmen die im Rahmen der stochastischen Ablaufplanung durchgeführte Monte-Carlo-Simulation zur Berücksichtigung der Unsicherheiten der Planung (s.o.).

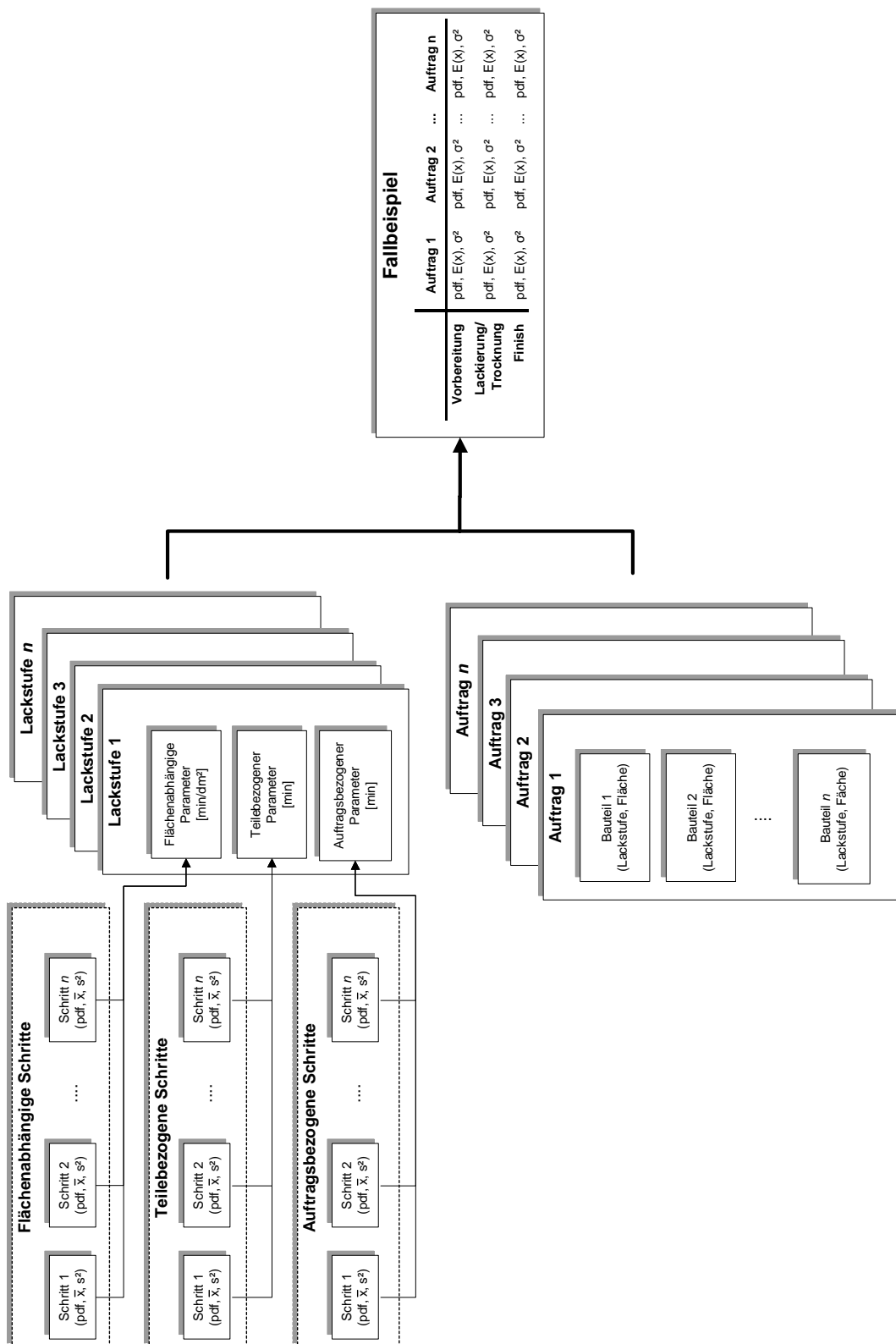


Abbildung 5.1: Vorgehensweise bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (pdf) der Bearbeitungszeiten der einzelnen Jobs auf den Maschinen

5.1.4 Softwaretechnische Umsetzung

Für die Lösung des Planungsproblems wurde der Algorithmus in der Programmiersprache *Python* formuliert [139]. Die Eingangsdaten werden in einer Excel-Datei hinterlegt. Für die Beschreibung der Unsicherheiten mittels Verteilung und Standardabweichung sowie die Durchführung der Ziehungen der Monte-Carlo-Simulation wird *Crystal Ball* [45], das als Add-In für Excel verfügbar ist, verwendet. Gesteuert wird die Berechnung über das *Python*-Skript, das nach der Ermittlung der optimalen Reihenfolgen für eine Eingangstabelle die Ziehung einer neuen Tabelle veranlasst.

Die Unsicherheiten der Eingangsdaten werden ebenfalls unter Verwendung von *Crystal Ball* mittels einer Monte-Carlo-Simulation mit $N = 10.000$ Ziehungen ermittelt, basierend auf den Unsicherheiten der Arbeitsabschnitte der Lackstufen (vgl. Kapitel 4.3.3.2). Diese Berechnungen werden unabhängig vom eigentlichen Lösungsalgorithmus des Ablaufplanungsproblems durchgeführt.

Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Text-Dateien geschrieben. Dabei werden für jede Ziehung der Wert der minimalen Zykluszeit, die Anzahl der optimalen Reihenfolgen, die Eingangstabelle der Berechnung sowie die Sequenzen der optimalen Reihenfolgen festgehalten. Der ausführliche Programmcode in Python findet sich in Anhang A.

Die Rechenzeit für die Bestimmung der Unsicherheiten der Bearbeitungszeit (erste Monte-Carlo-Simulation) lag bei Verwendung eines herkömmlichen PC mit 2,4GHz Prozessor und 512 MB Arbeitsspeicher zwischen drei und vier Minuten. Für die Ermittlung der minimalen Zykluszeit einer Ziehung im Rahmen der Bestimmung optimaler Reihenfolgen (zweite Monte-Carlo-Simulation) wurden zwischen 80 und 90 Sekunden benötigt, so dass die gesamte Rechenzeit für ein Fallbeispiel mit 1.000 Ziehungen im Durchschnitt bei etwa 23,7 Stunden lag.

Die Statistik-Software *R* wurde für die Auswertung der Ergebnisse, die die Grundlage für die Bewertung der Ablaufplanung darstellen, und für die statistische Analyse der Datensätze (vgl. Kapitel 4.2.3.2) eingesetzt⁴⁸. Für die entsprechenden Berechnungen werden eigens definierte Funktionen verwendet, die über Text-Dateien eingelesen werden.

Da der Fokus der Arbeit primär auf der Untersuchung des Einflusses der empirisch ermittelten Unsicherheiten auf die Ablaufplanung lag, wurde bei der Modellentwicklung auf die Programmierung einer benutzerfreundlichen Oberfläche verzichtet. Zudem ist mit

⁴⁸Nähere Informationen zu dieser Software und ihrem Einsatz findet sich u.a. in [60, 149, 235] und auf ihrer Internetseite (<http://www.r-project.org>).

einem praktischen Einsatz eines softwarebasierten Planungstools in den Betrieben der Kfz-Reparaturlackierung wegen der kleinen Betriebsgrößen nicht zu rechnen (vgl. Kapitel 4.1.1). Ziel war einzig die Entwicklung eines Modells, das den Anforderungen an die Beantwortung der untersuchten Fragestellungen genügt.

5.2 Ergebnisse der Berechnungen

5.2.1 Gewählte Beispielaufträge

Der für die Fallstudie definierte Referenzbetrieb ist mit einer Kombikabine ausgestattet, in der die Fahrzeuge sowohl lackiert als auch getrocknet werden. Die Arbeitszeit pro Lackierer und Tag beträgt 7,7 Stunden (exklusive einer Stunde Pause, deren Zeitpunkt frei wählbar ist). Die Lackierer arbeiten in Gruppenarbeit gemeinsam einen Auftrag ab, d.h. die einzelnen Arbeitsabschnitte eines Auftrags, Vorbereitung, Lackierung/Trocknung und Finish, werden von unterschiedlichen Lackierern bearbeitet. Das Werkstattlayout entspricht dem der Abbildung 4.2. Es kommt dabei zu keinem Engpass durch Platzmangel im Finishbereich, wie er bei einigen Werkstätten in der Praxis auf Grund baulicher Gegebenheiten beobachtet werden kann [75], so dass die Kombikabine die mögliche Engpassstelle des Prozesses darstellt.

Als Grundlage für die Berechnung des Maschinenbelegungsplans werden neun Aufträge angenommen. Diese werden zufällig aus der Liste der im Rahmen der Arbeitszeitstudien aufgenommenen Aufträge ausgewählt (vgl. Kapitel 4.2). Dadurch entspricht die mittels der Aufträge beschriebene Variation in etwa der in der Praxis anzutreffenden Vielfalt hinsichtlich Gesamtumfang und Lackstufenzusammensetzung. Tabelle 5.1 zeigt die neun Aufträge des Beispiels T11 stellvertretend für die weiteren Fallbeispiele.

Die Unsicherheiten der Bearbeitungszeiten der Aufträge werden im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation mit einem Umfang von $N = 10.000$ Ziehungen berechnet (vgl. Kapitel 5.1.3). Für das deterministische Planungsproblem wird die auf Grundlage der ermittelten Zeitparameter errechnete Auftragszeit verwendet (vgl. Kapitel 4.3.2). Diese Zeiten sind gleichbedeutend mit der ersten Ziehung des stochastischen Ansatzes, und damit ebenfalls Teil der Lösungsmenge des stochastischen Problems.

Berechnet werden je sechs Fallbeispiele für zwei unterschiedliche Besetzungen der oben beschriebenen Werkstatt. Bei der ersten Besetzung (Beispiele T11 bis T16) handelt es sich um eine Werkstatt mit drei Angestellten in der Lackierung, d.h. jeder der drei identi-

Tabelle 5.1: Die neun gewählten Aufträge des Fallbeispiels T11

Auftrag (Fahrzeug)	Bauteil	Lackstufe	Zustand
1 (BMW 3er)	Motorhaube	1	eingebaut
	Kotflügel links	2	eingebaut
	Kotflügel rechts	2	eingebaut
	Frontverkleidung	2	ausgebaut
	Front oben	1	ausgebaut
2 (Audi A6 Avant)	Hintertür links	1	ausgebaut
	Heckverkleidung	1	ausgebaut
	Seitenwand links	3	eingebaut
	Seitenwand oben links	2	ausgebaut
3 (Porsche Boxter)	Seitenwand links	3	eingebaut
	Seitenwand rechts	3	eingebaut
	Frontverkleidung	3	ausgebaut
	Heckverkleidung	3	ausgebaut
4 (Golf 4)	Seitenwand rechts	2	eingebaut
5 (Vectra-B)	Seitenwand links	2	eingebaut
	Seitenwand oben	2	eingebaut
	A-Säule links	2	eingebaut
	Kotflügel links	2	eingebaut
	Vordertür links	2	eingebaut
6 (Golf 4)	Hintertür rechts	3	ausgebaut
	Seitenwand rechts	3	eingebaut
	Tankklappe	1	ausgebaut
	Einstiegsverkleidung	3	eingebaut
7 (Audi A4 Avant)	Heckverkleidung	3	ausgebaut
	Hintertür rechts	3	eingebaut
	Motorhaube	3	ausgebaut
	Schutzzierleiste	1	ausgebaut
	Vordertür links	3	eingebaut
8 (Astra-F Caravan)	Seitenwand rechts	3	eingebaut
	Tankklappe	2	ausgebaut
	Heckverkleidung	3	eingebaut
9 (Seat Toledo)	Frontverkleidung	3	eingebaut

fizierten Abschnitte wird von einem Lackierer bearbeitet. Im zweiten Fall (Beispiele T21 bis T26) arbeitet ein zusätzlicher Lackierer in der Vorbereitung. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Werkstatt mit drei Angestellten in der Lackierung im Text als *Besetzung 1* und die mit vier Angestellten als *Besetzung 2* bezeichnet⁴⁹. Die mit diesen Annahmen beschriebene Betriebsgröße entspricht den üblichen Bedingungen, wie sie in der Praxis bei freien und Vertragswerkstätten vorliegen (vgl. Kapitel 4.2.2 und [19, 182]).

Anhand der zweiten Gruppe von Fallbeispielen soll u.a. untersucht werden, wie groß der Einfluss der sich ändernden Verhältnisse zwischen den Bearbeitungszeiten der einzelnen Abschnitte auf die Ergebnisse ist. Daher wird auch die Grundstruktur des Ablaufplanungsproblems beibehalten⁵⁰ und lediglich die Vorbereitungszeiten der Aufträge halbiert unter der Annahme, dass die Vorbereitung nun mit dem doppelten Personaleinsatz durchgeführt wird (vgl. Kapitel 3.3.1). Zudem liegen den sechs Fallbeispielen der Besetzung 2 die gleichen Aufträge in gleicher Reihenfolge zu Grunde wie bei Besetzung 1, d.h. der Unterschied zwischen T11 und T21 liegt ausschließlich in der Halbierung der Vorbereitungszeit.

Tabelle 5.2 zeigt die Daten des ersten Fallbeispiels für Besetzung 1. Dabei entspricht die Auftragszeit in Minuten dem Mittelwert der Verteilung. Dieser wird zudem als Wert für die Auftragszeit des deterministischen Problems verwendet. Die negative Abweichung beschreibt die Lage des 2,5 % Quantils, die positive Abweichung die des 97,5 % Quantils der Verteilung der Auftragszeit⁵¹. Diese Werte werden entsprechend dem formulierten Ablaufproblem (vgl. Kapitel 5.1.2) bei jedem Auftrag für die drei Abschnitte Vorbereitung, Lackierung/Trocknung und Finish separat angegeben. Die Daten der weiteren Beispiele finden sich im Anhang B.

Die mittels Ablaufplanung erreichte Verbesserung wird durch den Vergleich der Zykluszeit der ursprünglichen Auftragsreihenfolge (= Sequenz *123456789*) mit der minimierten Zykluszeit der optimalen Reihenfolgen bestimmt. Grund hierfür ist die Annahme, dass die Aufträge ohne Planung in der Reihenfolge ihres Eintreffens (*First-In-First-Out*) abgearbeitet werden.

Für die Bewertung des stochastischen Planungsproblems sind neben der mittleren Verbesserung, die Häufigkeitsverteilungen der berechneten minimalen Zykluszeiten sowie der

⁴⁹Bei den Abbildungen wird zur Unterscheidung meist die Anzahl der Vorbereiter (*1 Vorbereiter* bzw. *2 Vorbereiter*) angegeben.

⁵⁰Theoretisch wäre auch denkbar gewesen, ein Ablaufplanungsproblem mit zwei parallelen identischen Maschinen M_{11} und M_{12} zu formulieren.

⁵¹Der Absolutwert der Quantile errechnet sich dabei wie folgt:

$$\text{Quantil [min]} = \frac{100 + \text{Abweichung [\%]}}{100 [\%]} \cdot \text{Auftragszeit [min]}.$$

Tabelle 5.2: Übersicht über die Daten der Fallstudie 1 der Besetzung 1 (Fallbeispiel T11)

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	157,28	153,88	40,85
	neg. Abweichung [%]	-11,37	-21,49	-7,60
	pos. Abweichung [%]	16,26	36,08	9,15
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	161,43	115,88	26,43
	neg. Abweichung [%]	-12,11	-28,45	-8,91
	pos. Abweichung [%]	16,78	47,41	13,18
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	290,55	143,21	48,11
	neg. Abweichung [%]	-7,49	-23,01	-8,77
	pos. Abweichung [%]	9,67	38,26	10,26
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	58,04	92,85	9,04
	neg. Abweichung [%]	-24,34	-35,19	-18,30
	pos. Abweichung [%]	34,69	61,20	33,10
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	108,25	164,57	44,58
	neg. Abweichung [%]	-13,39	-20,16	-10,86
	pos. Abweichung [%]	18,72	34,80	11,68
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	182,17	118,51	24,86
	neg. Abweichung [%]	-11,15	-27,61	-10,09
	pos. Abweichung [%]	14,83	45,94	14,11
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	253,59	131,04	40,32
	neg. Abweichung [%]	-8,48	-25,12	-9,17
	pos. Abweichung [%]	10,97	41,71	11,32
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	172,49	124,36	23,69
	neg. Abweichung [%]	-11,63	-26,45	-12,07
	pos. Abweichung [%]	15,80	43,89	15,60
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	99,24	90,07	7,67
	neg. Abweichung [%]	-19,00	-36,21	-20,38
	pos. Abweichung [%]	26,74	60,60	39,03

erzielten Zeitersparnis von Interesse. Beide werden durch entsprechende Histogramme beschrieben. Des Weiteren wird die ermittelte Anzahl optimaler Reihenfolgen sowohl im deterministischen als auch im stochastischen Fall betrachtet.

5.2.2 Die deterministische Lösung des Problems

Beim deterministischen Ablaufplanungsproblem wird der Algorithmus (vgl. Kapitel 5.1.2) pro Fallbeispiel auf eine einzige Eingangsdatentabelle angewendet, die die Mittelwerte der Auftragszeiten beinhaltet (vgl. Kapitel 5.2.1 und Tabelle 5.2). Bei den Ergebnissen zeigen sich deutliche Unterschiede sowohl zwischen den sechs Fallbeispielen einer Besetzung als auch zwischen den beiden Besetzungen.

Die minimierten Zykluszeiten der sechs Fallbeispiele der Besetzung 1 liegen zwischen 1.597 min und 1.891 min. Die Differenzen in den Absolutwerten der Zykluszeiten sind dabei eine Konsequenz der unterschiedlichen Struktur der ausgewählten Beispielaufträge. Für Besetzung 2 errechnen sich minimierte Zykluszeiten zwischen 1.171 min und 1.268 min.

Hinsichtlich der Verbesserung der Gesamtdurchlaufzeit (= Zykluszeit) der optimalen Reihenfolge ergibt sich bei Besetzung 1 eine mittlere Verbesserung von 2,44 %. Für Besetzung 2 liegt die Verbesserung im Mittel bei 4,23 % im Vergleich zur *First-In-First-Out* Bearbeitung. Betrachtet man die einzelnen Fallbeispiele, so fällt die Streuung der Ergebnisse auf (Abbildung 5.2). Die minimale Verbesserung für Besetzung 1 liegt bei 0 % (T15), während die maximale Verbesserung sich zu 6,53 % (T16) ergibt. Bei Besetzung 2 sind die entsprechenden Werte 1,50 % (T25) bzw. 7,35 % (T23). Diese Unterschiede sind ein erstes Indiz für den Einfluss der Auftragsstruktur und deren Eingangsreihenfolge auf eine mögliche Verbesserung durch den Einsatz einer Ablaufplanung.

Ähnlich sehen die Ergebnisse für die Anzahl optimaler Reihenfolgen aus. Diese können als ein Hinweis für die wahrscheinliche Verbesserung der Zykluszeit durch den Einsatz einer Ablaufplanung gesehen werden. Je größer ihr Wert ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Eingangsreihenfolge bereits einer optimalen Reihenfolge entspricht, wie z.B. bei Fallbeispiel T15.

Für die Besetzung 1 liegt die Anzahl der optimalen Reihenfolgen zwischen 4 (T13) und 2.096 (T11), der Mittelwert liegt bei 554. Bei der Werkstatt mit zwei Vorbereitern (Besetzung 2) variiert die Anzahl der optimalen Reihenfolgen zwischen 550 (T25) und 2.289 (T22 und T26). Hier liegt das Mittel mit 1.519 Reihenfolgen nahezu dreimal so hoch wie bei Besetzung 1 (Abbildung 5.3). Folglich ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Startse-

quenz 123456789 eine optimale Reihenfolge darstellt höher für Besetzung 2, jedoch bei einer Gesamtzahl möglicher Reihenfolgen von $9! = 362880$ immer noch sehr gering (0,41 % für Besetzung 2 im Vergleich zu 0,15 % für Besetzung 1).

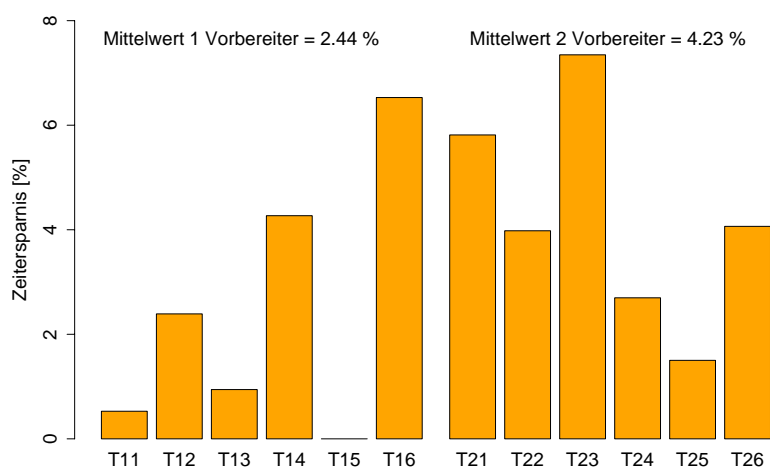


Abbildung 5.2: Relative Verbesserung der Zykluszeit im deterministischen Fall

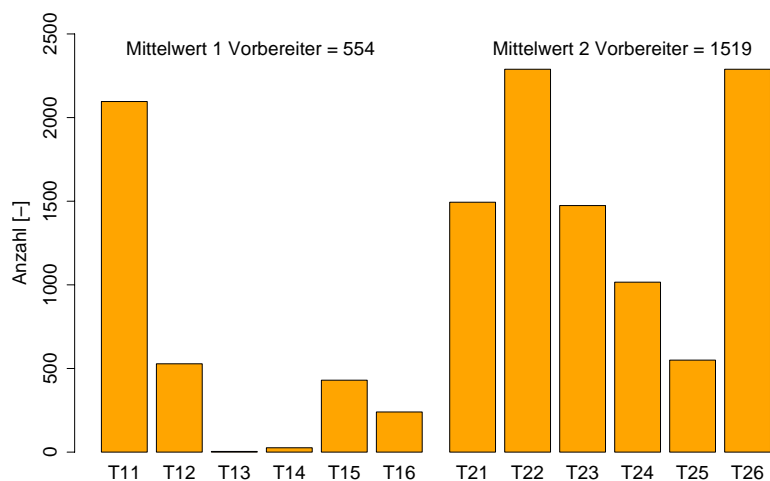


Abbildung 5.3: Anzahl der optimalen Reihenfolgen im deterministischen Fall

Das deterministische Ablaufplanungsproblem ermöglicht zudem eine Darstellung der Ergebnisse in Form eines Gantt⁵²-Diagramms (Abbildung 5.4). Mittels dieser Darstellung lassen sich die betrieblichen Konsequenzen für die Umsetzung der erhaltenen Lösung abschätzen. Zudem können die Verhältnisse zwischen dem Zeitbedarf der unterschiedlichen Maschinen sowie die Totzeiten dargestellt werden. Daraus können dann auch Schlussfolgerungen für den Einsatzplan der einzelnen Lackierer gewonnen werden [200].

Für das hier dargestellte Fallbeispiel T11 zeigt sich, stellvertretend für die Beispiele der Besetzung 1, der deutlich höhere Zeitbedarf von Vorbereitung und Lackierung/Trocknung im Vergleich zum Finish. Zudem wird die verringerte Auslastung der Lackierkabine deutlich, die aus dem höheren Zeitbedarf der Vorbereitung resultiert. Eine Korrektur des Gantt-Diagramms führt zu einer Eliminierung der Totzeiten der Kombikabine (Abbildung 5.5). Aus dem daraus resultierenden späteren Start der Lackierkabine lässt sich deren Laufzeit reduzieren, was zu zusätzlichen Einsparungen führen kann (vgl. Kapitel 5.3). Eine weitere Konsequenz ist die Vermeidung von Überstunden, die durch eine verbesserte Personaleinsatzplanung möglich ist. So kann bei dem dargestellten Beispiel der Arbeitsbeginn des Lackierers nach hinten verlegt werden, was dazu führt, dass der Auftrag 2 noch innerhalb der regulären Arbeitszeit fertig gestellt werden kann. Dies setzt allerdings die Möglichkeit flexibler Arbeitszeiten voraus. Bei der hier dargestellten Lösung noch nicht berücksichtigt sind z.B. Überstundenregelungen, die ebenfalls einen Einfluss auf die Lösung haben (vgl. Kapitel 7.3). Daher werden die Aufträge in der Vorbereitung als zusammenhängend betrachtet, und es treten hier keine Totzeiten auf. Eventuelle Überstunden werden akzeptiert vor dem Hintergrund, dass alleinig die Zykluszeit zu minimieren ist (vgl. Aufträge 6 und 9 in Abbildung 5.5).

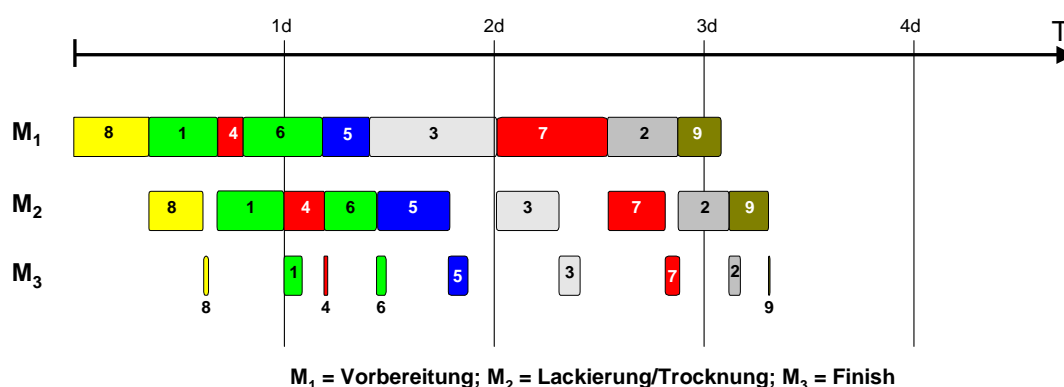


Abbildung 5.4: Berechneter Belegungsplan für das Fallbeispiel T11

⁵²Nähere Informationen zu Gantt-Diagrammen finden sich in der Literatur (vgl. u.a. [38, 51, 118]).

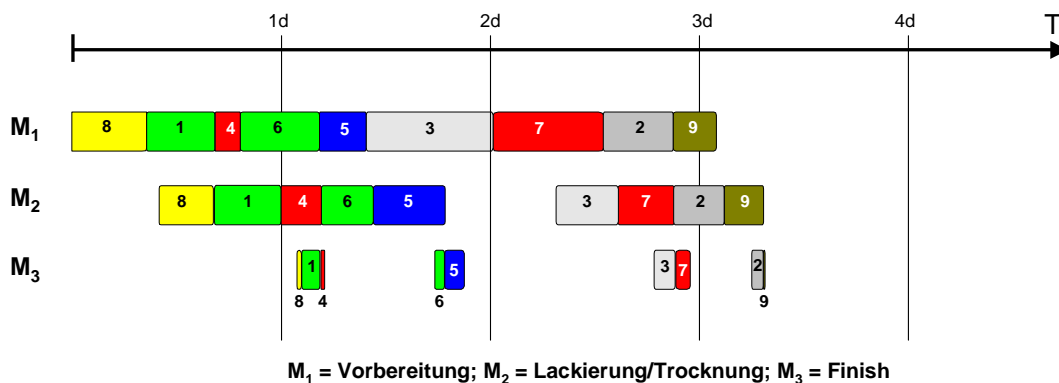


Abbildung 5.5: Belegungsplan ohne Totzeiten für das Fallbeispiel T11

Bei der Besetzung 2 ergibt sich auf Grund der verkürzten Vorbereitungszeiten ein leicht verändertes Bild (Abbildung 5.6). Es treten keine Totzeiten der Kabine mehr auf. Dies resultiert vornehmlich aus der Tatsache, dass bei diesem Beispiel der Zeitbedarf für Lackierung/Trocknung bei acht von neun Aufträgen größer ist als die Vorbereitungszeit. Auch bei der Vorbereitung zeigen sich keine Totzeiten.

Mittels Nachkorrektur können ähnlich wie bei Besetzung 1 die Aufträge im Finishbereich gruppiert werden. Eine Restriktion, die jedoch bei Besetzung 2 berücksichtigt werden muss, ist die Gesamtzahl verfügbarer Stellplätze. Diese führt dazu, dass das Finish des Auftrags 2 vor Ende der Lackierung/Trocknung von Auftrag 7 abgeschlossen sein muss (vgl. Abbildung 5.7). Auch bei den Fallbeispielen der Besetzung 2 wird keine Überstundenregelung berücksichtigt, da die Zykluszeit die einzige zu minimierende Zielgröße darstellt. Für die Durchführung des Belegungsplans sind daher Überstunden des Lackierers und der Vorbereiter notwendig. Die Berücksichtigung einer Beschränkung der Überstunden würde auch hier zu einem veränderten Belegungsplan führen (vgl. Kapitel 7.3).

Vergleicht man die Gantt-Charts des jeweiligen Fallbeispiels 1 der Besetzungen 1 und 2, zeigt sich auch, dass die optimalen Reihenfolgen unterschiedlich sind. Dies gilt nicht nur für die dargestellten Beispiele, sondern für sämtliche in der Lösungsmenge enthaltenen optimalen Reihenfolgen. Gleiches trifft auch für die Beispiele T12 bis T16 im Vergleich zu T22 bis T26 zu.

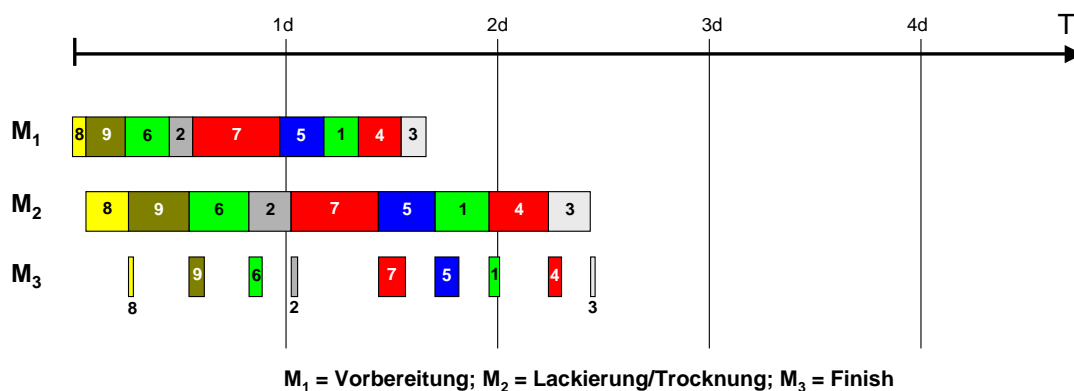


Abbildung 5.6: Berechneter Belegungsplan für das Fallbeispiel T21

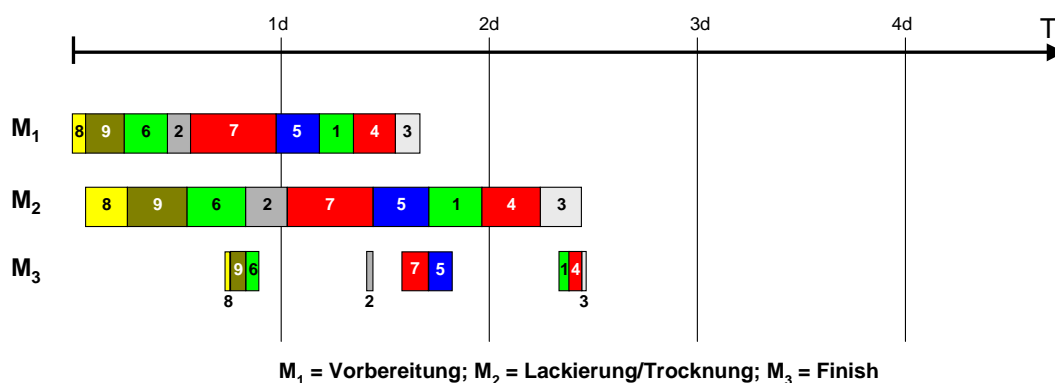


Abbildung 5.7: Belegungsplan ohne Totzeiten für das Fallbeispiel T21

5.2.3 Ergebnisse unter Berücksichtigung der unsicheren Datengrundlage

Wird aus dem deterministischen Planungsproblem durch Berücksichtigung der Unsicherheit ein stochastisches Planungsproblem, zeigt sich bei Verwendung eines vollständig enumerativen Algorithmus die daraus resultierende Streuung der Ergebnisse. Diese betrifft sowohl die absolute Zykluszeit als auch die erzielbare Verbesserung.

Für die hier betrachteten Fallbeispiele zeigt sich im Mittel bei den Ergebnissen des stochastischen Ablaufplanungsproblems ein vergleichbares Bild hinsichtlich der Zeitersparnis wie für den deterministischen Fall. Für Besetzung 1 ist die mittlere Zeitersparnis mit 3,42 % ca. 1 Prozentpunkt höher, für Besetzung 2 mit 4,17 % nahezu identisch mit den Verbesse-

rungen der deterministischen Rechnung. Auch beim Vergleich der mittleren Zeitersparnis zwischen den einzelnen Fallbeispielen ergibt sich ein ähnliches Bild. So besitzt Fallbeispiel T16 die größte, T15 die geringste Ersparnis für Besetzung 1. Bei Besetzung 2 sind es entsprechend T23 bzw. T25 (vgl. Abbildung 5.8).

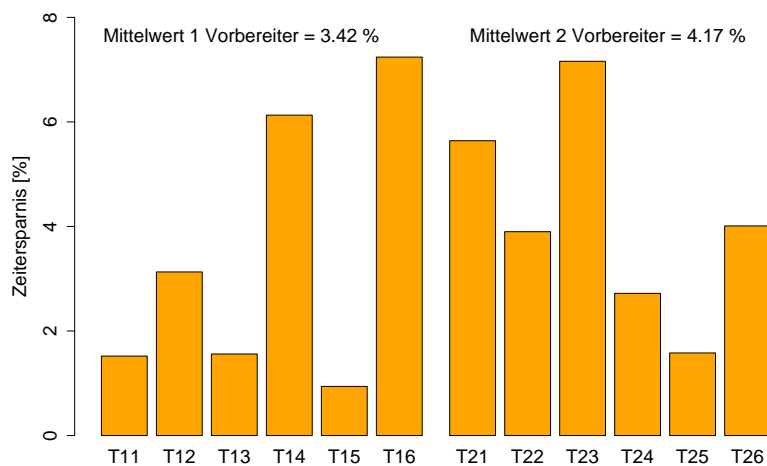


Abbildung 5.8: Mittlere relative Verbesserung der Zykluszeit für die 12 Fallbeispiele unter Berücksichtigung der Unsicherheit

Neben der Streuung der Mittelwerte der Zeitersparnis fällt bei Betrachtung der Histogramme der prozentualen Zeitersparnis (Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10) die Streuung der berechneten Verbesserung pro Fallbeispiel auf. So liegt bei ca. 30 % der Ziehungen des Fallbeispiels T11 die Verbesserung zwischen 0 % und 0,5 %. Für T15 liegt bei ca. 40 % die Zeitersparnis unter 0,2 %. Zudem zeigt sich, dass auch eine Verringerung der Zykluszeiten um 10 % und mehr möglich ist. Bei Fallbeispiel T16 trifft das für mehr als 10 % der Ziehungen und damit der möglichen Eingangsdatentabellen zu.

Bei Besetzung 2 liegen nicht nur die mittleren Werte der Verbesserung höher, auch die minimal auftretende Zeitersparnis der Fallbeispiele liegt über der der Besetzung 1. Unabhängig vom Fallbeispiel treten keine Werte unter 0,5 % auf. Die berechneten maximalen Zeitersparnisse liegen dafür unter den für einige Beispiele der Besetzung 1 berechneten Werten und stets unter 10 %. Über alle Fallbeispiele betrachtet, streuen die Ergebnisse der Besetzung 2 damit deutlich geringer als die der Besetzung 1.

Neben den Streuungen innerhalb und zwischen den Fallbeispielen treten unterschiedliche Histogramme, je nach Struktur der gewählten Eingangstabelle und in Abhängigkeit

der gewählten Anfangsreihenfolge, auf. Bei Besetzung 1 verteilt sich für drei Fallbeispiele (T12, T14, T16) die prozentuale Einsparung ähnlich einer Glockenkurve um den Mittelwert, d.h. je näher die Verbesserung am Mittelwert liegt, desto häufiger tritt sie auf. Bei den restlichen drei Fallbeispielen (T11, T13, T15) dominieren die Ziehungen mit geringer Verbesserung und die Häufigkeit sinkt mit zunehmender Zeitersparnis, vergleichbar einer log-Normalverteilung.

Bei Besetzung 2 liegen geringere Unterschiede zwischen den Histogrammen der Zeitersparnis vor. Hier zeigt sich in der Regel eine Glockenkurven ähnliche Verteilung um den Mittelwert, wobei die Häufigkeit stärker mit der Entfernung abnimmt als bei Besetzung 1. Dadurch ergibt sich ein insgesamt geringerer Wertebereich für die relative Zeitersparnis der Besetzung 2.

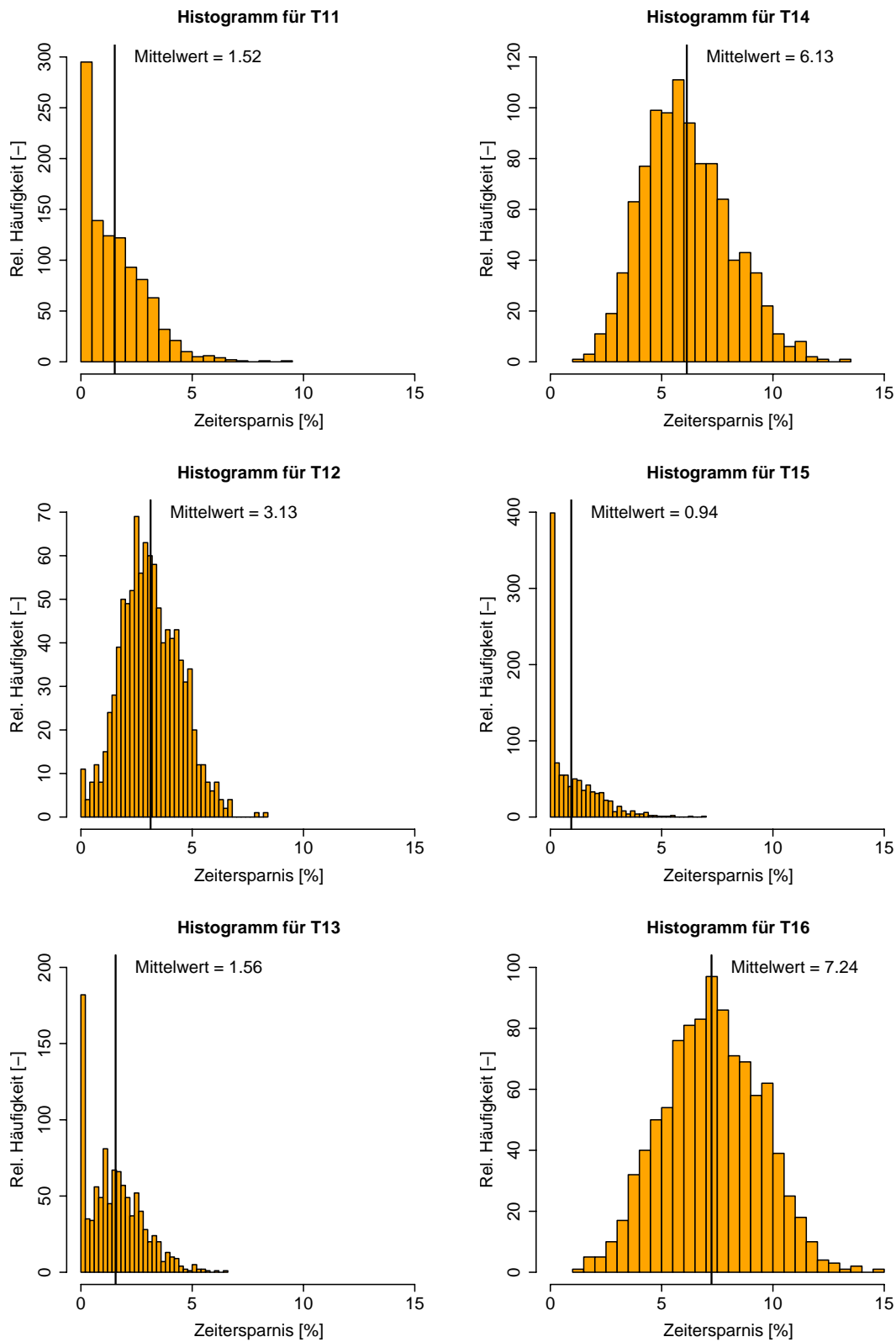


Abbildung 5.9: Histogramme der relativen Zeitersparnis für Besetzung 1

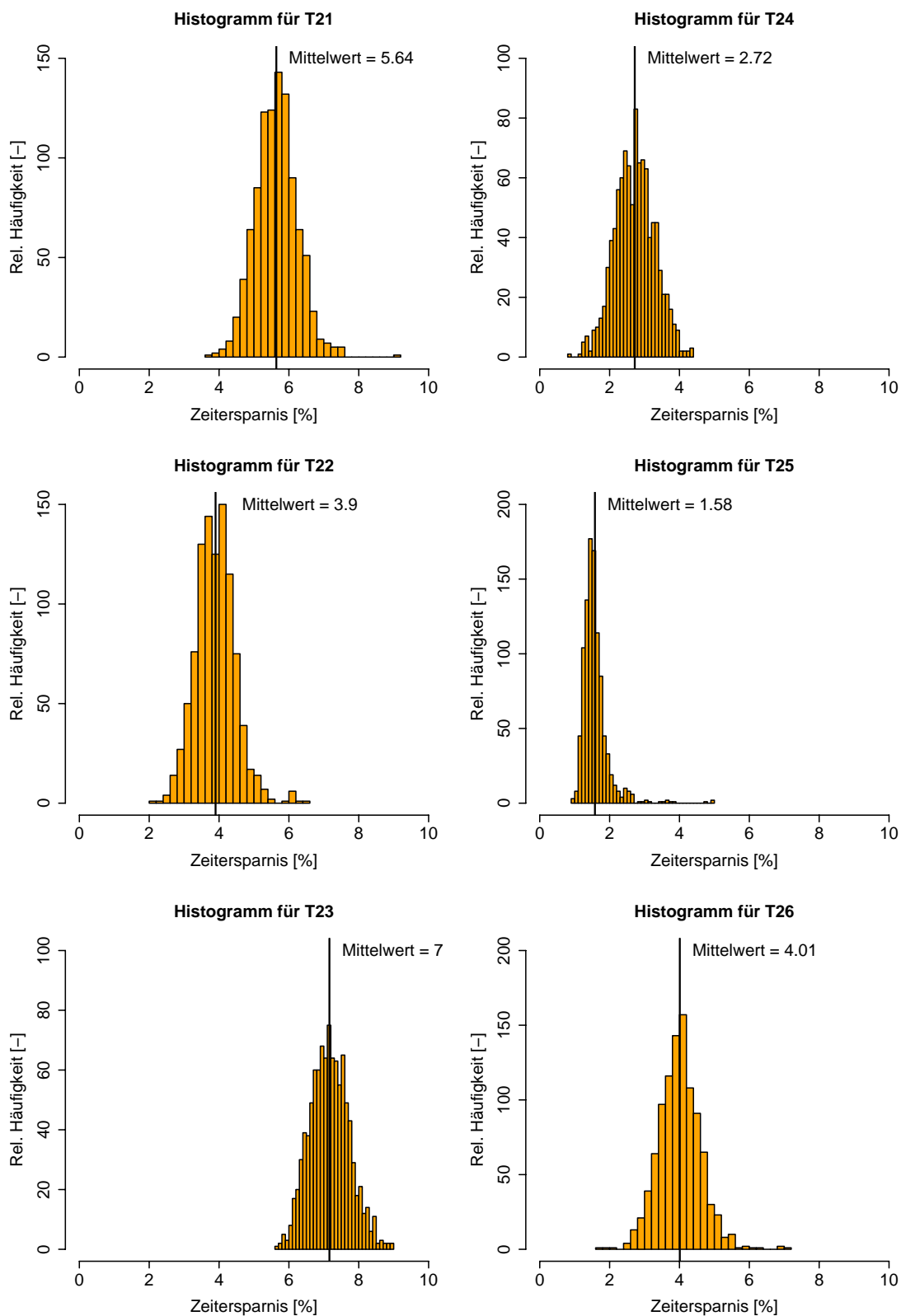


Abbildung 5.10: Histogramm der relativen Zeitersparnis für Besetzung 2

Die Mittel der berechneten Zykluszeiten schwanken für Besetzung 1 zwischen 1.609,79 min (T11) und 1.904,05 min (T13). Die zugehörigen Histogramme der minimierten Zykluszeiten der jeweils 1.000 Ziehungen zeigen vergleichbare Charakteristika (Abbildung 5.11). Bei allen nimmt die Häufigkeit beidseitig des Mittelwertes ähnlich einer Glockenkurve ab und nahezu der gesamte Wertebereich liegt im Intervall $[0,9 \cdot \bar{C}_{max}; 1,1 \cdot \bar{C}_{max}]$. Dies bestätigt auch die Berechnung der relativen Standardabweichung der mittleren minimalen Zykluszeit, die für Besetzung 1 zwischen 1,97 % und 2,26 % liegt (vgl. Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Relative Standardabweichung der minimalen Zykluszeiten für Besetzung 1

T11	T12	T13	T14	T15	T16
2,26 %	1,97 %	1,97 %	1,99 %	2,01 %	2,14 %

Die Histogramme der minimalen Zykluszeiten der Fallbeispiele der Besetzung 2 (Abbildung 5.12) verdeutlichen den größeren Wertebereich der berechneten minimalen Zykluszeiten. Dieser zeigt sich auch in den relativen Standardabweichungen, die zwischen 4,83 % (T24) und 5,38 % (T21) liegen (vgl. Tabelle 5.4) und damit mehr als doppelt so groß sind wie bei Besetzung 1. Die Verteilung der Zykluszeiten als solche ähnelt wie schon bei Besetzung 1 einer Glockenkurve und zeigt eine mit der Entfernung vom Mittelwert abnehmende Werteanzahl pro Größenklasse. Absolut betrachtet liegen die Mittelwerte der minimierten Zykluszeiten für die stochastischen Eingangsdaten der Besetzung 2 zwischen 1.221,49 min (T26) und 1.318,79 min (T24). Sie liegen damit ca. 5 % über den minimalen Zykluszeiten der deterministischen Lösungen für T21 bis T26.

Tabelle 5.4: Relative Standardabweichung der minimalen Zykluszeiten für Besetzung 2

T21	T22	T23	T24	T25	T26
5,38 %	5,16 %	4,98 %	4,83 %	5,11 %	5,23 %

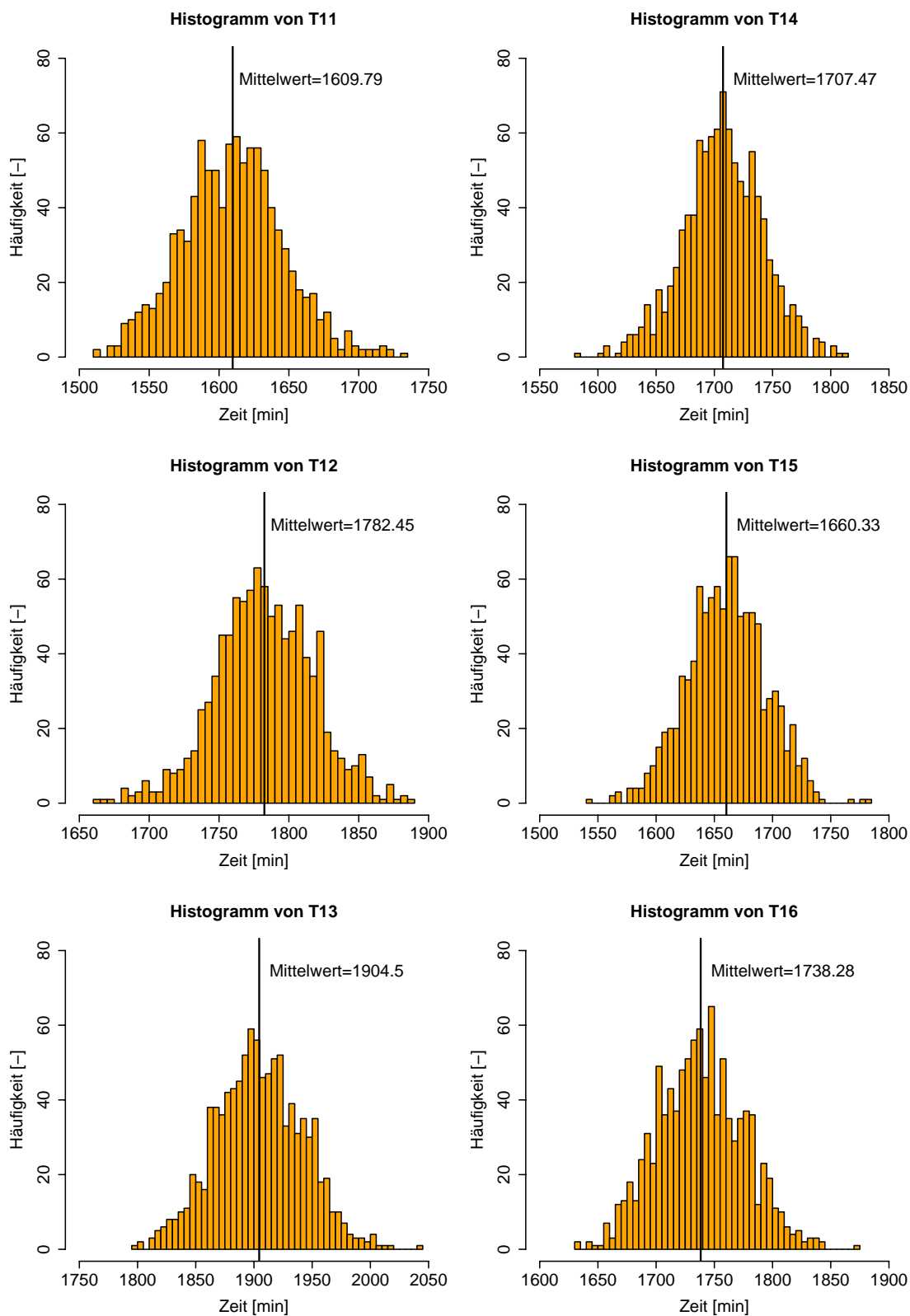


Abbildung 5.11: Histogramme der Anzahl minimaler Zykluszeiten für Besetzung 1

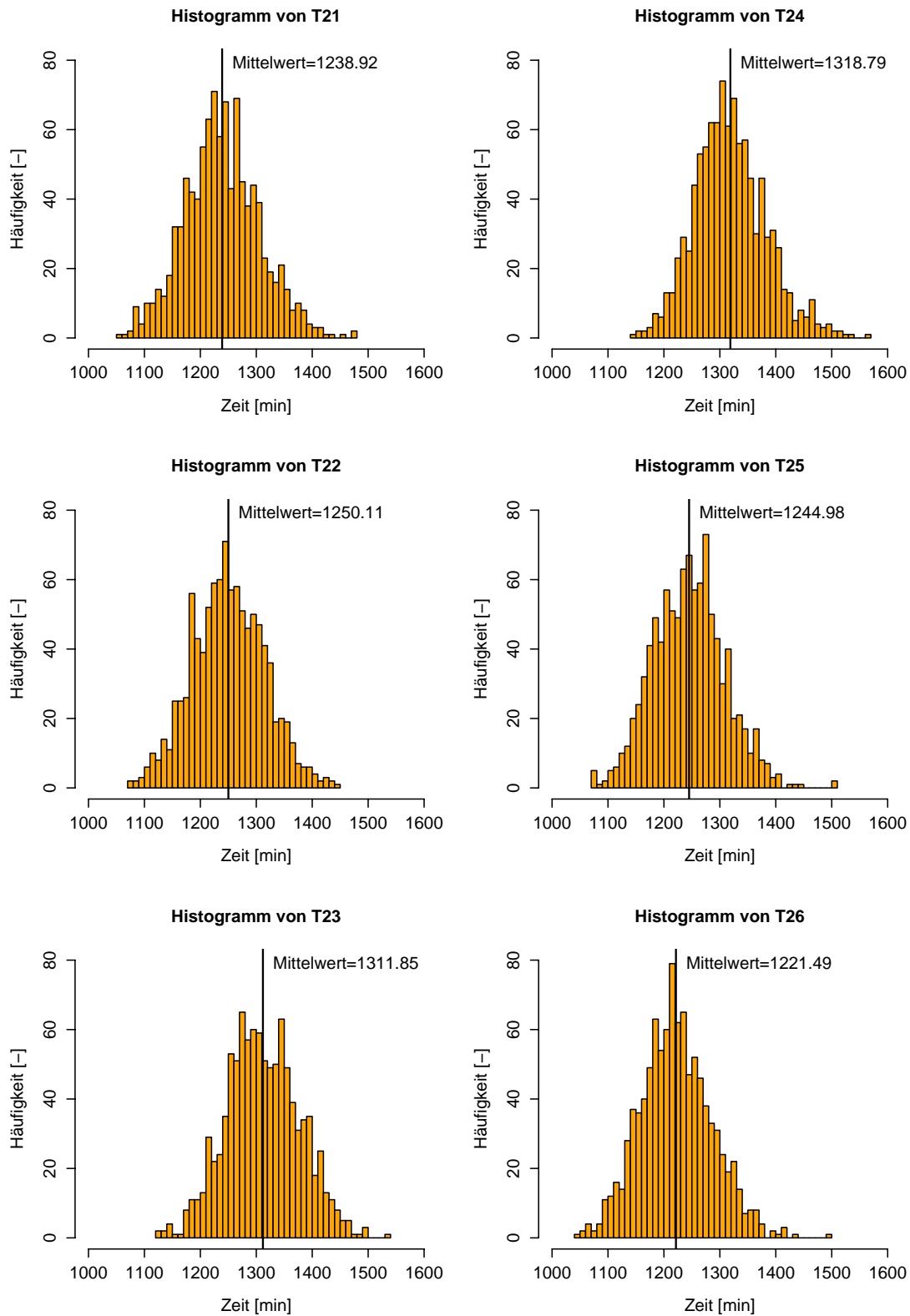


Abbildung 5.12: Histogramme der minimalen Zykluszeiten für Besetzung 2

Bei der Anzahl optimaler Reihenfolgen pro Fallbeispiel finden sich deutliche Unterschiede zwischen Besetzung 1 und Besetzung 2 (Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14). Die maximale Anzahl optimaler Lösungen bei Besetzung 1 entspricht mit durchschnittlich ca. 40.000 dem neunfachen der maximalen Lösungsanzahl bei Besetzung 2, die bei durchschnittlich ca. 4.300 liegt. Ähnliches Verhalten zeigen die beiden Besetzungen hinsichtlich der Dominanz der Ziehungen mit einer niedrigen Anzahl an optimalen Reihenfolgen. Bei Besetzung 1 sind dies Lösungsmengen mit weniger als 1.000 Reihenfolgen, bei Besetzung 2 ist die Anzahl kleiner 100. Mit zunehmender Anzahl an optimalen Reihenfolgen nimmt die Menge der zugehörigen Ziehungen dann ab. Im Mittel liegt die Anzahl erhaltener optimaler Lösungen bei Besetzung 1 zwischen 1.052 (T16) und 4.552 (T13). Für Besetzung 2 errechnen sich die entsprechenden Werte zu 357 (T23) bzw. 921 (T25).

Aus der Anzahl optimaler Reihenfolgen lässt sich erkennen, dass sich für Besetzung 1 eine höhere Wahrscheinlichkeit ergibt, mit der zufällig gewählten Startreihenfolge eine optimale Reihenfolge zu treffen. Im Durchschnitt liegt diese bei 0,7 %, kann aber in Einzelfällen bis zu 11,1 % betragen. Für Besetzung 2 liegt diese Wahrscheinlichkeit bei durchschnittlich 0,2 % und erreicht in Einzelfällen maximal 1,4 %. Es ergibt sich also für das stochastische Ablaufplanungsproblem ein gegensätzliches Bild zur deterministischen Betrachtungsweise (vgl. Kapitel 5.2.2), bei der die mittlere Wahrscheinlichkeit für Besetzung 2 mit 0,41 % mehr als doppelt so groß ist, wie die der Besetzung 1 (0,15 %).

Die Problematik des deterministischen Ansatzes kann durch die Verwendung eines weiteren Beispiels für die relative Verbesserung auf der Grundlage einer einzelnen Betrachtung verdeutlicht werden. Hierbei wurden nicht wie in Kapitel 5.2.2 die Mittelwerte der Bearbeitungszeiten zu Grunde gelegt, sondern zufällig eine der 1.000 ermittelten Eingangstabellen verwendet. Die darin enthaltenen Bearbeitungszeiten können in der Praxis ebenso auftreten, wenn auch mit geringerer Wahrscheinlichkeit.

Vergleicht man die berechnete relative Zeitersparnis für dieses Beispiel (Abbildung 5.15), so ergibt sich eine um ca. 50 % größere mittlere Zeitersparnis für Besetzung 1. Zudem treten Unterschiede zwischen den einzelnen Fallbeispielen auf. Dies ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass bei einem deterministischen Ablaufproblem in der Regel nur eine Eingangstabelle verwendet wird⁵³. Während bei Verwendung der Mittelwerte die relative Zeitersparnis für T14 bei ca. 4,2 % liegt, zeigt sich bei Verwendung einer zweiten Eingangstabelle eine Verbesserung um nahezu 8 %. Die Ergebnisse der zweiten deterministischen Lösung der Besetzung 2 zeigen nur geringe Unterschiede zu denen der Ersten. Die mittlere

⁵³Eine Eingangstabelle entspricht hier einem Fallbeispiel, z.B. T14.

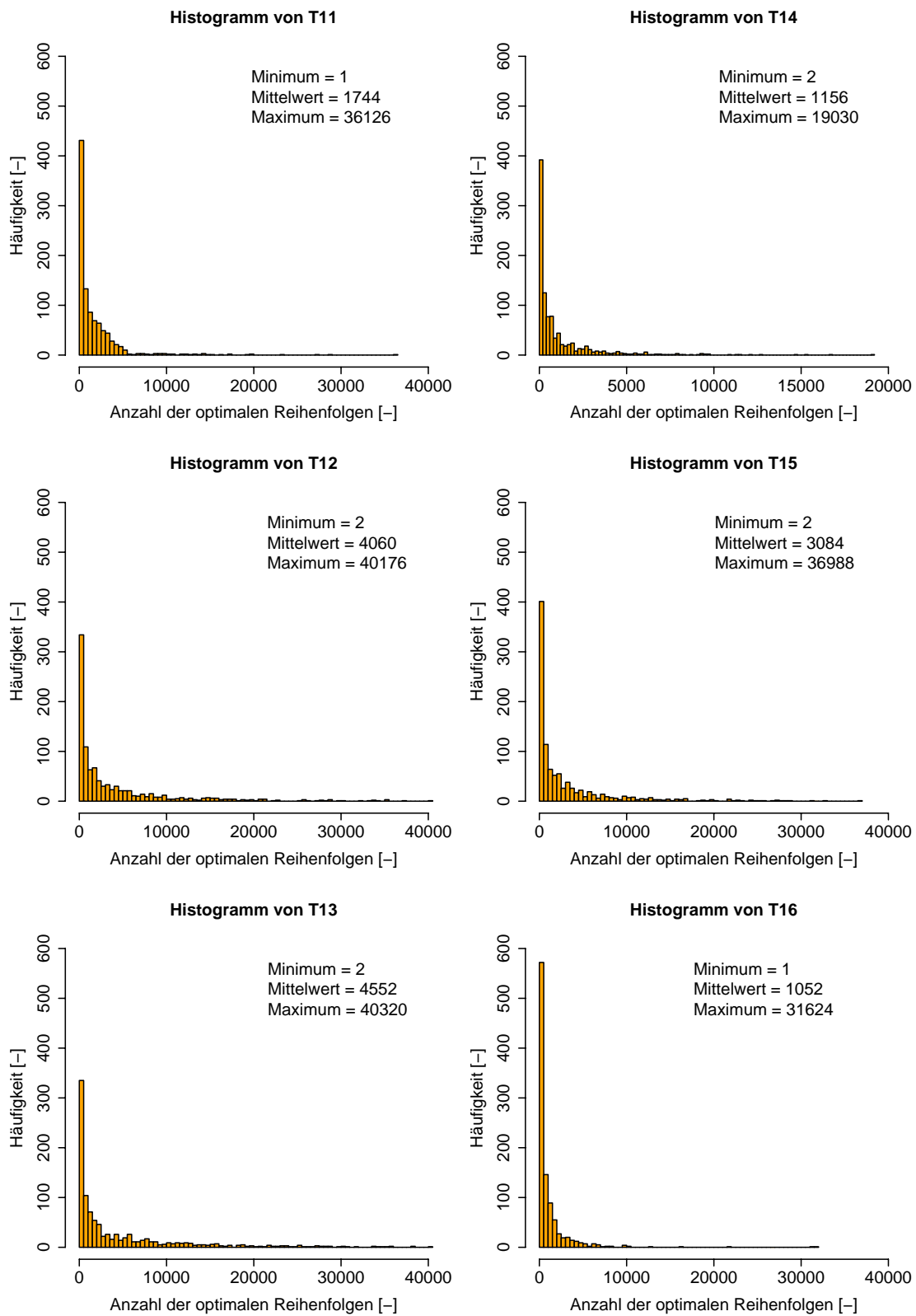


Abbildung 5.13: Histogramm der Anzahl optimaler Reihenfolgen für Besetzung 1

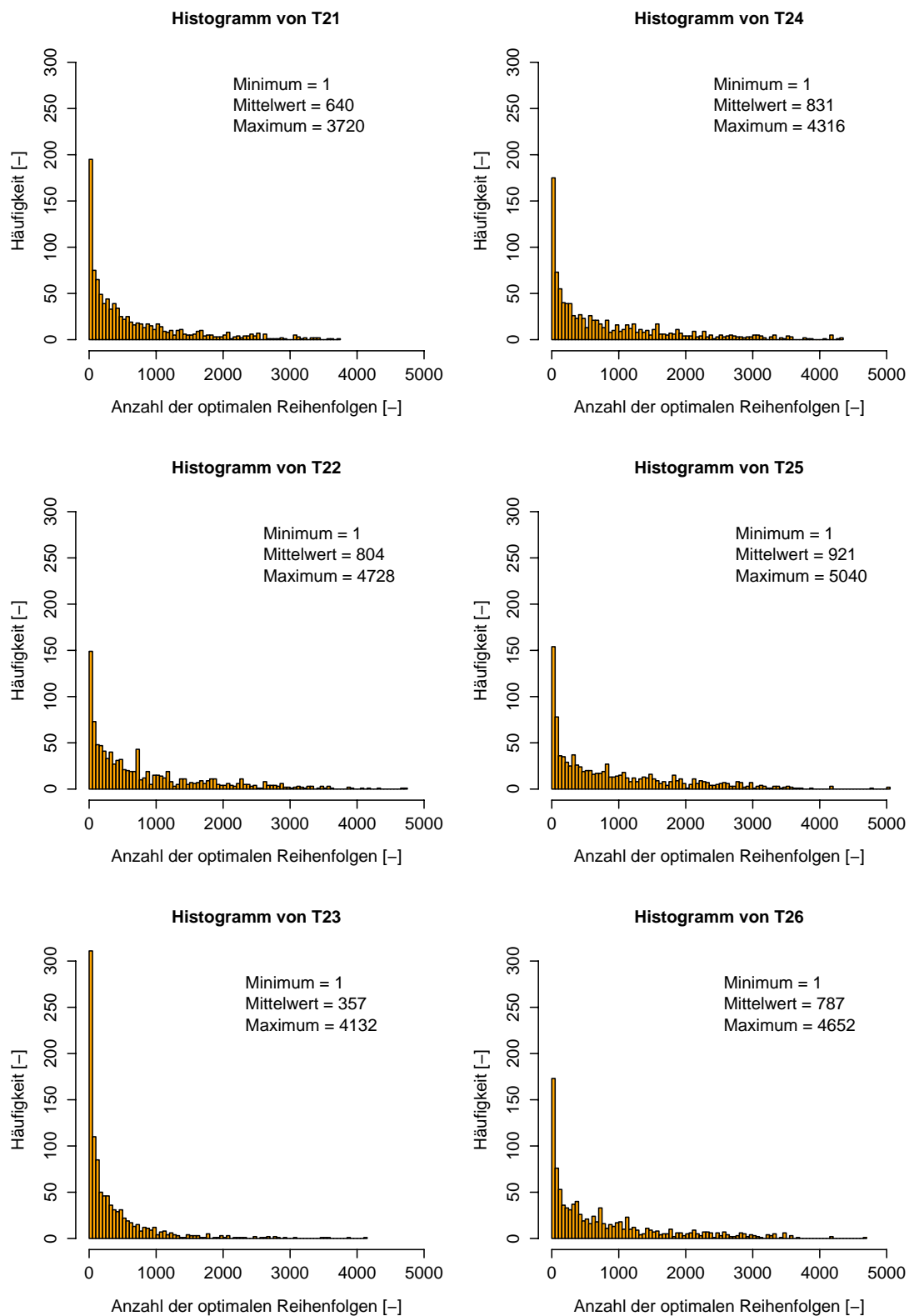


Abbildung 5.14: Histogramm der Anzahl optimaler Reihenfolgen für Besetzung 2

Zeitersparnis liegt mit 4,69 % ca. 10 % höher, die einzelnen Fallbeispiele zeigen eine leichte Steigerung der Verbesserung, grundlegend ergibt sich aber ein vergleichbares Bild.

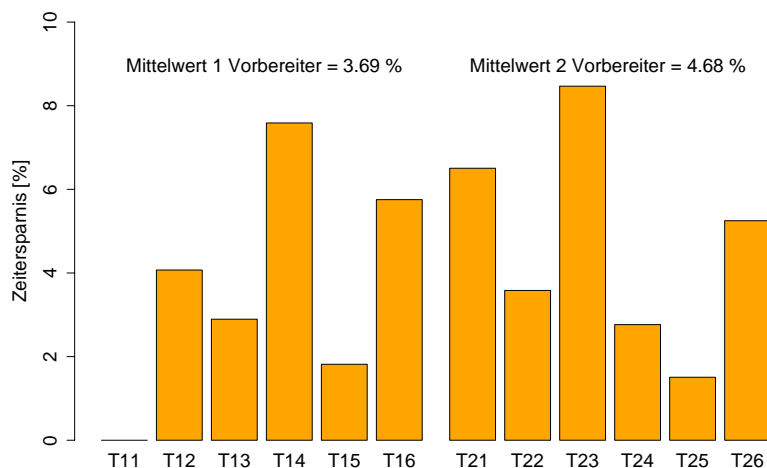


Abbildung 5.15: Relative Verbesserung der Zykluszeit der 12 Fallbeispiele für die deterministischen Eingangstabellen der Ziehung 703

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse des deterministischen Ablaufproblems im Wesentlichen von den verwendeten Eingangstabellen und damit von den berücksichtigten Aufträgen und deren Startreihenfolge abhängen. Dafür repräsentative Annahmen zu treffen, ist auf Grund der herrschenden Unsicherheit unmöglich. Dies gilt sowohl in Bezug auf die Auftragsstruktur als auch im Hinblick auf die tatsächliche Bearbeitungszeit der einzelnen Aufträge. Die mit Hilfe des deterministischen Ablaufproblems möglichen Aussagen stellen damit nur eine Näherung der in der Ausführung zu erwartenden realen Bedingungen dar.

Besonders deutlich wird diese eingeschränkte Aussagekraft bei Betrachtung der Wahrscheinlichkeiten, mit der die Startreihenfolge eine optimale Reihenfolge darstellt. Hierbei entspricht die Bearbeitung in Reihenfolge des Eingangs der Aufträge bereits einem bestmöglichen Ablauf. Die zugehörigen Ergebnisse unterscheiden sich zwischen deterministischem und stochastischem Ansatz in zweierlei Hinsicht. Bei der deterministischen Lösung besitzt diese Wahrscheinlichkeit für Besetzung 2 einen ca. 2,5 mal so hohen Wert wie für Besetzung 1. Bei der stochastischen Betrachtung hingegen liegt der Wert für Besetzung 1 3,5 mal so hoch wie für Besetzung 2. Außerdem unterscheiden sich auch die absoluten Werte deutlich. Der deterministische Ansatz liefert Wahrscheinlichkeiten von

0,15 % (Besetzung 1) bzw. 0,40 % (Besetzung 2), der stochastische von 0,7 % (Besetzung 1) bzw. 0,2 % (Besetzung 2). Zudem lässt sich mit Hilfe des stochastischen Ansatzes bestimmen, dass in Einzelfällen für Besetzung 1 diese Wahrscheinlichkeit auf bis zu ca. 11 % ansteigen kann.

Die Verwendung des stochastischen Ansatzes unter Einsatz eines vollständig enumerativen Verfahrens ermöglicht zudem eine Bewertung der erzielten Zeitersparnis. So stellt sich besonders für Besetzung 1 heraus, dass die möglichen Zeitersparnisse beim stochastischen Ablaufplanungsproblem deutlich höher liegen als beim deterministischen. Aus der Betrachtung der Histogramme der Zeitersparnis wird erkennbar, dass dies aus der stark rechtsschiefen Verteilung der Werte resultiert. Daraus wird ersichtlich, dass durch die Berücksichtigung der Unsicherheiten der Bearbeitungszeiten abgeschätzt werden kann, mit welcher Wahrscheinlichkeit relevante Zeitersparnisse möglich sind. So zeigt sich z.B. für Fallbeispiel T15 (vgl. Abbildung 5.9), dass in ca. 40 % der Fälle die Zeitersparnis kleiner 0,2 % ist, obwohl der Mittelwert der Zeitersparnis bei 0,94 % liegt. Tabelle 5.5 fasst die erzielte Verbesserung des Ablaufs, dargestellt als prozentuale Verringerung der Zykluszeit im Vergleich zu einer Abarbeitung in der Reihenfolge der Auftragsannahme, für die 12 untersuchten Fallbeispiele nochmals zusammen.

Tabelle 5.5: Überblick über die Verbesserung der Gesamtbearbeitungszeit

	Minimum [%]	Mittel [%]	Maximum [%]	Deterministisch [%]
T11	0	1,52	9,12	0,53
T12	0	3,13	8,32	2,39
T13	0	1,56	6,53	0,94
T14	1,50	6,13	13,05	4,27
T15	0	0,94	6,97	0
T16	1,38	7,24	14,98	6,53
T21	3,70	5,64	9,07	5,81
T22	2,10	3,90	6,57	3,98
T23	5,69	7,16	8,98	7,35
T24	0,88	2,72	4,39	2,70
T25	0,94	1,58	4,99	1,50
T26	1,70	4,00	7,20	4,06

Auch die ermittelten Zykluszeiten unterscheiden sich zwischen deterministischem und stochastischem Planungsproblem. Für Besetzung 1 liegen sie bei stochastischer Betrachtung im Mittel 1 %, für Besetzung 2 um 5 % über den Ergebnissen der deterministischen Betrachtung. Berücksichtigt man die Streuung der Zykluszeiten, so liegen zumindest für Besetzung 2 bei ca. 75 % der Ziehungen des stochastischen Ansatzes die minimierten Zykluszeiten höher als bei der deterministischen Betrachtung.

Es zeigt sich also, dass sich durch die Berücksichtigung der Unsicherheiten mittels Formulierung eines stochastischen Ablaufplanungsproblems nicht nur die realen Bedingungen in der Reparaturlackierung besser abbilden lassen, sondern auch die Aussagekraft der Ergebnisse zunimmt. Zudem können die Erkenntnisse im Vergleich zur deterministischen Betrachtung gegensätzlich sein, wobei davon auszugehen ist, dass die Realität durch den stochastischen Ansatz besser abgebildet wird. Die Angabe der Verteilungen der erzielbaren Zeiteinsparungen ermöglicht eine bessere Abschätzung hinsichtlich der in der Praxis zu erwartenden Verbesserungen. Für die Bewertung der Ablaufplanung für den praktischen Einsatz (Kapitel 5.3) werden daher alleinig die Ergebnisse der stochastischen Planung berücksichtigt.

5.3 Bedeutung der Ergebnisse für die Praxis

Die Bewertung der durchgeführten Ablaufplanung für einen praktischen Einsatz in der Reparaturlackierung erfordert eine ökonomische Betrachtung der erzielten Ergebnisse. Auf Grund der Unterschiede werden die gewählten Besetzungen 1 und 2 zunächst getrennt betrachtet.

Für Besetzung 1 ergibt sich im Mittel eine Zeitersparnis von 3,42 % für den betrachteten Planungszeitraum von vier Tagen. Hochgerechnet auf ein Jahr mit 210 Arbeitstagen pro Mitarbeiter und unter der Annahme, dass die mittlere Verbesserung übertragbar ist auf andere Auftragsstrukturen, berechnet sich die Anzahl eingesparter Arbeitsstunden unter Zugrundelegung einer täglichen Arbeitszeit von 7,7 Stunden zu ca. 55 Stunden pro Lackierer. Diese Zeitersparnis kann für eine Steigerung der Kapazität verwendet werden. Bei Berücksichtigung eines Stundenverrechnungssatzes (SVS) von netto 87 € je Lackierer (vgl. Kapitel 4.1.2) führt diese Kapazitätserweiterung zu einer Umsatzsteigerung von 14.355 €/a. Unter Verwendung des branchenüblichen, im SVS berücksichtigten Gewinns (vgl. Gleichung 4.1) von 30 % [96] ergibt sich eine jährliche Gewinnsteigerung von 4.307 €/a.

Neben einer Einsparung bei Personalkosten können bei Besetzung 1 durch Reduzierung der Betriebszeit der Kombikabine als Folge der Gruppierung von Aufträgen auch Energiekosten eingespart werden. Bei der Berechnung der Betriebszeitreduzierung muss berücksichtigt werden, dass es zwischen den Planungsperioden zu Überlappungen kommen kann, d.h. während der letzte Auftrag der Planungsperiode 1 in der Kombikabine steht, kann bereits mit der Vorbereitung des ersten Auftrags der Planungsperiode 2 begonnen werden (vgl. z.B. Abbildung 5.5). Zudem muss die konstante Vorheizdauer für die Kabine beachtet werden. Diese fällt immer an, unabhängig von der täglichen Betriebsdauer der Kombikabine.

In Rahmen dieser Arbeit wird die Zeitersparnis beim Betrieb der Kombikabine unter der Annahme berechnet, dass eine Gruppierung der zu lackierenden Aufträge (M_2) vergleichbar der Korrektur in Abbildung 5.5 möglich ist. Dies ist zutreffend, da bei Aufträgen der Besetzung 1 der Zeitbedarf der Vorbereitung größer ist als der der Lackierung/Trocknung, sofern es sich nicht um kleinflächige einteilige Aufträge handelt. Diese treten jedoch bei der Reparaturlackierung eher selten auf. Die letztendliche Reduzierung der Betriebszeit der Kombikabine errechnet sich dann aus der Summe der Bearbeitungszeiten auf Maschine 1 (Vorbereitung) abzüglich der Summe der Bearbeitungszeiten der ersten acht Aufträge auf Maschine 2 (Lackierung/Trocknung) plus 20 Minuten Vorheizdauer.

Grundlage für die Berechnung der jährlichen Reduzierung der Betriebszeit sind die aktuell angenommenen Betriebsstunden der Lackierkabine. Diese sind identisch mit den Betriebsstunden der Werkstatt, da in der Praxis die Lackierkabine zu Arbeitsbeginn ein- und bei Arbeitsende abgeschaltet wird. Sie belaufen sich auf 7,7 Stunden täglich und damit auf 1.848 Stunden jährlich bei angenommenen 240 Arbeitstagen. Da bei Aufträgen der Besetzung 1 die Vorbereitung in der Regel den höchsten Zeitbedarf aufweist, kann die aus den Studien ermittelte relative Betriebszeitreduzierung (Tabelle 5.6) mit der für das Gesamtjahr gleichgesetzt werden.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich eine mittlere⁵⁴ jährliche Verkürzung der Betriebsdauer der Kabine von 17,6 % oder ca. 325 Stunden, die durch ein späteres Einschalten der Kombikabine bzw. durch besser planbare Start- und Endzeitpunkte des Kabineneinsatzes (vgl. Abbildung 5.5) erreicht wird.

Unter Verwendung einer mittleren Wärmeleistung der Kabine von 90 kW und einer mittleren elektrischen Leistung von 16,7 kW [19] liegt die jährliche Energieeinsparung bei 29.340 kWh thermisch und 5.444 kWh elektrisch. Aus der Einsparung an thermischer

⁵⁴Auf Grund der unterschiedlichen Zykluszeiten wird hier das gewichtete und nicht das arithmetische Mittel der relativen Betriebszeitreduzierung der Berechnung zu Grunde gelegt.

Tabelle 5.6: Einsparmöglichkeiten bei der Betriebszeit der Kombikabine für Besetzung 1

	T11	T12	T13	T14	T15	T16
Mittlere Zykluszeit [min]	1.609,79	1.782,45	1.904,05	1.707,47	1.660,33	1.738,28
Mittlere Betriebszeit- reduzierung [min]	210,86	398,58	439,79	225,83	220,96	330,56
Relative Betriebszeit- reduzierung [%]	13,1	22,4	23,1	13,2	13,3	19,0

Energie resultiert eine Reduzierung des Gasverbrauchs bei Annahme eines feuerungstechnischen Wirkungsgrad von 92 % [64] um 3.051 m^3 . Die erzielbaren Kosteneinsparungen⁵⁵ aus der Verringerung des Energieverbrauchs belaufen sich dann auf insgesamt rund 2.006 €/a für Besetzung 1.

Für Besetzung 1 führt die Einsatzplanung im Mittel zu einer Gesamtgewinnsteigerung von 6.313 €/a . Dies entspricht einer Zunahme um ca. 5,6 % bei gleichbleibendem SVS. Anstatt diesen Gewinn zu realisieren, hat die Werkstatt auch die Möglichkeit auf den zunehmenden Wettbewerb und den zu erwartenden Rückgang der Auftragszahlen (vgl. Kapitel 4.1.1) mit einer Absenkung des SVS um 5,6 % zu reagieren, um sich damit Vorteile gegenüber Konkurrenten zu verschaffen.

Die wirtschaftlichen Vorteile der Ablaufplanung bei Besetzung 2 ergeben sich allein aus der möglichen Zeitersparnis. Die Gantt-Charts des deterministischen Lösungsansatzes (Abbildungen 5.6 und 5.7) verdeutlichen, dass bei dieser Besetzung Totzeiten in der Kombikabine nicht auftreten. Die berechnete Zeitersparnis aus der verbesserten Auftragsbearbeitung liegt bei 4,17 %. Unter Verwendung der gleichen Annahmen wie bei Besetzung 1 errechnet sich daraus eine auf das Jahr betrachtete Zeiteinsparung von insgesamt ca. 269 Stunden. Wird diese Zeit für eine Kapazitätserweiterung verwendet, kann eine Umsatzsteigerung von 23.403 €/a resultieren.

Da bei Besetzung 2 auf Grund der höheren Anzahl an Lackierern eine größere Anzahl an Aufträgen bearbeitet werden kann, ist mit einem höheren Gesamtumsatz zu rechnen.

⁵⁵Die Kosten der thermischen Energie aus Erdgaseinsatz werden mit 4,10 Cent/kWh angenommen, die der elektrischen Energie mit 14,75 Cent/kWh. Beide Angaben sind Nettopreise der Stadtwerke Karlsruhe mit Stand vom 20.04.2005 (vgl. www.stadtwerke-karlsruhe.de).

Geht man vom gleichen SVS aus wie bei Besetzung 1, ist mit einem maximalen Jahresumsatz von ca. 562.716 € zu rechnen⁵⁶. Auf Grund des verbesserten Personaleinsatzes und als Folge der höheren Kabinenauslastung (vgl. Abbildung 5.5 und Abbildung 5.7) ergibt sich eine Gesamtverbesserung der Auslastung, bezogen auf produktive Stunden, um 2,7 % für Besetzung 2 im Vergleich zu Besetzung 1. Wird der gleiche SVS angesetzt, kann der prozentuale Gewinn von 30 % auf 32,7 % gesteigert werden. Aus der erzielbaren Umsatzsteigerung resultiert folglich eine absolute Gewinnsteigerung um ca. 7.653 €/a.

Der Betrieb mit der Besetzung 2 hat also die Möglichkeit, seinen SVS um die erzielte Ablaufverbesserung, d.h. um 4,17 % zu reduzieren. Zudem kann er seine Gewinnmarge auf 30 % reduzieren und damit den SVS um zusätzliche 2,7 % verringern. Insgesamt ist folglich eine Absenkung des SVS um 6,87 % realisierbar. Die Absenkung des SVS für die Besetzung 2 fällt damit um 21 % höher aus als bei Besetzung 1.

Die berechneten Einsparungen basieren sowohl für Besetzung 1 als auch für Besetzung 2 auf den mittleren Einsparpotenzialen, wie sie sich aus den Ergebnissen des stochastischen Ablaufproblems ergeben. Das bedeutet, dass sie nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit diesen Wert erreichen bzw. darüber liegen. Betrachtet man die Ergebnisse aller Fallbeispiele der einzelnen Besetzungen gemeinsam (Abbildungen 5.16 und 5.17), wird deutlich, dass in ca. 60 % der Fälle bei Besetzung 1 eine Ersparnis geringer als die im Mittel vorliegenden 3,42 % erzielt wird. Für Besetzung 2 liegt in ca. 56 % der Lösungen die Verbesserung unter dem Mittelwert von 4,17 %.

Diese Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss der Unsicherheit auf die Ablaufplanung handwerklicher Tätigkeiten und im Speziellen der Autoreparaturlackierung. Dabei zeigt sich nicht nur eine Streuung zwischen den erzielbaren Verbesserungen der einzelnen Fallbeispiele, sondern auch der Ergebnisse hinsichtlich einer möglichen Verbesserung. So ist die berechnete Ergebnissteigerung der Betriebe nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 40 % (Besetzung 1) bzw. 44 % (Besetzung 2) zu erreichen bzw. zu übertreffen.

⁵⁶Hierbei wird von einem Auslastungsgrad von 100 % und einer Jahresarbeitszeit von 210 Tagen mit je 7,7 Stunden ausgegangen.

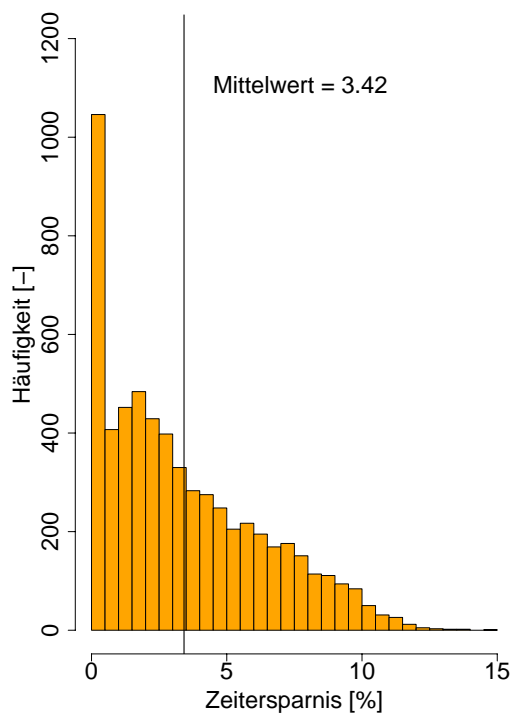


Abbildung 5.16: Histogramm der relativen Verbesserung der Zykluszeit für alle Fallbeispiele der Besetzung 1

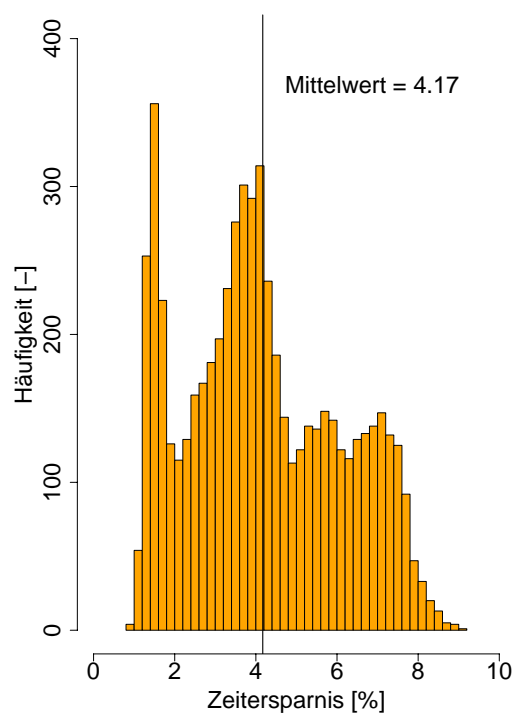


Abbildung 5.17: Histogramm der relativen Verbesserung der Zykluszeit für alle Fallbeispiele der Besetzung 2

6 Handlungsempfehlungen für Reparaturlackierbetriebe

Der praktische Einsatz softwaregestützter Methoden der Ablaufplanung in kleinen und mittleren Betrieben der Reparaturlackierung ist auf Grund der vergleichsweise geringen Verbesserung der Abläufe und der damit verbundenen Unsicherheit nicht gerechtfertigt. Nichtsdestotrotz ist es möglich, auf Grundlage der erzielten Lösungen einfache Regeln für eine Verbesserung der Auftragsreihenfolge abzuleiten, mit deren Hilfe ein Teil der Einsparungen in der Praxis erreicht werden kann (Kapitel 6.1). Der Vorteil dieser Prioritätsregeln ist deren einfache praktische Umsetzung, die keinen Einsatz softwarebasierter Instrumente der Planung erfordert.

Dazu ist eine detaillierte Betrachtung der Lösungen bzw. der Strukturen der optimalen Reihenfolgen notwendig (vgl. Kapitel 5.2.3). Diese Untersuchung ist nur deshalb möglich, da ein rein enumeratives Verfahren der Ablaufplanung gewählt wurde, dessen Ergebnisse sämtliche optimalen Reihenfolgen darstellen. Das hierbei angewendete Vorgehen zur Identifizierung möglicher Regeln ist vergleichbar mit der Bestimmung von Ausschlusskriterien zur Reduzierung der möglichen Lösungen bei Ausschlussverfahren. Ziel der Herausarbeitung der Prioritätsregeln ist die Bestimmung der Ablaufverbesserung, die durch ihre Anwendung in der Praxis erzielt werden kann.

Neben den aus der Reihenfolgenplanung ableitbaren Handlungsempfehlungen können aus den Daten der Arbeitszeitstudien zusätzliche Empfehlungen für einen verbesserten Arbeitsablauf formuliert werden (Kapitel 6.2). Sie basieren auf einer Schwachstellenanalyse unter Einsatz eines Modells zur Abbildung zeitbasierter Stoffströme⁵⁷. Mit Hilfe dieser Handlungsempfehlungen kann ein zusätzliches Einsparpotenzial realisiert werden.

⁵⁷Für eine genauere Beschreibung des Modells sei u.a. auf [74, 75] verwiesen.

6.1 Reihenfolge der Auftragsbearbeitung

Zunächst werden die Anfangs- und Endziffern der optimalen Sequenzen aller Fallbeispiele beider Besetzungen betrachtet. Diese sollen Aufschluss darüber geben, ob es unter den jeweils neun Aufträgen eines Fallbeispiels einige mit einer besonderen Eigenschaft gibt, die ihre Position innerhalb einer optimalen Reihenfolge (erster oder letzter Job) bestimmt. Liegen diese Besonderheiten vor, können entsprechende Prioritätsregeln formuliert werden. Deren Umsetzung führt zu einer Anordnung der Aufträge in einer bestimmten Reihenfolge.

In einem nächsten Schritt ist dann die Wahrscheinlichkeit, mit der die vorsortierte Reihenfolge einem Optimum entspricht, zu bestimmen. Daraus lässt sich dann die betriebswirtschaftliche Konsequenz z.B. in Form einer resultierenden Gewinnsteigerung berechnen. Diese basiert auf den selben Annahmen, wie sie in Kapitel 5.3 bereits für die Bewertung der Ablaufplanung im Kontext der Reparaturlackierung verwendet werden.

6.1.1 Bearbeitungsreihenfolge bei drei Maschinen und einem Vorbereiter

Für Besetzung 1 zeigt die Untersuchung der optimalen Reihenfolgen, dass es meist ein bzw. zwei Aufträge gibt, die bevorzugt am Ende der optimalen Reihenfolge zu finden sind (vgl. Tabelle 6.1). Zudem gibt es Aufträge, die nie als Letzte bearbeitet werden⁵⁸. Bei den Anfangsziffern, d.h. den Nummern der zuerst bearbeiteten Aufträge der optimalen Auftragsreihenfolge, gibt es jedoch weder eine dominierende Auftragsnummer noch einen Auftrag, der nie zuerst bearbeitet wird (vgl. Tabelle 6.2). Die Ableitung einer Regel für die Bestimmung des zuerst zu bearbeitenden Auftrags ist daher nicht möglich. Für die weiteren Untersuchungen der Fallbeispiele der Besetzung 1 sind darum ausschließlich die Endziffern, d.h. die Nummern der zuletzt bearbeiteten Aufträge der optimalen Auftragsreihenfolgen, von Interesse.

⁵⁸Die Tatsache, dass bei keinem der gewählten Fallbeispiele der Auftrag Nr. 5 als letzter bearbeitet wird, ist eine zufällige Gegebenheit und nicht etwa ein Fehler z.B. in der Programmierung. Zum Nachweis wurden erneute Rechnungen unter Einsatz der gleichen Aufträge, aber einer unterschiedlichen Startreihenfolge durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Kontrollrechnungen sind nicht in der Arbeit enthalten.

Tabelle 6.1: Häufigkeit der Nummer des zuletzt bearbeiteten Auftrags (= Endziffer) der optimalen Reihenfolgen für Besetzung 1

Endziffer	T11	T12	T13	T14	T15	T16
1	0	982.822	27.224	0	0	95.195
2	218.329	2.165.624	1.658.468	538.529	483.280	311.850
3	17.442	573.670	1.492.228	78.197	0	606.176
4	56.923	15.138	103.260	34.372	111.662	14.876
5	0	0	0	0	0	0
6	251.051	232.506	10.120	195.257	502.764	4.999
7	0	4.726	50.112	0	58.647	0
8	173.114	75.538	372.972	310.031	324.834	19.856
9	1.028.004	10.752	838.176	0	1.603.051	0
Summe:	1.744.863	4.060.776	4.552.560	1.156.386	3.084.238	1.052.952

Tabelle 6.2: Häufigkeit der Nummer des zuerst bearbeiteten Auftrags (= Anfangsziffer) der optimalen Reihenfolgen für Besetzung 1

Anfangsziffer	T11	T12	T13	T14	T15	T16
1	252.334	377.364	588.107	133.746	427.834	110.269
2	153.980	223.115	346.933	71.116	291.295	89.789
3	185.247	424.218	367.928	168.386	339.892	55.566
4	262.634	510.595	557.783	49.548	434.531	111.324
5	291.152	585.470	621.531	149.150	491.722	100.105
6	145.429	460.725	561.236	146.777	283.835	118.419
7	171.269	507.562	561.848	215.608	317.059	173.244
8	180.365	483.592	502.300	90.858	317.339	166.923
9	102.453	488.135	444.894	131.197	180.731	127.313
Summe:	1.744.863	4.060.776	4.552.560	1.156.386	3.084.238	1.052.952

Durch eine Betrachtung der Charakteristika einer zufälligen Auswahl an zuletzt bearbeiteten Aufträgen der Besetzung 1 konnten Hypothesen formuliert werden, deren Gültigkeit für sämtliche optimalen Reihenfolgen bzw. die zu Grunde liegenden Auftragsdaten un-

tersucht wurde. Für die Fallbeispiele der Besetzung 1 ergaben sich folgende zu testende Hypothesen:

- Der Job k an der letzten Stelle ist derjenige, für den die Summe der Bearbeitungszeiten auf den Maschinen M_2 und M_3 minimal ist:

$$p_{2k} + p_{3k} = \min_{j=1}^9 \{p_{2j} + p_{3j}\} \quad (6.1)$$

- Der Job k an der letzten Stelle ist derjenige, der Gleichung 6.1 erfüllt und für den zusätzlich gilt, dass die Bearbeitungszeit auf Maschine M_2 (Lackier- und Trockenzeit) kleiner ist als die der Maschine M_1 (Vorbereitungszeit):

$$p_{2k} \leq p_{1k} \quad (6.2)$$

Mit Hilfe der Hypothese 1 können die Endziffern der optimalen Reihenfolgen bei zwei der sechs Fallbeispiele vollständig erklärt werden. Bei den verbleibenden vier Fallbeispielen zeigt sich keine eindeutige Tendenz (vgl. Tabelle 6.3). Die Hinzunahme der zweiten Hypothese (Gleichung 6.1) führt bei allen Fallbeispielen zu einer Erklärung von mindestens 85 % der erhaltenen Lösungen (vgl. Tabelle 6.4).

Tabelle 6.3: Ergebnisse des Tests auf Hypothese 1 für Besetzung 1

	T11	T12	T13	T14	T15	T16
<i>TRUE</i>	856.861	4.060.776	4.552.560	429.643	1.008.322	681.949
<i>FALSE</i>	888.002	0	0	726.743	2.075.916	371.003
Summe:	1.744.863	4.060.776	4.552.560	1.156.386	3.084.238	1.052.952

Tabelle 6.4: Ergebnisse des Tests auf Hypothese 2 für Besetzung 1

	T11	T12	T13	T14	T15	T16
<i>TRUE</i>	1.488.353	4.060.776	4.551.564	1.034.974	2.994.402	970.649
<i>FALSE</i>	256.510	0	996	121.412	89.836	82.303
Summe:	1.744.863	4.060.776	4.552.560	1.156.386	3.084.238	1.052.952

Wird nun eine optimale Reihenfolge allein dadurch bestimmt, dass der Auftrag, der die beiden formulierten Hypothesen erfüllt, an die letzte Stelle gestellt wird, so reduziert sich die Anzahl der Lösungen auf $8! = 40320$ pro Fallbeispiel. Für 1.000 Ziehungen ergibt sich dann ein maximal möglicher Umfang der Lösungsmenge von $4,03 \cdot 10^7$. Für die Wahrscheinlichkeit, allein durch Bestimmung des Auftrags an der letzten Stelle eine optimale Reihenfolge zu erhalten, errechnen sich dann für die hier untersuchten Fallbeispiele der Besetzung 1 Werte zwischen 2,6 % und 11,3 % und ein Mittelwert von 6,5 %.

Für die Praxis der Reparaturlackierung müssen die Hypothesen (Gleichungen 6.1 und 6.2) in für Aufträge charakteristische Größen umformuliert werden, um deren einfache Umsetzung zu ermöglichen. Auf Grund der Abhängigkeiten der Bearbeitungszeit werden dafür die Parameter *Bearbeitungsfläche* und *Lackstufe* verwendet. Die Hypothesen lassen sich dann durch folgende Handlungsempfehlungen beschreiben:

Bearbeite von den Aufträgen mit der geringsten Bauteilfläche denjenigen **zuletzt**, der den größten Anteil an Oberflächenlackierung (Lackstufe 2) aufweist. Liegen keine Aufträge mit Oberflächenlackierung vor, ist derjenige Auftrag **zuletzt** zu bearbeiten, der den größten Anteil ausgebauter Neuteile (Lackstufe 1) besitzt (= Gleichung 6.1).

Bei vorhandener Oberflächenlackierung ist zudem darauf zu achten, dass die Teile im ausgebauten Zustand vorliegen bzw. die Bearbeitungsflächen bei Neuteilen **größer** als 115 dm^2 (ausgebaut) bzw. **größer** als 216 dm^2 (eingebaut) sind (= Gleichung 6.2)

Mittels Anwendung der hier abgeleiteten Handlungsempfehlungen für die Reihenfolge der Auftragsbearbeitung kann bei einer Besetzung mit drei Arbeitern in der Reparaturlackierung (Besetzung 1) durchschnittlich 6,5 % (s.o.) der berechneten 3,42 % Zeitersparnis (vgl. Kapitel 5.2.3) umgesetzt werden. Die daraus berechnete Gewinnsteigerung als Folge der Kapazitätserweiterung liegt dann nur noch bei ca. 280 €/a statt 4.307 €/a.

Durch die zusätzliche Berücksichtigung einer möglichen Gruppierung der zu lackierenden Aufträge (vgl. Abbildung 5.5) lässt sich auf Grund der resultierenden Einsparungen beim Energieverbrauch eine zusätzliche Gewinnsteigerung von durchschnittlich 2.006 €/a erzielen (vgl. Kapitel 5.3). Insgesamt ist dadurch eine maximale Steigerung des Gewinns um ca. 2.286 €/a im Jahr für Besetzung 1 möglich, sofern die beschriebenen Handlungsempfehlungen zur Vorsortierung der angenommenen Aufträge eingehalten werden.

6.1.2 Bearbeitungsreihenfolge bei drei Maschinen und zwei Vorbereitern

Die Untersuchung der Anfangs- bzw. Endziffern der optimalen Reihenfolgen der Fallbeispiele der Besetzung 2 zeigen ein einheitlicheres Bild als bei Besetzung 1 (vgl. Tabellen 6.5 und 6.6). Sowohl zu Beginn als auch zum Ende werden bestimmte Aufträge bevorzugt. Im Extremfall, wie z.B. bei Fallbeispiel T26, wird bei sämtlichen optimalen Lösungen derselbe Auftrag zuletzt bzw. zuerst bearbeitet.

Tabelle 6.5: Häufigkeit der Nummer des zuletzt bearbeiteten Auftrags (= Endziffer) der optimalen Reihenfolgen für Besetzung 2

Endziffer	T21	T22	T23	T24	T25	T26
1	0	0	0	0	167.165	0
2	7.389	0	4.951	309.671	546.881	0
3	633.021	0	30.321	496.308	187.960	0
4	0	72	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	322.246	0	13.352	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	20.111	5.757	0
9	0	804.511	0	5.323	0	787.458
Summe:	640.410	804.583	357.518	831.413	921.115	787.458

Die optimalen Reihenfolgen der Fallbeispiele der Besetzung 2 wurden daraufhin zunächst auf die für Besetzung 1 formulierten Hypothesen getestet (vgl. Gleichungen 6.1 und 6.2 in Kapitel 6.1.1). Hierbei zeigt sich, dass die Bedingung hinsichtlich des Minimums der Summe der Bearbeitungszeiten auf Maschine 2 und 3 von der Mehrheit der Reihenfolgen nicht erfüllt wird (Tabelle 6.7). Die zusätzliche Berücksichtigung der Bedingungen 6.2 führt sogar zu einer Verschlechterung der Ergebnisse (Tabelle 6.8). Dies erklärt sich aus der Tatsache, dass auf Grund der Halbierung der Vorbereitungszeit bei den berücksichtigten Aufträgen der Zeitbedarf für Lackierung/Trocknung (p_{2k}) meist größer ist als der für die Vorbereitung (p_{1k}) (vgl. hierzu Tabelle B.6 bis Tabelle B.11 in Anhang B).

Tabelle 6.6: Häufigkeit der Nummer des zuerst bearbeiteten Auftrags (= Anfangsziffer) der optimalen Reihenfolgen für Besetzung 2

Anfangsziffer	T21	T22	T23	T24	T25	T26
1	0	0	0	0	676.507	0
2	0	0	0	518.430	172.312	0
3	0	0	325.722	284.199	32.559	0
4	0	804.511	0	132	0	787.458
5	0	72	0	0	0	0
6	0	0	31.796	96	36.675	0
7	0	0	0	0	0	0
8	640.410	0	0	22.489	0	0
9	0	0	0	6.067	3.062	0
Summe:	640.410	804.583	357.518	831.413	921.115	787.458

Tabelle 6.7: Ergebnisse des Tests auf Hypothese 1 für Besetzung 2

	T21	T22	T23	T24	T25	T26
<i>TRUE</i>	296.048	165.548	227.900	347.599	400.563	500.569
<i>FALSE</i>	344.362	639.035	129.618	483.814	520.552	286.889
Summe:	640.410	804.583	357.518	831.413	921.115	787.458

Tabelle 6.8: Ergebnisse des Tests auf Hypothese 2 für Besetzung 2

	T21	T22	T23	T24	T25	T26
<i>TRUE</i>	3.097	12.090	235	22.691	67.260	9.305
<i>FALSE</i>	637.313	792.493	357.283	808.722	853.855	778.153
Summe:	640.410	804.583	357.518	831.413	921.115	787.458

Daher war die Formulierung einer weiteren Regel für die Ableitung einer Handlungsempfehlung für die Praxis notwendig. Nach detaillierter Betrachtung zufällig ausgewählter Eingangstabellen unterschiedlicher Fallbeispiele und den zugehörigen optimalen Lösungen konnte folgende zu testende Hypothese aufgestellt werden:

- Eine Reihenfolge ist optimal, wenn folgende Bedingungen der Reihe nach erfüllt sind:

1. Der Job k , der zuerst bearbeitet wird, besitzt die geringste Bearbeitungszeit auf M_1 :

$$p_{1k} = \min_{j=1}^9 \{p_{1j}\} \quad (6.3)$$

2. Der Job l , der zuletzt bearbeitet wird, besitzt die geringste Bearbeitungszeit auf M_3 :

$$p_{3l} = \min_{j=1}^9 \{p_{3j}\} \vee l \neq k \quad (6.4)$$

Die Ergebnisse des Tests für diese dritte Hypothese zeigen eindeutige Ergebnisse. Sie gilt bei allen Fallbeispielen für mindestens 83% der Reihenfolgen und erklärt im Mittel über alle Fallbeispiele 94,2% der optimalen Lösungen (vgl. Tabelle 6.9). Durch eine Bestimmung der ersten und der letzten Position der Reihenfolge auf Grundlage der definierten Hypothese wird die Zahl der denkbaren Lösungen eines Fallbeispiels auf $7! = 5.040$ pro Ziehung eingeschränkt. Durch einen Vergleich der erhaltenen Anzahl optimaler Lösungen für das stochastische Ablaufplanungsproblem und unter Berücksichtigung des berechneten Anteils an Lösungen, der mit Hilfe der Hypothese 3 (Gleichungen 6.3 und 6.4) erklärt werden kann, berechnet sich die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit, mit der eine auf dieser Grundlage bestimmte Reihenfolge optimal ist, zu 13,5%.

Tabelle 6.9: Ergebnisse des Tests auf Hypothese 3 für Besetzung 2

	T21	T22	T23	T24	T25	T26
<i>TRUE</i>	639.265	804.511	293.550	693.066	875.995	787.140
<i>FALSE</i>	1.145	72	63.968	138.347	45.120	318
Summe:	640.410	804.583	357.518	831.413	921.115	787.458

Aus der für die Besetzung 2 entscheidenden Prioritätsregel hinsichtlich der optimalen Reihenfolge lässt sich für die praktische Anwendung im Rahmen der Reparaturlackierung eine Handlungsempfehlung ableiten. Diese muss sich wiederum an den Parametern *Bearbeitungsfläche* und *Lackstufe* orientieren und lässt sich folgendermaßen formulieren:

Bearbeite von den Aufträgen mit der geringsten Bauteilfläche denjenigen **zuerst**, der den größten Anteil an Oberflächenlackierung (Lackstufe 2) aufweist, unabhängig davon, ob das Bauteil ein- oder ausgebaut bearbeitet wird und unabhängig vom Untergrundmaterial (Metall oder Kunststoff). Liegen keine Aufträge mit Oberflächenlackierung vor, ist derjenige Auftrag **zuerst** zu bearbeiten, der den größten Anteil an geschraubten Neuteilen (Lackstufe 1) besitzt (= *Gleichung 6.3*)

Bearbeite von den verbleibenden Aufträgen denjenigen **zuletzt**, der die geringste Bearbeitungsfläche besitzt, unabhängig von der Lackstufe. Existieren zwei Aufträge mit vergleichbarer Bearbeitungsfläche, ist derjenige vorzuziehen, der den höheren Anteil ausgebaute Bauteilfläche besitzt (= *Gleichung 6.4*).

Durch den Einsatz dieser Handlungsempfehlung für das Vorsortieren einer Menge zu bearbeitender Aufträge kann eine Reparaturwerkstatt mit vier Angestellten in der Lackierung im Mittel eine Zeitersparnis von 0,6 % erzielen. Diese entsprechen 13,5 % der als Mittel berechneten 4,17 % Zeitersparnis bei Verwendung einer optimalen Auftragsreihenfolge (vgl. Kapitel 5.2.3). Durch eine entsprechende Steigerung der Kapazität führt diese Zeitersparnis zu einer Gewinnsteigerung von ca. 1.102 €/a. Diese mittlere Gewinnsteigerung lässt sich allerdings nur mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 44 % erreichen bzw. übertreffen (vgl. Kapitel 5.3). Da bei Besetzung 2 die Kombikabine bereits voll ausgelastet ist (vgl. Abbildung 5.7), besteht auch kein zusätzliches Einsparpotenzial durch Reduzierung des Energieverbrauchs, wie bei Besetzung 1.

Auch die Einsparungen unter Einsatz der formulierten Handlungsempfehlungen sind nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu erreichen. Da die Ziehung einer der mittels Prioritätsregeln erhaltenen Reihenfolgen zufällig und damit gleichwahrscheinlich ist, wird die Wahrscheinlichkeit der Verbesserungen ausschließlich von der berechneten Verteilung der erzielbaren Zeitersparnisse der stochastischen Ablaufplanung bestimmt (vgl. Kapitel 5.3). Demnach werden die Einsparungen bei Besetzung 1 mit einer Wahrscheinlichkeit von 40 % erreicht bzw. übertroffen. Für Besetzung 2 liegt dieser Wert bei 44 %.

6.2 Gute Betriebspraxis

Neben den bereits aufgezeigten Verbesserungen durch eine optimierte Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge existieren weitergehende Prozessverbesserungen im gesamten Betriebsablauf. Diese setzen bei den einzelnen Arbeitsschritten und deren Durchführungen an. Neben Arbeitsweisen der Lackierer ist dabei auch die technische Ausstattung der Betriebe zu berücksichtigen.

Die in der Reparaturlackierung herrschende Vielfalt an technischer Ausstattung der Werkstätten und die Unterschiede in der Organisation innerbetrieblicher Abläufe führt zu einer Variation in den tatsächlichen Bearbeitungszeiten eines Auftrags (vgl. u.a. Abbildung 3.2 und Kapitel 4.2). Durch den Einsatz eines Modells zur Abbildung der einzelnen Zeitflüsse⁵⁹ können Schwachstellenanalysen für eine einzelne Werkstatt durchgeführt werden und so der Einfluss unterschiedlicher Ausstattungen bzw. unterschiedlicher Betriebspraktiken analysiert werden. Daraus lassen sich weitere Handlungsempfehlungen für eine gute Betriebspraxis in der Reparaturlackierung ableiten, deren Umsetzung zu zusätzlichen Zeiteinsparungen bei der Auftragsbearbeitung führt.

Grundlage dieser Betrachtungen ist die Analyse der Zeitstudien der einzelnen Betriebe (vgl. Kapitel 4.2). Neben den reinen Zeitdaten wurden dabei auch die Informationen hinsichtlich eingesetzter Werkzeuge, Techniken bzw. weiterer Besonderheiten des Ablaufs, die ebenfalls für jeden Arbeitsschritt aufgenommen wurden, verwendet. Des Weiteren wurden Angaben über Ausstattung und Layout der Betriebe berücksichtigt, die im Rahmen von Betriebsanalysen zu Beginn einer Aufnahme in jedem Betrieb bestimmt wurden. Nach Ermittlung von Arbeitsschritten bzw. Teilarbeiten mit erhöhtem Zeitverbrauch kann dann ein möglicher Zusammenhang zu Ausstattung bzw. Arbeitsweise des jeweiligen Betriebes identifiziert werden [202].

6.2.1 Materialbereitstellung

Durch den Einsatz eines Werkzeugwagens am Arbeitsplatz sowie eines Abrollständers für Abdeckpapier bzw. -folie kann der Zeitbedarf für das Holen und Wegbringen (= Wegezeit) von Material deutlich verringert werden, wie der Vergleich der Wegezeiten zweier Betriebe zeigt. Dabei verfügt Werkstatt 1 über eine Materialbereitstellung am Arbeitsplatz, bei Werkstatt 2 arbeiten die Lackierer weder mit Werkzeugwagen, noch wird ein Abrollständer

⁵⁹Der Begriff Zeitfluss resultiert aus der Analogie zu Material- und Stoffflüssen und der Verwendung eines Modells auf Grundlage einer Software zur Ökobilanzierung (vgl. [74, 75, 201]).

für Papier eingesetzt. Dies führt dazu, dass der Lackierer im Bedarfsfall Materialnachschub eigens aus dem Lager besorgen muss.

Aus den prozentualen Anteilen der Wegezeiten kann unter Berücksichtigung der Gesamtzeit des jeweiligen Auftrags das gewogene Mittel für den prozentualen Anteil der Wegezeit der Werkstätten 1 und 2 berechnet werden (vgl. Abbildung 6.1). Der Unterschied berechnet sich zu

$$(4,14 \% - 0,84 \%) = 3,30 \%$$

Bei Annahme von 210 Arbeitstagen pro Lackierer und Jahr und einer täglichen produktiven Arbeitszeit von maximal 7,7 Stunden können so maximal ca. 53 Stunden:

$$210 \text{ d/a} \cdot 7,7 \text{ h/d} \cdot 0,033 = 53,36 \text{ h/a}$$

pro Jahr und Lackierer eingespart werden. Bei dem hier errechneten Verbesserungspotenzial handelt es sich um die Gegenüberstellung zweier Extremfälle (volle Materialbereitstellung am Arbeitsplatz gegenüber keiner Bereitstellung). Nichtsdestotrotz zeigte sich bei den Arbeitszeitstudien, dass bei einigen der analysierten Werkstätten keine Materialien am Arbeitsplatz bereitgestellt werden.

Die durch den Einsatz eines Werkzeugwagens eingesparte Arbeitszeit kann zur Bearbeitung weiterer Aufträge verwendet werden (= Kapazitätserweiterung). Dadurch ergibt sich eine theoretische Umsatzsteigerung von

$$53 \text{ h/a} \cdot 87 \text{ €/h} = 4.611 \text{ €/a},$$

der ein Kaufpreis des Werkzeugwagens von ca. 750 € gegenübersteht. Wird angenommen, dass die Kosten pro produktiver Arbeitsstunde vor und nach der Kapazitätserweiterung gleich sind, lässt sich bei Annahme eines im SVS berücksichtigten Gewinns in Höhe von 30 % (vgl. Gleichung 4.1) ein Erlös von 1383 €/a erzielen.

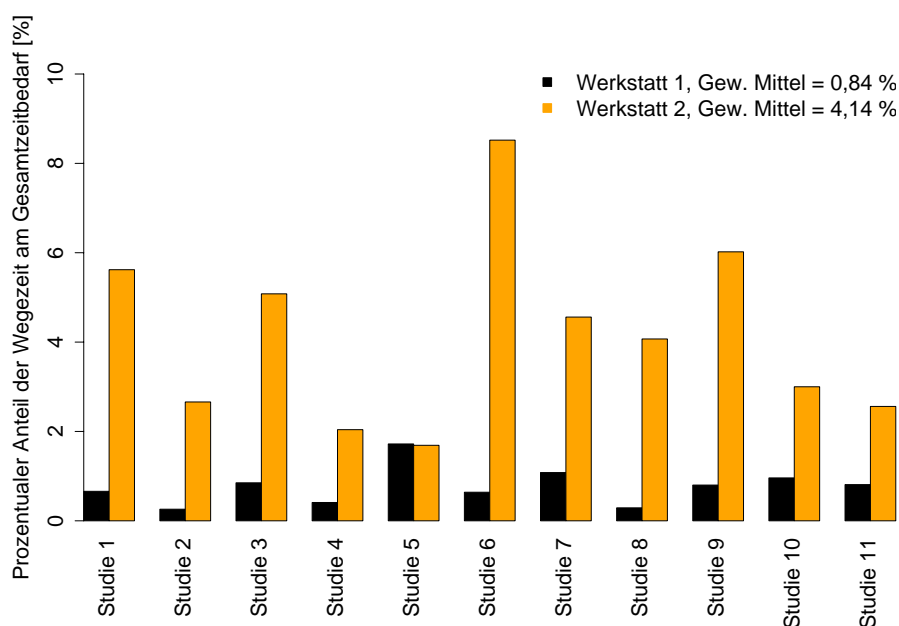


Abbildung 6.1: Vergleich des Anteils der Wegezeit an der Gesamtzeit des Auftrags

6.2.2 Gruppieren von Aufträgen gleicher Farbe

Bei Aufträgen gleichen Farbtons besteht die Möglichkeit einer parallelen Bearbeitung, besonders bei ausgebauten Teilen. Dies ist gleichbedeutend mit der Zusammenfassung zu einem gemeinsamen Auftrag, d.h. aus zwei oder mehr ein- oder mehrteiligen Aufträgen wird ein einziger mehrteiliger Auftrag. Dadurch können Arbeitsschritte, die bei getrennter Bearbeitung doppelt anfallen, eingespart werden. Zu diesen gehören u.a.:

- Füllerablüfzeit (abhängig von der Lackstufe)
- Mischen des Basislacks
- Vorbereitung des Klarlacks
- Reinigung der Spritzpistole

Das Vorgehen zur Berechnung der Zeitersparnis entspricht dem Ansatz beim Übergang vom einteiligen zum zwei- bzw. mehrteiligen Auftrag. Der Zeitbedarf der einzelnen Auf-

tragsvarianten wird mit Hilfe eines Kalkulationssystems ermittelt. Dazu wird das VDA-Lackzeitentool⁶⁰ eingesetzt:

1. *Auftrag:* Bauteil 1: Kotflügel, Lackstufe 3, ausgebaut
Bauteil 2: Frontverkleidung, Lackstufe 2, ausgebaut (Kunststoff)
2. *Auftrag:* Bauteil 1: Motorhaube, Lackstufe 3, ausgebaut
Bauteil 2: Vordertür links, Lackstufe 3, ausgebaut

Werden beide Aufträge einzeln bearbeitet ergibt sich folgender Zeitbedarf:

- | | |
|--------------------|---------|
| 1. <i>Auftrag:</i> | 170 min |
| 2. <i>Auftrag:</i> | 261 min |
| <i>Summe:</i> | 431 min |

Die Zusammenfassung der Bauteile zu einem gemeinsamen, mehrteiligen Auftrag führt zu folgendem Zeitbedarf:

Gemeinsamer Auftrag aus 1 und 2: 336 min

Daraus berechnet sich für das hier gewählte Beispiel eine maximale Zeitersparnis von 95 min, die dem Zeitbedarf der doppelt anfallenden, auftragsbezogenen Arbeitsschritte entspricht.

Das gemeinsame Bearbeiten zweier Aufträge gleicher Farbe ist nur dann zu empfehlen, wenn bei mindestens einem der beiden Aufträge nur ausgebaute Teile vorkommen, da die Lackierkabine in der Regel für ein Fahrzeug ausgelegt ist. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Gesamtumfang des gemeinsamen Auftrags nicht zu groß wird, da sonst die Kabine während der Vorbereitungszeit zu lange leersteht und letztendlich nicht alle Teile auf Grund ihres Platzbedarfs gemeinsam lackiert werden können. Auch bei zwei Fahrzeugen gleicher Farbe, d.h. zwei Aufträgen, bei denen jeder auch eingebaute zu bearbeitende Teile besitzt, ist eine Zeitersparnis erzielbar, indem zumindest die Vorbereitung der Lackflächen und das Mischen des Lacks gemeinsam durchgeführt werden.

⁶⁰Das Tool zur Berechnung von Arbeitszeiten in der Reparaturlackierung wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes im Auftrag des Verbands der Automobilindustrie (VDA) am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) der Universität Karlsruhe im Jahr 2003 erstellt [182]. Grundlage der hierin verwendeten Arbeitszeiten sind die Ergebnisse der im Rahmen des Projektes durchgeführten Arbeitszeitstudien (vgl. Kapitel 4.2).

Neben der Zeitersparnis durch den Synergieeffekt bei den durchzuführenden Arbeitsschritten kommt es auch zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs pro Auftrag, da nur ein Trockengang notwendig ist. Diese Einsparungen liegen bei einer mittleren Trockenzeit von ca. 41 min bei ca. 11,4 kWh Strom und 221.600 kJ Wärme. Hinzu kommen noch Einsparungen durch den Wegfall eines Basis- und Klarlackauftrags. Diese liegen bei 400 dm² zu lackierender Fläche bei 14,94 kWh Strom bzw. 289.764 kJ Wärme. Je nach Arbeitsorganisation kann die frei werdende Kapazität der Lackier- und Trockenkabine aber auch in eine Steigerung der Auftragszahl umgesetzt werden. Dadurch entfallen die absoluten Einsparungen an Strom und Wärme. Die spezifischen Verbräuche pro Quadratdezimeter Lackfläche werden jedoch für die gemeinsam bearbeiteten Aufträge nichtsdestotrotz gesenkt.

6.2.3 Gruppieren bestimmter Teilarbeiten

Für einige Teilarbeiten der Reparaturlackierung besteht die Möglichkeit bestimmte Arbeitsschritte mehrerer getrennt bearbeiteter Aufträge kurz vor Ende eines Arbeitstages gemeinsam durchzuführen und somit Zeit und Personal einzusparen. Diese Vorgehensweise kann in der Praxis besonders für den Auftrag des Füllers beobachtet werden. Für eine gleichzeitige Füllerapplikation müssen die Bauteilflächen der zu füllenden Teile entsprechend vorbereitet werden. Dabei sind all jene Bauteile der aktuell bearbeiteten Aufträge einzubeziehen, die aus Zeitgründen am selben Tag nicht mehr lackiert werden können.

Der gleichzeitige Auftrag des Füllers auf mehrere Bauteile unterschiedlicher Aufträge führt zu einer Zeitersparnis bei auftragsbezogenen Schritten, da die Bauteile in diesem Moment als ein einziger Auftrag bearbeitet werden. Dadurch kann die Durchführung der entsprechenden Arbeitsschritte von einem einzigen Lackierer übernommen werden. Zudem können durch eine räumliche Gruppierung der relevanten Bauteile die Wege während des Auftrags des Füllers minimiert werden.

Tabelle 6.10 zeigt die Liste all jener Schritte, die bei dieser Arbeitsweise zu unterschiedlichen Anteilen eingespart werden können. Die resultierende Zeitersparnis hängt sowohl von der Bearbeitungsfläche als auch der Anzahl der zusammengefassten Aufträge ab. Die Fläche bestimmt die Anzahl der Pistolenfüllungen sowie die Wegezeit. Dabei kann von einer Füllung der Spritzpistole pro 100 dm² ausgegangen werden. Die Häufigkeit der Werkzeugreinigung hängt dagegen von der Anzahl der Aufträge ab. Eine Reinigung der Spritzpistole ist nach jedem dritten Auftrag notwendig. Dadurch kommt es zu einer an-

teilsmäßigen Einsparung der Werkzeugreinigung, d.h. bei drei Aufträgen wird eine komplette Werkzeugreinigung eingespart.

Tabelle 6.10: Doppelt auftretende Arbeitsschritte bei gleichzeitiger Füllerapplikation

Arbeitsschritt
<i>Füllern</i>
Weg in Spritzkabine oder zum Füllerplatz
Spritzpistole befüllen
Ablüftzeit Füller
Weg aus Spritzkabine oder vom Füllerplatz
Schutzkleidung ablegen
Schutzkleidung anlegen
<i>Werkzeugreinigung</i>
Weg zum Reinigungsplatz
Spritzpistole zerlegen
Spritzpistole säubern (von Hand)
Spritzpistole zusammensetzen

Abbildung 6.2 zeigt die berechnete Zeitersparnis in Abhängigkeit von der gesamten zu bearbeitenden Bauteilfläche und der Anzahl der Aufträge. Der Zunahme der Bearbeitungsfläche durch die Bearbeitung mehrerer Aufträge spiegelt sich bei der zugehörigen Zeitersparnis nur abgeschwächt wider. Die Zeitersparnis gegenüber einer Einzelbearbeitung der Aufträge kann durch folgende Formel näherungsweise berechnet werden:

$$t_s = (t_{Fu} - (1 - A/100) \cdot (t_{be} + t_{in} + t_{out})) + t_{rei} \cdot N/3 \quad (6.5)$$

mit

t_s [min]	: Zeitersparnis
t_{Fu} [min]	: Gesamtdauer der Füllerapplikation bei einem Auftrag
A [dm ²]	: Gesamtfläche
t_{in} [min]	: Wegezeit in Spritzkabine
t_{out} [min]	: Wegezeit aus Spritzkabine
t_{be} [min]	: Dauer zum Befüllen der Spritzpistole
t_{rei} [min]	: Gesamtdauer der einmaligen Werkzeugreinigung
N [-]	: Anzahl der Aufträge ($N \geq 2$)

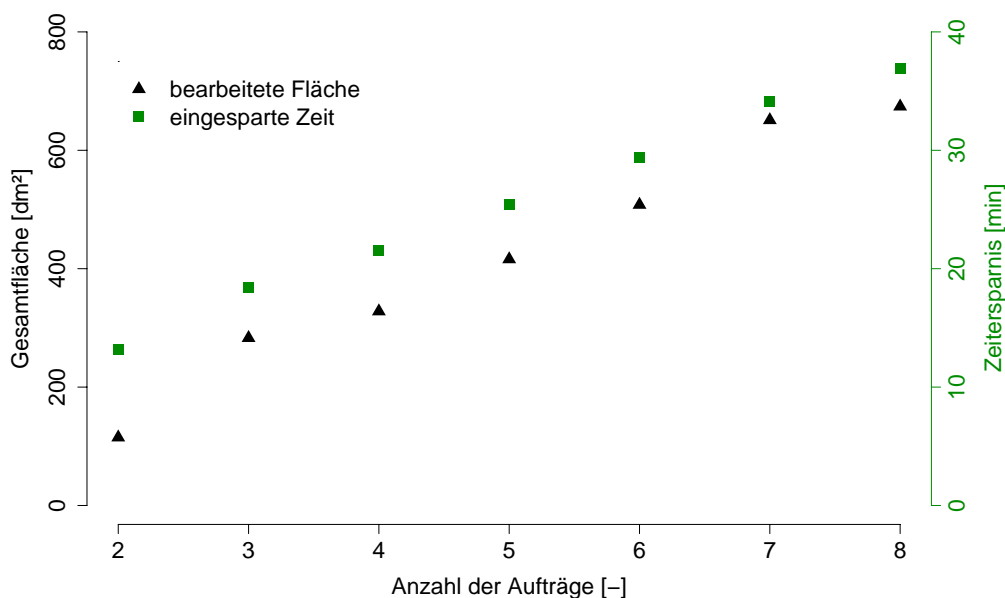


Abbildung 6.2: Gesamtfläche und Zeitersparnis bei gemeinsamer Füllerapplikation mehrerer Aufträge

Die Gesamtzahl der Aufträge, die für eine gemeinsame Füllerapplikation berücksichtigt werden können, hängt von der Werkstatt- und der Auftragsstruktur ab. Hierbei sind unter anderem Aspekte wie Arbeitszeitmodelle, Werkstattlayout und -ausstattung zu berücksichtigen. Mit dem Zusammenlegen der Füllerschritte wird zudem eine gute Voraussetzung für eine kontinuierliche Auslastung der Lackierkabine geschaffen, da eine bestimmte Anzahl an Aufträgen nahezu lackierfertig vorbereitet wird. In Kombination mit Maßnahmen zur besseren Auslastung der Lackierkabine, z.B. über eine verbesserte Auftragsreihenfolge (vgl. Kapitel 6.1), können so zusätzliche Einsparmöglichkeiten genutzt werden.

6.2.4 Schleifarbeiten

Die Analyse der in den Arbeitszeitstudien aufgenommenen Aufträge zeigt, dass ein Großteil der Arbeitszeit eines Auftrags für das Schleifen des Untergrunds und der Lackschichten des zu bearbeitenden Bauteils aufgewendet wird (Abbildung 6.3). Der Anteil der Schleifarbeiten liegt deutlich über dem der Ablüft- oder Abdeckzeiten, unabhängig von der

Auftragsstruktur. Bei der Durchführung der Schleifarbeiten existieren große Unterschiede zwischen den Werkstätten. Dies gilt sowohl hinsichtlich der eingesetzten Materialien und Werkzeuge als auch für den Einsatz des Trocken- anstelle des Nassschliffs. Auf Grund des hohen Zeitanteils wirken sich Verbesserungsmaßnahmen bei den Schleifarbeiten besonders positiv auf den Gesamtprozess aus.

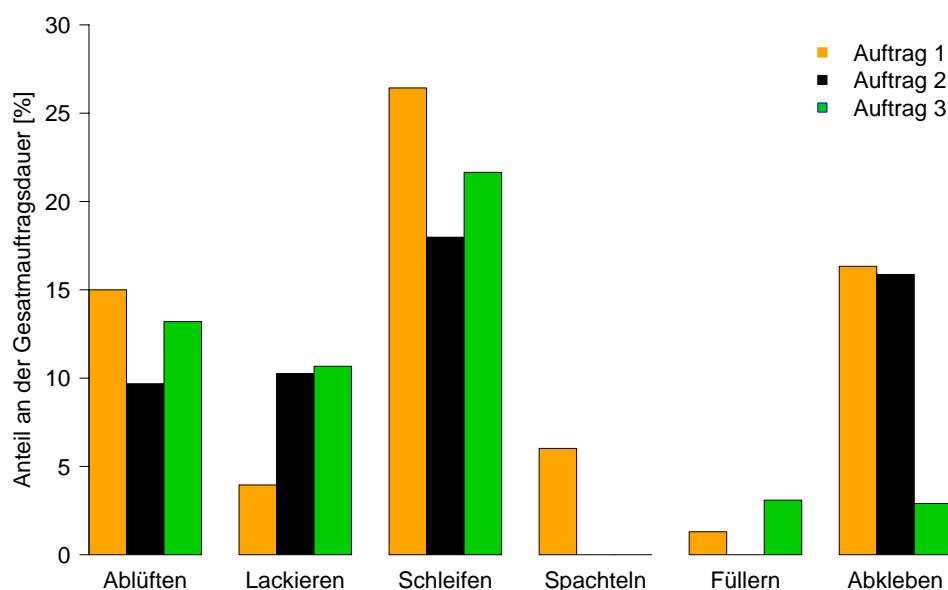


Abbildung 6.3: Prozentuale Anteile der Arbeitsabschnitte für drei Aufträge

Grundsätzlich gilt, dass der Trockenschliff das schnellste Verfahren ist. Eine reine Anwendung dieser Schleifart hängt neben der Werkzeugausstattung auch von den installierten Absaugeinrichtungen ab. Anderenfalls kann sich der Staubgehalt der Luft und damit das Risiko von Lackeinschlüssen erhöhen. Daher sollte beim Trockenschliff ebener Flächen eine Schleifmaschine mit integrierter Absaugung eingesetzt werden. Ecken und Kanten sollten weiterhin manuell geschliffen werden. Um ein optimales Schleifbild zu erzielen, ist die Verwendung von Schleifpapieren unterschiedlicher Korngrößenklassen notwendig. Dadurch kann eine optimale Vorbereitung erreicht und die Gefahr der Nacharbeit als Folge des ungewollten Durchschleifens einer intakten Schicht verringert werden.

Neben den aus dem Arbeitsablauf und dem Zeitbedarf abgeleiteten Handlungsempfehlungen gibt es noch weiteres Verbesserungspotenzial beim Prozess der Reparaturlackierung. So zeigt eine Studie [178], dass die in der Praxis häufig anzutreffenden zu hohen Ablüft-

zeiten aus einer fehlerhaften Applikation der Lackmaterialien herrühren. Diese führen zu erhöhten Schichtdicken, die eine längere Verdunstungszeit der flüssigen Anteile des Lacks zur Folge haben.

Neben der Schichtdicke beeinflussen auch die Betriebsparameter der Lackierkabine die Ablüftzeit. So sollte die Kabinenleistung - d.h. das Volumen an durchströmender Luft pro Zeiteinheit - regelmäßig überprüft werden. Ebenso ist die Luftsinkgeschwindigkeit⁶¹ zu testen. Sie ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der die Lösemittel und der Overspray zu Boden sinken und damit aus der Kabine entfernt werden. Ein zu niedriger Wert führt hierbei zu Lacknebel in der Kabine und damit zu erhöhten Ablüftzeiten. Zusätzlich sollten die in der Kabine vorhandenen Luftfilter (Vorfilter, Deckenfilter bzw. Bodenfilter) in regelmäßigen Abständen gereinigt bzw. gewechselt werden. Verschmutzte Filter verringern die Reinigungsleistung und erhöhen die Schmutzfracht der Luft. Dadurch führen sie zu einer geringeren Qualität der Lackierung auf Grund von Staubeinschlüssen. Als Folge davon steigt der Finishaufwand und damit dessen Zeitbedarf [202].

Insgesamt wird deutlich, dass aus den Arbeitszeitstudien neben der Optimierung der Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge noch weitere Maßnahmen zur Verbesserung des Arbeitsablaufs und zur Reduzierung des Zeitbedarfs abgeleitet werden können. Diese sind mitunter einfach einzuführen und müssen nur einmalig umgesetzt werden (z.B. Anschaffung eines Werkzeugwagens), erzielen aber im Vergleich zu den Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Auftragsreihenfolge (Kapitel 6.1) ebenso hohe bzw. sogar höhere Erlöse. Es bestätigt sich, dass erst das genaue Studium des Prozesses der Reparaturlackierung und die Messung entscheidender Prozessparameter, z.B. der Arbeitszeit, die Identifizierung und Bewertung solcher Maßnahmen ermöglichen.

⁶¹Bei geschlossenen Spritzkabinen wird durch Frischluftzufuhr eine möglichst laminare Strömung von oben nach unten erzeugt. Die Zielwerte der Strömungsgeschwindigkeit der Luft (Luftsinkgeschwindigkeit [81]) liegen zwischen 0,2 und 0,5 m/s. Um diese zu erreichen müssen pro Quadratmeter Grundfläche der Kabine 720 - 1.800 m³/h zugeführt werden.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Motiviert durch die steigende Bedeutung produktintegrierter Ansätze der Emissionsminderung und die damit zu erwartenden Einflüsse auf die Prozesse der betroffenen Sektoren wurden im Rahmen dieser Arbeit anhand des Anwendungsbeispiels der Reparaturlackierung Bedeutung und Verbesserungspotenzial des Arbeitsablaufs untersucht. Dabei wurde auf der Grundlage von Arbeitszeitstudien der Arbeitsablauf der Kfz-Reparaturlackierung analysiert und der zugehörige Zeitbedarf für deren Durchführung ermittelt. Besondere Beachtung fand dabei die Vielfalt der in der Praxis zu findenden Ausstattungen und Arbeitsweisen sowie die Möglichkeiten deren Berücksichtigung bei der Datenauswertung. Aufbauend auf dieser Untersuchung wurden Verbesserungspotenziale für den Arbeitsablauf auf zwei Ebenen ermittelt:

1. Verbesserungen durch Anpassung der Arbeitsweise bei bestimmten Arbeitsschritten bzw. Teilabschnitten des Gesamtprozesses.
2. Möglichkeiten der Einsparung durch eine verbesserte Reihenfolge bei der Auftragsbearbeitung.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse aus Einsatz und Analyse der Arbeitszeitstudien im Kontext produktintegrierter Minderungsmaßnahmen (Kapitel 7.1) sowie die identifizierten Verbesserungsmöglichkeiten für das Anwendungsbeispiel zusammengefasst (Kapitel 7.2). Abschließend werden neuere Entwicklungen in der Reparaturlackierung angesprochen und ein Ausblick auf zukünftige Fragestellungen bzw. Erweiterungen des verwendeten Ansatzes gegeben (Kapitel 7.3).

7.1 Bedeutung von Zeitstudien im Kontext produktintegrierter Umweltschutzmaßnahmen

Die durchgeführte Studie hat gezeigt, dass die Arbeitszeit als Parameter für die Bestimmung der Einflüsse produktintegrierter Minderungsmaßnahmen auf handwerkliche Tätigkeiten grundsätzlich einsetzbar ist. Dabei ist die Notwendigkeit, gerade bei diesen Prozessen die Arbeitszeit zu berücksichtigen, eine Folge ihres hohen Personaleinsatzes. Der Aufwand bei der Bestimmung dieser Größe richtet sich nach den Grenzen des zu untersuchenden Systems. Sollen die Konsequenzen für einen Sektor im Allgemeinen untersucht werden, so muss sichergestellt werden, dass der Umfang der Messungen die herrschende Vielfalt der Prozesse abdeckt. Nur so kann ein durchschnittlicher Prozess definiert werden. Bei einer Bewertung auf Betriebsebene ist der Umfang zwar entsprechend geringer, muss aber trotzdem ausreichend groß sein, um die auf Betriebsebene herrschende Vielfalt (z.B. Arbeitsweisen der Lackierer, Unterschiede in der Bauteilgeometrie etc.) abbilden zu können.

Für das im Rahmen dieser Arbeit behandelte Fallbeispiel der Reparaturlackierung zeigt sich, dass mit Hilfe einer Arbeitszeitstudie eine genaue Beschreibung des Zeitbedarfs der Reparaturlackierung möglich ist. Mit den ermittelten Zeitparametern, die unter Zugrundelegung der Lackstufen, der Untergrundmaterialien und Zustände der Bauteile die unterschiedlichen Arbeitsumfänge beschreiben, kann der Zeitbedarf der bestehenden Prozesse der Reparaturlackierung mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden. Dies wird bestätigt durch den Vergleich berechneter und gemessener Arbeitszeiten (vgl. Abbildung 4.17), bei dem sich der Gesamtzeitunterschied zu nur 6 % berechnet.

Gleichzeitig wird deutlich, dass, auf Grund der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf den Zeitbedarf des Prozesses sowie die herrschende Vielfalt bei der Ausstattung der Werkstätten, der Auswertung der Daten eine besondere Bedeutung zukommt. Eine Schwierigkeit dabei ist die Identifizierung möglicher Ausreißer des Datensatzes. Hierbei hat sich gezeigt, dass für die Bestimmung dieser Werte neben einer genauen Auswahl der Verfahren, eine detaillierte Kenntnis des untersuchten Prozesses notwendig ist. Dadurch kann sichergestellt werden, dass Ausreißer, deren extreme Werte sich aus dem Auftrag selbst ergeben⁶², berücksichtigt bleiben. Bei dem hier beschriebenen Beispiel führt dieses Vorgehen zu einer insgesamt geringen Zahl an Ausreißern, da ein Großteil der höheren Werte prozessbedingt ist.

⁶²Gründe für im Vergleich hohen Zeitbedarf können z.B. die Bauteilgeometrie oder ein Sonderfarbton sein.

Bei der Anwendung der unterschiedlichen Schätzverfahren zur Bestimmung des flächenabhängigen Zeitbedarfs zeigt sich deren Auswirkung auf die Endergebnisse. Diese führen zu einer Variation der Arbeitszeiten zwischen den unterschiedlichen Verfahren von bis zu 20 % (vgl. Tabelle 4.9). Der letztendlich gewählte Ansatz des *Least Sum of Squares* besitzt zwar die höchste Sensitivität gegenüber Ausreißern und führt zu den höchsten Parametern des Zeitbedarfs, ermöglicht aber in Kombination mit der Ausreißeranalyse die Berücksichtigung der in Praxis vorhandenen Vielfalt der Prozesse.

Für die Reparaturlackierung kann letztendlich gefolgert werden, dass unter Anwendung der beschriebenen Methoden eine Auswertung der Zeitstudien möglich ist und prozessspezifische Zeitparameter ermittelt werden können. Es zeigt sich zudem, dass mit Hilfe der Zeitparameter bestehende Unterschiede beschrieben werden können und die Bestimmung des jeweiligen Zeitbedarfs der unterschiedlichen Arbeitsumfänge in Abhängigkeit von Bauteilfläche und -anzahl gelingt. Damit sind die Voraussetzungen für eine Berücksichtigung der Größe *Arbeitszeit* bei der Bewertung integrierter Minderungsmaßnahmen gegeben. Eine umfassendere Betrachtung der Auswirkungen auf den Arbeitsablauf, gerade bei handwerklichen und personalintensiven Prozessen, kann damit durchgeführt werden.

Neben der Verwendung der Arbeitszeiten für die Berechnung des Zeitbedarfs können diese auf Grund ihres hohen Detailgrades auch für eine weitere Analyse der Prozesse eingesetzt werden mit dem Ziel, Verbesserungsmöglichkeiten des Arbeitsablaufs zu identifizieren. Dazu wird zum einen die Methode der Ablaufplanung zur Bestimmung der optimalen Auftragsreihenfolge verwendet, zum anderen das zusätzliche Einsparpotenzial auf Ebene der Arbeitsschritte untersucht.

7.2 Möglichkeiten der Verbesserung des Arbeitsablaufs in der Kfz-Reparaturlackierung

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Identifizierung von Einsparpotenzialen durch eine verbesserte Reihenfolge der Auftragsbearbeitung wurden für zwei unterschiedliche Besetzungen durchgeführt: für einen Vorbereiter bei insgesamt drei Lackierern (Besetzung 1) und für zwei Vorbereiter bei insgesamt vier Lackierern (Besetzung 2). Für die Ermittlung des Verbesserungspotenzials auf Ebene der Arbeitsschritte wurden die Prozesse verschiedener Werkstätten miteinander verglichen.

Um die Bedingungen in der Reparaturlackierung möglichst realitätsnah abzubilden, muss bei der Ablaufplanung die Unsicherheit berücksichtigt werden. Im Unterschied zum Groß-

teil der existierenden Arbeiten zur stochastischen Ablaufplanung, bei denen die Robustheit der Ablaufpläne untersucht wird und Größe und Verteilung der Unsicherheiten angenommen werden (vgl. u.a. [14, 100, 148]), konnten bei dem hier beschriebenen Anwendungsbeispiel empirisch ermittelte Unsicherheiten eingesetzt werden. Der für die Ablaufplanung entwickelte Ansatz, bestehend aus einem enumerativen Verfahren, das mit einer Monte-Carlo-Simulation verknüpft wird, besitzt zwar einen höheren Rechenaufwand gegenüber z.B. heuristischen Verfahren, rechtfertigt sich aber, da er die „unsichere Realität“ besser abbildet und die Unsicherheiten der Ergebnisse, d.h. der möglichen Verbesserung, quantifiziert werden können.

Dies wird deutlich am Vergleich der Ergebnisse der deterministischen und stochastischen Rechnung. Die Berücksichtigung der Unsicherheit ermöglicht die Angabe von Wahrscheinlichkeiten, mit denen gewisse Einsparungen erzielt werden können. Die Tatsache, dass die sich deterministisch ergebende Ablaufverbesserung im stochastischen Fall mit einer Wahrscheinlichkeit geringer 50 % erreicht werden kann, relativiert diese. Hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit, mit der eine Startreihenfolge einer optimalen Reihenfolge entspricht, kommt der stochastische Ansatz nicht nur zu höheren Werten sondern auch zu einer gegensätzlichen Aussage beim Vergleich dieser Wahrscheinlichkeiten der beiden Besetzungen untereinander.

Die aus den Ergebnissen der „unsicheren Reihenfolgenplanung“ abgeleiteten Handlungsempfehlungen ermöglichen den Betrieben der Reparaturlackierung eine Sortierung der Aufträge, die zu Einsparungen führen kann. Dabei ist jedoch anzumerken, dass die aus den Strukturen der Reihenfolgen ableitbaren Prioritätsregeln und die daraus für den praktischen Einsatz entwickelten Handlungsempfehlungen nur zu einer geringen Gewinnsteigerung führen. Dies gilt für Besetzung 1 wie auch für Besetzung 2 gleichermaßen. Zudem ist die Gewinnsteigerung auch noch mit einer Unsicherheit belegt, so dass davon auszugehen ist, dass diese Steigerungen in der Praxis häufig noch niedriger ausfallen.

Da eine Reparaturwerkstatt bei der Umsetzung der entsprechenden Handlungsempfehlung jedoch auch das Risiko eingeht, dass die vorsortierte Reihenfolge zu einer Verschlechterung im Vergleich zur Startreihenfolge führt, kann ohne zusätzliche Bestimmung dieses Risikos ein Einsatz der Handlungsempfehlungen nicht empfohlen werden. Um die möglichen Einsparungen aus der Ablaufplanung erzielen zu können, erscheint der Einsatz softwaregestützter Verfahren erforderlich. Gerade für die den Sektor dominierenden kleineren Betriebe gilt ein solcher Einsatz jedoch als nicht realisierbar, da ein Großteil der Zeiteinsparung für die Anwendung des Verfahrens verwendet werden müsste.

Bezüglich der hier eingesetzten Methode der Ablaufplanung lässt sich festhalten, dass es mit Hilfe des gewählten stochastischen Ansatzes erstmals möglich war,

- die in der Reparaturlackierung herrschenden Unsicherheiten bei der Planung zu berücksichtigen,
- den Einsatz der Ablaufplanung für handwerkliche Tätigkeiten unter Verwendung empirischer Unsicherheiten zu untersuchen,
- die Abhängigkeit der minimierten Zykluszeit von empirischen Unsicherheiten zu bestimmen,
- Aussagen über die Wahrscheinlichkeiten der möglichen Einsparpotenziale zu treffen,
- die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, mit der es sich bei der Startreihenfolge um eine optimale Sequenz handelt („zufälliges Optimum“),
- vereinfachte Handlungsempfehlungen für einen verbesserten Arbeitsablauf und deren Verbesserungspotenzial abzuleiten.

Als zusätzliche Erkenntnis aus dem Vergleich der Ergebnisse für Besetzung 1 und 2 lässt sich eine Empfehlung für den Personaleinsatz in der Reparaturlackierung ableiten, deren Umsetzung automatisch zu einer Steigerung der Kapazität des Betriebes führt. Es zeigt sich, dass durch den Einsatz der doppelten Anzahl an Vorbereitern im Vergleich zu Lackierern bzw. Kombikabinen die Totzeiten der Lackierkabine nahezu eliminiert werden können. Der Auslastungsgrad der Kombikabine kann so gesteigert werden, da Vorbereitungs- und Lackierzeit inkl. Trocknung für einen Großteil der Aufträge vergleichbar sind. Auf Grund der kurzen Bearbeitungszeiten für das Finish lässt sich dieser Ansatz auch für Werkstätten mit drei Lackierern dadurch teilweise umsetzen, dass ein Lackierer als Springer eingesetzt wird. Dieser unterstützt, wann immer zeitlich verfügbar, die Vorbereitung noch zu lackierender Fahrzeuge bzw. Bauteile.

Neben den Einsparungen aus einer verbesserten Auftragsreihenfolge existiert auch ein Verbesserungspotenzial für einzelne Arbeitsschritte bzw. Prozessabschnitte. Dieses konnte nur auf Grund der Vielzahl an untersuchten Betrieben (Tabelle 4.5) und der hohen Anzahl an Studien pro Werkstatt identifiziert werden. Dadurch konnten unterschiedliche Arbeitsweisen überhaupt erst realistisch miteinander verglichen werden. Um eine Nutzung dieses Potenzials für Betriebe der Reparaturlackierung zu ermöglichen, wurden entsprechende Handlungsempfehlungen formuliert.

Als eine sehr effektive Maßnahme erweist sich die Bereitstellung eines Werkzeugwagens am Vorbereitungsplatz sowie die Anschaffung eines Abrollständers für Abdeckmaterialien (Folien bzw. Papier). Die dadurch verkürzten Laufwege des Lackierers führen zu einer Reduzierung der Bearbeitungszeit pro Auftrag um maximal ca. 3%. Gelingt es die so frei werdende Kapazität in eine Umsatzsteigerung umzuwandeln, amortisiert sich die Anschaffung in sehr kurzer Zeit.

Auch die Bearbeitung von Aufträgen gleicher Farbe führt auf Grund von Synergieeffekten zu einer Verkürzung der Gesamtbearbeitungszeit. Dadurch können bis zu 1,5 h pro Sammelauftrag eingespart werden, die dann erneut zur Steigerung der Kapazität der Werkstatt verwendet werden können. Zudem wird ein kompletter Trocknungsgang eingespart und damit auch der Energieverbrauch pro Flächeneinheit reduziert. Nicht berücksichtigt ist dabei die eventuelle Steigerung der Totzeiten der Kabine, die aus der Zunahme der Vorbereitungszeit resultiert und die Energieeinsparung sowie die mögliche Kapazitätssteigerung teilweise kompensiert. Nichtsdestotrotz kann von einer Nettoeinsparung ausgegangen werden, da die Zeiteinsparung durch das Zusammenlegen größer ist als die Steigerung der Vorbereitungszeit. Grund hierfür ist die Begrenzung der Bauteilfläche, da eine gemeinsame Bearbeitung von Aufträgen gleicher Farbe nur dann sinnvoll ist, wenn die Bauteile auch gemeinsam in die vorhandene Kabine passen.

Eine weitere Einsparung ist möglich, wird der Auftrag des lufttrocknenden Füllers kurz vor Ende des Arbeitstages durchgeführt. Dadurch kann die Trocknung außerhalb der Arbeitszeit stattfinden und es werden keine Personalressourcen gebunden. Zudem können durch die gemeinsame Applikation auf Bauteilen unterschiedlicher Aufträge doppelt anfallende Arbeitsschritte eingespart werden. Voraussetzung ist, dass diese Aufträge entsprechend vorbereitet werden. Eine Einschränkung stellen dabei sowohl die Anzahl verfügbarer Stellplätze als auch die Anzahl mit der Vorbereitung der Fahrzeuge beschäftigter Lackierer dar. So ergibt sich zwar eine im Vergleich zu den anderen Maßnahmen geringere Einsparung, die sich jedoch sehr einfach umsetzen lässt.

Insgesamt betrachtet lässt sich festhalten, dass die Verbesserungspotenziale aus der Anpassung der Arbeitsweise wesentlich einfacher umzusetzen sind, als die Einsparungen aus der Ablaufplanung. Zudem liegen sie bzgl. ihrer absoluten Verbesserung in vergleichbaren Größenordnungen. Gerade kleineren Betrieben ist daher zu empfehlen, primär diese Maßnahmen einzuführen, bevor sie eine Verbesserung der Auftragsreihenfolge durchführen. Gestützt wird diese Aussage durch die Tatsache, dass der Erfolg der verbesserten Auftragsreihenfolge mit einer Unsicherheit belegt ist und sich bei den Berechnungen gezeigt

hat, dass in mehr als 50 % der Fälle die erzielbare Verbesserung geringer ist, als das berechnete Mittel.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass bei den Werkstätten der Reparaturlackierung ein Verbesserungspotenzial vorhanden ist. Dies ist besonders vor dem Hintergrund abnehmender Auftragszahlen und dem damit verbundenen steigenden Wettbewerb zu sehen. Die wesentliche Strategie, die sich aus den Untersuchungen für Betriebe der Reparaturlackierung formulieren lässt, ist folgende:

Bevorzugt ist eine Anpassung der innerbetrieblichen Abläufe durchzuführen. Punkte, die es dabei zu berücksichtigen gilt, sind:

- die Bereitstellung der wichtigsten Werkzeuge und Einsatzmaterialien am Arbeitsplatz,
- die Zusammenfassung von Aufträgen gleicher Farbe zu einem Auftrag, sowie
- der Auftrag lufttrocknender Lackschichten, speziell des Füllers, vor Ende des Arbeitstages.

Anpassungen der eingesetzten Techniken, die zu Zeiteinsparungen führen, sind bevorzugt für Tätigkeiten des Schleifens einzuführen. Hier erzielbare relative Verbesserungen zeigen die höchsten absoluten Einsparungen.

Auf Grund der hohen Streuung der erzielbaren Einsparungen ist die Verbesserung der Auftragsreihenfolge erst an zweiter Stelle einzuführen. Für deren Umsetzung ist auf softwaregestützte Instrumente zurückzugreifen, da der Einsatz der abgeleiteten Prioritätsregeln nur zu geringen Verbesserungen führt.

Aus methodischer Sicht lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Ablaufplanung zu einer erhöhten Aussagekraft der Ergebnisse führt, da den Verbesserungspotenzialen Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können. Zudem hat sich gezeigt, dass im Vergleich zum deterministischen Ansatz gegensätzliche Erkenntnisse gewonnen werden können. Der Einsatz eines enumerativen Verfahrens in Kopplung mit einer Monte-Carlo-Simulation hat sich dabei als zielführend für die untersuchten Fragestellungen erwiesen. Von besonderer Bedeutung hierbei war die Verwendung empirisch ermittelter Unsicherheiten, die nur deshalb möglich war, da es sich bei der Reparaturlackierung um einen sich wiederholenden Prozess handelt. Insgesamt konnte daher mit dem hier behandelten Anwendungsbeispiel ein wichtiger Beitrag zur stochastischen

prädiktiven Ablaufplanung geleistet werden, wobei zudem mit dem Beispiel der handwerklichen Reparaturlackierung ein Problemtyp untersucht wurde, der bisher nur wenig Beachtung im Bereich der Ablaufplanung fand.

7.3 Neuere Entwicklungen und Erweiterungsmöglichkeiten des Ansatzes

Die vorliegende Arbeit stellt einen ersten Ansatz für eine Analyse des Arbeitsablaufs in der Reparaturlackierung dar. Die gefolgerten Schlüsse und vorgeschlagenen Strategien zur Steigerung beziehen sich in erster Linie auf den Referenzbetrieb, bei dem es sich um einen Kleinbetrieb handelt. Daneben gibt es in Form der Lack- und Karosseriezentren bereits neuere Entwicklungen im Sektor der Reparaturlackierung, auf die hier abschließend eingegangen werden soll. Hinsichtlich der angewandten Methode zur Reihenfolgenplanung in Betrieben der Reparaturlackierung mit Berücksichtigung empirischer Unsicherheiten stellt die Arbeit einen Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen dar. Daher sollen an dieser Stelle auch noch Anregungen zu möglichen Erweiterungen des Ansatzes gegeben werden, wie sie für zukünftige Arbeiten interessant sein können.

Neuere Entwicklungen in der Kfz-Reparaturlackierung

Im Sektor der Reparaturlackierung existieren neben den hier behandelten Kleinbetrieben auch größere Werkstätten mit Umsätzen bis zu 15 Mio €/a. Diese haben in den letzten Jahren eigene Strategien entwickelt, um den sinkenden Auftragszahlen entgegenzuwirken. Es handelt sich dabei um die Errichtung sogenannter Lackierzentren bzw. Lack- und Karosseriezentren. Diese Bestrebungen werden einerseits von Autohäusern betrieben [5], andererseits sind sie Teil der Konzernstrategie einiger Automobilhersteller. Motivation für den Bau solcher Zentren ist die Bündelung von Kapazitäten, das Ausnutzen von Größendegressionseffekten sowie, speziell bei privaten Autohäusern, die Kooperation bei der Finanzierung der notwendigen Investitionen. Da es sich bei solchen Zentren meist um Neubauten handelt, besteht die Möglichkeit bereits in der Planungsphase neuere Erkenntnisse hinsichtlich technologischer Ausstattung und Arbeitsablauf umzusetzen.

Zum einen ist es möglich, das Wissen über den Arbeitsablauf im Rahmen der Layoutplanung einzusetzen. Dadurch können nicht nur die Anordnung der unterschiedlichen Arbeitsbereiche und damit die zurückzulegenden Wege optimiert, sondern auch Fragen der

Kapazitätsplanung (z.B. *Wie viele Lackierkabinen sind notwendig?*) beantwortet werden. Zum anderen ist auf Grund der Größe der Lackierzentren der Einsatz softwaregestützter Planungsinstrumente während des Betriebs realistisch. Dadurch ist dann auch die Verwendung von Verfahren der Reihenfolgenplanung möglich, die zu entsprechenden Zeiterparnissen führen können.

Bezüglich der produktintegrierten Minderungsmaßnahmen der Reparaturlackierung ist davon auszugehen, dass mit der Decopaint-Richtlinie (vgl. Kapitel 4.1.3) die Grundlage für eine nahezu vollständige Umstellung der Reparaturlackierbetriebe auf Wasserbasislacke in den nächsten Jahren geschaffen ist. Weitere Neuerungen, die sich sowohl auf den Arbeitsablauf als auch auf die VOC-Emissionen des Sektors auswirken werden, sind der vermehrte Einsatz des sogenannten Spot-Repairs auf Grund dessen Anerkennung durch Versicherer und Automobilhersteller. Dabei werden kleinflächige Beschädigungen nur noch örtlich ausgebessert und nicht mehr wie bisher das gesamte Bauteil lackiert. Dadurch wird sowohl der Zeitbedarf dieser Reparaturen, als auch deren Materialeinsatz reduziert. Weitere technische Neuerungen betreffen zum einen den Festkörpergehalt der eingesetzten Materialien (z.B. *Dickschichtfüller*) sowie die Trocknungstechnik. Hier sind besonders die Untersuchungen mit strahlungshärtenden Lacken, auch als UV-Lacke bezeichnet, zu erwähnen, die vermehrt durchgeführt werden [222]. Deren Einsatz führt zu einer Reduzierung der Trockenzeiten sowie, im Zusammenhang mit Spot-Repair, zu einer Reduzierung des Energieaufwands, da die Trocknung außerhalb der Trockenkabine stattfinden kann.

Gerade bei den zuletzt aufgeführten technischen Neuerungen wird es erneut von Interesse sein, die Einflüsse auf den Arbeitsablauf zu bestimmen und bei einer techno-ökonomischen Bewertung zu berücksichtigen. Als Vorgehensweise empfiehlt sich dabei erneut eine Quantifizierung der Einflüsse auf Grundlage von Arbeitszeitstudien, wodurch die Möglichkeit besteht, diese neuen Prozesse und deren Zeitbedarf als Grundlage für die Bewertung des Arbeitsablaufs sowie die Reihenfolgenplanung in Werkstätten und Lackierzentren der Reparaturlackierung zu verwenden.

Methodische Erweiterungen des Ansatzes

Das im Rahmen dieser Arbeit definierte Problem der Ablaufplanung ist ein vereinfachter Ansatz, dessen Ziel erste Untersuchungen des Einflusses empirischer Unsicherheiten auf die Ergebnisse der Ablaufplanung ist. Abgebildet wurde damit ein Referenzbetrieb, der die mittleren Bedingungen der Reparaturlackierung wiedergibt. Vor dem Hintergrund der genannten Entwicklungen im Sektor der Reparaturlackierung und einem wahrscheinlicheren

Einsatz der Ablaufplanung in größeren Werkstätten bzw. Lackierzentren ist es methodisch besonders interessant, den hier gewählten Ansatz in zweierlei Hinsicht zu erweitern:

- Da in naher Zukunft die Kundenbindung für die Werkstätten der Reparaturlackierung an Bedeutung zunehmen wird, erscheint es besonders interessant, die maximale Wartezeit des Kunden auf sein Fahrzeug explizit als Zielgröße mit zu berücksichtigen. Dies kann mittels Minimierung der Fertigstellungszeitpunkte sowie durch Einführung von Straftermen erfolgen.
- Die Reparaturlackierung lässt sich auch als Prozess mit vier Abschnitten beschreiben, sofern Lackierung und Trocknung in getrennten Kabinen durchgeführt werden, d.h. die beschriebene Werkstatt keine Kombikabine verwendet. Diese Erweiterung auf mindestens vier Maschinen führt dazu, dass der hier vorgestellte Algorithmus nicht mehr anwendbar ist, da dann die optimale Lösung nicht mehr notwendigerweise die gleiche Reihenfolge auf allen Maschinen aufweist. Eine Weiterentwicklung des Ansatzes auf allgemeine Flow-Shop Probleme ist dafür erforderlich.

Des Weiteren kann die Anzahl an Überstunden als Zielgröße bei einer Weiterentwicklung zusätzlich zur minimalen Zykluszeit berücksichtigt werden. Dadurch kann einerseits die zeitliche Beschränkung, die durch die Dauer des Arbeitstages vorgeben wird, explizit berücksichtigt werden. Andererseits lässt sich die nicht mögliche Unterbrechung begonnener Aufträge im Abschnitt Lackierung/Trocknung und deren Einfluss auf die Reihenfolge abbilden⁶³.

Für die Planung in Lackierzentren, die mehr als drei Lackierer beschäftigen, ist die optimale Bearbeitungsreihenfolge unter Ausnutzung von Zwischenlagern von besonderer Bedeutung. Im Gegensatz zu dem hier berechneten Beispiel mit drei Maschinen, bei dem es bei der optimalen Lösung keine Positionswechsel vor einer Maschine gibt (*Permutationsplan*), kann es bei Problemen mit mehr als drei Maschinen besser sein, die Aufträge auf den einzelnen Maschinen in unterschiedlicher Reihenfolge zu bearbeiten.

Durch den Fokus zukünftiger Fragestellungen der Ablaufplanung in der Reparaturlackierung auf größere Betriebe und einer damit verbundenen zunehmenden Komplexität des Problems, wird die Anwendung heuristischer Verfahren, gekoppelt mit Ansätzen zur Abbildung von Unsicherheiten, interessant. Umso mehr, wenn dabei die Möglichkeit des

⁶³So ist z.B. denkbar, dass es dann zu einem Positionswechsel in der Bearbeitungsreihenfolge kommt, der zwar die Zykluszeit erhöht, jedoch die Anzahl der Überstunden des für den Lackauftrag zuständigen Lackierers reduziert.

praktischen Einsatzes erhalten werden soll, d.h. es möglich sein muss eine Lösung schnell zu berechnen. Zudem kann ein rollierender Ansatz verwendet werden, um neu hinzukommende Aufträge früh genug bei der Ablaufplanung zu berücksichtigen. Methodisch gesehen kann das Ablaufplanungsproblem dann als Flow-Shop mit parallelen Maschinen verstanden werden, ähnlich dem Ansatz von z.B. *Thornton et al.* [229].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der entwickelte und angewendete Ansatz für die hier behandelte Fragestellung ausreichend ist und mit ihm die allgemeinen Bedingungen kleinerer Betriebe der Reparaturlackierung sehr gut abgebildet werden können. Auf Grund der erzielten Ergebnisse wird empfohlen, sich bei methodischen Weiterentwicklungen auf Strukturen vergleichbar jenen der Lackierzentren zu konzentrieren. Dabei sind sowohl Fragen der Reihenfolgenplanung als auch der Kapazitätsplanung von Interesse. Auf eine Berücksichtigung der Unsicherheit des Arbeitsablaufs ist dabei besonders zu achten, zeigt sich doch im Rahmen dieser Arbeit deren Bedeutung für die Planung und den Arbeitsablauf in der Kfz-Reparaturlackierung.

8 Zusammenfassung

Durch die zunehmende Bedeutung produktintegrierter Emissionsminderungsmaßnahmen (Primärmaßnahmen) zeigt sich ein verstärkter Einfluss umweltpolitischer Instrumente auf einen Großteil industrieller Prozesse. Im Gegensatz zu additiven Maßnahmen stellen Primärmaßnahmen in der Regel einen direkten Eingriff in den Prozessablauf dar, der in der Folge entsprechende Anpassungen erfordert. Zu den betroffenen Aktivitäten zählt auch die Lackanwendung, die für einen bedeutenden Anteil der VOC-Emissionen in Europa verantwortlich ist. Die Autoreparaturlackierung ist dabei einer der ersten Sektoren aus dem Bereich der Oberflächenbehandlung, für den produktintegrierte Minderungsmaßnahmen in Form einer Produktrichtlinie vorgegeben werden.

Für die Umsetzung dieser Maßnahme in der Reparaturlackierung müssen nicht nur Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienzen beim Materialeinsatz, sondern auch die Arbeitsabläufe und deren Verbesserungspotenzial betrachtet werden. Auf Grund des hohen Personalkostenanteils erscheint dabei vor allem ein verbesserter Einsatz der Arbeitskräfte von großer Bedeutung. Daher ist das Ziel der vorliegenden Arbeit die Analyse des Arbeitsablaufs in der handwerklichen Reparaturlackierung sowie dessen mögliche Verbesserung. Dabei werden bestehende Unsicherheiten des Prozesses berücksichtigt. Des Weiteren sollen Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, mit deren Umsetzung ein Teil der identifizierten Einsparungen realisiert werden kann.

Zunächst wird dazu ein Überblick über bestehende Möglichkeiten der Emissionsminderung auf Betriebsebene gegeben, wobei der Schwerpunkt auf Primärmaßnahmen gelegt wird. Bei der Lackanwendung steht dabei die Reduzierung der Lösemittelgehalte in den Anstrichstoffen im Mittelpunkt. Je nach Lacksystem (festkörperreich, wasserbasiert oder Pulver) zeigen sich dabei unterschiedliche Konsequenzen für den Prozessablauf. Dabei wird festgestellt, dass der Einsatz von Pulverlacksysteme in der Reparaturlackierung auf Grund der Temperaturempfindlichkeit bestimmter Komponenten momentan ausscheidet. Daher zählen Wasserlacksysteme zu den favorisierten Lösungsansätzen in diesem Anwendungsfeld. Veränderungen im Prozessablauf aus der Verwendung dieser Lacke resultieren vor allem aus einer geringeren Schichtdicke des Materials und einer aufwändigeren

Vorbereitung der Oberfläche. Zudem ist eine sorgfältigere Reinigung der Spritzpistolen erforderlich.

Bei der Untersuchung und Planung des Arbeitsablaufs in der Reparaturlackierung müssen zwei Aspekte vorrangig betrachtet werden. Zum einen der Arbeitsablauf auf Ebene der einzelnen Arbeitsschritte, zum anderen die Reihenfolge, in der die Aufträge bearbeitet werden. Letztere kann mit Hilfe von Methoden der Ablaufplanung verbessert werden. Bestehende Ansätze können dabei in drei Klassen unterteilt werden: effiziente optimierende Verfahren, enumerative optimierende Verfahren und Heuristiken. Diese unterscheiden sich hinsichtlich Problemtyp und Zielgröße, aber auch in puncto Rechengeschwindigkeit und Güte der Lösung. Zudem können die Ansätze in deterministische und stochastische Verfahren eingeteilt werden. Die Reparaturlackierung wird dabei im Kontext der Ablaufplanung als eine Reihenfertigung (*Flow-Shop*) verstanden.

Bei der Analyse existierender Lösungsansätze der Ablaufplanung zeigt sich, dass ein Großteil der stochastischen Ansätze für die Bestimmung der Robustheit von Lösungen eingesetzt wird. In wenigen Fällen wird die Berechnung der unsicheren Zielgröße tatsächlich durchgeführt, empirisch ermittelte Unsicherheiten werden hierzu nur sehr selten verwendet. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein Algorithmus entwickelt und eingesetzt, mit dem das Reihenfolgenproblem der Reparaturlackierung gelöst und die empirischen Unsicherheiten abgebildet werden können. Da hierbei neben der Zeitersparnis auch der Einfluss der Unsicherheit auf die erreichbare Verbesserung untersucht werden soll, wird ein vollständig enumeratives Verfahren verwendet und mit einer Monte-Carlo-Simulation verknüpft. Dadurch können sämtliche optimalen Reihenfolgen in Abhängigkeit der Unsicherheit der Eingangsdaten bestimmt und deren Besonderheiten analysiert werden.

Grundlage für die Durchführung der Ablaufverbesserung ist die Analyse bestehender Prozesse in der Reparaturlackierung sowie die Ermittlung ihres Zeitbedarfs. Dazu wurden umfangreiche Arbeitszeitstudien durchgeführt und Zeitparameter berechnet, mit deren Hilfe die Dauer einzelner Arbeitsschritte bzw. Arbeitsabschnitte bestimmt werden kann. Zudem ermöglicht der Umfang der Studien die Bestimmung der Unsicherheiten und der jeweiligen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für jeden Arbeitsschritt. Hierbei zeigt sich, dass die auftrags- und teilebezogenen Arbeitsschritte in der Regel log-normalverteilt sind, wohingegen die flächenabhängigen Schritte durch eine Normalverteilung beschrieben werden können. Bei der durchgeführten Identifizierung der Ausreißer wird zudem deutlich, dass eine detaillierte Prozesskenntnis notwendig ist, um eine Eliminierung prozessbedingter Extremwerte zu verhindern. Deren Berücksichtigung ist jedoch unerlässlich, sollen die ermittelten Zeitparameter die Vielfalt der Bedingungen in den Lackierereien widerspiegeln.

Für die Ablaufplanung ist die Formulierung eines konkreten Planungsproblem notwendig. Die in der Praxis herrschenden Bedingungen werden dabei über Nebenbedingungen, Zielgröße und die Wahl der Planungsperiode beschrieben. Die Beispielaufträge, die zufällig aus den aufgenommenen Zeitstudien ausgewählt wurden, geben die in der Praxis anzutreffende Vielfalt der Aufträge in Umfang und Schadenstiefe wider. Zudem werden zwei unterschiedliche personelle Besetzungen der Referenzwerkstatt berücksichtigt, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu untersuchen. Der Vergleich der Ergebnisse des deterministischen und des stochastischen Planungsproblem zeigt, dass die berechneten durchschnittlichen Zeiterparnisse bei beiden Besetzungen vergleichbar sind. Jedoch wird durch Berücksichtigung der Unsicherheit deutlich, dass diese Verbesserung nur mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 40 % erreicht bzw. übertroffen werden kann. Bei Betrachtung der Wahrscheinlichkeit, mit der die Startsequenz bereits dem Optimum entspricht, führen die deterministische und stochastische Lösung zu unterschiedlichen Werten und sogar zu gegensätzlichen Aussagen beim Vergleich der beiden Besetzungen.

Da der Einsatz softwaregestützter Planungsinstrumente in der Reparaturlackierung nur für mittlere und größere Betrieb vorstellbar ist, werden im Rahmen dieser Arbeit aus den optimalen Reihenfolgen der Ablaufplanung Handlungsempfehlungen abgeleitet, die eine Vorsortierung der Aufträge durch einfach umzusetzende Regeln ermöglichen. Dabei stellt sich heraus, dass unter Einsatz dieser Regeln nur in 6,5 % bzw. 13,5 % der Fälle die optimale Reihenfolge bestimmt werden kann. Dies führt zu einer deutlichen Reduzierung des Verbesserungspotenzial. Durch die Berücksichtigung der Unsicherheit lässt sich folglich zeigen, dass solche Regeln für den praktischen Einsatz in der Reparaturlackierung nicht formuliert werden können.

Die Analyse einzelner Arbeitsschritte macht deutlich, dass zusätzliche Zeiteinsparungen durch die Modifikation innerbetrieblicher Abläufe erzielt werden können. Es zeigt sich, dass dabei folgende Aspekte von Bedeutung sind: die Materialbereitstellung am Arbeitsplatz, das Gruppieren von Aufträgen gleicher Farbe sowie bestimmter Arbeitsschritte vor Arbeitsende und die Verbesserung der zum Schleifen eingesetzten Techniken. Im Zuge der Untersuchungen stellt sich heraus, dass die hier vorgeschlagenen Maßnahmen zu einer ähnlichen bzw. höheren Einsparung führen, wie sie durch die Optimierung der Reihenfolge erreicht werden kann. Da sie einfach umzusetzen sind, ist ihre Bedeutung für die Praxis höher einzustufen als die der Reihenfolgenplanung, auch wenn eine Betrachtung der Unsicherheiten dieser Maßnahmen nicht möglich ist.

Die in dieser Arbeit vorgenommene Analyse der Betriebsabläufe in der Reparaturlackierung zeigt, dass hier ein bedeutendes Verbesserungspotenzial vorhanden ist. Grundlage für

diese Schlussfolgerung sind die ausführlichen Arbeitszeitstudien, die in Reaktion auf den zunehmenden Einsatz produktintegrierter Minderungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Letztendlich zeigt sich aus den hier realisierten Analysen, dass zum einen die Arbeitszeit und damit der Prozessablauf und dessen Veränderung bei der Bewertung eben solcher Minderungsmaßnahmen zu berücksichtigen ist. Zum anderen lassen sich aus der in diesem Zusammenhang durchzuführenden Prozessanalyse zusätzliche Verbesserungspotenziale identifizieren. Eine gleichzeitige Berücksichtigung der mit dem Prozess verbundenen Unsicherheiten erhöht dabei die Aussagekraft der Ergebnisse wesentlich und lässt eine praxisnähere Interpretation zu. Dies gilt auf Grund der Vielzahl an den Prozess beeinflussenden Faktoren besonders für handwerkliche Tätigkeiten, wie es im Rahmen dieser Arbeit für das Anwendungsbeispiel der Reparaturlackierung gezeigt werden konnte.

Mit der vorliegenden Arbeit wird erstmals eine detaillierte Analyse der Betriebsabläufe einer handwerklichen Tätigkeit durchgeführt und die Möglichkeit des Einsatzes einer Ablaufplanung unter Berücksichtigung der Unsicherheit untersucht. Die dabei gewählte Vorgehensweise hinsichtlich Umfang, Auswertung und Verwendung der ermittelten Zeitdaten kann als exemplarisch für vergleichbare Prozesse mit Werkstattcharakter gesehen werden. Die Ergebnisse der Fallbeispiele unterstreichen die Bedeutung der Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Bewertung berechneter Verbesserungspotenziale. Insgesamt zeigt die Arbeit sowohl Werkstattbetreibern als auch Automobilherstellern Ansatzpunkte für eine Verbesserung der Abläufe in der Reparaturlackierung auf. Dabei können die gewonnenen Erkenntnisse sowohl zur Verbesserung bestehender Prozesse als auch bei der Planung zukünftiger Werkstätten und deren Abläufe eingesetzt werden. Sie stellen damit die Grundlage für Strategien zur Umsetzung zukünftiger umweltpolitischer und betriebswirtschaftlicher Anforderungen dar.

Literaturverzeichnis

- [1] ADES, A. E. ; LU, G. : Correlations Between Parameters in Risk Models: Estimation and Propagation of Uncertainty by Markov Chain Monte Carlo. In: *Risk Analysis* 23 (2003), Nr. 6, S. 1165–1172
- [2] AGGOUNE, R. : Minimizing the makespan for the flow shop scheduling problem with availability constraints. In: *European Journal of Operational Research* 153 (2004), S. 534–543
- [3] ANSELM, D. : *Die Kfz-Reparaturlackierung*. Würzburg : Vogel-Buchverlag, 1999
- [4] ATKINSON, A. ; RIANI, M. : *Robust Diagnostic Regression Analysis*. New York; Berlin; Heidelberg : Springer, 2000 (Springer Series in Statistics)
- [5] AUER, W. : Sechs Autohäuser gründen ein gemeinsames Lackierzentrum. In: *Fahrzeug- und Metalllackierer* 46 (2002), Nr. 9, S. 26–27
- [6] AUTOHAUSONLINE: *Lackieranlagen Durst gibt auf*.
<http://www.autohaus.de/sixcms/detail.php?id=56725>, 22.3.2005
- [7] AVCI, N. : *Zur Produktprogrammplanung in Unternehmen der Lackproduktion - Entwicklung eines Vorgehensmodells unter besonderer Berücksichtigung neuer umweltgesetzlicher Regelungen auf die Lackanwendung*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2003 (Fortschrittsberichte VDI, Reihe 16, Nr. 162)
- [8] AVERILL, A. F. ; INGRAM, J. M. ; NOLAN, P. F.: A Study of the Dispersion of Solvent Vapour in the Workspace during wipe Cleaning of Metal Components with Organic Solvents - A Monte Carlo Uncertainty Analysis. In: *Trans IMF* 77 (1999), Nr. 5, S. 204–208
- [9] AYTUG, H. ; LAWLEY, M. A. ; MCKAY, K. ; MOHAN, S. ; UZSOY, R. : Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions. In: *European Journal of Operational Research* 161 (2005), S. 86–110

- [10] BABLICK, M. ; FEDERL, S. : *Fachwissen für Maler und Lackierer*. 3. Köln : H. Stam GmbH, 1997
- [11] BAKER, K. R.: *Introduction to Sequencing and Scheduling*. New York, London, Sydney, Toronto : John Wiley and Sons, 1974
- [12] BALASUBRAMANIAN, J. ; GROSSMANN, I. E.: Scheduling optimization under uncertainty - an alternative approach. In: *Computers and Chemical Engineering* 27 (2003), S. 469–490
- [13] BASIL, M. ; JAMIESON, A. : Uncertainty of complex systems by Monte Carlo simulation. In: *Measurement+Control* 32 (1999), S. 16–20
- [14] BASSETT, M. ; PEKNY, J. F. ; REKLAITIS, G. V.: Using Detailed Scheduling to Obtain Realistic Operating Policies for a Batch Processing Facility. In: *Industrial and Engineering Chemistry Research* 36 (1997), S. 1717–1726
- [15] BERNE, A. : Comparison of the Uncertainties Calculated for the Results of Radiochemical Determinations Using the Law of Propagation of Uncertainty and Monte Carlo Simulation. In: *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 248 (2001), Nr. 1, S. 179–183
- [16] BERTHOUEX, P. M. ; BROWN, L. C.: *Statistics for Environmental Engineers*. Boca Raton, USA : CRC Press, 1994
- [17] BIECKER, C. : Festkörperreiche Lacksysteme. In: ONDRATSCHEK, D. (Hrsg.): *Jahrbuch besser lackieren! 2002*. Vincentz Verlag, 2001, S. 42–50
- [18] BLAIR, R. : Innovationen für Fahrzeuglacke. In: *Fahrzeug- und Metalllackierer* 46 (2002), Nr. 2, S. 9–13
- [19] BLÜMEL, F. : *Stoffstrommanagement in der handwerklichen Autoreparaturlackierung - Zur Planung und Steuerung betrieblicher Stoff- und Energieströme in kleinen und mittleren Unternehmen der Autoreparaturlackierung*. Düsseldorf : VDI Verlag, 2001 (Fortschrittsberichte VDI, Reihe 16, Nr. 129)
- [20] BLÜMEL, F. ; LONJARET, J.-P. ; RENTZ, O. : Stoffstrommanagement für die Autoreparaturlackierung. In: *Tagungsband zur Großen Naßlacktagung*, 1998
- [21] BMU: *31. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen*

- bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen). (31.BImSchV), 2001
- [22] BOUQUARD, J.-L. ; BILLAUT, J.-C. ; KUBZIN, M. A. ; STRUSEVICH, V. A.: Two-machine flow shop scheduling problems with no-wait jobs. In: *Operations Research Letters* 33 (2005), S. 255–262
- [23] BRAUER, H. : *Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik*. Bd. 2: Produktions- und produktintegrierter Umweltschutz. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1996
- [24] BREITBARTH, M. ; HAUFF, M. von ; MAIER, K.-D. : *Innovationserfolge durch umweltschonende Investitionsgüter - Pilotstudie zur Oberflächentechnikindustrie in Baden-Württemberg*. Forschungsbericht, 1995
- [25] BÖRGER, G.-G. : Fortschritte in der Luftreinhaltechnik - Optimierung von produktionsintegriertem Umweltschutz und Abgasreinigung. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 60 (2000), Nr. 3, S. 121–122
- [26] BRUCKER, P. : *Scheduling Algorithms*. 2nd. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1998
- [27] BUSATO, F. : Powder and Waterborne Coatings 2000 - 2010 - Is Past Growth Sustainable? In: ADLER, H.-J. (Hrsg.) ; POTJE-KAMPLOTH, K. (Hrsg.): *Quo Vadis Coatings*. Wiley-VCH, 2002 (Macromolecular Symposia), S. 17–21
- [28] CAMPBELL, H. ; DUDEK, R. A. ; SMITH, M. L.: A heuristic algorithm for the n Job m machine sequencing problem. In: *Management Science* 16 (1970), Nr. 10, S. B630–B637
- [29] CAPE, J. N.: Effect of airborne volatile organic compounds on plants. In: *Environmental Pollution* 122 (2003), S. 145–157
- [30] CEPE: *Technische Richtlinie für Fahrzeugreparaturlackierung*. Bericht, 1999
- [31] CEPE: *Paint Statistics 2002/2003*. Folienpräsentation, 2004
- [32] CHANAS, S. ; KASPERSKI, A. : On two single machine scheduling problems with fuzzy processing times and fuzzy due dates. In: *European Journal of Operational Research* 147 (2003), S. 281–296

- [33] CHRIST, C. : Produktionsintegrierter Umweltschutz am Beispiel der chemischen Industrie. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *Integrierter Umweltschutz: Ingenieurkonzepte für eine umweltverträgliche Technikgestaltung*. VDI-Verlag, 1991, S. 79–106
- [34] CHRIST, C. : Integrated Environmental Protection Reduces Water Pollution. In: *Chemical Engineering and Technology* 22 (1999), Nr. 8, S. 642–651
- [35] CIROTH, A. : *Fehlerrechnung in Ökobilanzen*, Fakultät II - Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin, Dissertation, 2001
- [36] COOK, R. D. ; WEISBERG, S. : *Residuals and Influence in Regression*. London : Chapman and Hall, 1982
- [37] CORSTEN, H. : Produktivitätsmanagement bilateraler personenbezogener Dienstleistungen. In: CORSTEN, H. (Hrsg.) ; HILKE, W. (Hrsg.): *Dienstleistungsproduktion*. Gabler, 1994 (Schriften zur Unternehmensführung), S. 43–77
- [38] CORSTEN, H. : *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. München, Wien : Oldenbourg, 2000 (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre)
- [39] COUGHLAN, L. ; BAIL, M. ; COX, P. : System uncertainty modelling using Monte Carlo simulation. In: *Measurement+Control* 33 (2000), S. 78–81
- [40] COX, L. A. J.: *Risk Analysis: Foundations, Models and Methods*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002
- [41] COX, M. ; HARRIS, P. ; SIEBERT, B. R. L.: Evaluation of Measurement Uncertainty Based on the Propagation of Distributions Using Monte Carlo Simulation. In: *Measurement Techniques* 46 (2003), Nr. 9, S. 824–833
- [42] DANIELS, R. L. ; KOUVELIS, P. : Robust Scheduling to Hedge Against Processing Time Uncertainty in Single-stage Production. In: *Management Science* 41 (1995), Nr. 2, S. 363–376
- [43] DANNENBRING, D. G.: An evaluation of flow shop sequencing heuristics. In: *Management Science* 23 (1977), Nr. 11, S. 1174–1182
- [44] DAUB, A. : *Ablaufplanung*. Bergisch Gladbach, Köln : Josef Eul Verlag, 1994
- [45] DECISIONEERING INC.: *Crystal Ball 2000.2 - User Manual*. 2001

- [46] DEMPSTER, M. A. H. ; FISHER, M. L. ; JANSEN, L. ; LAGEWEG, B. J. ; LENSTRA, J. K. ; KAN, A. H. G. R.: Analysis of Heuristics for Stochastic Programming: Results for Hierarchical Scheduling Problems. In: *Mathematics of Operations Research* 8 (1983), Nr. 4, S. 525–537
- [47] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Lacke und Anstrichstoffe - Fachausdrücke und Definitionen für Beschichtungsstoffe und Beschichtungen*. (DIN 55945), 1999
- [48] DEUTSCHES KRAFTFAHRZEUGGEWERBE: *Geschäftsbericht 2000/2001*. 2001
- [49] DEUTSCHES KRAFTFAHRZEUGGEWERBE: *Geschäftsbericht 2003/2004*. 2004
- [50] DIETZ, T. : Industrielle Wasserlacke und ihre besonderen Verarbeitungsbedingungen. In: ONDRATSCHEK, D. (Hrsg.): *Jahrbuch besser lackeiren! 2002*. Vincentz Verlag, 2001, S. 51–73
- [51] DOMSCHKE, W. ; SCHOLL, A. ; VOSS, S. : *Produktionsplanung - Ablauforganisatorische Aspekte*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1997
- [52] DUBOIS, D. ; FARGIER, H. ; FORTEMPS, P. : Fuzzy scheduling: Modelling flexible constraints vs. coping with incomplete knowledge. In: *European Journal of Operational Research* 147 (2003), S. 231–252
- [53] DUDEK, R. A. ; PANWALKAR, S. S. ; SMITH, M. L.: The lessons of flowshop scheduling research. In: *Operations Research* 40 (1992), Nr. 1, S. 7–13
- [54] DYCKHOFF, H. : *Grundzüge der Produktionswirtschaft*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1998
- [55] EC: *Council Directive 96/61/EC concerning integrated pollution prevention and control*. (1996/61/EC), 1996
- [56] EC: *Richtlinie über die Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aufgrund der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Farben und Lacken und in Produkten der Fahrzeugreparaturlackierung sowie zur Änderung der Richtlinie 1999/13/EG*. (2004/42/EG), 21-4-2004
- [57] EC: *Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants*. (2001/81/EC), 23-10-2001

- [58] EC: *Council Directive 99/13/EC on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in certain activities and installations.* (1999/13/EC), 29-3-1999
- [59] ESTRELA, M. ; LIPKOVA, A. : *Condition, technical limitations, industrial and environmental costs in passing from metal to plastic.* Forschungsbericht, 2003
- [60] FARAWAY, J. : *Practical Regression and Anova Using R.* <http://www.stat.lsa.umich.edu/faraway/book/>, 2002
- [61] FINK, A. ; VOSS, S. : Solving the continuous flow-shop scheduling problem by metaheuristics. In: *European Journal of Operational Research* 151 (2003), S. 400–414
- [62] FISHMAN, G. : *Monte Carlo - Concepts, Algorithms, and Application.* New York, Berlin, Heidelberg : Springer, 1996 (Springer Series in Operation Research)
- [63] FLOUDAS, C. A. ; LIN, X. : Continuous-times versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. In: *Computers and Chemical Engineering* 28 (2004), S. 2109–2129
- [64] FLUCK, G. ; MÜLLER, J. : Lackierkabinen - Typen, Daten, Varianten. In: *Lackiererblatt* 4 (2000), S. 24–33
- [65] FLUCK, G. ; SCHRÖDER, J. ; MÜLLER, J. : *Technologie und Betriebsführung für Fahrzeuglackierbetriebe.* Frankfurt : Institut für Fahrzeuglackierung, 2001
- [66] FOLEY, R. D. ; SURESH, S. : Stochastically Minimizing the Makespan in Flow Shops. In: *Naval Research Logistics Quarterly* 31 (1984), S. 551–557
- [67] FORTEMPS, P. : Jobshop Scheduling with Imprecise Durations: A Fuzzy Approach. In: *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 5 (1997), Nr. 4, S. 557–569
- [68] FRANCK, B. ; NEUMANN, K. ; SCHWINDT, C. : *A capacity-oriented hierarchical approach to single-item and small-batch production planning using project scheduling methods.* Bericht, 1996
- [69] GELDERMANN, J. : *Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung.* Düsseldorf : VDI Verlag, 1999 (Fortschrittsberichte VDI, Reihe 16, Nr. 105)

- [70] GELDERMANN, J. ; AVCI, N. ; BLÜMEL, F. ; RENTZ, O. : Modelling of body-shop processes. In: *The Coatings Agenda Europe 2003* (2003), S. 16–17
- [71] GELDERMANN, J. ; PETERS, N.-H. ; NUNGE, S. ; RENTZ, O. : Best Available Techniques in the Sector of Adhesives Application. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 24 (2004), S. 85–91
- [72] GELDERMANN, J. ; RENTZ, O. : Integrated technique assessment with imprecise information as a support for the identification of Best Available Techniques (BAT). In: *OR Spectrum* 23 (2001), S. 137–157
- [73] GELDERMANN, J. ; SCHOLLENBERGER, H. ; HUBERT, I. ; RENTZ, O. : The sector of metal coating: integrated assessment of future states. In: *Advances in Coatings Technology-ACT '04*. Katowice : The Paint and Plastics Department of the Institute for Plastics Processing, 24. November 2004
- [74] GELDERMANN, J. ; SCHOLLENBERGER, H. ; RENTZ, O. : Linking Mass and Energy Flow Analysis with Time Management. In: KLAUS TOCHTERMANN, W. P. (Hrsg.): *Proceedings of the 16th International Conference of Informatics for Environmental Protection*, IGU/ISEP, 25.-27.September 2002, S. 424–432
- [75] GELDERMANN, J. ; SCHOLLENBERGER, H. ; RENTZ, O. : Die Verknüpfung von Stoffstromanalysen und Zeitstudien. In: SPATH, D. (Hrsg.) ; LANG, C. (Hrsg.): *Stoffstrommanagement - Entscheidungsunterstützung durch Umweltinformationen in der betrieblichen IT*, Fraunhofer IAO, 2003, S. 73–86
- [76] GELDERMANN, J. ; SCHOLLENBERGER, H. ; RENTZ, O. : Integrated Scenario Analysis for Metal Surface Treatment . In: *International Journal of Integrated Supply Management* 1 (2004), Nr. 2, S. 219–235
- [77] GENCOGLU, M. : Zeitstudium. In: LUCZAK, H. (Hrsg.) ; VOLPERT, W. (Hrsg.): *Handbuch Arbeitswissenschaft*. Schäffer-Poeschel, 1997, Kapitel 7.5.3., S. 916–920
- [78] GENTLE, J. E.: *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*. New York, Berlin, Heidelberg : Springer, 2003 (Statistics and Computing)
- [79] GIORDAN, B. ; LIEBSCHER, H. : Best Available Technique for vehicle refinishing - Technical and economic aspects. In: *Pollution Atmosphérique Special Volume* (2000), S. 73–78

- [80] GÜNTHER, H.-O. ; TEMPELMEIER, H. : *Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1997
- [81] GOLDSCHMIDT, A. ; STREITBERGER, H.-J. : *BASF Handbuch der Lackiertechnik*. Hannover : Vincentz Verlag, 2002
- [82] GOURGAND, M. ; GRANGEON, N. ; NORRE, S. : A contribution to the stochastic flow shop scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* 151 (2003), S. 415–433
- [83] GOURGAND, M. ; GRANGEON, N. ; NORRE, S. : Markovian analysis for performance evaluation and scheduling in m machine stochastic flow-shop with buffers of any capacity. In: *European Journal of Operational Research* 161 (2005), S. 126–147
- [84] GRABOWSKI, J. ; WODECKI, M. : A very fast tabu search algorithm for the permutation flow shop problem with makespan criterion. In: *Computers and Operations Research* 31 (2004), S. 1891–1909
- [85] GRÜNER, C. : *Die strategische Entwicklung umweltgerechter Produkte*. Düsseldorf : VDI Verlag, 2001 (Fortschrittsberichte VDI, Reihe 1, Nr. 349)
- [86] GROSS, J. : *Linear Regression*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2003 (Lecture Notes in Statistics)
- [87] GROSS, O. : Die Lackbestandteile und ihre Aufgaben - am Beispiel der organische Lösemittel enthaltenden Lacksysteme. In: ONDRATSCHEK, D. (Hrsg.): *Jahrbuch besser lackieren! 2002*. Vincentz Verlag, 2001, S. 25–31
- [88] GUTENBERG, E. : *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band 1: Die Produktion*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1983
- [89] HACKMACK, U. ; MAHRWALD, B. : *Lösemittelverordnung: Einführung und Vorschläge für die Umsetzung in die Praxis*. Forschungsbericht Nr. 500 40 301, Umweltbundesamt Berlin, 2002
- [90] HACKSTEIN, R. : *Produktionsplanung und -steuerung (PPS)*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1989
- [91] HALL, N. G. ; SRISKANDARAJAH, C. : A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process. In: *Operations Research* 44 (1996), Nr. 3, S. 510–525

- [92] HANSEMANN, W. : Strahlenhärtende Lacksysteme. In: ONDRATSCHEK, D. (Hrsg.): *Jahrbuch besser lackieren! 2002*. Vincentz Verlag, 2001, S. 74–85
- [93] HARTUNG, J. : *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. München, Wien : Oldenbourg, 1998
- [94] HAUBER, B. ; MITZ, W. ; PUCHAN, G. : *Die Autolackierung*. Würzburg : Vogel Buchverlag, 1992
- [95] HEINZ, K. : Ziele und Paradigmen der Zeitwirtschaft. In: LUCZAK, H. (Hrsg.) ; VOLPERT, W. (Hrsg.): *Handbuch der Arbeitswissenschaft*. Schäffer-Poeschel, 1997, Kapitel 7.5.1., S. 911–916
- [96] HENNEMANN, A. : *Betriebswirtschaftslehre für Fahrzeuglackierbetriebe*. München : Audin, 1994
- [97] HENNEMANN, A. : Chancen und Perspektiven. In: *Lackiererblatt* 1 (1999), S. 34–37
- [98] HONG, T.-P. ; CHUANG, T.-N. : Fuzzy scheduling on two machine flow shop. In: *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* 6 (1998), S. 471–481
- [99] HONKOMP, S. J. ; MOCKUS, L. ; REKLAITIS, G. V.: Robust Scheduling with Processing Time Uncertainty. In: *Computers and Chemical Engineering* 21 Suppl. (1997), S. S1055–S1060
- [100] HONKOMP, S. J. ; MOCKUS, L. ; REKLAITIS, G. V.: A framework for schedule evaluation with processing uncertainty. In: *Computers and Chemical Engineering* 23 (1999), S. 595–609
- [101] HOU, S. ; HOOGEVEEN, H. : The three-machine proportionate flow shop problem with unequal machine speeds. In: *Operations Research Letters* 31 (2003), S. 225–231
- [102] HOYBYE, J. : Model Error Propagation and Data Collection Design: An Application in Water Quality Modelling. In: *Water, Air, and Soil Pollution* 103 (1998), S. 101–119
- [103] IPCC: *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Vol.1 Reporting Instructions*. 1996
- [104] IPCC: *IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. 2000

- [105] IRINK, H. : Lösemittel erfolgreich mit Wasserlack verbannt. In: *Journal für Oberflächentechnik* 6 (2003), S. 28–30
- [106] ITOH, T. ; ISHII, H. : Fuzzy due-date scheduling problem with fuzzy processing time. In: *International Transactions of Operational Research* 6 (1999), S. 639–647
- [107] JANSEN, I. : The 'Sevilla Process' - Best Available Techniques in surface treatment using organic solvents. In: GELDERMANN, J. (Hrsg.) ; SCHOLLENBERGER, H. (Hrsg.) ; HUBERT, I. (Hrsg.) ; RENTZ, O. (Hrsg.): *Proceedings of the Conference on Integrated Scenario Analysis and Decision Support for the Modern Factory*. Karlsruhe : French-German Institute for Environmental Research (DFIU/IFARE), 23./24.September 2004, S. 127–136
- [108] JERAJ, R. ; KEALL, P. : The effect of statistical uncertainty on inverse treatment planning based on Monte Carlo dose calculation. In: *Physics in Medicine and Biology* 45 (2000), S. 3601–3613
- [109] JIA, Z. ; IERAPETRITOU, M. G.: Short-Term Scheduling under Uncertainty Using MILP Sensitivity Analysis. In: *Industrial and Engineering Chemistry Research* 43 (2004), S. 3782–3791
- [110] JOCHUM, R. : *Zur stoffstromorientierten Investitionsplanung im Rahmen integrierter Emissionsminderungskonzepte*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2001 (Fortschrittsberichte VDI, Reihe 16, Nr. 135)
- [111] JOHNSON, S. M.: Optimal two- and three-stage production schedules with set-up times. In: *Naval Research Logistics Quarterly* 1 (1954), S. 61–68
- [112] JONES, P. : Quality, capacity and productivity in service industries. In: *The Management of Service Operations*, Springer, 1988, S. 309–321
- [113] JOURDAN, M. : *Entwicklung eines Konzepts zur kosteneffizienten Minderung von anthropogenen VOC-Emissionen aus stationären Quellen*. Frankfurt am Main : Peter Lang, 1994 (Europäische Hochschulschriften: Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft, Band 1524)
- [114] KAMBUROWSKI, J. : Stochastically minimizing the makespan in two-machine flow shops without blocking. In: *European Journal of Operational Research* 112 (1999), S. 304–309

- [115] KAMINSKY, G. : *Praktikum der Arbeitswissenschaft*. München, Wien : Carl Hanser, 1980
- [116] KAYSSER, D. ; KOTT, M. : Produktionsintegrierter Umweltschutz bei der Herstellung von Beton- und Stahlbetonelementen des Hochbaus im Fertigteilwerk. In: *Concrete precasting plant and technology* 68 (2002), Nr. 8, S. 52–57
- [117] KHAN, F. I. ; GHOSHAL, A. K.: Removal of Volatile Organic Compounds from polluted air. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 13 (2000), S. 527–545
- [118] KISTNER, K.-P. ; STEVEN, M. : *Produktionsplanung*. Physica-Verlag, 2001
- [119] KLASING, J. : LaKaZes mit Zukunft? In: *AutoService* 4 (2003), S. 12
- [120] KNILL, C. : *Europäische Umweltpolitik - Steuerungsprobleme und Regulierungsmuster im Mehrebenensystem*. Opladen : Leske und Budrich, 2003 (Governance)
- [121] KONNO, T. ; ISHII, H. : An open shop scheduling with fuzzy allowable time and fuzzy resource constraint. In: *Fuzzy Sets and Systems* 109 (2000), S. 141–147
- [122] KRIMM, O. : *Beitrag zur Produktionsplanung und -steuerung von technischen Dienstleistungen*. Dortmund : Verlag Praxiswissen, 1995 (Fabrikorganisation)
- [123] KU, P.-S. ; NIU, S.-C. : On Johnson's Two-machine Flow Shop with Random Processing Times. In: *Operations Research* 34 (1986), Nr. 1, S. 130–136
- [124] KUBIAK, W. ; BLAZEWICZ, J. ; FORMANOWICZ, P. ; BREIT, J. ; SCHMIDT, G. : Two-machine flow shops with limited machine availability. In: *European Journal of Operational Research* 136 (2002), S. 528–540
- [125] KUCZERA, G. ; PARENT, E. : Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models:the Metropolis algorithm. In: *Journal of Hydrology* 211 (1998), S. 69–85
- [126] LADHARI, T. ; HAOUARI, M. : A computational study of the permutation flow shop problem based on a tight lower bound. In: *Computers and Operations Research* 32 (2005), S. 1831–1847
- [127] LAFORSCH, M. : *Kosten der Luftreinhaltung: ein Ansatz zur Erstellung von Kostenfunktionen für die Emissionsminderung zur Unterstützung internationaler umweltpolitischer Verhandlungen*. Frankfurt am Main : Peter Lang, 1999 (Europäische Hochschulschriften: Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaften, Bd. 2507)

- [128] LAIBLE, R. : High-Solids-Materialien als energiesparende, umweltfreundliche Lackiersysteme. In: BURCKHARDT, W. (Hrsg.): *Umweltfreundliche Lackiersysteme*. expert verlag, 1984 (Kontakt und Studium, Band 126), S. 49–82
- [129] LANGE, P. de: A History of Power Coatings. In: *Industrial Paint and Powder* 80 (2004), Nr. 2, S. 23–27
- [130] LATZ, T. : *Entscheidungsmodelle in der Ablaufplanung: mathematische Programme for Shop-Scheduling-Probleme*. Wiesbaden : Gabler Verlag; Deutscher Universitäts-Verlag, 1997
- [131] LECHLEITER, I. : *Maschinenbelegungsplanung in der Variantenfertigung*. Deutscher Universitäts-Verlag, 1999
- [132] LI, W. ; GLAZEBOOK, K. D.: On stochastic machine scheduling with general distributional assumptions. In: *European Journal of Operational Research* 105 (1998), S. 525–536
- [133] LIEBSCHER, H. : Die zukünftige Technologie in der Fahrzeugreparaturlackierung - Entwicklung von Lacksystemen gemäß des Vereinfachten Reduzierungsplans der 31.BImSchV. In: *Fachtagung zu Anforderungen der 31.BImSchV an Anlagen der Autoreparaturlackierung*, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2002, S. 74–85
- [134] LIN, X. ; JANAK, S. L. ; FLOUDAS, C. A.: A new robust optimization approach for scheduling under uncertainty: I. Bounded uncertainty. In: *Computers and Chemical Engineering* 28 (2004), S. 1069–1085
- [135] LITOIU, M. ; TADEI, R. : Real time task scheduling allowing fuzzy due dates. In: *European Journal of Operational Research* 100 (1997), S. 475–481
- [136] LIU, S. ; ONG, H. L.: A comparative study of algorithms for the flowshop scheduling problem. In: *Asia-Pacific Journal of Operational Research* 19 (2002), S. 205–222
- [137] LUCEY, T. : *Quantitative Techniques*. 6. London, New York : Continuum, 2002
- [138] LUCZAK, H. ; VOLPERT, W. : *Handbuch der Arbeitswissenschaft*. Stuttgart : Schäffer Poeschl Verlag, 1997
- [139] LUTZ, M. ; ASCHER, D. : *Einführung in Python*. Köln : O'Reilly, 2000
- [140] MACCARTHY, B. L. ; JIYIN, L. : Adressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. In: *International Journal of Production Research* 31 (1993), Nr. 1, S. 59–79

- [141] MAK, C.-P. ; MÜHLE, H. ; ACHINI, R. : Integrated Solutions to Environmental Protection. In: *Chimia* 51 (1997), S. 184–188
- [142] MANNE, A. S.: On the Job-Shop Scheduling Problem. In: *Operations Research* 8 (1960), S. 219–223
- [143] MARSEGUERRA, M. ; ZIO, E. : *Basics of Monte Carlo Method with Application to System Reliability*. Hagen : LiLoLe-Verlag, 2002
- [144] MATERAZZI, T. ; MITTERMAYER, C. : Statistische Fehlerfortpflanzung nach DIN 1319 und der ISO/BIPM-Leitlinie. In: *Technisches Messen* 65 (1998), Nr. 1, S. 22–29
- [145] MAY, T. : Die VOC-Richtlinie als Chance für Lackierbetriebe. In: *Journal für Oberflächentechnik* 12 (2000), S. 34–39
- [146] MCELROY, B. : Choosing the Right Technology. In: *Industrial Paint and Powder* 79 (2003), Nr. 10, S. 37–44
- [147] MEYER, B. : Pulverlacke. In: BURCKHARDT, W. (Hrsg.): *Umweltfreundliche Lackiersysteme*. expert verlag, 1984 (Kontakt und Studium, Band 126), S. 83–117
- [148] MIGNON, D. J. ; HONKOMP, S. J. ; REKLAITIS, G. V.: A Framework for investigating Schedule Robustness under Uncertainty. In: *Computers and Chemical Engineering* 19 Suppl. (1995), S. S615–S620
- [149] MILLARD, S. : *EnvironmentalStats for S-PLUS*. New York : Springer, 1998
- [150] MILLING, P. : Integrierter Umweltschutz im Produktionsprozeß. In: EICHHORN, P. (Hrsg.): *Ökosoziale Marktwirtschaft*. Gabler, 1995, S. 145–161
- [151] MÜLLER, F. A.: Produkt- und produktionsintegrierter Umweltschutz bei Lacken und Farben. In: BRAUER, H. (Hrsg.): *Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik, Band 2: Produktions- und produktintegrierter Umweltschutz*. Springer, 1996, S. 582–615
- [152] MUGLER, J. : *Betriebswirtschaftslehre der Klein- und Mittelbetriebe*. Bd. 1. Springer, 1998
- [153] NANETTI, P. : *Lackrohstoffkunde*. Hannover : Vincetz Verlag, 2000
- [154] NEUMANN, K. : *Produktions- und Operationsmanagement*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1996

- [155] NEUMANN, K. ; MORLOCK, M. : *Operations Research*. München, Wien : Hanser, 1993
- [156] NUNGE, S. : *Der Referenzanlagenansatz zur Ableitung von Luftreinhaltestrategien*. Düsseldorf : VDI Verlag, 2001 (Fortschrittsberichte VDI, Reihe 15, Nr. 234)
- [157] OBST, M. : *Lackierereien planen und optimieren*. Hannover : Vincentz Verlag, 2002 (Moderne Lackiertechnik)
- [158] ONDRATSCHEK, D. : VOC-Emissionen reduzieren mit effektiver Betriebsorganisation. In: *Journal für Oberflächentechnik* 11 (2002), S. 22–24
- [159] PACK, M. : *Kapazitätsmessung und Kapazitätsplanung in Dienstleistungsbetrieben mit Handwerkscharakter am Beispiel der Kraftfahrzeug-Werkstätten*. Frankfurt : Peter Lang, 1993 (Europäische Hochschulschriften: Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaften, Bd. 1428)
- [160] PAPPIS, C. P. ; KARACAPILIDIS, N. I.: Lot Size Scheduling using Fuzzy Numbers. In: *International Transactions of Operational Research* 2 (1995), S. 205–212
- [161] PARTHASARATHY, G. ; EL-HALWAGI, M. M.: Optimum mass integration strategies for condensation and allocation of multicomponent VOCs. In: *Chemical Engineering Science* 55 (2000), S. 881–895
- [162] PFEIFFER, W. ; DÖRRIE, U. ; STOLL, E. : *Menschliche Arbeit in der industriellen Produktion*. Göttingen : Vandenhoeck und Ruprecht, 1977
- [163] PHILIPP, S. : Hochglänzende Kunststoff-Folien - Alternative zur Fahrzeuglackierung. In: *Journal für Oberflächentechnik* 2 (2003), S. 30–32
- [164] PILCHER, G. R.: Meeting the Challenge of Radical Change: Coatings R&D as we enter the 21st Century. In: ADLER, H.-J. (Hrsg.) ; POTJE-KAMPLOTH, K. (Hrsg.): *Quo Vadis - Coatings?* Wiley-VCH, 2002 (Macromolecular Symposia), S. 1–16
- [165] PINEDO, M. : Minimizing Makespan with Bimodal Processing Times Distributions. In: *Management Science* 27 (1981), Nr. 5, S. 582–586
- [166] PINEDO, M. : Minimizing the Expected Makespan in Stochastic Flow Shops. In: *Operations Research* 30 (1982), Nr. 1, S. 148–162
- [167] PINEDO, M. : Stochastic Scheduling with Release Dates and Due Dates. In: *Operations Research* 31 (1983), Nr. 3, S. 559–572

- [168] PINEDO, M. : Scheduling Jobs with Exponentially Distributed Processing Times on Two Machines with Resource Constraints. In: *Management Science* 30 (1984), Nr. 7, S. 883–889
- [169] PINEDO, M. : *Scheduling - Theory, Algorithms, and Systems*. Upper Saddle : Prentice Hall, 2002
- [170] PLATE, E. J.: *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*. Berlin : Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1993
- [171] POTTS, C. N. ; SHMOYS, D. B. ; WILLIAMSON, D. P.: Permutation vs. non-permutation flow shop schedules. In: *Operations Research Letters* 10 (1991), S. 281–284
- [172] POULTER, S. R.: Monte Carlo Simulation in Environmental Risk Assessment - Science, Policy and Legal Issues. In: *Risk: Health, Safety and Environment* 9 (1998), Nr. 7, S. 7–26
- [173] RAWLINGS, J. ; PANTULA, S. ; DICKEY, D. : *Applied Regression Analysis*. 2nd. New York : Springer, 1998 (Springer Texts in Statistics)
- [174] REFA - VERBAND FÜR ARBEITSZEITSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V.: *Methodenlehre des Arbeitsstudiums; Teil 2: Datenermittlung*. München : Carl Hanser Verlag, 1992
- [175] REKLAITIS, G. V.: Overview of Planning and Scheduling Technologies. In: *Latin American Applied Research* 30 (2000), S. 285–293
- [176] RENTZ, O. : *Techno-Ökonomie betrieblicher Emissionsminderungsmaßnahmen*. Berlin : Erich Schmidt Verlag, 1979 (Technological Economics, Band 4)
- [177] RENTZ, O. : Integrierter Umweltschutz. In: JUNKERNHEINRICH, M. (Hrsg.) ; KLEMMER, P. (Hrsg.) ; WAGNER, G. R. (Hrsg.): *Handbuch zur Umweltökonomie*. Analytica, 1995 (Handbücher zur angewandten Umweltforschung), S. 64–69
- [178] RENTZ, O. ; AVCI, N. ; PETERS, N.-H. ; GELDERMANN, J. : *Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens zum verbesserten Einsatz von Wasserlacken in kleinen und mittleren Unternehmen der Kfz-Reparaturlackierung*. Forschungsbericht, 2001
- [179] RENTZ, O. ; BLÜMEL, F. ; LONJARET, J.-P. ; GELDERMANN, J. ; GROSSE-OPHOFF, M. : *Stoffstrommanagement für kleine und mittlere Unternehmen aus dem Bereich*

- der Autoreparaturlackierung*. Erich Schmidt Verlag, 2000 (Initiativen zum Umweltschutz Band 20)
- [180] RENTZ, O. ; NUNGE, S. ; LAFORSCH, M. ; HOLTSMANN, T. : *Technical Background Document for the Actualisation and Assessment of UN/ECE Protocols related to the Abatement of the transboundary Transport of Volatile Organic Compounds from Stationary Sources*. Forschungsbericht, 1999
- [181] RENTZ, O. ; PETERS, N.-H. ; NUNGE, S. ; GELDERMANN, J. : *Bericht über Beste Verfügbare Techniken (BVT) in den Bereichen der Lack- und Klebstoffanwendung in Deutschland / Reports on the Best Available Techniques (BAT) in the Sectors of Paint and Adhesive Application in Germany (deutsch / english)*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2003
- [182] RENTZ, O. ; SCHOLLENBERGER, H. ; GELDERMANN, J. : *Arbeitszeitstudie für die Autoreparaturlackierung in Herstellerwerkstätten - Projekt im Auftrag des VDA unter Beteiligung der Marken Audi, BMW, Ford, Opel, Porsche und VW*. Forschungsbericht, 2003
- [183] RÜHL, G. ; MELCHER, S. : *Zur Arbeitsstrukturierung in Kraftfahrzeug-Reparatur-Betrieben*. Kösching : Heizmann, 1984
- [184] RITCHIE, A. ; OLLERENSHAW, B. ; HANNY, R. ; REYNOLDS, F. ; CONLIN, H. : *Reducing VOC emissions from the Vehicle Refinishing Sector*. Report, 2000
- [185] RITTGEN, P. : *Prozeßtheorie der Ablaufplanung*. Stuttgart, Leipzig : Teubner, 1998 (Teubner-Reihe Wirtschaftsinformatik)
- [186] ROBERT, C. P. ; CASELLA, G. : *Monte Carlo Statistical Methods*. New York, Berlin, Heidelberg : Springer, 1999 (Springer Texts in Statistics)
- [187] ROMMELFANGER, H. : *Fuzzy Decision Support-Systeme - Entscheiden bei Unschärfe*. 2. Berlin : Springer, 1994
- [188] ROUSSEEUW, P. ; LEROY, A. M.: *Robust Regression and Outlier Detection*. New York : John Wiley and Sons, 1987
- [189] RUBIK, F. : *Integrierte Produktpolitik*. Marburg : Metropolis-Verlag, 2002 (Ökologie und Wirtschaftsforschung, Band 44)
- [190] RYPDAL, K. ; WINIWARTER, W. : Uncertainties in GHG emission inventories. In: *Environmental Policy and Science* 4/2 (2001), Nr. 3, S. 107–116

- [191] SAADANI, N. E. H. ; GUINET, A. ; MOALLA, M. : A traveling salesman approach to solve the F/no-idle/Cmax problem. In: *European Journal of Operational Research* 161 (2005), S. 11–20
- [192] SACHS, L. : *Angewandte Statistik*. Berlin : Springer, 1992
- [193] SADOWSKI, F. : *Basiswissen Autoreparaturlackierung*. Würzburg : Vogel, 2000
- [194] SANMARTI, E. ; HUERCIO, A. ; ESPUÑA, A. ; PUIGJANER, L. : A combined scheduling/reactive scheduling Strategy to minimize the Effect of Process Operations Uncertainty in Batch Plants. In: *Computers and Chemical Engineering* 20 Suppl. (1996), S. S1263–S1268
- [195] SCHENK, H. : Quellen sprudeln spärlich. In: *kfz-betrieb* 6 (2000), S. 44–47
- [196] SCHNEEWEISS, C. : *Einführung in die Produktionswirtschaft*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2002
- [197] SCHNITZER, H. : Die auf einer Stoffstromanalyse basierende Implementierung von vorsorgendem integrierten Umweltschutz. In: *Chemie Ingenieur Technik* 70 (1998), Nr. 1/2, S. 64–73
- [198] SCHOLLENBERGER, H. ; GELDERMANN, J. ; RENTZ, O. : Materialflüsse und Arbeitsabläufe optimieren. In: *Tagungsband zur Veranstaltung: VOC senken: Lackierprozesse wirtschaftlich optimieren*. Stuttgart : Vincentz Verlag, 12.November 2002
- [199] SCHOLLENBERGER, H. ; GELDERMANN, J. ; RENTZ, O. : Analysis of time and motion studies in the sector of vehicle refinishing. In: DEISENROTH, M. P. (Hrsg.): *Proceedings of the 17th International Conference on Production Research (ICPR-17)*. Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 3.-7.August 2003
- [200] SCHOLLENBERGER, H. ; GELDERMANN, J. ; RENTZ, O. : Integrated Product Policy and its Consequences for Work Flow - A Case Study from Vehicle Refinishing. In: *Proceedings of the 11th LCA Case Studies Symposium and the 2003 European Meeting of the International Society for Industrial Ecology*. Lausanne : SETAC Europe, 03.-05.December 2003, S. 150–153
- [201] SCHOLLENBERGER, H. ; GELDERMANN, J. ; RENTZ, O. : Zeitbasierte Materialflüsse zur Planung des Arbeitsablaufs am Beispiel der Autoreparaturlackierung. In: *Umweltwirtschaftsforum* 11 (2003), Nr. 3, S. 68–73

- [202] SCHOLLENBERGER, H. ; GELDERMANN, J. ; RENTZ, O. : *Gute Betriebspraxis in der Reparaturlackierung - Möglichkeiten zur Verbesserung des Betriebsablaufs*. Forschungsbericht, 2004
- [203] SCHOLLENBERGER, H. ; GELDERMANN, J. ; TREITZ, M. ; RENTZ, O. : Best Available Techniques for Industrializing Countries: The Example of Chile and China. In: *Proceedings of the First Conference of Environmental Science and Technology*. New Orleans : American Academy of Sciences, 23. - 26. Januar 2005. – (in press)
- [204] SCHOLLENBERGER, H. ; HUBERT, I. ; GELDERMANN, J. ; RENTZ, O. : The Future of Metal Coating. In: GELDERMANN, J. (Hrsg.) ; SCHOLLENBERGER, H. (Hrsg.) ; HUBERT, I. (Hrsg.) ; RENTZ, O. (Hrsg.): *Proceedings of the Conference on Integrated Scenario Analysis and Decision Support for the Modern Factory*. Karlsruhe : French-German Institute for Environmental Research (DFIU/IFARE), 23./24. September 2004, S. 85–91
- [205] SCHULTMANN, F. : *Stoffstrombasiertes Produktionsmanagement: betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung industrieller Kreislaufwirtschaftssysteme*. Berlin : Erich Schmidt, 2003 (Technological economics ; 58)
- [206] SCHULTZ, J. : *Ausgewählte Methoden der Ablaufplanung*. Wiesbaden : Deutscher Universitäts Verlag, 1999
- [207] SHAH, N. : Single- and multisite planning and scheduling: current status and future challenges. In: BRICE CARNAHAN, J. F. P. (Hrsg.): Bd. 94, American Institute of Chemical Engineers, 1998, S. 75–90
- [208] SHEVLYAKOV, G. ; VILCHEVSKI, N. : *Robustness in Data Analysis: criteria and methods*. Utrecht : VSP, 2002 (Modern Probability and Statistics)
- [209] SIEVERDINGBECK, A. : *Zur Planung einer emissionsarmen Produktion in der Eisen- und Stahlindustrie*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2001 (Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 16, Nr. 128)
- [210] SLOWINSKI, R. ; HAPKE, M. : *Scheduling under Fuzziness*. Heidelberg, New York : Physica-Verlag, 2000 (Studies in Fuziness and Soft Computing)
- [211] SMITH, M. L. ; PANWALKAR, S. S. ; DUDEK, R. A.: Flow shop sequencing with ordered processing time matrices. In: *Management Science* 21 (1975), Nr. 5, S. 544–549

- [212] SMITH, M. L. ; PANWALKAR, S. S. ; DUDEK, R. A.: Flow shop sequencing problem with ordered processing time matrices: a general case. In: *Naval Research Logistics Quarterly* 23 (1976), S. 481–486
- [213] SMITH, R. D. ; DUDEK, R. A.: A general algorithm for solution of the n-Job, m-machine sequencing problem of the flow shop. In: *Operations Research* 15 (1967), S. 71–82
- [214] SOHN, M. D. ; SMALL, M. J. ; PANTAZIDOU, M. : Reducing Uncertainty in Site Characterization Using Bayes Monte Carlo Methods. In: *Journal of Environmental Engineering* (2000), S. 893–902
- [215] STARZMANN, O. : Effektive Lacktrocknung mit UV. In: *Journal für Oberflächentechnik* 12 (2000), S. 24–28
- [216] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Umweltökonomische Gesamtrechnung - Ausgaben für den Umweltschutz* -. Bericht, 2004
- [217] STEINBUCH, P. A. ; OLFERT, K. : *Fertigungswirtschaft*. Ludwigshafen : Friedrich Kiehl Verlag, 1978 (Kompendium der praktischen Betriebswirtschaft)
- [218] STEINHILPER, R. ; SCHNEIDER, A. : Produktions- und produktintegrierter Umweltschutz in der Fertigungsindustrie. In: BRAUER, H. (Hrsg.): *Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik, Band 2: Produktions- und produktintegrierter Umweltschutz*. Springer, 1996, Kapitel 11, S. 689–781
- [219] STOP+GO: *Eine Werkstatt-Kette im Aufschwung*.
<http://www.stopandgo.de/stopandgo.php?goto=ueberuns>, 22.3.2005
- [220] STREBEL, H. : Integrierter Umweltschutz - Merkmale, Voraussetzungen, Chancen. In: KREIKEBAUM, H. (Hrsg.): *Integrierter Umweltschutz: Eine Herausforderung für das Innovationsmanagement*. Gabler, 1990, S. 3–16
- [221] STROHBECK, U. ; CUDAZZO, M. ; DOMNICK, J. ; PULLI, K. ; YE, Q. : Advanced Powder Coating Technologies Open New Markets for VOC-free Metal Coating. In: GELDERMANN, J. (Hrsg.) ; SCHOLLENBERGER, H. (Hrsg.) ; HUBERT, I. (Hrsg.) ; RENTZ, O. (Hrsg.): *Proceedings of the Conference on Integrated Scenario Analysis and Decision Support for the Modern Factory*. Karlsruhe : French-German Institute for Environmental Research, 23./24.September 2004, S. 209–219

- [222] STROPP, J. ; KERHAGAN, S. ; LÖFFLER, H. ; THOMAS, H. ; WOLFF, U. : UV-Lacksysteme für die Autoreparaturlackierung. In: *Farbe & Lack* 9 (2004), S. 48
- [223] SZWARC, W. : Elimination methods in the $m \times n$ sequencing problem. In: *Naval Research Logistics Quarterly* 18 (1971), S. 295–305
- [224] SZWARC, W. : Optimal Elimination Methods in the $m \times n$ Flow-Shop Scheduling Problem. In: *Operations Research* 21 (1973), S. 1250–1259
- [225] TAYLOR, G. D. ; VENKATARAMAN, S. ; SADIQ, M. : An evaluation of flowshop scheduling algorithms for makespan reduction in a stochastic environment. In: *Production Planning and Control* 7 (1996), Nr. 2, S. 129–143
- [226] TELLINGHUISEN, J. : Statistical Error Propagation. In: *Journal of Physical Chemistry A* 105 (2001), S. 3917–3921
- [227] TEMIZ, I. ; EROL, S. : Fuzzy branch-and-bound algorithm for flow shop scheduling. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 15 (2004), S. 449–454
- [228] THELOKE, J. ; OBERMEIER, A. ; FRIEDRICH, R. : Abschätzung der Emissionen von Lösemitteln in Deutschland. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 61 (2001), Nr. 3, S. 105–112
- [229] THORNTON, H. W. ; HUNSUCKER, J. L.: A new heuristic for minimal makespan in flow shops with multiple processors and no intermediate storage. In: *European Journal of Operational Research* 152 (2004), S. 96–114
- [230] TOKTAS, B. ; AZIZOGLU, M. ; KÖKSALAN, S. K.: Two-machine flow shop scheduling with two criteria: Maximum earliness and makespan. In: *European Journal of Operational Research* 157 (2004), S. 286–295
- [231] TONINI, I. : Umweltschutz und industrielle Lackierung. In: LÜCKERT, O. (Hrsg.): *Emissionsarm lackieren*. Vincetz Verlag, 1989, S. 150–165
- [232] UMWELTBUNDESAMT: *Das Qualitäts-System-Emissionsinventare: Handbuch*. Berlin : Umweltbundesamt, 2004
- [233] UN/ECE: *Handbook for the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution and its Protocols*. New York, Genf : United Nations, 2004
- [234] VASANT, P. M.: Application of Fuzzy Linear Programming in Production Planning. In: *Fuzzy Optimization and Decision Making* 3 (2003), S. 229–241

- [235] VENABLES, W. N. ; RIPLEY, B. D.: *Modern Applied Statistics with S-PLUS*. New York, Berlin : Springer, 1999
- [236] VENABLES, W. N. ; SMITH, D. M.: *An introduction to R*. 2002
- [237] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Emissionsminderung: Reparaturlackierung für PKW und NFZ (Klein und Mittelbetriebe)*. (Richtlinie 3456), 2000
- [238] VLACH, M. : Single Machine Scheduling under Fuzziness. In: SLOWINSKI, R. (Hrsg.) ; HAPKE, M. (Hrsg.): *Scheduling under Fuzziness*. Physica Verlag, 2000 (Studies in Fuzziness and Soft Computing), S. 223–246
- [239] WEISE, K. ; ZHANG, H. : Uncertainty treatment in Monte Carlo simulation. In: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 30 (1997), S. 5971–5980
- [240] WOSSIDLO, P. R.: Finanzierung. In: PFOHL, H.-C. (Hrsg.): *Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe - Größenspezifische Probleme und Möglichkeiten zu ihrer Lösung*. Erich Schmidt Verlag, 1997 (Grundlagen und Praxis der Betriebswirtschaft), S. 287–333
- [241] YING, K.-C. ; LIAO, C.-J. : An ant colony system for permutation flow-shop sequencing. In: *Computers and Operations Research* 31 (2004), S. 791–801
- [242] YOKOYAMA, M. ; SANTOS, D. L.: Three-stage flow-shop scheduling with assembly operations to minimize the weighted sum of product completion times. In: *European Journal of Operational Research* 161 (2005), S. 754–770
- [243] ZADEH, L. A.: Fuzzy Sets. In: *Information and Control* 8 (1965), S. 338–353
- [244] ZADEH, L. A.: Calculus of Fuzzy Restrictions. In: ZADEH, L. A. (Hrsg.) ; FU, K.-S. (Hrsg.) ; TANAKA, K. (Hrsg.) ; SHIMURA, M. (Hrsg.): *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*. Academic Press, Inc., 1976, S. 1–40
- [245] ZADEH, L. A.: Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility. In: *Fuzzy Sets and Systems* 1 (1978), S. 3–28
- [246] ZADEH, L. A.: Fuzzy Logic. In: *Computer: innovative technology for computer professionals* 21 (1988), Nr. 4, S. 83–93
- [247] ZIMMERMANN, F. : Pulverlacksysteme. In: ONDRATSCHEK, D. (Hrsg.): *Jahrbuch besser lackieren! 2002*. Vincentz Verlag, 2001, S. 86–106
- [248] ZIMMERMANN, H. J.: *Fuzzy set theory and its application*. Boston : Kluwer, 1991

- [249] ZIMMERMANN, H. J. ; ANGSTENBERGER, J. : *Fuzzy-Technologien : Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993

A Programmcode des Ansatzes zur Ablaufplanung

```
# Laufindizes beginnen immer bei 0

#-----
# Anlegen einer Reihenfolge
def func(i,nr,sequences):
    for a in range(i):
        for seq in sequences:
            seqlen = len(seq)
            seq1 = seq[0:a] + nr + seq[a:seqlen]
            seqlen = len(seq)
            seqs.append(seq1)
    return seqs

#-----
# Erzeugen aller moeglichen Reihenfolgen
def seqrek(i,nr,counter): # i: Parameter zum Zerschneiden der Zahlenkette;
    global seqs          # n: einzufuegende Zahl; counter: zum Loeschen
    a = seqs[0:len(seqs)] # der alten Inhalte der Liste der Reihenfolgen
    func(i,nr,a)
    seqs = seqs[counter:len(seqs)]
    i = i+1
    nr = int(nr)+1
    counter = counter * nr
    if i<jmax+1:
        seqrek(i,str(nr),counter)
    else:
        return 0
```

```

#-----
# Berechnung der cmax Werte
def cmax(k,l,c): # k steht für Anzahl der Maschinen, l für die Jobnummer,
    global C # c ist counter
    if k == 1:          #Tritt doppelt auf, in beide Listen Schreiben
        Cmj = max(C[k-1][0][1],C[k-1][1][1]) + times[1][k]
        C[k][0][0] = Cmj #Schreiben in Liste der C mit konst. k
        C[k][1][0] = Cmj #Schreiben in Liste der C mit konst. l
    elif k > 1:        #Schreiben in Liste mit konst.
        Cmj = max(C[k-1][0][(k-1)-1],C[l-1][1][k-(l-1)]) + times[1][k]
        C[l][1][k-1] = Cmj
    else:              # gleichbedeutend mit l > k;
        Cmj = max(C[k-1][0][l-(k-1)],C[k][0][(l-1)-k]) + times[1][k]
        C[k][0][l-k] = Cmj
    #----- Erhoehen des Index der Maschinen und der Jobs (abwechseln)-----#
    if k == m-1 and l == jmax-1:
        maxC = C[len(C)-1][0][len(C[len(C)-1][0])-1]
        maxClist.append(maxC)
        return 0
    else:
        if c == 0:
            k = k+1
            c = 2 #Eins gibt die Art der Indexsteigerung an
            cmax(k,l,c)
        elif c== 1:
            k = k+1
            c = 2 #Zwei gibt die Art der Indexveraenderung an
            cmax(k,l,c)
        else:          #gleichbedeutend mit c == 2
            l = l+1
            k = k-1
            c = 1
            cmax(k,l,c)

#-----
# Aufruf von Excel und Einlesen der dort hinterlegten Werte
def ReadValues():
    global m, jmax, timesorig, o
    o.Workbooks("vehref_schedule.xls").Activate

```

```

o.ActiveWorkbook.Worksheets('Tabelle2').Select
timesorig = []
#----- Aufbau der Liste der Prozesszeiten -----#
for l in range(jmax):
    vallist = []
    for k in range(m):
        singval = o.Cells(6+k,3+1).Value
        vallist.append(float(singval))
    timesorig.append(vallist)
#----- Ende Aufbau Liste -----#

#-----Berechnung von Cmax-----
# Berechnung  $f\tilde{A}_4^1$  r den ersten Job und alle Maschinen
def calcmaxC(times):
    global C
    Cm1=0
    Cmj1 =[]
    for i in range(m):
        Cm1 = Cm1 + times[0][i]
        Cmj1.append(Cm1)
    C1j = 0
    Cm1j = []
    # Berechnung fuer die erste Maschine und alle Jobs
    for j in range(jmax):
        C1j = C1j + times[j][0]
        Cm1j.append(C1j)
    C = [[Cm1j,Cmj1]]
#-----Schreiben der Nullen zum Aufbau der geschachtelten Liste-----
    for i in range(1,m):
        C.append([0,0])
    for j in range(1,m):
        Csub1 = []
        Csub2 = []
        for k in range(j,jmax):
            Csub1.append(0)
        C[j][0] = Csub1
        for l in range(j,m):
            Csub2.append(0)
        C[j][1] = Csub2

```

```

#-----Aufrufen der Funktion zur Berechnung der Cmax-----
    cmax(1,1,0) #Indizes beginnen bei 0
#-----Ende Berechnung Cmax-----

#-----
# Anfüegen der optimalen Reihenfolgen an die Liste aller optimalen
# Reihenfolgen
def seqmin(step):
    global datum
    if step == 1:
        datum = time.strftime("%H%M_%d%b%Y",time.gmtime())
        # Anlegen sämtlicher Ordner, auch jener, die später in R benötigt
        # werden
        os.mkdir('E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum)
        os.mkdir('E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum + '\\minima')
        os.mkdir('E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum + '\\timebasis')
        os.mkdir('E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum + '\\minimacheck')
        os.mkdir('E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum + '\\minimacheck_v2')
        os.mkdir('E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum + '\\timebasis_sum')
        # ----- Oeffnen saemtlicher Dateien -----
        file = 'E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum + '\\minima\\'+
            'minima_' + str(step) + '.txt'
        minseq = open(file,'a')
        file2 = 'E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum + '\\'+
            'nr_minima.txt'
        NrOfMin = open(file2,'a')
        file3 = 'E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum + '\\'+
            'cmins.txt'
        cmins = open(file3,'a')
        file4 = 'E:\\diss\\rechnungen\\results\\'+ datum + '\\timebasis\\'+
            'timebasis_' + str(step) + '.txt'
        timebasis = open(file4,'a')
        #----- Schreiben der Ergebnisse -----
        listmin = min(maxClist)
        cmins.write(str(listmin) + '\n') # Schreiben der minimalen Zeiten
        NrOfMin.write(str(maxClist.count(listmin)) + '\n')
        #----- Schreiben der zugrunde liegenden Zeiten -----
        for j in range(m):
            for i in range(jmax):

```

```

        if i < jmax-1:
            timebasis.write(str(timesorig[i][j]) + ' ')
        if i == jmax-1:
            timebasis.write(str(timesorig[i][j]) + '\n')
#----- Schreiben aller Reihenfolgen minimaler Auftragszeit -----
for i in range(len(maxClist)):
    if maxClist[i] == listmin:
        minseq.write(seqs[i] + '\n')
#----- Schliessen der Dateien -----
minseq.close
NrOfMin.close
cmins.close
timebasis.close
#-----

#####
#
#           Hier startet der Code
#
#####

import win32com.client
import win32file
import win32ui
import win32con
import pickle
import time
import os

o = win32com.client.Dispatch("Excel.Application")
o.Visible = 1
o.Workbooks.Open("E:\\diss\\rechnungen\\programming\\vehref_schedule.xls")
jmax = o.Cells(2,3).Value # Bestimmung der Maxchinezahl
jmax = int(jmax)
m = o.Cells(3,3).Value # Einlesen der Jobnr.
m = int(m)
seqs = ['0'] # Startwert der Sequeunes
seqrek(2,"1",1) # Aufbau der Liste der Reihenfolgen
stepnr = 1000 # Anzahl der Ziehungen der Monte-Carlo Simulation

```

```

#---Prozedur zur Berechnung saemtlicher Reihenfolgen mit minimalen Cmax----
for step in range(1,stepnr+1):
    #-----Aufrufen von Excel, Einlesen der relevanten Daten -----
    ReadValues()
    o.Cells(3,6).Value = step
    o.Run('Tabelle2.nextstep') # Ziehung einer Zufallszahl
    #-----Durchsortieren der Zeiten auf Grundlage der sequences
    maxClist = []
    C = []
    for i in range(len(seqs)):
        times = []
        for n in seqs[i]:
            times.append(timesorig[int(n)])
        # Berechnung von Cmax fÃ¼r jede Times-Listee
        calcmxC(times)
    seqmin(step) # Schreiben der Reihenfolgen der minimalen Completion Times
    # (Cmax) in Datei minima

#-----
o.Run('Modul1.SaveAndClose')

#####
#
#           Hier endet der Code
#
#####

```


B Daten der Fallstudien

Im Folgenden werden die weiteren Eingangsdaten für die Berechnung der einzelnen Fallstudien aufgeführt. Die ersten fünf Tabellen (Tabelle B.1 bis B.5) beziehen sich dabei auf die Beispiele der Besetzung 1, Tabellen B.6 bis B.11 zeigen die Eingangsdaten der Beispiele der Besetzung 2. Die Tabelle der Eingangsdaten der ersten Fallstudie findet sich im Hauptteil des Dokumentes (vgl. Tabelle 5.2).

Tabelle B.1: Übersicht über die Daten der Fallstudie 2 für Besetzung 1

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	130,98	105,39	18,19
	neg. Abweichung [%]	-14,71	-31,33	-11,39
	pos. Abweichung [%]	19,21	53,00	19,05
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	142,58	98,52	17,86
	neg. Abweichung [%]	-13,47	-33,49	-13,57
	pos. Abweichung [%]	17,53	56,38	21,65
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	154,46	114,21	19,63
	neg. Abweichung [%]	-12,69	-28,70	-12,76
	pos. Abweichung [%]	16,94	49,18	17,35
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	193,66	134,66	29,76
	neg. Abweichung [%]	-10,68	-24,32	-10,88
	pos. Abweichung [%]	14,26	41,75	12,85
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	285,40	162,94	51,10
	neg. Abweichung [%]	-7,77	-20,86	-8,44
	pos. Abweichung [%]	10,18	34,68	10,54
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	156,35	118,24	21,57
	neg. Abweichung [%]	-12,31	-27,79	-11,91
	pos. Abweichung [%]	16,18	47,35	16,35
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	253,59	131,04	40,32
	neg. Abweichung [%]	-8,43	-25,27	-9,16
	pos. Abweichung [%]	10,78	43,15	11,22
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	172,49	124,36	23,69
	neg. Abweichung [%]	-11,59	-26,46	-12,22
	pos. Abweichung [%]	15,18	44,93	15,66
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	165,93	123,67	36,10
	neg. Abweichung [%]	-11,91	-26,47	-8,39
	pos. Abweichung [%]	15,63	45,44	10,42

Tabelle B.2: Übersicht über die Daten der Fallstudie 3 für Besetzung 1

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	201,94	147,40	37,54
	neg. Abweichung [%]	-9,86	-22,38	-7,98
	pos. Abweichung [%]	13,15	37,55	10,07
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	142,06	108,55	16,82
	neg. Abweichung [%]	-13,61	-30,44	-13,27
	pos. Abweichung [%]	18,23	50,91	18,86
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	154,46	114,21	19,63
	neg. Abweichung [%]	-12,65	-28,90	-12,54
	pos. Abweichung [%]	16,90	48,50	16,92
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	193,66	134,66	29,76
	neg. Abweichung [%]	-10,55	-24,56	-10,66
	pos. Abweichung [%]	14,20	40,98	12,74
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	285,40	162,94	51,10
	neg. Abweichung [%]	-7,75	-20,80	-8,26
	pos. Abweichung [%]	10,00	34,07	10,66
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	180,32	135,96	43,17
	neg. Abweichung [%]	-10,81	-24,21	-6,84
	pos. Abweichung [%]	14,33	40,40	8,51
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	253,59	131,04	40,32
	neg. Abweichung [%]	-8,37	-25,47	-8,94
	pos. Abweichung [%]	10,74	42,27	11,39
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	172,49	124,36	23,69
	neg. Abweichung [%]	-11,52	-26,58	-12,32
	pos. Abweichung [%]	15,09	44,15	15,48
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	182,17	118,51	24,86
	neg. Abweichung [%]	-10,93	-27,90	-9,96
	pos. Abweichung [%]	14,54	46,56	13,70

Tabelle B.3: Übersicht über die Daten der Fallstudie 4 für Besetzung 1

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	201,94	147,40	37,54
	neg. Abweichung [%]	-9,83	-22,13	-8,18
	pos. Abweichung [%]	13,26	37,31	10,20
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	142,06	108,55	16,82
	neg. Abweichung [%]	-13,57	-29,73	-13,29
	pos. Abweichung [%]	18,73	50,72	19,16
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	65,62	90,24	14,52
	neg. Abweichung [%]	-19,56	-36,03	-12,40
	pos. Abweichung [%]	28,67	60,46	14,16
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	223,63	117,97	32,98
	neg. Abweichung [%]	-9,24	-28,21	-9,90
	pos. Abweichung [%]	12,16	46,83	12,53
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	304,49	193,33	58,83
	neg. Abweichung [%]	-7,77	-16,88	-9,12
	pos. Abweichung [%]	10,30	28,49	9,69
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	72,18	84,78	11,26
	neg. Abweichung [%]	-20,26	-38,60	-11,98
	pos. Abweichung [%]	28,92	65,39	13,95
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	247,95	234,02	78,99
	neg. Abweichung [%]	-8,62	-14,36	-8,38
	pos. Abweichung [%]	11,66	23,63	8,65
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	137,34	105,73	21,98
	neg. Abweichung [%]	-13,87	-30,49	-10,08
	pos. Abweichung [%]	18,98	51,85	14,41
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	180,32	135,96	43,17
	neg. Abweichung [%]	-10,78	-23,76	-6,81
	pos. Abweichung [%]	14,65	40,28	8,72

Tabelle B.4: Übersicht über die Daten der Fallstudie 5 für Besetzung 1

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	157,28	153,88	40,85
	neg. Abweichung [%]	-11,33	-21,33	-7,72
	pos. Abweichung [%]	15,64	35,63	9,48
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	161,43	115,88	26,43
	neg. Abweichung [%]	-11,85	-28,22	-8,91
	pos. Abweichung [%]	15,87	48,04	12,99
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	290,55	143,21	48,11
	neg. Abweichung [%]	-7,48	-22,91	-8,51
	pos. Abweichung [%]	9,42	38,71	10,35
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	58,04	92,85	9,04
	neg. Abweichung [%]	-24,49	-35,13	-17,92
	pos. Abweichung [%]	35,06	60,61	32,96
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	108,25	164,57	44,58
	neg. Abweichung [%]	-13,51	-20,10	-10,79
	pos. Abweichung [%]	19,01	34,63	11,30
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	182,17	118,51	24,86
	neg. Abweichung [%]	-10,73	-27,49	-9,91
	pos. Abweichung [%]	14,36	47,00	13,77
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	253,59	131,04	40,32
	neg. Abweichung [%]	-8,29	-24,96	-9,02
	pos. Abweichung [%]	10,69	42,29	11,32
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	172,49	124,36	23,69
	neg. Abweichung [%]	-11,41	-26,24	-11,95
	pos. Abweichung [%]	15,08	44,92	15,25
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	139,53	107,40	16,25
	neg. Abweichung [%]	-13,69	-30,33	-13,34
	pos. Abweichung [%]	18,47	51,94	19,27

Tabelle B.5: Übersicht über die Daten der Fallstudie 6 für Besetzung 1

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	157,90	123,80	24,38
	neg. Abweichung [%]	-12,35	-26,33	-9,99
	pos. Abweichung [%]	17,28	44,25	13,86
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	108,76	96,66	14,77
	neg. Abweichung [%]	-17,48	-33,84	-13,20
	pos. Abweichung [%]	24,22	57,04	21,64
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	114,48	95,97	10,59
	neg. Abweichung [%]	-16,79	-33,91	-16,73
	pos. Abweichung [%]	23,45	57,08	29,01
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	193,66	134,66	29,76
	neg. Abweichung [%]	-10,60	-24,30	-10,66
	pos. Abweichung [%]	14,53	40,94	12,83
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	200,82	128,37	53,97
	neg. Abweichung [%]	-9,67	-25,93	-6,93
	pos. Abweichung [%]	13,22	43,70	7,62
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	201,27	135,58	30,21
	neg. Abweichung [%]	-10,04	-24,21	-11,47
	pos. Abweichung [%]	13,56	40,73	13,25
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	395,80	197,08	61,05
	neg. Abweichung [%]	-6,44	-16,95	-10,68
	pos. Abweichung [%]	8,09	28,30	10,80
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	61,12	97,24	11,22
	neg. Abweichung [%]	-22,83	-33,41	-15,81
	pos. Abweichung [%]	33,38	57,25	26,40
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	179,16	137,13	35,51
	neg. Abweichung [%]	-10,89	-23,97	-7,84
	pos. Abweichung [%]	14,81	40,12	10,09

Tabelle B.6: Übersicht über die Daten der Fallstudie 1 für Besetzung 2

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	78,95	123,80	24,38
	neg. Abweichung [%]	-12,09	-26,48	-10,02
	pos. Abweichung [%]	17,26	44,74	13,72
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	54,38	96,66	14,77
	neg. Abweichung [%]	-17,17	-34,12	-13,06
	pos. Abweichung [%]	24,24	57,31	21,42
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	57,24	95,97	10,59
	neg. Abweichung [%]	-16,54	-34,24	-16,21
	pos. Abweichung [%]	23,71	57,43	28,46
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	96,83	134,66	29,76
	neg. Abweichung [%]	-10,39	-24,49	-10,49
	pos. Abweichung [%]	14,75	41,06	12,86
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	100,41	128,37	53,97
	neg. Abweichung [%]	-9,79	-25,66	-7,02
	pos. Abweichung [%]	13,35	42,50	7,71
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	100,64	135,58	30,21
	neg. Abweichung [%]	-9,85	-24,31	-11,30
	pos. Abweichung [%]	13,68	40,71	13,37
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	197,90	197,08	61,05
	neg. Abweichung [%]	-6,28	-17,11	-10,62
	pos. Abweichung [%]	8,08	28,25	10,88
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	30,56	97,24	11,22
	neg. Abweichung [%]	-22,83	-33,53	-16,16
	pos. Abweichung [%]	32,99	56,09	26,32
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	89,58	137,13	35,51
	neg. Abweichung [%]	-10,75	-24,00	-7,86
	pos. Abweichung [%]	14,78	40,86	10,12

Tabelle B.7: Übersicht über die Daten der Fallstudie 2 für Besetzung 2

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	78,64	153,88	40,85
	neg. Abweichung [%]	-11,31	-21,37	-7,53
	pos. Abweichung [%]	15,74	35,82	9,76
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	80,72	115,88	26,43
	neg. Abweichung [%]	-12,01	-28,48	-9,05
	pos. Abweichung [%]	16,64	48,62	13,23
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	145,28	143,21	48,11
	neg. Abweichung [%]	-7,50	-23,27	-8,89
	pos. Abweichung [%]	9,71	39,82	10,28
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	29,02	92,85	9,04
	neg. Abweichung [%]	-24,18	-24,49	-18,08
	pos. Abweichung [%]	34,01	59,68	32,65
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	54,13	164,57	44,58
	neg. Abweichung [%]	-13,43	-20,15	-10,83
	pos. Abweichung [%]	18,77	33,61	11,48
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	91,09	118,51	24,86
	neg. Abweichung [%]	-10,96	-27,63	-10,02
	pos. Abweichung [%]	14,84	47,67	14,13
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	126,80	131,04	40,32
	neg. Abweichung [%]	-8,47	-25,36	-9,34
	pos. Abweichung [%]	11,22	43,39	11,44
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	86,24	124,36	23,69
	neg. Abweichung [%]	-11,58	-26,51	-12,14
	pos. Abweichung [%]	15,65	45,37	15,35
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	69,77	107,40	16,25
	neg. Abweichung [%]	-13,99	-30,56	-13,72
	pos. Abweichung [%]	18,97	52,44	19,90

Tabelle B.8: Übersicht über die Daten der Fallstudie 3 für Besetzung 2

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	100,97	147,40	37,54
	neg. Abweichung [%]	-9,84	-22,29	-8,08
	pos. Abweichung [%]	13,31	37,70	9,92
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	71,03	108,55	16,82
	neg. Abweichung [%]	-13,62	-30,01	-13,27
	pos. Abweichung [%]	18,60	51,27	19,07
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	32,81	90,24	14,52
	neg. Abweichung [%]	-19,34	-36,27	-11,99
	pos. Abweichung [%]	27,66	59,34	14,56
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	111,81	117,97	32,98
	neg. Abweichung [%]	-9,27	-24,49	-10,04
	pos. Abweichung [%]	12,14	47,39	12,67
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	152,24	193,33	58,83
	neg. Abweichung [%]	-7,75	-17,30	-9,07
	pos. Abweichung [%]	10,33	28,82	9,51
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	36,09	84,78	11,26
	neg. Abweichung [%]	-20,19	-38,01	-11,77
	pos. Abweichung [%]	29,16	63,80	13,95
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	123,97	234,02	78,99
	neg. Abweichung [%]	-8,57	-14,44	-8,51
	pos. Abweichung [%]	11,80	23,68	8,74
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	68,67	105,73	21,98
	neg. Abweichung [%]	-13,85	-30,83	-9,95
	pos. Abweichung [%]	19,16	52,84	14,83
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	90,16	135,96	43,17
	neg. Abweichung [%]	-10,76	-24,06	-6,72
	pos. Abweichung [%]	14,61	41,11	8,73

Tabelle B.9: Übersicht über die Daten der Fallstudie 4 für Besetzung 2

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	100,97	147,40	37,54
	neg. Abweichung [%]	-9,72	-22,75	-8,02
	pos. Abweichung [%]	13,40	37,66	10,06
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	71,03	108,55	16,82
	neg. Abweichung [%]	-13,50	-30,61	-13,14
	pos. Abweichung [%]	18,74	51,28	19,60
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	77,23	114,21	19,63
	neg. Abweichung [%]	-12,50	-29,10	-12,50
	pos. Abweichung [%]	17,28	48,74	17,41
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	96,83	134,66	29,76
	neg. Abweichung [%]	-10,57	-24,49	-10,61
	pos. Abweichung [%]	14,53	41,52	12,93
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	142,70	162,94	51,10
	neg. Abweichung [%]	-7,62	-21,03	-8,48
	pos. Abweichung [%]	10,20	34,41	10,78
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	90,16	135,96	43,17
	neg. Abweichung [%]	-10,69	-24,25	-6,83
	pos. Abweichung [%]	14,62	41,06	8,80
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	126,80	131,04	40,32
	neg. Abweichung [%]	-8,29	-25,82	-9,31
	pos. Abweichung [%]	11,00	42,12	11,48
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	86,24	124,36	23,69
	neg. Abweichung [%]	-11,41	-26,70	-12,11
	pos. Abweichung [%]	15,67	44,97	15,66
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	91,09	118,51	24,86
	neg. Abweichung [%]	-10,86	-28,23	-10,09
	pos. Abweichung [%]	14,74	46,72	14,10

Tabelle B.10: Übersicht über die Daten der Fallstudie 5 für Besetzung 2

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	65,49	105,39	18,19
	neg. Abweichung [%]	-14,56	-31,02	-11,15
	pos. Abweichung [%]	20,21	52,08	18,51
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	71,29	98,52	17,86
	neg. Abweichung [%]	-13,23	-33,22	-13,87
	pos. Abweichung [%]	18,17	57,11	21,47
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	77,23	114,21	19,63
	neg. Abweichung [%]	-12,61	-28,41	-12,47
	pos. Abweichung [%]	17,38	48,09	17,43
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	96,83	134,66	29,76
	neg. Abweichung [%]	-10,63	-24,49	-10,55
	pos. Abweichung [%]	14,39	41,08	13,03
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	142,70	162,94	51,10
	neg. Abweichung [%]	-7,66	-20,73	-8,43
	pos. Abweichung [%]	10,13	33,97	10,31
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	78,18	118,24	21,57
	neg. Abweichung [%]	-12,40	-27,52	-11,85
	pos. Abweichung [%]	17,02	46,81	16,64
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	126,80	131,04	40,32
	neg. Abweichung [%]	-8,31	-25,30	-9,23
	pos. Abweichung [%]	11,11	42,12	10,98
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	86,24	124,36	23,69
	neg. Abweichung [%]	-11,64	-26,23	-12,06
	pos. Abweichung [%]	15,81	44,40	15,96
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	82,96	123,67	36,10
	neg. Abweichung [%]	-11,90	-26,15	-8,11
	pos. Abweichung [%]	16,22	44,41	9,92

Tabelle B.11: Übersicht über die Daten der Fallstudie 6 für Besetzung 2

		Vorbereitung	Lackierung/ Trocknung	Finish
Auftrag 1	Auftragszeit [min]	78,64	153,88	40,85
	neg. Abweichung [%]	-11,27	-21,45	-7,51
	pos. Abweichung [%]	15,81	35,17	9,51
Auftrag 2	Auftragszeit [min]	80,72	115,88	26,43
	neg. Abweichung [%]	-12,11	-28,19	-8,98
	pos. Abweichung [%]	16,12	47,63	13,11
Auftrag 3	Auftragszeit [min]	145,28	143,21	48,11
	neg. Abweichung [%]	-7,50	-23,31	-8,78
	pos. Abweichung [%]	9,34	38,77	10,26
Auftrag 4	Auftragszeit [min]	29,02	92,85	9,04
	neg. Abweichung [%]	-24,12	-24,49	-18,18
	pos. Abweichung [%]	34,13	60,66	32,55
Auftrag 5	Auftragszeit [min]	54,13	164,57	44,58
	neg. Abweichung [%]	-13,22	-20,20	-10,95
	pos. Abweichung [%]	18,52	34,50	11,49
Auftrag 6	Auftragszeit [min]	91,09	118,51	24,86
	neg. Abweichung [%]	-11,05	-27,91	-10,01
	pos. Abweichung [%]	14,42	46,98	13,73
Auftrag 7	Auftragszeit [min]	126,80	131,04	40,32
	neg. Abweichung [%]	-8,43	-25,46	-9,29
	pos. Abweichung [%]	10,67	42,48	11,44
Auftrag 8	Auftragszeit [min]	86,24	124,36	23,69
	neg. Abweichung [%]	-11,46	-26,43	-11,98
	pos. Abweichung [%]	15,21	44,35	15,43
Auftrag 9	Auftragszeit [min]	49,62	90,07	7,67
	neg. Abweichung [%]	-19,06	-36,22	-20,15
	pos. Abweichung [%]	25,84	61,46	38,65

